

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PARA PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO
EM FUNDIÇÕES DE MERCADO

RODOLFO FLORENCE TEIXEIRA JUNIOR

TESE DE DOUTORADO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PARA PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO
EM FUNDIÇÕES DE MERCADO

RODOLFO FLORENCE TEIXEIRA JUNIOR

**Tese de Doutorado apresentada
ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Produção da
Universidade Federal de São
Carlos, como parte dos requisitos
para a obtenção do título de
Doutor em Engenharia de
Produção.**

ORIENTADOR: Prof. Dr. FLÁVIO CÉSAR FARIA FERNANDES

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. NÉOCLES ALVES PEREIRA

SÃO CARLOS

2005

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária/UFSCar**

T266sa

Teixeira Junior, Rodolfo Florence.

Sistema de apoio à decisão para programação da
produção em fundições de mercado / Rodolfo Florence
Teixeira Junior. -- São Carlos : UFSCar, 2005.
373 p.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos,
2005.

1. Programação da Produção. 2. Sistemas de suporte à
decisão. 3. Fundições de mercado. I. Título.

CDD: 658.53 (20^a)

A meu avô, Guido Assugeni (*In Memorium*),
por ter despertado em mim o
espírito de pesquisador.

AGRADECIMENTOS

À minha família por tudo.

Ao Prof. Dr. Flávio César Faria Fernandes pelo ensinamento, apoio, esforço, paciência e exemplo.

Ao Prof. Dr. Néocles Alves Pereira pelo imprescindível apoio, contribuição e dedicação a este trabalho.

Aos colegas do PLACOP por se fazer presente, prestativo, crítico e, também, pela saudosa convivência.

Aos demais professores, funcionários e colegas do Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos, pelo apoio, ensinamentos, companheirismo e agradável convivência.

À Engemasa pela contribuição, abertura e receptividade.

A todos os demais que de alguma forma contribuíram para que este projeto pudesse ser realizado.

A Deus, pela oportunidade.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1: Fonte “33° Census of World Casting Production – 1998” (Fonte: MCAR, 2000)	61
FIGURA 3.2: Visão geral do processo de produção em uma fundição de mercado	77
FIGURA 4.1: Visão geral do planejamento e controle da produção e do sistema de controle da produção	91
FIGURA 5.1: Modelo de categorias decisórias de Gorry & Morton. (Fonte: ADAM, FAHY e MURPHY (1998)).....	113
FIGURA 5.2: Classificação das abordagens aproximativas (Fonte: GOLDBARG & LUNA (2000), p. 245))	123
Figura 5.3: Esquema de busca do método “ <i>beam search</i> ”	150
FIGURA 5.4: Esquemas hipotéticos de operadores de “ <i>crossover</i> ” e “mutação”	152
FIGURA 6.1: Concepção sistêmica do controle da produção (Baseado em Burbidge (1996, p. 43)).....	163
FIGURA 6.2: Sistema de controle da produção PBC aplicado a um ambiente produtivo típico das fundições de mercado	164
FIGURA 6.3: Detalhe da árvore de busca como proposta.....	192
FIGURA 6.4: Estruturação de um problema hipotético na árvore de busca como proposto.....	192
FIGURA 6.5: Esquema de representação de um indivíduo	207
FIGURA 6.6: Inter-relacionamento entre os cromossomos de um indivíduo hipotético	207
FIGURA 6.7: Esquema de funcionamento do operador genético de “ <i>crossover</i> ” para o “cromossomo 1”.....	210
FIGURA 6.8: Esquema de funcionamento do operador genético de “ <i>crossover</i> ” para o “cromossomo 2”.....	212
FIGURA 6.9: Sistema de apoio à decisão proposto.....	224
FIGURA 6.10: Interface principal do SAD proposto	225
FIGURA A6.11: Exemplo de interface típica de configuração do ambiente produtivo	226
FIGURA 6.12: Estrutura do “menu” “Programação Produção”.....	226

FIGURA 6.13: Interface de seleção dos itens de pedidos a programar	227
FIGURA A6.14: Interface de análise e alteração das corridas de fornos programadas	228
FIGURA 6.15: Interface de consulta do consumo das capacidades das operações produtivas.....	229
FIGURA 6.16: Excluindo itens de pedido de uma corrida de forno programada.....	230
FIGURA 6.17: Esquema do arquivo texto do componente “banco de dados”	231
FIGURA 7.1: Número de itens de pedidos diferentes em cada caso experimental de cada cenário	236
FIGURA 7.2: Relação entre a capacidade necessária e a capacidade disponível das corridas de fornos em cada caso experimental.....	237
FIGURA 7.3: Relação entre a capacidade necessária e a capacidade disponível das operações produtivas cambiáveis em cada caso experimental.....	238
FIGURA 7.4: Relação entre a capacidade necessária das operações produtivas e o peso bruto dos itens de pedidos a programar.....	239
FIGURA 7.5: Concentração dos itens de pedidos em relação às principais ligas metálicas.....	240
FIGURA 7.6: Concentração dos pedidos em relação às ligas metálicas menos comuns	241
FIGURA 7.7: Tempo de execução do método de solução para a primeira solução factível para os modelos <i>PLIRX</i> e <i>PLIRT1</i>	244
FIGURA 7.8: Diferença entre a primeira solução factível e a estimativa da solução ótima do método de solução para os modelos <i>PLIRX</i> e <i>PLIRT1</i>	245
FIGURA 7.9: Análise de convergência do método de solução para os modelos <i>PLIRX</i> e <i>PLIRT1</i> para os casos experimentais nos quais as soluções iniciais apresentaram mais que 10% de diferença da solução ótima estimada	246
FIGURA 7.10: Tempo de execução do método de solução para a primeira solução factível para os modelos <i>PLIA</i> e <i>PLIRT2</i>	247
FIGURA 7.11: Diferença entre a primeira solução factível e a estimativa da solução ótima do método de solução para os modelos <i>PLIA</i> e <i>PLIRT2</i>	248
FIGURA 7.12: Análise de convergência do método de solução para o modelo <i>PLIA</i> para os casos experimentais nos quais as soluções iniciais apresentaram mais que 10% de diferença da solução ótima estimada.....	249

FIGURA 7.13: Tempo de execução (seg.) do método de solução para o modelo <i>HE</i> considerando os diâmetros de busca 1, 3 e 10	250
FIGURA 7.14: Tempo médio de execução (seg.) do método de solução para o modelo <i>HE</i> considerando os diâmetros de busca 1, 3 e 10	251
FIGURA 7.15: Tempo de execução (seg.) do método de solução para o modelo <i>AG</i> ..	253
FIGURA 7.16: Proporção entre o peso programado e a capacidade média disponível das corridas de fornos.....	254
FIGURA 7.17: Relação média entre o peso programado e a capacidade média disponível das corridas de fornos.....	255
FIGURA 7.18: Relação entre a capacidade programada e a capacidade disponível das operações cambiáveis.....	256
FIGURA 7.19: Relação média entre a capacidade programada e a capacidade disponível das operações cambiáveis	257
FIGURA 7.20: Diferença entre a solução apresentada pelo método de solução e a estimativa da solução ótima para o modelo <i>PLIRX</i> após 14.400 segundos de execução.....	258
FIGURA 7.21: Performance dos métodos de solução para os casos dos cenários “BMMM”, “MMMA”, “AAMA” e “AAMM” em (%) do limite superior	259
FIGURA 7.22: Performance dos métodos de solução para os casos dos cenários “BBBB”, “MBBA”, “MAAB” e “BMAA” em (%) do limite superior	260
FIGURA 7.23: Comparação entre as performances, em porcentagem do limite superior, obtidas pelo método de solução para o modelo <i>PLIRT2</i> com tempos de execução de 360 e 3600 seg.....	261
FIGURA 7.24: Comparação entre as performances, em porcentagem do limite superior, obtidas pelo método de solução para o modelo <i>HE</i> com diâmetros de solução de 1, 3 e 10.....	263
FIGURA 7.25: Performance média dos métodos de solução, em porcentagem do limite superior, para os casos com baixos níveis de itens de pedidos diferentes a programar	264
FIGURA 7.26: Performance média dos métodos de solução, em porcentagem do limite superior, para os casos com níveis médios de itens de pedidos diferentes a programar	265

FIGURA 7.27: Performance média dos métodos de solução, em porcentagem do limite superior, para os casos com níveis altos de itens de pedidos diferentes a programar	266
FIGURA 7.28: Performance média dos métodos de solução, em porcentagem do limite superior, para os casos com níveis altos de itens de pedidos diferentes a programar	267
FIGURA 7.29: Performance média geral dos métodos de solução, em porcentagem do limite superior	268
FIGURA 7.30: Desvio-padrão dos métodos de solução para cada cenário experimental	270
FIGURA 9.1: Performance média geral dos métodos de solução para os modelos propostos expressa em porcentagem alcançada do limite superior.....	288
FIGURA 9.2: Desvio-padrão dos métodos de solução para os modelos propostos.....	289
FIGURA A2.1: Esquema de geração dos casos experimentais para cada cenário	321
FIGURA A4.1: Processo de convergência do <i>AG</i> através das gerações populacionais para o caso 2 do cenário experimental “AAMA”	339
FIGURA A4.2: Processo de convergência do <i>AG</i> através das gerações populacionais para o caso 2 do cenário experimental “BBBB”	340
FIGURA A6.1: Abrindo uma programação de ciclo	355
FIGURA A6.2: Caixa de diálogo para abrir uma programação de ciclo	356
FIGURA A6.3: Conferindo as configurações de produção	356
FIGURA A6.4: A caixa de configuração dos fornos disponíveis.....	357
FIGURA A6.5: Conferindo os itens de pedidos à programar	357
FIGURA A6.6: Selecionando os itens de pedido à programar	358
FIGURA A6.7: Definindo as Configurações de execução	359
FIGURA A6.8: Escolha do modelo decisório e dos parâmetros de solução	359
FIGURA A6.9: Executando a programação da produção.....	360
FIGURA A6.10: Consultando e alterando a programação da produção gerada	361
FIGURA A6.11: Visualizando as corridas de fornos.....	362
FIGURA A6.12: Consultando o consumo das capacidades das operações produtivas	363
FIGURA A6.13: Excluindo itens de pedido de uma corrida de forno programada.....	364

FIGURA A6.14: Analisando o resultado da exclusão de itens de pedido de uma corrida de forno programada	365
FIGURA A6.15: Inserindo itens de pedido a uma corrida de forno programada	366
FIGURA A6.16: Analisando o resultado da inserção de itens de pedido de uma corrida de forno programada	367
FIGURA A6.17: Analisando o consumo das operações produtivas após a inserção de itens de pedido em uma corrida de forno programada.....	368
FIGURA A6.18: Desmarcando alguns itens que não se deseja considerar no processo de elaboração da programação da produção	369

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1: Análise das características da questão de pesquisa 1	53
TABELA 2.2: Análise das características da questão de pesquisa 2	55
TABELA 2.3: Análise das características da questão principal de pesquisa.....	57
TABELA 3.1: “Evolução das exportações em fundidos (em U\$ mil) (Fonte: BNDES (1996)).....	62
TABELA 3.2: Faixa de número de trabalhadores das empresas (Fonte: FERNANDES & LEITE (2002)).....	69
TABELA 3.3: Faixa de faturamento das empresas (Fonte: FERNANDES & LEITE (2002)).....	69
TABELA 3.4: Tamanho médio de lote das empresas (Fonte: FERNANDES & LEITE (2002)).....	69
TABELA 3.5: Principais problemas e necessidades relativos à produção (Fonte: FERNANDES & LEITE (2002)).....	70
TABELA 3.6: Valores médios para a importância e força dos fatores de competitividade (Fonte: FERNANDES & LEITE (2002))	71
TABELA 3.7: Medidas de acompanhamento do desempenho apontado pelas empresas (Fonte: FERNANDES & LEITE (2002))	72
TABELA 3.8: Projetos de Melhoria apontados pelas empresas (Fonte: FERNANDES & LEITE (2002)).....	73
TABELA 3.9: Projetos de Melhoria apontados pelas empresas (Fonte: FERNANDES & LEITE (2002)).....	74
TABELA 7.1: Resumo das características principais dos cenários experimentais.....	235
TABELA 8.1: Visão geral das características produtivas das indústrias pesquisadas..	274
TABELA 8.2: Restrições atualmente consideradas para a elaboração da programação da produção.....	277
TABELA 8.3: Objetivos atualmente considerados para a elaboração da programação da produção.....	278
TABELA 8.4: Grau de prioridade para cada melhoria desejada decorrente de um processo mais elaborado de programação da produção	279
TABELA A1.1: Tabela solução do método heurístico geral de solução proposto	307

TABELA A2.1: Descrição das operações de produção consideradas nos casos experimentais	313
TABELA A2.2: Retorno bruto por peso de liga metálica.....	314
TABELA A2.3: Restrições para ordenamento das ligas metálicas nas corridas de fornos	315
TABELA A2.4: Economia possível com o ordenamento das ligas metálicas nas corridas de fornos.....	316
TABELA A2.5: Características dos fornos dos reatores um e dois.....	316
TABELA A2.6: Distribuições estatísticas das capacidades agregadas das operações produtivas para todos os cenários	318
TABELA A2.7: Distribuição estatística de chegadas de pedidos por dia.....	318
TABELA A2.8: Distribuição estatística do número de itens de pedidos diferentes para cada pedido	319
TABELA A2.9: Distribuição estatística do prazo de entrega para cada item de pedido	319
TABELA A2.10: Distribuições estatísticas dos detalhes de cada modelo para cada item de pedido	319
TABELA A2.11: Distribuições estatísticas do consumo das capacidades produtivas para cada item de pedido.....	320
TABELA A2.12: Informações resumidas sobre os casos experimentais	323
TABELA A2.13: Distribuição dos itens de pedidos através dos tipos de ligas disponíveis	324
TABELA A3.1: Resumo dos resultados apresentados pelos métodos de solução para os casos experimentais tratados.....	325
TABELA A4.1: Análise de variância ANOVA de fator duplo, para os parâmetros de “crossover” e “mutação”, para 30 replicações do AG proposto para o caso experimental 2 do cenário “AAMA”	333
TABELA A4.2: Análise de variância ANOVA de fator duplo, para os parâmetros de “crossover” e “mutação”, para 30 replicações do AG proposto para o caso experimental 2 do cenário “BBBB”	334

TABELA A4.3: Análise de variância ANOVA de fator único, para os parâmetros populacionais analisados, para 30 replicações do AG proposto para o caso experimental 2 do cenário “AAMA”	336
TABELA A4.4: Análise de variância ANOVA de fator único, para os parâmetros populacionais analisados, para 30 replicações do AG proposto para o caso experimental 2 do cenário “BBBB”	336
TABELA A4.5: Análise de variância ANOVA de fator único dos tempos de solução, para os parâmetros populacionais analisados, para 30 replicações do AG proposto para o caso experimental 2 do cenário “AAMA”	337
TABELA A4.6: Análise de variância ANOVA de fator único dos tempos de solução, para os parâmetros populacionais analisados, para 30 replicações do AG proposto para o caso experimental 2 do cenário “BBBB”	338
TABELA A4.7: Análise de variância ANOVA de fator único para os parâmetros de pressão de seleção analisados, para 30 replicações do <i>AG</i> proposto para o caso experimental 2 do cenário “AAMA”	341
TABELA A4.8: Análise de variância ANOVA de fator único para os parâmetros de pressão de seleção analisados, para 30 replicações do <i>AG</i> proposto para o caso experimental 2 do cenário “BBBB”	342
TABELA A4.9: Análise de variância ANOVA de fator único para análise da estratégia de elitismo, para 30 replicações do <i>AG</i> proposto para o caso experimental 2 do cenário “AAMA”	343
TABELA A4.10: Análise de variância ANOVA de fator único para análise da estratégia de elitismo, para 30 replicações do <i>AG</i> proposto para o caso experimental 2 do cenário “BBBB”	343
TABELA A4.11: Análise de variância ANOVA de fator único para análise da estratégia de hibridização, para 30 replicações do <i>AG</i> proposto para o caso experimental 2 do cenário “AAMA”	345
TABELA A4.12: Análise de variância ANOVA de fator único para análise da estratégia de hibridização, para 30 replicações do <i>AG</i> proposto para o caso experimental 2 do cenário “BBBB”	345

TABELA A4.13: Análise de variância ANOVA de fator único para análise dos tempos de solução da estratégia de hibridização, para 30 replicações do <i>AG</i> proposto para o caso experimental 2 do cenário “AAMA”	346
TABELA A4.14: Análise de variância ANOVA de fator único para análise dos tempos de solução da estratégia de hibridização, para 30 replicações do <i>AG</i> proposto para o caso experimental 2 do cenário “BBBB”	347

LISTA DE SIGLAS, SIMBOLOS E ABREVIATURAS

ABIFA	Associação brasileira de fundições
AG	Algoritmo Genético
ERP	Sistema de informação Gerencial ou “ <i>Enterprise Resource Planning</i> ”
JIT	“ <i>Just-in-time</i> ”
MME	Ministério de minas e energia
MRP	Sistema de planejamento das necessidades de materiais
MRP II	Sistema de planejamento dos recursos produtivos
OF	Ordem de fabricação
OPT	Sistema de planejamento e controle da produção baseado na teoria da produção otimizada
PBC	Sistema de planejamento e controle da produção de ciclo único baseado em lotes periódicos conhecido como “ <i>Period Bach Control</i> ”
PCP	Planejamento e controle da produção
SAD	Sistema de apoio à decisão

SUMÁRIO

RESUMO	19
ABSTRACT	20
1 INTRODUÇÃO	23
1.1 Origem Do Trabalho.....	23
1.2 Estrutura Do Trabalho.....	27
2 METODOLOGIA CIENTÍFICA	30
2.1 Introdução.....	30
2.2 Metodologia Científica Em Trabalhos De Engenharia De Produção	30
2.3 Breve Visão Sobre A Atividade Científica.....	32
2.4 Trabalho Científico	34
2.5 Métodos Científicos.....	36
2.6 Abordagens De Pesquisa	39
2.7 Procedimentos De Pesquisa.....	43
2.7.1 Teórico-conceitual.....	43
2.7.2 Pesquisa experimental	43
2.7.3 Pesquisa de avaliação.....	44
2.7.4 Estudo de caso	44
2.7.5 Pesquisa ação	45
2.8 O Projeto De Pesquisa	46
2.8.1 Definição do problema de pesquisa	47
2.8.2 Definição do objetivo geral e objetivos específicos.....	48
2.8.3 Definição do objeto de estudo	49
2.8.4 Definição das questões de pesquisa.....	49
2.8.5 Definição das hipóteses	50
2.8.6 Estratégia para abordar a primeira questão de pesquisa	51
2.8.7 Estratégia para abordar a segunda questão de pesquisa	54

2.8.8 Estratégia para abordar a terceira questão de pesquisa	56
2.8.9 Estratégia para abordar a questão principal de pesquisa	56
2.9 Conclusão	58
3 FUNDIÇÕES DE MERCADO	59
3.1 Introdução.....	59
3.2 Panorama Mundial Do Setor De Fundições	60
3.3 Situação Corrente Do Setor De Fundições.....	63
3.4 Avaliação Das Fundições De Mercado Do Interior Do Estado De São Paulo ..	68
3.5 O controle Da Produção De Uma Fundação De Mercado	75
3.5.1 Processo de vendas	77
3.5.2 Busca dos modelos e preparação dos projetos de fundição.....	78
3.5.3 Moldagem final - Fechamento	80
3.5.4 Vazamento	81
3.5.5 Desmoldagem.....	81
3.5.6 Corte.....	82
3.5.7 Lixamento	82
3.5.8 Tratamento térmico	83
3.5.9 Controle de qualidade.....	83
3.5.10 Acabamento final	84
3.5.11 Restrições e informações existentes no processo produtivo	84
3.5.11.1 Restrições e informações relativas à pré-moldagem.....	84
3.5.11.2 Restrições e informações relativas à moldagem final e fechamento.....	85
3.5.11.3 Restrições e informações relativos ao vazamento	85
3.5.11.4 Restrições e informações relativos ao tratamento térmico	86
3.5.12 Problemas existentes no processo produtivo	86
3.5.12.1 Problemas relativos ao departamento de vendas	86
3.5.12.2 Problemas relativos à movimentação	87
3.5.12.3 Problemas relativos ao departamento de PCP	87
3.5.12.4 Problemas relativos aos estoques entre processos	87
3.5.12.5 Problemas relativos à qualidade da moldagem.....	88

3.5.13 Considerações finais sobre a empresa analisada.....	88
3.6 Conclusão.....	88
4 CONTROLE DA PRODUÇÃO.....	90
4.1 Introdução.....	90
4.2 Contextualização Das Principais Atividades Envolvidas Com O Controle Da Produção.....	90
4.3 – Visão geral de alguns “<i>Ordering Systems</i>”.....	93
4.4 Análise Dos Fatores Que Podem Adicionar Complexidade À Operacionalização da Produção.....	97
4.5 Análise De Aplicabilidade Do Sistema <i>PBC</i> Em Funções De Mercado.....	101
4.6 Conclusão.....	104
5 TEORIA DA DECISÃO E SISTEMAS DE APOIO À DECISÃO.....	106
5.1 Introdução.....	106
5.2 Teoria Da Decisão.....	107
5.3 – Os Tomadores De Decisões No Controle Da Produção.....	108
5.4 Sistematização E Operacionalização Do Processo Decisório No Controle Da Produção.....	109
5.4.1 A etapa de inteligência.....	114
5.4.2 A etapa de projeto e análise.....	115
5.4.2.1 <i>Classificação de modelos</i>.....	118
5.4.2.1.1 <i>Modelos de previsão</i>.....	119
5.4.2.1.2 <i>Modelos de simulação</i>.....	120
5.4.2.1.3 <i>Modelos de otimização e métodos aproximativos</i>.....	121
5.4.2.1.4 <i>Modelos multi-critério</i>.....	125
5.4.2.1.5 <i>Modelos baseados em conhecimento</i>.....	125
5.4.2.1.6 <i>Modelos analíticos de dados</i>.....	128
5.4.2.2 <i>Análises com modelos</i>.....	129
5.4.3 A etapa de escolha.....	130

5.5	Sistemas De Apoio À Decisão	130
5.5.1	Componentes de um sistema de apoio à decisão	133
5.5.2	Características, desenvolvimento e tendências para os sistema de apoio à decisão	134
5.6	Revisão Das Aplicações Existentes De SAD Para Controle Da Produção	137
5.7	Escolha E Revisão Dos Tipos De Modelos Decisórios Para O Sistema De Apoio À Decisão Para Programação Da Produção Em Fundições De Mercado.....	145
5.7.1	Modelos de programação matemática	146
5.7.2	Modelos baseados em métodos aproximativos clássicos.....	147
5.7.3	Modelos baseados em algoritmos genéticos	150
5.8	Conclusão	159
6	– PROPOSTA DO SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PARA PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO EM FUNDIÇÕES DE MERCADO	162
6.1	Introdução.....	162
6.2	Visão Geral Do Sistema Proposto.....	162
6.3	Proposta Dos Modelos Decisórios Para Elaboração Da Programação Da Produção Em Fundições De Mercado	165
6.3.1	Modelo de programação matemática	168
6.3.1.1	<i>Modelo de programação matemática não-linear inteira</i>	<i>168</i>
6.3.1.2	<i>Modelo de programação matemática linear inteira - PLI.....</i>	<i>173</i>
6.3.1.3	<i>Modelo relaxado de programação matemática linear inteira - PLIRX.....</i>	<i>177</i>
6.3.1.4	<i>Modelo restrito de programação matemática linear inteira - PLIRT</i>	<i>183</i>
6.3.1.5	<i>Modelo alternativo de programação matemática linear inteira - PLIA.....</i>	<i>187</i>
6.3.2	Modelo aproximativo clássico - HE	190
6.3.2.1	<i>Método heurístico de solução</i>	<i>194</i>
6.3.2.2	<i>Aplicação do método heurístico de solução para o modelo HE.....</i>	<i>199</i>
6.3.3	Modelo baseado em algoritmos genéticos - AG	206
6.4	O Sistema De Apoio À Decisão Para Programação Da Produção Em Fundições De Mercado Proposto	223
6.4.1	O componente “interface com o usuário”	225

6.4.2 O componente “banco de dados”	230
6.4.3 O componente “tomador de decisões”	232
6.5 Conclusão	232
7 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	234
7.1 Introdução.....	234
7.2 Os Casos Experimentais Analisados	234
7.3 Analise Dos Resultados Apresentados Pelos Modelos Propostos	242
7.3.1 Analise dos tempos de solução para os modelos <i>PLIRX</i> e <i>PLIRT1</i>	243
7.3.2 Analise dos tempos de solução para os modelos <i>PLIA</i> e <i>PLIRT2</i>	247
7.3.3 Analise dos tempos de solução para o modelo <i>HE</i>	250
7.3.4 Analise dos tempos de solução para o modelo <i>AG</i>	252
7.3.5 Analise dos consumos das capacidades dos fornos	254
7.3.6 Analise do consumo das capacidades das operações produtivas	255
7.3.7 Performance isolada dos métodos de solução para os casos analisados.....	257
7.3.8 Avaliação do impacto do tempo de solução na performance apresentada pelo modelo <i>PLIRT2</i>	261
7.3.9 Avaliação do impacto do diâmetro de solução na performance apresentada pelo modelo <i>HE</i>	262
7.3.10 Performance média dos métodos de solução para os casos analisados	263
7.3.11 Performance média geral dos métodos de solução para cada cenário analisado	268
7.4 – Conclusão	270
8 – ANÁLISE DA ADEQUAÇÃO E VIABILIDADE DO SISTEMA PROPOSTO NAS FUNDIÇÕES DE MERCADO DO INTERIOR DO ESTADO DE SÃO PAULO.....	273
8.1 – Introdução.....	273
8.2 – Amostragem E Métodos	273
8.3 – Análise Da Amostra Seleccionada	274
8.4 – Análise Da Adequação E Viabilidade Do Sistema Proposto	281

8.5 – Conclusões.....	282
9 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	284
9.1 Originalidade E Contribuição.....	284
9.2 Principais Conclusões Sobre Os Testes Computacionais	286
9.3 Principais Conclusões Sobre A Adequação Do Sistema Proposto Às Fundições de Mercado	290
9.4 Sugestões Para Trabalhos Futuros.....	291
10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	292
APÊNDICE A1 TABELA SOLUÇÃO APRESENTADA PELO MÉTODO HEURÍSTICO GERAL DE SOLUÇÃO.....	307
APÊNDICE A2 O AMBIENTE PRODUTIVO EXPERIMENTAL.....	313
APÊNDICE A3 DESCRIÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	325
APÊNDICE A4 PARAMETRIZAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO PROPOSTO.....	331
A4.1 Taxa De “Crossover” E “Mutação”	332
A4.2 Número De Indivíduos Em Uma População	335
A4.3 Número De Gerações Populacionais.....	338
A4.4 Pressão De Seleção Para Reprodução	340
A4.5 Sobreposição Populacional.....	342
A4.6 Estratégia De Hibridização	344
APÊNDICE A5 QUESTIONÁRIO APLICADO NO “SURVEY” REALIZADO PARA ANÁLISE DE ADEQUAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO NAS FUNDIÇÕES DE MERCADO DO INTERIOR DO ESTADO DE SÃO PAULO	348
APÊNDICE A6 SIMULAÇÃO DE UMA APLICAÇÃO DO SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PROPOSTO	351

RESUMO

A programação da produção tem por objetivo temporizar o uso dos recursos para realizar as ordens de produção necessárias para atender alguma necessidade produtiva previamente definida. Em decorrência das mudanças dos ambientes produtivos, caracterizadas pelo aumento da competição e diversidade de produtos, tem-se verificado uma complexidade crescente no processo de elaboração da programação da produção em indústrias, principalmente quando se considera ambientes produtivos complexos.

Apesar dos avanços eminentes do corpo de conhecimento disponível, muitos ambientes de produção continuam à margem de soluções aplicáveis na área. Criar alternativas para suprimir esta lacuna, proporcionando meios efetivos para elaborar a programação da produção à luz de um ambiente produtivo carente de soluções nesta área, foram os direcionadores iniciais para este trabalho. A partir destas constatações e tomando por base um “*survey*” inicial, realizado no interior do estado de São Paulo, sobre o ambiente produtivo das fundições que trabalham com produtos personalizados sob encomenda, também conhecidas como fundições de mercado, buscou-se criar alternativas efetivas para o processo de elaboração da programação da produção para este ambiente produtivo complexo.

Este trabalho apresenta uma proposta viável para o processo de elaboração da programação da produção em fundições de mercado, considerando as principais particularidades e restrições de seu ambiente produtivo, por meio de um sistema de apoio à decisão, empregando, como sistema de controle da produção, um sistema de ciclo único conhecido como sistema de período padrão ou sistema *PBC*.

Dentre os resultados alcançados, foi proposto uma metodologia para racionalização e sistematização do processo decisório no controle da produção. Para o processo de elaboração da programação da produção no sistema de apoio à decisão foram propostos modelos decisórios viáveis, quais sejam: um modelo de programação inteira binária, um modelo baseado em métodos aproximativos clássicos, especificamente um método conhecido como “*beam search*”, e um modelo meta-heurístico baseado em algoritmos genéticos. Os resultados obtidos com a aplicação dos modelos decisórios em situações produtivas experimentais análogas à realidade de produção das fundições de mercado confirmaram a viabilidade prática destes modelos proporcionando a comparação dos resultados apresentados entre técnicas de modelagem distintas, contribuindo, também, na criação de direcionadores para outras aplicações de sistemas de apoio à decisão à área operacional de ambientes produtivos complexos. Por fim, a adequação do sistema proposto foi confirmada na realidade do ambiente produtivo do setor industrial pesquisado por meio de um “*survey*” posterior realizado nas principais fundições de mercado do interior de São Paulo.

Palavras-chave: Sistemas de Apoio à Decisão, Programação da Produção, Fundições de mercado.

ABSTRACT

The aim of production scheduling is to time the use of resources to carry out the production orders required to meet a previously defined production need. Due to the changes in the production settings, defined by the increase in competition and diversity of products, there has been increasing complexity in the development of production scheduling process, mainly when complex production settings are considered.

Despite the developments in the area, a significant number of production settings still do not use the applicable solutions in the area. The initial aims of this work were to create alternatives to fill this gap. From these findings and based on an initial survey, carried out in the interior of São Paulo State, regarding the productive settings of foundries which work with customized products made to order, also known as steel casting foundries, effective alternatives for the production scheduling process for this specific production settings were sought.

This work presents a viable proposal for the production scheduling process in steel casting foundries, considering its main particularities and restrictions, using a decision support system, which employs a single cycle system known as Period Batch Control (PBC).

Among the results obtained, a methodology for the rationalization and systematization of the decision-making process in the production control was proposed. For the development of a decision support system in ordering process, the following viable decision-making models were proposed: a model of binary integer programming; a model based on classical approximation methods, specifically the method known as "beam search"; and a meta-heuristic model based on genetic algorithms. The results obtained from the application of decision-making models in experimental production situations similar to the reality of production in steel casting foundries have confirmed the practical viability of these models, providing a comparison of the results between distinct modeling techniques. It has also contributed to the designing of guidelines for other applications of decision support systems in the operational area of complex production settings. Finally, the suitability of the proposed system was confirmed by a later survey carried out in the main steel casting foundries in the interior of São Paulo State.

Keywords: Decision Support Systems, Production Scheduling, Steel Casting Foundries.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Origem Do Trabalho

A programação da produção tem por objetivo temporizar o uso dos recursos para realizar as ordens de produção necessárias para atender alguma necessidade produtiva previamente definida. Em uma indústria, o controle da produção é a função gerencial que regula e controla o fluxo de materiais no sistema produtivo, envolvendo todas as atividades de programar e monitorar a produção no curto prazo.

Em decorrência das mudanças dos ambientes produtivos, caracterizadas pelo aumento da competição e da diversidade de produtos, tem-se verificado uma complexidade crescente para a operacionalização do controle da produção e, conseqüentemente, da programação da produção, em indústrias, que, à revelia da riqueza de soluções disponíveis, permanece sem fornecer soluções viáveis a vários ambientes produtivos específicos.

São comuns os casos de ambientes produtivos nos quais a programação da produção é realizada empiricamente de acordo com a experiência e a conveniência, ou também, onde se pode contar com melhores recursos tecnológicos, métodos padronizados são aplicados indiscriminadamente, sem respeitar as particularidades de cada ambiente produtivo, priorizando a eficiência ante a eficácia e, muitas vezes, forçando estas indústrias a amargarem sérias deficiências para gerir sua produção.

Para melhor delinear estas deficiências é conveniente discorrer rapidamente sobre o ambiente competitivo no qual as indústrias se encontram. Atualmente a tecnologia apresenta um universo de novas possibilidades. A comunicação com clientes, fornecedores e parceiros é instantânea. Processos produtivos podem ser automatizados e operados com perfeição e rapidez. Recursos produtivos modernos podem tirar diversas vantagens da tecnologia disponível, adicionando maior flexibilidade à produção e serviços aos clientes.

Podem-se perceber muitas mudanças nas empresas, mas é justamente fora dos limites industriais onde as maiores mudanças estão acontecendo. Hoje a concorrência é global, o mundo vem diminuindo progressivamente suas fronteiras, os clientes se tornam mais exigentes e clamam por personalização, os prazos, por sua vez,

são continuamente menores e os custos são pressionados constantemente, além da qualidade, que deixou de ser um fator de competitividade, para se tornar um item obrigatório.

Os fatores citados inserem a necessidade de um grande nível de flexibilidade ao sistema produtivo e, conseqüentemente, incerteza e desestruturação, por sua vez, a teoria direcionada à área operacional da produção está principalmente fundamentada em conceitos estruturados, contribuindo com o aumento da lacuna teórica existente. A argumentação deste trabalho se concentra no fato de que muito se faz para tentar estruturar a operacionalização dos ambientes produtivos, no intuito de garantir maior aderência à teoria existente, sendo que, ao contrário, dever-se-ia melhor tentar entender e lidar com a flexibilidade e desestruturação imposta pelo mercado.

Esta busca por flexibilidade implica em uma nova forma de entender a área operacional dos ambientes produtivos existentes. Ao invés de eliminar as incertezas, procurar-se-á introduzi-las convenientemente no ambiente de produção. Parâmetros produtivos que antes deveriam estar disponíveis com antecedência poderão ser desconhecidos e deverão ser estimados convenientemente. Além disso, a cada nova ordem de produção, múltiplos e, até mesmo, inéditos, objetivos deverão ser alcançados, envolvendo desde atingir prazos e metas produtivas, até diminuir custos e agressão ao meio ambiente. Para isto, a criatividade e experiência deverão suprir os parâmetros desconhecidos e as incertezas deverão ser transformadas em riscos calculados e gerenciáveis. Neste contexto, o fator humano será imprescindível e sua interação com o sistema produtivo não mais será mecânica, rotineira e obscura, e sim, inédita, ativa e consciente.

Como seria, neste contexto, a proposta de um sistema dirigido à área operacional da produção? Qual filosofia de produção mais se adequaria? Como as metodologias, técnicas e procedimentos produtivos poderiam ser aplicados? Ao tentar responder a estas perguntas que este trabalho propõe a nova mudança de enfoque. Talvez se esteja querendo modificar filosofias e teorias existentes, visando conseguir maior capacidade de lidar com problemas desestruturados e situações adversas, correndo-se o risco de alterar o cerne da filosofia ou teoria em questão, conseguindo-se talvez apenas adequações direcionadas a situações específicas. Não seria natural responder a este novo ambiente produtivo da forma como se apresenta?

Foi justamente esta constatação que norteou a proposta deste trabalho. Ao se perguntar sobre a área de conhecimento que naturalmente lida com situações desestruturadas, incertas e inéditas, chega-se à área de estudos da tomada de decisões, suas particularidades e nuances. A aplicação destes estudos convenientemente em um sistema produtivo poderá ser realizada racionalizando e sistematizando o processo decisório aplicado à área operacional da produção, por meio de um sistema de apoio à decisão. Nesta proposta, o foco do sistema será também o tomador de decisões e não o ambiente de produção isolado, visando garantir a flexibilidade e aplicabilidade necessária, através da potencialização de suas decisões.

Apesar destes direcionadores, é de se esperar que uma abordagem generalista da área operacional da produção comprometa a concepção e posterior avaliação da proposta deste trabalho. Desta forma, será tomado por base a operacionalização de um ambiente de produção industrial que atenda às características de complexidade tratada por este trabalho, para que os resultados possam ser avaliados e as devidas conclusões possam ser realizadas.

Baseado em experiências anteriores e pesquisas de campo, verificou-se que o setor de fundições que trabalham com produtos personalizados sob-encomenda, também conhecidas como “fundições de mercado”, apresenta uma grande adequação aos fatores considerados. Esta constatação proporcionou a definição da **programação da produção em fundições de mercado** como objeto de estudo deste trabalho, podendo-se delinear, no objeto de estudo, vários problemas existentes na operacionalização da produção de um ambiente produtivo complexo e permitindo, também, definir o objetivo principal deste trabalho, qual seja: **Proporcionar um suporte efetivo à programação da produção em fundições de mercado por meio de um sistema de apoio à decisão para programação da produção.**

A abordagem do objeto de estudo, envolvendo a análise e entendimento de seu ambiente de produção, delineando suas principais restrições e complexidades e, também, do corpo de conhecimento existente em controle da produção e sistemas de apoio à decisão, visando o objetivo definido, forneceram os direcionadores para a proposta deste trabalho. Quanto ao corpo de conhecimento existente em controle da produção, tomou-se por base uma contextualização da área, visando direcionar as escolhas das filosofias e teorias em controle da produção mais aptas à aplicação no

sistema de apoio à decisão proposto. Os direcionadores apontaram também para uma revisão e análise do corpo de conhecimento existente na aplicação de sistemas de apoio a decisões a área operacional de ambientes produtivos, visando criar entendimento e contribuir com a visão deste trabalho.

Dentre as contribuições gerais alcançadas, podem-ser citadas:

- Estudo sobre a aplicação da metodologia científica em trabalhos de engenharia de produção, apontando tendências e alternativas metodológicas, e apresentando direcionadores para se estruturar um trabalho científico na área;
- Contextualização da área de controle da produção e também de ambientes de produção complexos, visando ressaltar as características potencializadoras para a aplicação do corpo de conhecimento existente na área visando à operacionalização efetiva destes ambientes;
- Análise de aplicabilidade do sistema *PBC* visando simplificar a operação de ambientes de produção complexos, com ênfase, especificamente, ao ambiente de produção das fundições de mercado;
- Análise da área de tomada de decisão e sistemas de apoio à decisão, assim como do corpo de conhecimento existente sobre a aplicação de sistemas de apoio à decisão em controle da produção, contribuindo com a proposta de direcionadores para a aplicação de sistemas de apoio à decisão à área operacional da produção;
- Proposta de modelos decisórios viáveis para o processo de elaboração da programação da produção em fundições de mercado, envolvendo técnicas distintas como: programação matemática, sob a forma de um modelo de programação linear inteira binária, métodos aproximativos clássicos, com a proposta de um modelo heurístico baseado em um método conhecido como “*beam search*” e também um modelo meta-heurístico baseado em algoritmos genéticos;
- Análise da performance apresentada, considerando um contexto de aplicação sob a forma de sistemas de apoio à decisão, de técnicas de modelagem distintas, permitindo direcionar a aplicação destas modelagens à área operacional de outros ambientes produtivos complexos.

Apesar das contribuições gerais proporcionadas pela busca do objetivo deste trabalho, pode-se definir como sua principal contribuição a proposta de um

sistema viável de apoio à decisão para programação da produção em fundições de mercado.

1.2 Estrutura Do Trabalho

A seguir é apresentada a estrutura deste trabalho segundo os assuntos tratados em cada capítulo.

Um tratamento científico adequado é crucial em um trabalho de pesquisa, além de que, um elevado rigor metodológico contribui para o desenvolvimento efetivo na área de engenharia de produção e da pesquisa científica nacional como um todo. Visando tratar adequadamente a complexidade do tema, o capítulo dois é reservado para explorar o projeto de pesquisa para este trabalho, culminando com a elaboração das estratégias de pesquisa possíveis, além de discorrer sobre as principais abordagens metodológicas aplicáveis em engenharia de produção e utilizadas em trabalhos nacionais e internacionais da área, criando os direcionadores e justificadores para a construção da estruturação e estratégia metodológica empregada neste trabalho.

O objeto de estudo possibilita que se aplique os desenvolvimentos concebidos visando validá-los, assim como, elaborar conclusões pertinentes. O capítulo três discorre sobre a programação da produção do setor industrial analisado, abordando as principais características, problemas, restrições e necessidades, incluindo uma revisão bibliográfica e uma análise do setor industrial das fundições de mercado. É apresentada, também, uma referência aos resultados obtidos em uma pesquisa sobre fundições de mercado do interior de São Paulo, com o intuito de justificar o setor industrial escolhido. Por fim, um estudo de caso realizado em uma fundição de mercado específica é apresentado, ressaltando em pormenores, os detalhes da programação da produção de uma empresa deste tipo.

A abordagem do corpo de conhecimento disponível em controle da produção permite avaliar o potencial das teorias existentes para aplicação à área operacional da produção sob a forma de um sistema de apoio à decisão. O capítulo quatro tem por objetivo contextualizar o corpo de conhecimento nesta área, além de buscar caracterizar as dificuldades existentes para o controle da produção em ambientes produtivos complexos, visando direcionar a escolha de um sistema de controle da produção mais adequado ao objetivo deste trabalho.

No capítulo cinco é tratado a teoria da decisão e sistemas de apoio à decisão, com o intuito de direcionar a racionalização e sistematização do processo decisório na área operacional da produção, especificamente, no que se refere este trabalho, à programação da produção de ambientes produtivos complexos. Para isto, é realizada uma revisão da teoria existente nesta área, assim como das técnicas, metodologias e soluções disponíveis para se apoiar decisões operacionais. Uma ênfase especial é despendida para o processo de modelagem decisória. É realizada também uma revisão sobre os sistemas de apoio à decisão, envolvendo evolução, principais componentes, características, processo de apoio à tomada de decisões, atualidades e tendências na área, permitindo criar os direcionadores para a devida aplicação destes conceitos para se alcançar os objetivos deste trabalho. Por fim, é realizada uma revisão crítica dos trabalhos existentes sobre a aplicação da teoria da decisão e sistemas de apoio à decisão para controle da produção, fixando um ponto de partida para um novo desenvolvimento que forneça uma contribuição significativa para a área.

No capítulo seis o sistema de apoio à decisão para programação da produção em fundições de mercado é apresentado. Para isto, são propostos os seguintes modelos decisórios: um modelo de programação linear inteira binária, um modelo aproximativo clássico baseado no método conhecido como “*beam search*”, e um modelo heurístico moderno baseado em algoritmos genéticos. São propostos também os métodos de solução para estes modelos e as possíveis formas de sua interação com o usuário por meio do sistema de apoio à decisão.

No capítulo sete, os resultados obtidos por meio de uma exaustiva experimentação usando cenários produtivos criados experimentalmente, tomando por base as principais características observadas nos ambientes produtivos das fundições de mercado, são apresentados e analisados.

A avaliação do sistema proposto quanto à sua adequação ao ambiente produtivo característico das fundições de mercado do interior de São Paulo é realizada no capítulo oito. Para isto, um “*survey*” envolvendo as fundições de mercado mais significativas é empreendido com o objetivo de confirmar a adequação do sistema proposto à realidade deste setor industrial.

No capítulo nove, as conclusões obtidas neste trabalho são apresentadas e recomendações para pesquisas futuras são devidamente sugeridas.

Por fim, as bibliografias tomadas como referência por este trabalho são organizadas no capítulo dez.

2 METODOLOGIA CIENTÍFICA

2.1 Introdução

O estudo das alternativas metodológicas de pesquisa é de significativa relevância para este trabalho, pois se torna perceptível a crescente exigência de rigor metodológico nas pesquisas em Engenharia de Produção (BERTO & NAKANO, 1998). Além de que, uma consideração minuciosa das possibilidades existentes na condução de um trabalho científico nesta área pode ser determinante para seu sucesso e a confiabilidade dos resultados obtidos.

Este esforço, em conjunto com uma ampla revisão da bibliográfica disponível sobre o tema da pesquisa e o envolvimento do pesquisador com o objeto de estudo, permitirá a construção da base teórico-cultural desejada, possibilitando o delineamento dos problemas e lacunas existentes, assim como possíveis relações e soluções, fornecendo subsídios para a construção de questões de pesquisa pertinentes, que nortearão as escolhas metodológicas.

2.2 Metodologia Científica Em Trabalhos De Engenharia De Produção

A consideração sobre alternativas metodológicas a serem utilizadas em pesquisas científicas em Engenharia de Produção, conduzida à luz de levantamentos e reflexões de trabalhos realizados na área, permite avaliar tendências e resultados, assim como criar direcionadores para o desenvolvimento de um projeto metodológico plausível.

Dentre os trabalhos neste tema publicados, pode se citar FILIPPINI (1997), que traçou um perfil da evolução das publicações na área, efetuadas nos anais da conferência do *Decision Science Institute (DSI)* por dez anos (de 1986 a 1996), quanto aos temas e também às técnicas de pesquisas utilizadas, visando apontar perspectivas e classificá-las conforme o tipo de pesquisa utilizado. FERNANDES (1999a), em um trabalho similar, procurou analisar a evolução e tendências das pesquisas em Engenharia de Produção, especialmente no campo de Gestão da Produção, utilizando para isto diversas fontes de trabalhos internacionais e também dados dos anais do Encontro

Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP) de 1987 e 1997. BERTO e NAKANO (1998) (1999) também contribuíram significativamente com o tema, realizando a análise de trabalhos científicos publicados no Departamento de Engenharia de Produção da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e também do ENEGEP. Os autores analisaram a aplicação da metodologia científica na área de Engenharia de Produção no Brasil e as necessidades e caminhos a serem seguidos.

FILIPPINI (1997) classificou as técnicas de pesquisa em Engenharia de Produção, segundo duas dimensões chaves. A primeira trata dos dois extremos possíveis para gerar conhecimento, a técnica indutiva e a dedutiva, com o empirismo em uma posição intermediária. A segunda dimensão se refere aos métodos de construção da realidade utilizado no desenvolvimento das pesquisas, variando de observação direta em um extremo até o subjetivismo no outro extremo. Partindo desta classificação, através da análise das publicações efetuadas nos anais da conferência do DSI, o referido autor conclui que houve uma redução do número de trabalhos em simulação e modelagem, seguido de um crescimento em número dos estudos conceituais e de natureza teórica, principalmente os empíricos, particularmente os baseados em técnicas como “*surveys*”.

FERNANDES (1999a) considera em seu trabalho, além da evolução das metodologias de pesquisa em gestão da produção, de acordo com o estudo de autores na área, também a evolução dos temas de pesquisa em gestão da produção, fornecendo uma boa noção da evolução das pesquisas em cada área específica da engenharia de produção. Avaliando também os principais métodos de pesquisa utilizados, ressaltando a pesquisa empírica como grande fonte de trabalhos na área.

WESTBROOK (1995) sobre a necessidade de uma consideração maior da pesquisa empírica em Engenharia de Produção justifica, “... porque as operações no mundo real freqüentemente apresentam problemas desestruturados, que não podem ser modelados, mas sim gerenciados ...”, o autor completa com o fato de técnicas matemáticas e de modelagem, muitas vezes, não serem os principais métodos aplicáveis a estas situações.

BERTO & NAKANO (1999) realizaram um trabalho similar ao de FILIPPINI (1997) nos anais do ENEGEP no período de 1996 a 1998, classificando as publicações de acordo com algumas considerações próprias. Os autores apresentaram uma comparação entre os resultados brasileiros e norte-americanos, chegando a algumas

conclusões importantes. Dentre estas se pode citar o elevado número de pesquisas teórico-conceituais, a ausência de tradição no uso de métodos e técnicas de pesquisa e também uma maior necessidade de rigor metodológico.

Como deixa claro BERTO & NAKANO (1999), a falta de estruturação dos trabalhos em Engenharia de Produção não permite a identificação do método e/ou tipo de pesquisa empregado, comprometendo não somente a replicação e generalização dos resultados como também a própria consistência dos mesmos.

FILIPPINI (1997), BERTO & NAKANO (1998)(1999) e WESTBROOK (1995) evidenciaram o caráter multidisciplinar da área, ressaltando a natureza humanizada da Engenharia da Produção e a aproximação com as ciências sociais, o que requer o domínio amplo de métodos de pesquisa, exigindo do pesquisador maior preciosismo na elaboração do projeto metodológico, além da consideração por parte do mesmo, de uma variada gama de possibilidades metodológicas.

Quanto às técnicas de pesquisa de significativa importância para Engenharia de Produção, analisadas pelos referidos autores, podem-se incluir desde os tipos gerais de pesquisa como a pesquisa teórica, a aplicada e a exploratória ou descritiva, assim como os métodos amplos de pesquisa abrangendo os indutivos, dedutivos, considerando também o empirismo. Dentre as abordagens de pesquisa, a área se estende desde abordagens quantitativas até as abordagens qualitativas. Em relação aos procedimentos de pesquisa existentes, pode-se citar pesquisa teórico-conceitual, experimental, pesquisa de avaliação, estudo de caso e pesquisa-ação. Por último, os instrumentos de pesquisa utilizados, variam de acordo com a abordagem e procedimento escolhido.

A partir destes resultados, será realizado a seguir uma revisão bibliográfica da atividade científica, além dos métodos, abordagens, procedimentos e instrumentos de pesquisas aplicáveis na área da Engenharia de Produção, visando direcionar as escolhas metodológicas e garantir o caráter científico deste trabalho.

2.3 Breve Visão Sobre A Atividade Científica

Para que se possa iniciar no estudo sobre metodologia científica é necessário uma correta caracterização do termo ciência ou a atividade denominada ciência ou científica. BRYMAN (1989) trata o termo científico como inevitavelmente

vago e controversial concluindo que, na mente de diversos autores e estudiosos da área, é descrita como uma técnica sistemática de investigação, coleção de dados e análises dos mesmos em relação a um problema formulado previamente.

ALVES-MAZZOTTI & GEWANDSZNAJDER (1998) discutem a crença, ainda comum, de que a atividade científica se inicia com coletas de dados ou observações puras, sem idéias pré-concebidas por parte do cientista. Na realidade uma observação deve pressupor algum modo de escolher, dentre diversas observações possíveis, as que, a partir de alguma suposição, seja relevante para a solução de algum problema ou lacuna em questão. Isto só será possível partindo do conjunto de fatos aceitos e do conhecimento teórico disponível.

De forma mais geral, segundo ALVES (1995), a busca de uma possível ordem do mundo percebido, com base nos fatos conhecidos e no referencial teórico, traz à tona uma gama de problemas e lacunas a serem solucionados. Para isto, continua o autor, poderá ser utilizada a atividade científica na busca de soluções científicas para os mesmos, da mesma forma que o senso comum utiliza suas próprias soluções para estes problemas. Na realidade, a atividade científica pode ser vista como uma especialização do senso comum. Desta forma, um problema será científico quando explicita a relação de um ou mais fenômenos ou fatos entre si, sendo adequado a uma pesquisa sistemática, controlada, empírica e crítica (LAKATOS & MARCONI, 1995). Ou seja, o objetivo da formulação do problema da pesquisa é torná-lo individualizado, específico e inconfundível.

De posse de um problema formulado e cientificamente válido, de acordo com LAKATOS & MARCONI (1995), o próximo passo é a proposição de hipóteses para a solução do mesmo a partir do conjunto de fatos aceitos pelo cientista e também do referencial teórico do mesmo.

Como relata LAKATOS & MARCONI (1995: 115), sobre o conjunto de fatos aceitos pelo cientista, "... um fato não é somente uma observação prática ao acaso, mas também uma afirmativa empiricamente verificada sobre o fenômeno em pauta: dessa forma, engloba tanto as observações científicas quanto um quadro de referência teórico conhecido, no qual estas observações se enquadram. ..."

Para o mesmo autor, hipóteses podem ser vistas então como respostas prováveis e provisórias aos problemas formulados, propondo enunciados de relações

entre os fenômenos e fatos estudados e cuja validade será verificada através da atividade científica. Da mesma forma ALVES-MAZZOTTI & GEWANDSZNAJDER (1998: 4) definiram hipóteses como “... conjecturas, palpites, soluções provisórias, que tentam resolver um problema ou explicar um fato. ...”. Através das hipóteses é possível deduzir uma série de conclusões ou previsões que serão testadas.

Para que a hipótese gerada possa ser verificada cientificamente, é necessária a aplicação de extensivos e severos testes, controlando e repetindo os mesmos, visando a reprodução, inclusive por outros pesquisadores, contribuindo para sua objetividade e imparcialidade.

Da mesma forma, de acordo com ALVES-MAZZOTTI (1998), as hipóteses gerais testadas cientificamente, sofrem modificações e adaptações, para receber apoio experimental, sendo transformadas em leis, que possuem um caráter geral e podem ser utilizadas para explicar, descrever regularidades e prever fatos para certo grupo de fenômenos. De acordo com o mesmo autor, as leis, depois de um certo estágio de desenvolvimento de uma ciência, não se apresentam mais de forma isolada e passam a fazer parte do referencial teórico conhecido, sendo utilizada para formular novos problemas e hipóteses, fechando o ciclo científico.

Quanto à teoria, LAKATOS & MARCONI (1995), a conceituam como um meio para interpretar, criticar e unificar as leis estabelecidas, podendo ser modificada para se adequar a dados não previstos quando de sua formulação e para orientar a tarefa de descobrir generalizações novas e mais amplas. LAKATOS & MARCONI (1995:123) concluem que o objetivo das teorias é, “... compreender e explicar os fenômenos de uma forma mais ampla, através da reconstrução conceitual das estruturas objetivas do mesmo. ...”.

A maneira como o referencial teórico será desenvolvido, para compor o conhecimento científico disponível, dependerá da metodologia científica utilizada por cada pesquisador, de acordo com a natureza do problema a ser selecionado.

2.4 Trabalho Científico

SALOMON (1991) descreveu a atividade científica de forma menos extensiva que o empregado pela filosofia da ciência, utilizando elementos conceituais que constituem as premissas para a classificação dos trabalhos científicos. Dentre as

diversas propriedades e características da atividade científica, o referido autor destaca as seguintes: ser método de abordagem, ser processo cumulativo, comportar conhecimentos em processamento, ser um corpo de verdades provisórias, ser método não só de explicação e predição, mas também de classificação, descrição e interpretação, ter o rigor como característica fundamental e tender-se a realizar à medida que se torna aplicável. Sendo assim, para SALOMON (1991) uma atividade é denominada científica quando: produz a ciência, ou dela deriva, ou acompanha seu modelo de tratamento, resumindo, é a atividade que procura descobrir a teoria dos fatos.

A realização da atividade científica será realizada então a partir de um trabalho denominado científico e que considere suas características fundamentais; segundo SALOMON (1991:107), “... *trabalho científico passa a designar a concreção da atividade científica, ou seja, a pesquisa e o tratamento por escrito de questões abordadas metodologicamente.*”.

SALOMON (1991) descreve as características gerais de um trabalho científico, dentre estas se pode citar: o trabalho científico é frequentemente identificado com pesquisa científica, desta forma o termo pesquisa científica deverá ser assumido como um trabalho realizado metodologicamente, no momento em que surge um problema que requer um tratamento científico.

Problemas que requerem tratamento científico são aqueles que possuem algum tipo de relevância para a ciência, ou seja:

- Relevância operativa: ocorre quando o problema gera novos conhecimentos ao ser abordado;
- Relevância contemporânea: significa a atualização, a novidade e a originalidade; e
- Relevância humana: refere-se ao aspecto ético no tratamento de problemas.

O problema detectado que irá ditar o tipo geral de pesquisa científica a ser desenvolvida, sendo que os tipos poderão ser:

- Teórica: visa descobrir teorias, leis, modelos de explicação de fatos e predição do comportamento de fenômenos;
- Aplicada: visa a solução de problemas por meio da aplicação de leis e teorias elaboradas previamente; e

- Pesquisas exploratórias e descritivas: visa definir melhor o problema, proporcionando intuições de soluções e descrevendo o comportamento de fenômenos, assim como a definição e classificação de fatos e variáveis.

SALOMON (1991) reforça a importância da definição do problema científico como base para a escolha do tipo de pesquisa a ser seguido de forma mais geral, e direcionando também o estudo e escolha dos métodos e procedimentos de pesquisa a serem utilizados.

A determinação do problema científico desempenha um papel fundamental para a escolha dos métodos e procedimentos de pesquisa. Tomando por base BERTO & NAKANO (1998), as pesquisas científicas podem ser classificadas em:

- Pesquisa exploratória: possui por objetivo verificar a existência de um fenômeno. Pode ser utilizada para responder perguntas do tipo: se um certo fato existe, o que está acontecendo, quais são os aspectos, padrões ou categorias importantes e se existem relacionamentos entre eles;
- Pesquisa descritiva: visa estudar um fenômeno para descrevê-lo melhor. Responde perguntas do tipo: o que é um certo fato, como é diferente dos outros, quais os comportamentos, eventos, estruturas e processos que ocorrem no fenômeno;
- Pesquisa explanatória: possui por objetivo estudar a relação de causa e efeito entre dois fenômenos. Responde por exemplo, o que causa o fato, que eventos, crenças estão determinando o fenômeno, como os fatores interagem para determinar o fenômeno; e
- Pesquisa preditiva: visa conhecer melhor um fenômeno tendo por base o conhecimento da teoria disponível. Responde perguntas do tipo: como o fato é relacionado com um outro, o que vai acontecer como resultado deste fenômeno, quem será afetado e de que forma.

2.5 Métodos Científicos

Um método pode-se definir como uma série de regras para se resolver um problema. No método científico em especial, estas regras são bem gerais, não são infalíveis e não suprem o apelo à imaginação e à intuição do cientista (ALVES-MAZZOTTI & GEWANDSZNAJDER, 1998). LAKATOS & MARCONI (1995)

definem o método de pesquisa como uma gama de atividades sistemáticas e racionais, que visam conduzir a um certo objetivo de forma mais segura e econômica, determinando a estratégia a ser usada, apontando erros e ajudando nas decisões a serem tomadas pelo cientista no decorrer do trabalho.

SALOMON (1991) divide os métodos científicos em dois métodos clássicos gerais que podem ser utilizados em conjunto ou separadamente, são eles:

- Métodos indutivos: utilizam enunciados sintéticos, por meio de constatações particulares, visando generalizações, geralmente da amostra para a população e universo; e
- Métodos dedutivos: visam demonstrar e justificar por meio de enunciados analíticos originários de postulados e teoremas, buscando chegar a uma conclusão em particular.

Como relata LAKATOS & MARCONI (1995), “Indução é um processo mental por intermédio do qual, partindo de dados particulares, suficientemente constatados, infere-se uma verdade geral ou universal, não contida nas partes examinadas. ...”. Sendo assim, os argumentos indutivos levam a conteúdos mais amplos, em relação às premissas iniciais.

David Hume, segundo ALVES-MAZZOTTI & GEWANDSZNAJDER (1998), questionou a validade do raciocínio indutivo, utilizando como argumento o fato que a indução não é um argumento dedutivo e por isto não seria logicamente válida. Além de que, para ser justificada pela observação, teorias ou leis deveriam ser comprovadas de forma contínua, não sendo suficientes para gerar teorias mais complexas.

Já no método dedutivo, segundo LAKATOS & MARCONI (1995), os argumentos verificados ou estão corretos ou incorretos e as hipóteses geradas se sustentam completamente ou não se sustentam, não existindo graduações intermediárias como no método indutivo. Desta forma, visam atingir a certeza, sendo muito aplicados a trabalhos matemáticos ou que utilizam uma forte linguagem lógica.

LAKATOS & MARCONI (1995), por sua vez, separam os métodos científicos em métodos mais amplos e métodos de procedimento. Sendo que os primeiros possuem maior amplitude, abstração e generalismo na consideração dos problemas científicos. Já os métodos de procedimento visam maior concretismo na

busca de soluções, se restringindo a alguns fenômenos específicos. Os métodos mais amplos descritos por LAKATUS & MARCONI incluem os métodos indutivos e dedutivos, além dos seguintes:

- Método hipotético-dedutivo: a busca de soluções é realizada se teorias ou leis falham ao solucionar um problema, sendo então proposta uma nova teoria ou lei que resolva o problema e incorpore a teoria ou lei anterior; e
- Método dialético: a busca de soluções ocorre no mundo dos fenômenos através da ação recíproca, da contradição e da mudança dialética proveniente da natureza e da sociedade.

Como relata ALVES-MAZZOTTI & GEWANDSZNAJDER (1998), o método hipotético-dedutivo, também conhecido como método das conjecturas e refutações, foi proposto por Karl Popper, procurando resolver o problema do método indutivo. Popper justificou que a geração de conhecimento tem por início a formulação de hipóteses para a solução de problemas previamente elaborados, continuando com a tentativa de refutação destas hipóteses, através de testes e observações. Caso a hipótese não resista aos testes, são formuladas então outras hipóteses para serem testadas novamente. Em contrapartida, no caso da hipótese resistir aos testes, a mesma é corroborada, este termo é preferido ao termo confirmado, pois transmite a idéia que as leis e teorias não são verdadeiras e sim são cada vez mais prováveis à medida que passam pelos testes. Segundo ALVES-MAZZOTTI & GEWANDSZNAJDER (1998, 16), “... A refutação conta com o apoio lógico presente em argumentos do tipo: “Todos os cisnes são brancos; este cisne é negro; logo, é falso que todos os cisnes sejam brancos” ...”, percebe-se então que o argumento é dedutivamente válido, as hipóteses, leis e teorias que resistiram aos testes até o momento passam a fazer parte do conhecimento disponível.

As idéias de Popper não ficaram imunes às críticas. Como descrito por ALVES-MAZZOTTI & GEWANDSZNAJDER (1998) estas críticas tiveram como base dois problemas metodológicos. Primeiramente devido aos enunciados utilizados para realizar os testes serem impregnados de teorias e, por isto, não servirem de base para o teste de uma outra teoria. E também, ao fato de usualmente serem testados sistemas teóricos complexos ao invés de hipóteses isoladas, neste caso, a refutação indicaria apenas que existe algo errado em todo este conjunto. Outra crítica às idéias de Popper se

refere à ligação entre corroboração e verossimilitude, onde as teorias mais corroboradas seriam também mais próximas da verdade. Segundo ALVES-MAZZOTI (1998) a corroboração indica apenas o sucesso passado de uma teoria, já a verossimilitude diz respeito à previsão acerca de seu processo futuro, desta forma, a ligação entre estes dois fatores parece depender da lógica indutiva, sujeitando então a lógica de Popper às críticas à indução feitas por Hume.

Como frisado por BERTO & NAKANO (1998:2) acerca dos métodos amplos de pesquisa, “... A ciência moderna tem usado uma combinação desses métodos. De fato, a maioria dos cientistas entende usar a dedução e a indução em suas pesquisas. ...”

2.6 Abordagens De Pesquisa

Como analisado anteriormente, existem duas abordagens de pesquisa principais em Engenharia de Produção, a abordagem quantitativa e a qualitativa. Apesar de existir uma impressão geral, segundo BERTO & NAKANO (1998), que a diferença entre a pesquisa quantitativa e a qualitativa esteja na presença ou ausência de quantificação de dados, a diferença entre estas duas abordagens reside na forma geral do trabalho, no foco e na ênfase do estudo realizado (VAN MAANEM, 1979).

Como relata BERTO & NAKANO (1999:2), “... As abordagens tradicionais são as chamadas quantitativas, com natureza empírica e hipóteses “fortes” e bem formuladas. Baseiam-se em métodos lógico-dedutivos, buscam explicar relações de causa/efeito e através da generalização de resultados, possibilitar replicações. Privilegiam estudos do tipo “antes e depois”, propiciando análises estáticas e instantâneas da realidade, como se fosse fotografias. Tem ainda como características de conduta de investigação, a seleção de amostras, a distância ou a ausência do contato entre o pesquisador e o objeto de estudo. ...”.

De forma geral, segundo CRESWELL (1994), a abordagem quantitativa tem como origem um problema verificado, seguido da elaboração de uma teoria, hipóteses e a formulação de variáveis, onde por meio de medições e procedimentos estatísticos, esta teoria poderá ser generalizada ou não.

GODOY (1995) definiu de forma bem clara a abordagem quantitativa, no qual relata a característica do pesquisador possuir um plano pré-estabelecido do seu

trabalho, com hipóteses claramente formuladas e variáveis bem definidas. Nesta abordagem o autor despande grande preocupação com a medição objetiva das variáveis, assim como a obtenção de resultados passíveis de quantificação, além de buscar a precisão e a garantia de uma margem de segurança em relação às inferências estatísticas obtidas.

BRYMAN (1989) foi mais criterioso ao definir a abordagem quantitativa. Segundo este autor, depois de definido o problema, o ponto de partida é a teoria existente na área. O estudo da teoria disponível sobre o assunto pesquisado permite, através de um processo dedutivo, a formulação de hipóteses sobre a natureza do problema existente. A partir das hipóteses formuladas, são criadas variáveis para verificação destas hipóteses. Estas variáveis devem ser passíveis de mensuração, para que, no processo de operacionalização, possam ser testadas e manipuladas e os resultados possam ser coletados sistematicamente para quantificação. Neste ponto é realizada a análise de dados, utilizando métodos estatísticos e de correlação, visando a verificação das hipóteses levantadas, para que, caso as hipóteses sejam verificadas, sejam criadas novas teorias, por um processo de indução.

Desta forma, segundo BRYMAN (1989), a abordagem quantitativa deve se preocupar com as seguintes questões primordiais:

- Mensurabilidade: visa garantir que as variáveis criadas para testar as hipóteses formuladas possam ser devidamente medidas;
- Causalidade: possui por finalidade explicitar as relações de causa e efeito entre as variáveis, assim como demonstrar quais são dependentes, independentes e de contorno;
- Generalização: visa garantir que a coleta de dados seja realizada de forma a garantir a inferência estatística e a posterior generalização dos resultados; e
- Replicação: visa garantir que o procedimento de pesquisa possa ser reproduzido por outros pesquisadores para checar a validade da investigação.

Segundo CRESWELL (1994) pode-se classificar a abordagem quantitativa segundo as seguintes características:

- Ontologia: vê a realidade de forma objetiva, e independe do pesquisador;
- Epistemologia: o pesquisador deve permanecer distante e independente do que se está sendo pesquisado;

- Axiologia: os valores do pesquisador não influenciam o trabalho de pesquisa;
- Retórica: a linguagem utilizada para escrever o trabalho é impessoal e formal; e
- Metodologia: como descrito anteriormente, na abordagem quantitativa, é realizado teste de hipóteses formuladas previamente a partir de teorias existentes, utilizando uma relação de causa e efeito e a mensuração sistemática das variáveis definidas, o trabalho de pesquisa possui a intenção de criar generalização, para contribuir com a teoria existente e ser capaz de prever, explicar e entender algum fenômeno em questão.

Por outro lado, desde 1970 uma outra abordagem de pesquisa, menos estruturada, vem experimentando um elevado crescimento de interesse por parte dos pesquisadores, a esta abordagem de pesquisa dá-se o nome de pesquisa qualitativa (BRYMAN, 1989).

Segundo BERTO & NAKANO (1999:3), “... As pesquisas de natureza qualitativa buscam aprimorar a teoria e os fatos, através da descrição e interpretação de episódios isolados ou únicos, privilegiando o conhecimento das relações entre contexto e ação (método indutivo). Através de análises fenomenológicas e da subjetividade do pesquisador chegam, geralmente, a resultados particularizados que possibilitam, no máximo a comparação entre casos. ...”.

A abordagem qualitativa é um processo de pesquisa onde, a partir de um problema, tem por base a construção de um cenário complexo e holístico, definido por palavras e conduzido de forma natural (CRESWELL, 1994).

Para GODOY (1995) o foco da abordagem qualitativa não é a medição ou enumeração do objeto estudado, nem possui a intenção da análise estatística dos dados coletados, o ponto de partida desta abordagem são questões ou interesses amplos e não definidos, tomando forma à medida que o trabalho evolui. Na abordagem qualitativa os dados obtidos geralmente são descritivos e pouco estruturados, sendo conseguidos via contato direto do pesquisador com a situação estudada, de forma que o fenômeno em questão seja entendido de acordo com a perspectiva dos participantes da situação.

Para BRYMAN (1989) a abordagem qualitativa envolve as seguintes questões:

- Os fatos são observados pelo pesquisador sob o ponto de vista interno ao objeto de estudo;
- Possui a finalidade de compreender o contexto da situação estudada;
- Busca a seqüência dos fatos no tempo, ou seja, enfatiza os acontecimentos;
- A pesquisa é conduzida de forma mais desestruturada, não existem hipóteses fortes no decorrer do trabalho; e
- Usa-se normalmente mais de uma fonte de dados.

CRESWELL (1994), classifica a abordagem qualitativa segundo as seguintes características:

- Ontologia: a realidade é construída pelos indivíduos envolvidos na pesquisa;
- Epistemologia: o pesquisador interage com o estudo;
- Axiologia: os valores do pesquisador interferem na pesquisa;
- Retórica: a linguagem utilizada é pessoal, informal e baseada em definições desenvolvidas durante o estudo; e
- Metodologia: nesta abordagem a lógica indutiva predomina. Prevelem os conceitos que emergem dos informantes mais que os identificados previamente pelo pesquisador, este fato proporciona uma pesquisa baseada no contexto estudado e não visa a generalização dos resultados obtidos.

Como descrito por VAN MAANEN (1979) as abordagens quantitativas e qualitativas não são mutuamente exclusivas e podem ser utilizadas concomitantemente em um mesmo trabalho. CRESWELL (1994) também relatou a possibilidade da utilização das abordagens quantitativas e qualitativas em um trabalho, e as vantagens desta estratégia de pesquisa em diversas situações, visando alcançar maior convergência entre os resultados e cercar as diferentes facetas em que um fenômeno pode se apresentar.

De qualquer forma, tanto para a abordagem quantitativa como para a qualitativa, existem procedimentos de pesquisa apropriados de acordo com a característica da pesquisa que se pretende desenvolver.

2.7 Procedimentos De Pesquisa

De acordo com os estudos de publicações realizadas em Engenharia de Produção (FILIPPINI, 1997)(FERNANDES, 1999a)(BERTO & NAKANO, 1998) (BERTO & NAKANO, 1999), os procedimentos de pesquisa mais utilizados na área são: teórico-conceitual, experimental, pesquisa de avaliação, estudo de caso e pesquisa-ação. A seguir estes procedimentos são expostos com mais detalhes.

2.7.1 Teórico-conceitual

Como relata BERTO & NAKANO (1998), este procedimento é “... Produto de reflexões a partir de um fenômeno observado ou relatado pela literatura; compilação de idéias e opiniões de diferentes autores ou ainda simulação e modelagem teórica. ...”. Os autores, visando à classificação dos trabalhos científicos, propuseram que as observações de campo não estruturadas, as que, segundo os mesmos, são realizadas sem instrumentos formais de coletas de dados, também sejam classificadas como teórico-conceituais.

2.7.2 Pesquisa experimental

Este tipo de pesquisa, como descrito por CRESWEL (1994), tem por finalidade verificar as relações de causa e efeito, de forma que o pesquisador possa manipular as variáveis independentes, verificando as alterações ocorridas nos resultados decorrentes destas manipulações, para isto tanto as variáveis manipuladas, como também as de saída, deverão ser controladas pelo experimento. Devido a estas características, este procedimento de pesquisa é mais indicado para abordagens quantitativas (BRYMAN, 1989).

A pesquisa experimental é geralmente relacionada com experimentos controlados em laboratório e também modelagens matemáticas e simulações computacionais. Quanto maior o controle sobre as variáveis do experimento, maior será a possibilidade de testar as alternativas diferentes, aumentando assim sua validade interna. Já a pesquisa experimental desenvolvida na forma de um estudo de campo aumenta a validade externa.

Considerando a aplicação deste procedimento de pesquisa em empresas, é de se prever que os pesquisadores não manipularão com facilidade as variáveis

formuladas, devendo utilizar subterfúgios para conseguir controlar o experimento e extrair as relações de causa e efeito desejadas.

2.7.3 Pesquisa de avaliação

A pesquisa de avaliação, também conhecida como “*survey*”, consiste em questionários ou entrevistas estruturadas, com o objetivo de examinar padrões e relacionamentos entre as variáveis (BRYMAN, 1989).

Nesta forma de pesquisa, não existe a intervenção do pesquisador no experimento, ou seja, as variáveis não são manipuláveis.

Como descrito por CRESWELL (1994) a pesquisa de avaliação visa proporcionar uma descrição numérica de alguma parcela de uma população, com o objetivo de criar generalizações. Desta forma, este procedimento de pesquisa é mais aplicado à abordagem quantitativa, para isto, lança mão de questionários e entrevistas de forma objetiva e bem estruturada, passíveis de serem analisados estatisticamente.

Como descreve BRYMAN (1989, 29), “... Diferentemente da pesquisa experimental, o pesquisador não intervém na organização e observa os efeitos da intervenção. Informações são coletadas sobre um número de variáveis, e o grau no qual elas são casualmente relacionadas é inferido. ...”, o autor continua, discorrendo sobre o fato de geralmente ser realizada em um certo momento de tempo, criando relações instantâneas do objeto estudado.

2.7.4 Estudo de caso

Como descreve YIN (1989), estudo de caso é uma forma de pesquisa empírica, que visa investigar fenômenos contemporâneos, considerando o contexto real do fenômeno estudado, geralmente quando as fronteiras entre o contexto e o fenômeno não estão bem definidas. Devido a estas características, o estudo de caso é aplicado em abordagens qualitativas, como frisa BRYMAN (1989), “... geralmente é difícil distinguir pesquisa qualitativa e estudo de caso, ...”.

BRYMAN (1989) relata o fato deste procedimento de pesquisa geralmente envolver o exame de um pequeno número de casos, não tendo por objetivo a generalização estatística, mas sim, criar relações e entendimento sobre um fenômeno estudado. Na verdade, neste procedimento de pesquisa é possível criar generalizações analíticas a partir de um conjunto de casos considerados.

Segundo YIN (1989) estudo de caso não é apenas uma técnica não estruturada de coletar e analisar dados, mas uma estratégia de pesquisa completa, aplicável principalmente quando o pesquisador não pode manipular as características relevantes do objeto de estudo. Este procedimento de pesquisa é aplicado tanto para explicar e descrever, como para avaliar e explorar um objeto de estudo, sendo usado também em situações onde existem mais variáveis de interesse do que dados disponíveis, guiando, desta forma, a coleta e análise de dados através do desenvolvimento de proposições teóricas sobre o estudo e da consideração da teoria disponível sobre o assunto.

YIN (1989) descreve os principais componentes de um estudo de caso, além de relacionar a importância da definição da questão de pesquisa para este procedimento. O autor descreve também diversas estratégias para se conduzir estudos de casos com casos únicos ou múltiplos, e critérios para a definição das unidades de análise.

2.7.5 Pesquisa ação

A pesquisa ação empresta muitas de suas características do estudo de caso, com a diferença que, neste procedimento de pesquisa, o pesquisador é parte integrante do objeto estudado (WESTBROOK, 1995).

Segundo BRYMAN (1989), em organizações, o pesquisador geralmente está envolvido com os membros da organização, lidando com um problema reconhecido por ambos. O pesquisador a partir de ações realizadas no objeto de estudo, observa o resultado e analisa o impacto no problema estudado, desta forma, passa a fazer parte do campo de investigação, esta é a característica primordial da pesquisa ação.

Para THIOLENT (1997) a pesquisa ação se caracteriza por seu caráter participativo, uma vez que possibilita a integração entre os participantes da pesquisa e os próprios investigados. O autor enfatiza o fato de não se confundir a pesquisa participativa com a pesquisa-ação, pois nesta existe à vontade da ação planejada sobre os problemas identificados. Continua o autor que a pesquisa-ação não se restringe a descrever situações, se encarregando também de criar acontecimentos que venham propiciar mudanças no sistema considerado.

A partir do estudo da atividade científica e do conjunto de métodos, abordagens e procedimentos de pesquisa aplicáveis em Engenharia de Produção, é possível, através da análise minuciosa do problema/lacuna existente, a definição de estratégias de pesquisa coerentes e a definição, em um segundo momento, de um projeto de pesquisa que guie o trabalho do pesquisador em suas diferentes etapas.

2.8 O Projeto De Pesquisa

Em termos gerais o projeto de pesquisa é um plano de ação, funcionando como um guia para alcançar os objetivos da pesquisa. Como descrito por YIN (1989), “... é uma seqüência lógica que conecta os dados empíricos do estudo com as questões de pesquisas iniciais e, ultimamente, a suas conclusões. ...”

O primeiro passo para a elaboração do projeto de pesquisa é a definição de uma estratégia de pesquisa coerente com o problema a ser resolvido. A estratégia de pesquisa utilizada é que irá determinar as metodologias e procedimentos de pesquisa empregados, de acordo com as características do trabalho a ser desenvolvido. Como descreve YIN (1989), cada forma diferente de pesquisa exige lógicas diferentes de coletar e analisar as evidências empíricas e cada estratégia de pesquisa possui suas vantagens e desvantagens. O referido autor relaciona três condições principais que auxiliam a escolha de uma determinada estratégia de pesquisa, quais sejam:

- O tipo de questão de pesquisa proposto;
- O controle que o investigador possui sobre o objeto de estudo; e
- O quanto o objeto de estudo é contemporâneo.

Como relata YIN (1989) a definição da questão de pesquisa, representa um dos mais importantes passos de um projeto científico, significando a condição mais determinante na escolha de uma certa estratégia de pesquisa. Desta forma, deve ser despendido considerável empenho na elaboração desta tarefa.

Sobre o controle do objeto de estudo, YIN (1989) relata o fato da possibilidade de se realizar o estudo em laboratório, manipulando as variáveis de forma direta, precisa e sistemática, ou mesmo, em um estudo de campo, onde possa ser empregado um certo nível de controle ao experimento, ou, por fim, estudos que não permitem qualquer controle ou manipulação de suas variáveis. Por ultimo, sobre a

característica contemporânea do experimento, o autor refere-se ao tratamento de fatos atuais ou passados, pois estes últimos deverão ser analisados por estudos históricos. É importante ressaltar que os levantamentos realizados por FILIPPINI (1997), BERTO & NAKANO (1998)(1999) e FERNANDES (1999a) não consideram a pesquisa histórica na área de Engenharia de Produção, não que esta modalidade de pesquisa não seja aplicada, mas devido à não incidência deste procedimento de pesquisa nos anais analisados.

2.8.1 Definição do problema de pesquisa

Para que se possa determinar com clareza as condições necessárias à determinação da estratégia, é preciso definir o problema científico no qual este trabalho pretende se enveredar, assim como o objetivo desta pesquisa, o objeto de estudo e as hipóteses iniciais, para que, a partir do levantamento do referencial teórico disponível e da experiência do pesquisador no assunto, seja definida a estratégia científica a ser adotada para obter os resultados esperados.

O presente trabalho se concentrou, dentro das áreas de estudo da Engenharia de Produção, na área de Gestão da Produção, onde, a partir de estudos iniciais e de experiências anteriores, foi possível identificar uma dificuldade de aplicação prática da teoria existente em controle da produção, principalmente quando se considera ambientes complexos de produção. Visando delimitar o problema, setores industriais que se caracterizam por possuir um ambiente produtivo complexo foram considerados, dentre estes, o setor industrial específico das fundições de mercado apresentou uma grande dificuldade na operacionalização de seu controle da produção, especificamente para a elaboração da programação da produção. Uma vez constatado este fato, por vivência própria e de posse de um referencial teórico sobre o assunto, foi possível constatar o seguinte problema potencial, que se transformou no problema de pesquisa desta tese, qual seja:

Dificuldade das fundições de mercado em estabelecer a programação da produção de forma eficaz.

2.8.2 Definição do objetivo geral e objetivos específicos

Uma vez definido o problema da pesquisa, iniciou-se a revisão bibliográfica sobre o assunto, de forma a criar direcionadores, visando uma possível solução para o problema verificado. Com base nestes estudos foi possível constatar que as características encontradas em ambientes produtivos complexos dificultam ou, até mesmo, inviabilizam o emprego de técnicas e metodologias existentes em controle da produção, principalmente devido à elevada estruturação exigida para a operacionalização destas soluções, estruturação esta que vem de encontro com a flexibilidade necessária nestes ambientes. Como possível solução a este problema, os estudos considerados sugerem a flexibilização das técnicas e metodologias existentes em controle da produção sob a forma de sistemas de apoio à decisão.

Com base nestas constatações, foi possível definir o objetivo deste trabalho, qual seja:

Proporcionar um suporte efetivo à programação da produção em fundições de mercado por meio de um sistema de apoio à decisão para programação da produção.

Este objetivo geral pode ser dividido nos seguintes objetivos específicos:

- *Estudar e analisar o processo de elaboração da programação da produção em fundições de mercado, entendendo suas particularidades e identificando seus problemas, dificuldades e restrições;*
- *Contextualizar as atividades referentes à área de controle da produção assim como delinear as características principais dos ambientes produtivos complexos, visando direcionar a aplicação da teoria existente à área operacional de ambientes produtivos complexos, principalmente, no que se refere este trabalho, para elaboração da programação da produção em fundições de mercado;*
- *Revisar os estudos disponíveis sobre a teoria da decisão e sistemas de apoio à decisão, assim como dos trabalhos existentes sobre a aplicação de sistemas de apoio à decisão no controle da produção, visando criar direcionadores para a aplicação efetiva de sistemas de apoio à decisão à área operacional de ambientes produtivos complexos;*

- *Propor modelos decisórios aplicáveis à realidade do processo de elaboração da produção das fundições de mercado, assim como avaliar a viabilidade de aplicação destes modelos sob a forma de um sistema de apoio à decisão, visando, também, criar direcionadores para possíveis aplicações das modelagens decisórias tratadas à problemas operacionais de outros ambientes produtivos complexos; e,*
- *Avaliar a adequação do sistema proposto à realidade do ambiente produtivo das fundições de mercado.*

2.8.3 Definição do objeto de estudo

Será definido como objeto de estudo deste trabalho a **programação da produção em fundições de mercado**.

2.8.4 Definição das questões de pesquisa

Neste ponto, de posse da análise da teoria existente na área, assim como do problema de pesquisa, objetivos e objeto de estudo, é possível determinar as questões de pesquisa que irão guiar a definição das estratégias de condução deste trabalho, quais sejam:

- *1º Questão: A programação da produção em fundições de mercado se apresenta como uma área operacional complexa e sem suporte efetivo das técnicas e metodologias existentes para controle da produção?*
- *2º Questão: Quais são as principais particularidades, problemas, complexidades e restrições da programação da produção das fundições de mercado?*
- *3º Questão: A aplicação do corpo de conhecimento existente em controle da produção à área operacional de ambientes de produção complexos, especificamente, no que diz respeito a este trabalho, ao processo de elaboração da programação da produção em fundições de mercado, poderá ser potencializada por meio de sistemas de apoio à decisão?*

As questões de pesquisa secundárias permitem criar a base necessária para justificar este trabalho, assim como sua viabilidade, e criam os direcionadores para a definição da *questão principal de pesquisa*, como segue:

Como deve ser uma proposta viável de um sistema de apoio à decisão para programação da produção em fundições de mercado?

A questão principal de pesquisa será responsável pelos principais resultados obtidos neste trabalho, mas somente será viabilizada, se as questões secundárias forem satisfatoriamente respondidas e justificarem a resposta da questão principal, ou seja, caso as questões secundárias apontem uma outra direção, que não a esperada pela análise preliminar, este trabalho não se justificará, isto é necessário para garantir a viabilidade desta pesquisa e sua aplicação posterior.

2.8.5 Definição das hipóteses

O próximo passo no desenvolvimento do projeto de pesquisa é a definição das hipóteses deste trabalho. As respostas para cada questão de pesquisa formam os subsídios necessários para desenvolver o conjunto de hipóteses iniciais que irão guiar o desenvolvimento do trabalho em campo ou laboratório, estas hipóteses são definidas com base no conhecimento do pesquisador sobre o assunto estudado.

A seguir são propostas as hipóteses deste trabalho respectivamente a cada questão de pesquisa apresentadas no tópico anterior, quais sejam:

- ***Hipótese 1:*** O processo de elaboração da programação da produção em fundições de mercado é uma atividade crítica. Apesar disto, estas indústrias possuem sérios problemas nesta área e grandes dificuldades para saná-los, devido, principalmente, à complexidade de seu ambiente produtivo;
- ***Hipótese 2:*** O processo de elaboração da programação da produção em fundições de mercado possui problemas, complexidades e restrições que poderão ser devidamente abordados e caracterizados em contato com seu ambiente produtivo, criando direcionadores para a proposta de um sistema de programação da produção dirigido a este setor;

- **Hipótese 3:** As principais características dos sistemas de apoio à decisão, quais sejam: interação com o usuário, facilidade de uso, capacidade em lidar com situações pouco estruturadas e transparência quanto à complexidade envolvida, são fatores chaves para adicionar a flexibilidade necessária para a adequação do corpo de conhecimento existente em controle da produção à área operacional de ambientes produtivos complexos, como, no que se refere a este trabalho, ao processo de elaboração da programação da produção em fundições de mercado; e,
- **Hipótese principal:** A contextualização das principais atividades da área de controle da produção e a devida caracterização dos fatores que comumente adicionam complexidades aos ambientes de produção, em conjunto com direcionadores sobre a aplicação de sistemas de apoio à decisão ao controle da produção e, também, da análise detalhada do processo de elaboração da programação da produção em fundições de mercado, poderá criar os direcionadores necessários para propor um sistema efetivo de apoio à decisão para programação da produção, assim como seus modelos decisórios, dirigido à realidade do setor industrial das fundições de mercado.

Uma vez definidas as hipóteses iniciais deste trabalho, podem-se finalmente desenvolver estratégias coerentes de pesquisa para se responder cada uma das perguntas de pesquisa elaboradas. Para isto, é preciso considerar todas as abordagens e procedimentos de pesquisa aplicáveis à Engenharia de Produção. A seguir estas estratégias são definidas.

2.8.6 Estratégia para abordar a primeira questão de pesquisa

Deseja-se conhecer, com esta questão de pesquisa, as principais características do setor empresarial das fundições de mercado, suas complexidades produtivas e a natureza geral dos problemas que o referido setor vem enfrentado, além do quanto estes problemas estão relacionados com a elaboração da programação da produção destas empresas.

O setor empresarial das fundições de mercado é considerável e necessita ser delimitado para que possa ser tratado convenientemente. Procurou-se delimitar o

setor com base em uma região de acesso aos pesquisadores, que, em uma análise preliminar, pode-se decidir pelo estudo das fundições de mercado do interior do estado de São Paulo. Como base para esta decisão considerou-se o fato desta região concentrar um grande número deste tipo de indústria e, principalmente, devido à população ser conhecida e acessível.

Com base em estudos prévios sobre as características dos problemas e dificuldades enfrentadas na área operacional de ambientes produtivos complexos, foi possível determinar de antemão o que se desejava saber das unidades analisadas, em uma linguagem clara e inteligível. Por fim, a partir destas informações, foi possível definir a *tabela 2.1*, relacionando as características desta questão de pesquisa com todos os critérios analisados, para a escolha de um método de pesquisa coerente para esta estratégia.

TABELA 2.1: Análise das características da questão de pesquisa 1

Critério	Característica da Pesquisa	Método amplo mais indicado	Procedimento mais indicado
Quanto à natureza da realidade da pesquisa	Sabe-se de antemão as características do que se deseja conhecer, traçando um perfil objetivo à pesquisa	Quantitativo	“Survey”; Experimental
Quanto ao propósito da pesquisa	Exploratória - Tem por objetivo saber o que está acontecendo no objeto de estudo, quais são seus aspectos e relacionamentos	Quantitativo Qualitativo	“Survey”; Estudo de caso; Pesquisa-ação
Quanto à necessidade da presença do pesquisador	Pretende-se somente avaliar o objeto de estudo	Quantitativo Qualitativo	“Survey”; Estudo de Caso; Pesquisa-ação
Quanto à necessidade da percepção dos envolvidos no estudo	Não é necessário	Quantitativo	“Survey”; Experimental
Quanto às limitações das fronteiras do objeto de estudo	As fronteiras do estudo estão bem definidas e conhecidas, por uma análise prévia do objeto de estudo	Quantitativo	“Survey”; Experimental
Quanto ao relacionamento do pesquisador com o objeto de estudo	O pesquisador não deverá interagir com o objeto de estudo, o objetivo do pesquisador é conhecer melhor o objeto a ser estudado	Quantitativo	“Survey”
Quanto à influência do pesquisador nos resultados	O pesquisador não deve exercer influência no objeto a ser estudado, para conhecer a real problemática envolvida com o objeto de estudo	Quantitativo Qualitativo	“Survey”; Experimental; Estudo de caso
Quanto à dependência ao contexto estudado	O estudo será independente do contexto estudado	Quantitativo	“Survey”; Experimental
Quanto à linguagem utilizada na pesquisa	Deverá ser formal, visando uma definição clara do objeto analisado	Quantitativo	“Survey”; Experimental
Quanto à quantificação das variáveis	As variáveis deverão ser definidas para possibilitar a posterior quantificação	Quantitativo	“Survey”; Experimental
Quanto a elucidar relações de causa e efeito entre as variáveis	Pretende criar algumas relações de causa e efeito, através do estudo dos resultados das variáveis	Quantitativo Qualitativo	“Survey”; Experimental; Estudo de caso; Pesquisa-ação
Quanto à população do universo a ser considerada	O universo é conhecido, via uma análise prévia do objeto estudado e possível de ser obtido uma amostra estatisticamente válida	Quantitativo	“Survey”; Experimental
Quanto à aplicação de inferência estatística	O conjunto de unidades analisadas deverá se constituir de uma amostra estatisticamente válida	Quantitativo	“Survey”; Experimental
Quanto aos métodos amplos de pesquisa	À partir da análise estatística, tem-se por objetivo a definição de hipóteses por um processo dedutivo	Quantitativo	“Survey”; Experimental
Quanto à possibilidade de generalização	O resultado da pesquisa visa ser generalizado para o universo de amostras consideradas	Quantitativo Qualitativo	“Survey”; Experimental; Estudo de caso; Pesquisa-ação
Quanto ao tipo de questão de pesquisa	Responde a uma questão de pesquisa do tipo “Quanto”	Quantitativo	“Survey”
Quanto à manipulação das variáveis	Não é possível nem desejável	Quantitativo	“Survey”
Quanto à contemporaneidade	O estudo trata sobre um objeto atual	Quantitativo	“Survey”; Experimental

A análise da tabela indica para esta questão de pesquisa a utilização mais provável da abordagem quantitativa, fazendo uso do procedimento de pesquisa “survey”, as unidades de análises serão as pequenas e médias fundições de mercado do interior do estado de São Paulo e, por último, devido ao fato da pesquisa ter um caráter bem objetivo e visar generalização estatística, o uso de um questionário estruturado mostra-se mais adequado como instrumento de pesquisa.

2.8.7 Estratégia para abordar a segunda questão de pesquisa

A segunda questão de pesquisa possui um caráter fundamental para este trabalho, uma vez que pretende estudar a forma na qual atualmente se realiza a programação da produção e também caracterizar a operacionalização do ambiente produtivo das fundições de mercado. Analisando, para isto, como atualmente esta programação é operacionalizada, quais são suas principais particularidades, problemas, complexidades e restrições, ou seja, pretende-se criar um entendimento do objeto de estudo deste trabalho.

Existe uma certa escassez de trabalhos publicados sobre este tema, dificultando a definição do quê será analisado e também, a previsão das variáveis do estudo assim como a delimitação de suas fronteiras. A alternativa mais provável será o pesquisador interagir com o objeto de estudo, visando criar o entendimento necessário e analisá-lo criticamente, conseguindo subsídios para, em um segundo momento, propor possíveis soluções. Na *tabela 2.2* é possível visualizar a análise destas características para esta questão de pesquisa.

TABELA 2.2: Análise das características da questão de pesquisa 2

Critério	Característica da Pesquisa	Método amplo mais indicado	Procedimento mais indicado
Quanto à natureza da realidade da pesquisa	Não se sabe muito sobre o objeto da pesquisa, suas reais necessidades em programação da produção, e que tipo de informação se deseja, tendo um caráter subjetivo	Qualitativo	Estudo de caso; Pesquisa-ação
Quanto ao propósito da pesquisa	Descritivo - Tem por objetivo saber quais os comportamentos, eventos, estruturas, atitudes e processos que ocorrem no objeto de estudo	Quantitativo Qualitativo	“Survey”; Estudo de caso; Pesquisa-ação
Quanto à necessidade da presença do pesquisador	É necessária a presença do pesquisador	Quantitativo Qualitativo	Experimental; Estudo de caso; Pesquisa-ação
Quanto à necessidade da percepção dos envolvidos no estudo	É fundamental a percepção dos envolvidos na realidade industrial do setor analisado	Qualitativo	Estudo de caso; Pesquisa-ação
Quanto às limitações das fronteiras do objeto de estudo	As fronteiras do estudo não estão bem definidas, e devem ser delineadas no estudo	Qualitativo	Estudo de caso; Pesquisa-ação
Quanto ao relacionamento do pesquisador com o objeto de estudo	O pesquisador irá se relacionar com objeto a ser estudado, visando entender seu funcionamento	Quantitativo Qualitativo	Experimental; Estudo de caso; Pesquisa-ação
Quanto à influência do pesquisador nos resultados	O pesquisador não deve exercer influência no objeto a ser estudado	Quantitativo Qualitativo	“Survey”; Experimental; Estudo de caso
Quanto à dependência ao contexto estudado	O estudo poderá ser dependente do contexto estudado	Qualitativo	Estudo de caso; Pesquisa-ação
Quanto à linguagem utilizada na pesquisa	Poderá ser informal, com o objetivo de traçar uma visão do objeto analisado	Qualitativo	Estudo de caso; Pesquisa-ação
Quanto à quantificação das variáveis	Apesar de não possuir o objetivo de quantificação das variáveis, este processo será desejado caso possível	Quantitativo Qualitativo	“Survey”; Experimento; Estudo de caso; Pesquisa-ação
Quanto a elucidar relações causais entre as variáveis	Pretende criar algumas relações de causa e efeito	Quantitativo Qualitativo	“Survey”; Experimento; Estudo de caso; Pesquisa-ação
Quanto à população do universo a ser considerada	O universo é conhecido, mas não se deseja uma amostra estatisticamente válida	Qualitativo	Estudo de caso; Pesquisa-ação
Quanto à aplicação de inferência estatística	Não se deseja inferência estatística	Qualitativo	Estudo de caso; Pesquisa-ação
Quanto aos métodos amplos de pesquisa	A partir da análise analítica, tem-se por objetivo a definição de proposições por um processo indutivo	Qualitativo	Estudo de caso; Pesquisa-ação
Quanto à possibilidade de generalização	O resultado da pesquisa visa viabilizar o estudo do objeto em etapas posteriores do trabalho	Qualitativo	Estudo de caso
Quanto ao tipo de questão de pesquisa	Responde a uma questão de pesquisa do tipo “Por quê?”	Quantitativo Qualitativo	Experimental; Estudo de caso; Pesquisa-ação
Quanto à manipulação das variáveis	Não é possível nem desejável	Quantitativo Qualitativo	“Survey”; Estudo de caso; Pesquisa-ação
Quanto à contemporaneidade	O estudo trata sobre um objeto atual	Quantitativo Qualitativo	“Survey”; Experimental; Estudo de caso; Pesquisa-ação

A segunda questão de pesquisa mostra uma predominância da abordagem qualitativa como método amplo. Quanto aos procedimentos de pesquisa, o estudo de caso mostrou-se mais apto a ser empregado em todos os critérios analisados, se adequando perfeitamente às características da pesquisa analisada. A definição das unidades de análise será realizada via análise das respostas à primeira questão da pesquisa, pretendendo-se escolher uma fundição de mercado que mais se adeque às

características desejadas. Quanto ao instrumento de pesquisa, a observação estruturada, em uma primeira análise, parece se mostrar mais adequado para a confecção de um modelo do objeto de estudo.

2.8.8 Estratégia para abordar a terceira questão de pesquisa

Com esta questão de pesquisa pretende-se saber se o corpo de conhecimento existente em controle da produção poderá fornecer soluções viáveis à área operacional de ambientes produtivos complexos, quando aplicados sob a forma de um sistema de apoio à decisão, particularmente, no que se refere este trabalho, ao processo de elaboração da programação da produção em fundições de mercado.

Para isto, uma revisão sobre o processo de apoio decisório em ambientes operacionais deverá ser realizada em conjunto com uma contextualização das principais atividades para controle da produção, visando criar direcionadores para uma aplicação efetiva de sistemas de apoio à decisão à área operacional de ambientes complexos, para isto, será importante analisar os trabalhos existentes sobre a aplicação de sistemas de apoio à decisão para controle da produção, visando contribuir com a proposta destes direcionadores. Desta forma, será empreendida uma pesquisa teórico-conceitual envolvendo estas áreas do conhecimento.

2.8.9 Estratégia para abordar a questão principal de pesquisa

A resposta da questão principal irá prover os resultados realmente esperados para este trabalho. Esta questão possui por objetivo apresentar soluções efetivas para o processo de elaboração da programação da produção em fundições de mercado, através da definição das características e funcionalidades de um sistema de apoio à decisão para esta finalidade e somente deverá ser respondida caso as questões anteriores sejam satisfatórias.

Para que a efetividade do sistema proposto possa ser avaliada, será necessária a proposta e desenvolvimento do referido sistema, para que o mesmo possa ser aplicado aos testes devidos. Para isto, uma vez desenvolvido o sistema, o mesmo poderia ser analisado em laboratório específico, por meio da simulação do objeto de estudo, tornando possível uma validação inicial que poderia ser posteriormente analisada sua adequação no ambiente de produção real das fundições de mercado. A análise das características desta questão de pesquisa é apresentada na *tabela 2.3*.

TABELA 2.3: Análise das características da questão principal de pesquisa

Critério	Característica da Pesquisa	Método amplo mais indicado	Procedimento mais indicado
Quanto à natureza da realidade da pesquisa	Como as necessidades do objeto de estudo são conhecidas, pretende-se ter objetividade nos resultados obtidos	Quantitativo	“Survey”; Experimental
Quanto ao propósito da pesquisa	Explanatória – Tem por objetivo estudar e conhecer os eventos, regras, padrões que causam o fenômeno observado e como estes fatores se interagem para que isto aconteça, propondo uma solução	Quantitativo Qualitativo	“Survey”; Estudo de caso; Pesquisa-ação
Quanto à necessidade da presença do pesquisador	Será necessário a presença do pesquisador	Quantitativo Qualitativo	Experimental; Estudo de caso; Pesquisa-ação
Quanto à necessidade da percepção dos envolvidos no estudo	Não terá pessoas envolvidas no estudo	Quantitativo	“Survey”; Experimental
Quanto às limitações das fronteiras do objeto de estudo	As fronteiras do estudo são conhecidas, via análise prévia dos estudos anteriores	Quantitativo	“Survey”; Experimental
Quanto ao relacionamento do pesquisador com o objeto de estudo	O pesquisador irá se relacionar com o sistema a ser estudado, visando comprovar o seu funcionamento	Quantitativo Qualitativo	Experimental; Estudo de caso; Pesquisa-ação
Quanto à influência do pesquisador nos resultados	O pesquisador não deve exercer influência no sistema a ser estudado,	Quantitativo Qualitativo	“Survey”; Experimental; Estudo de caso
Quanto à dependência ao contexto estudado	O estudo deverá ser independente do contexto	Quantitativo	“Survey”; Experimental
Quanto à linguagem utilizada na pesquisa	Deverá buscar a formalidade, criando uma definição clara do sistema estudado	Quantitativo	“Survey”; Experimental
Quanto à quantificação das variáveis	Visa quantificar as variáveis	Quantitativo Qualitativo	“Survey”; Experimental; Estudo de caso; Pesquisa-ação
Quanto a elucidar relações causais entre as variáveis	Visa definir com clareza as relações de causa e efeito no sistema a ser estudado	Quantitativo Qualitativo	“Survey”; Experimental; Estudo de caso; Pesquisa-ação
Quanto à população do universo a ser considerada	Considerando os testes a serem analisados, poderá se definir uma amostra estatística dos mesmos	Quantitativo Qualitativo	“Survey”; Experimental; Estudo de caso; Pesquisa-ação
Quanto à aplicação de inferência estatística	Poderá ser realizada a análise estatística	Quantitativo	Experimental
Quanto aos métodos amplos de pesquisa	Tem-se por objetivo a definição de hipóteses, a partir da análise da problemática, por um processo dedutivo	Quantitativo	“Survey”; Experimental
Quanto à possibilidade de generalização	Tem por objetivo a generalização analítica somente para a gama de testes considerados	Qualitativo	Estudo de caso; Pesquisa-ação
Quanto ao tipo de questão de pesquisa	Responde a uma questão de pesquisa do tipo “Como”	Quantitativo Qualitativo	Experimental; Estudo de caso; Pesquisa-ação
Quanto à manipulação das variáveis	É possível e desejável	Quantitativo	Experimental
Quanto à contemporaneidade	O estudo trata sobre um objeto atual	Quantitativo Qualitativo	“Survey”; Experimental; Estudo de caso; Pesquisa-ação

A solução da questão principal de pesquisa apesar de apresentar várias características da abordagem quantitativa e também da qualitativa, apresenta uma predominância da abordagem quantitativa. Quanto ao procedimento de pesquisa é possível avaliar um direcionamento tanto para o procedimento experimental como para também para a realização de um “survey”.

Desta forma, será realizado inicialmente o emprego do procedimento experimental para a definição e testes do sistema de apoio à decisão proposto e dos modelos decisórios desenvolvidos, podendo-se valer de métodos quantitativos para quantificar estas análises, garantindo também a replicação dos experimentos realizados. Em um segundo momento, visando avaliar a adequação do sistema proposto e dos resultados experimentais obtidos, será realizado um “*survey*” envolvendo as fundições de mercado mais significativas do interior do estado de São Paulo, possibilitando analisar a adequação do sistema proposto à realidade deste setor industrial.

2.9 Conclusão

A consideração sobre as possibilidades de pesquisa em Engenharia de Produção, por meio da análise de trabalhos publicados e também o estudo das metodologias de pesquisa existentes e aplicáveis na área, foi fundamental para a definição deste projeto metodológico, criando novas oportunidades à medida que diferentes abordagens metodológicas eram analisadas. Isto tornou possível que a ação para abordar o problema da pesquisa, que em um primeiro instante se mostrava nebulosa, pôde ser analisada racionalmente, aflorando estratégias de abordagem e condução da pesquisa, fazendo com que se economize consideráveis esforços no momento da condução do trabalho.

Por fim, a realização deste estudo contribuiu significativamente com a própria essência de entender e realizar ciência, adicionando o rigor imprescindível em qualquer trabalho científico e aproximando o trabalho à garantia da aplicação e replicação futura.

3 FUNDIÇÕES DE MERCADO

3.1 Introdução

O setor industrial de fundição de metais é responsável pela produção de peças e artefatos de metais ferrosos, aço e também ligas de metais não-ferrosos. Este tipo de empresa se situa em uma posição intermediária no setor produtivo fornecendo peças e artefatos metálicos para a indústria em geral e possuindo grande importância na cadeia produtiva como um todo. Resumidamente, o processo produtivo deste setor é composto pela fusão dos metais descritos anteriormente com a intenção de obter um certo produto dentro de características estabelecidas. Uma vez fundidos estes metais são vazados no interior de moldes de acordo com a peça que se deseja obter. A confecção dos moldes também é um processo importante e, na sua maioria, são confeccionados com areias especiais aglomeradas com resinas específicas. As peças fundidas, por fim, são submetidas em geral a um processo de usinagem ou forjamento.

Estudos da Associação Norte Americana de Fundidos Metálicos “*CMC – Cast Metal Coalition*” (CMC, 1998) revelam que 90% de todo produto manufaturado contém algum tipo de fundido metálico, assim como 100% de toda maquinaria, este fato reforça a importância do setor e também a competitividade existente, pois fornecedores de fundidos metálicos concorrem não só entre fundidos similares, mas também com fundidos de outros metais, ou fundidos fabricados com outras técnicas e também peças não metálicas, produzidas a partir de diversos tipos de materiais. “... Neste ambiente dinâmico, mercados existentes para fundidos estão mudando e novos mercados estão emergindo. Para permanecerem competitivas nestas condições, as indústrias de fundição devem continuar a desenvolver técnicas para melhorar os produtos e processos que oferecem aos seus clientes.” (CMC, 1998:1).

A análise do setor, além de ressaltar a intensa competição existente, traz a tona um segmento empresarial constituído em sua maioria de pequenas empresas, com produtos que possuem relativamente um baixo valor adicionado e, conseqüentemente, uma baixa margem de contribuição, limitando em demasiado o investimento em pesquisas e desenvolvimento (CMC, 1998). Em contrapartida, a tecnologia representa um importante fator na diminuição dos custos de produção, melhoria da eficiência

energética, da qualidade, assim como para a criação de novos produtos. Pode-se facilmente perceber as sérias dificuldades na qual se encontra este segmento industrial, de forma que, somente uma soma combinada de recursos e talentos na indústria, governo e universidades, poderão criar soluções realmente efetivas para as fundições de metais (CMC, 1998).

3.2 Panorama Mundial Do Setor De Fundições

Em uma análise mundial, os EUA apresentam os maiores desenvolvimentos na área, assim como uma visão de longo prazo para o setor. Em setembro de 1995 a indústria americana de fundidos publicou, em conjunto com diversos órgãos governamentais e não governamentais assim como laboratórios de pesquisa, um guia para orientar pesquisas e desenvolvimentos, visando aumentar a produtividade, eficiência e a competitividade na área, o qual está em constante adequação. O guia *“Beyond 2000: A vision for the American Metalcasting Industry”* como ficou conhecido, tem por objetivo garantir que o setor tenha a visão de futuro necessária para alcançar com eficácia o ano 2020 (CMC, 1998).

O interesse americano no setor pode ser facilmente justificado quando se estuda a importância desta indústria para o mercado deste país. Existem atualmente 2950 fundições no EUA, com uma capacidade produtiva anual de 17,7 milhões de toneladas, tornando o país o maior produtor mundial de fundidos, empregando 225.000 pessoas. Os dados americanos apontam a característica do setor em se organizar em pequenas e médias indústrias, 80% das fundições americanas empregam menos que 100 pessoas, 14% empregam de 100 a 250 e 6% mais que 250 pessoas (MCAR, 2000).

No Brasil, fatores como a abundante ocorrência de sucata, minerais e a grande disponibilidade energética e de insumos contribuíram para a formação da indústria de fundição atual. Segundo informações do Ministério de Minas e Energia do Brasil o setor nacional de fundição é composto por aproximadamente 1000 empresas, e produziu em 1998, 1,5 milhão de toneladas, sendo o 9º ou 10º produtor mundial, empregando 37.783 pessoas (MME, 2000). Dados da Associação Brasileira de Fundição (ABIFA) relatam que aproximadamente 90% do setor é composto de pequenas e médias indústrias, com concentração acentuada na região sudeste do país (BNDES, 1996). Na *figura 3.1* pode-se analisar melhor a produção mundial de fundidos.

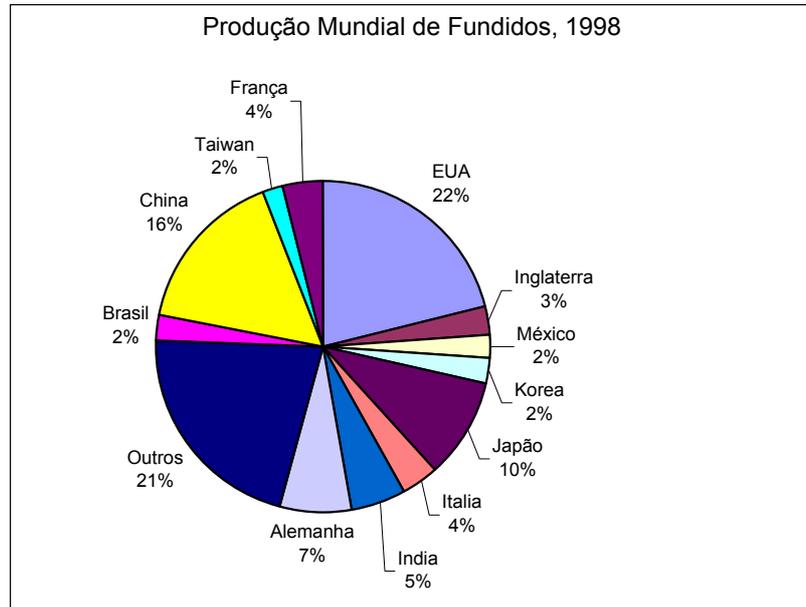


FIGURA 3.1: Fonte “33º Census of World Casting Production – 1998” (Fonte: MCAR, 2000)

Ainda sobre os desenvolvimentos no setor de fundição, o guia “*Beyond 2000*” diz o quê deve ser feito, mas não diz como pode ser feito. Nos EUA, em junho de 1997, diversos órgãos interessados no setor reuniram especialistas da área, clientes, pesquisadores e laboratórios de pesquisa, visando identificar as reais oportunidades, barreiras tecnológicas e as prioridades existentes neste tipo de indústria. Como resultado, o relatório “*Metalcasting Industry Technology Roadmap*”, resultou em mais de 100 idéias de pesquisa, agrupadas de acordo com o nível de prioridade industrial e a seção específica de aplicação. Este “*Roadmap*” abordou para cada seção de aplicação a situação atual, assim como as características críticas e as forças que influenciam as mesmas, as tecnologias e barreiras que devem ser ultrapassadas e as pesquisas recomendadas para o setor. Sendo que, atualmente, está dividido nas seguintes seções de pesquisa (CMC, 1998):

- Produtos e mercados: visa reconquistar os mercados perdidos, além de consolidar os mercados atuais e aumentar a taxa de crescimento de novos mercados;
- Tecnologia de materiais: visa aumentar a variedade, integridade e a performance de produtos fundidos;
- Tecnologia de manufatura: visa aumentar a produtividade, reduzir os tempos de produção envolvidos e também reduzir o consumo de energia; e

- Tecnologia ambiental: visa alcançar índices de reciclagem total e reduzir a poluição causada por fundições.

Seções adicionais de prioridades em pesquisas são: Recursos humanos (Principalmente quanto a atrair talentos para as fundições); Estudos de viabilidades e investimentos; Desenvolvimento de Parceiros e colaboradores.

Em relação às fundições nacionais este estudo pode servir como um guia inicial para se perceber as reais necessidades de desenvolvimento do setor. Dentre alguns estudos das fundições brasileiras, quando se comparam os índices de produtividade nacionais aos estrangeiros, percebe-se um dos maiores desequilíbrios. Enquanto no Japão são gastos entre 8 e 12 hh/t/ano¹, nos EUA e Alemanha entre 12 a 15 hh/t/anos e na Espanha 15 a 18 hh/t/ano, no Brasil é registrado o índice de 30 a 45 hh/t/ano (BNDES, 1996). Este índice direciona as atenções da indústria de fundição nacional, em relação ao guia “*Beyond 2000*”, para investimentos na seção de “*Tecnologia de manufatura*”.

Este trabalho irá se concentrar especificamente na seção de “*Tecnologia de manufatura*”, indo ao encontro das expectativas nacionais, por se tratar de um dos setores mais ávidos por investimentos na indústria brasileira de fundição. Analisando mais detalhadamente as fundições nacionais, percebe-se que, apesar da baixa produtividade, o setor se sustenta devido a algumas vantagens existentes como: baixos custos de energia elétrica, matérias primas e mão de obra. Estas vantagens contrabalançam os baixíssimos índices de produtividade e possibilita ao Brasil experimentar, no geral, um aumento nos níveis de exportação de materiais fundidos, como pode ser conferido na *tabela 3.1*.

TABELA 3.1: “Evolução das exportações em fundidos (em US\$ mil) (Fonte: BNDES (1996))

Ano	Ferro	Aço	Não-Ferrosos	Total
1990	137.258,4	22.719,3	19.793,2	179.770,9
1991	132.832,0	28.059,3	36.299,2	197.190,5
1992	115.439,1	28.904,9	38.611,4	182.955,4
1993	138.790,7	24.312,0	58.660,2	221.762,9
1994	158.329,0	29.869,0	60.003,2	248.201,2
1995	185.896,9	38.078,8	53.295,2	277.270,9

¹ homens-hora por tonelada de peças por ano

Para que o Brasil experimente um avanço realmente considerável nos níveis de exportação e uma maior participação no mercado mundial, possibilitando o desenvolvimento do setor de fundição, gerando empregos e também consolidando o Brasil no mercado mundial de fundidos, é necessário que os índices de produtividade se aproximem o mais possível aos índices internacionais, além de investimentos em qualidade e modernização. Para que se possa compreender melhor o que pode ser feito, é necessária a análise pormenorizada da situação corrente da indústria de fundição, quanto às tecnologias de manufatura, no Brasil e no mundo.

3.3 Situação Corrente Do Setor De Fundições

O processo de manufatura da indústria de fundição possui uma grande variedade de configurações, variando desde o tipo de molde utilizado, por exemplo, fundição em moldes de areia, fundições em moldes permanentes, fundição em moldes "Shell", entre outros, até o tipo de processo, liga de metais, acabamento necessário e tecnologia de fundição empregada. Este estudo irá se concentrar nas possibilidades existentes em termos de processos, mais especificamente na programação da produção, não se prendendo em divisões mais específicas. Para isto, o setor das fundições será dividido em dois tipos mais gerais, que neste trabalho iremos designar de "*fundições cativas*" e "*fundições de mercado*"; o objetivo desta divisão é poder concentrar os esforços no tipo de fundição que mais apresenta dificuldades dentro da seção de "*Tecnologia de manufatura*", este fato é esclarecido a seguir.

As "*fundições cativas*" são aquelas que apresentam uma reduzida variedade de produtos finais e a sua produção é dirigida a um único cliente ou a alguns poucos clientes. Neste tipo de fundição visa-se a produção em massa através de uma organização do ambiente de produção orientado por produto, seguindo o esquema de produção também conhecido como "*Flow-shop*". Neste tipo de fundição, devido à sua característica produtiva, o processo de produção se apresenta mais simplificado e consecutivamente, com maiores facilidades para a obtenção de índices aceitáveis de produtividade.

No outro extremo, as "*fundições de mercado*" são aquelas na qual a variedade de produtos finais é demasiadamente alta, assim como, o número de clientes. A produção é dirigida ao mercado, sendo sujeita ao dinamismo do mesmo, este tipo de

fundição geralmente possui uma organização do ambiente de produção orientado por processo, e segue o esquema produtivo do tipo “*Job-Shop*” (BLAZEWICZ, 1996) (JAIN, 1999). Os fatores que influenciam o processo de manufatura das fundições como: “*leadtime*”, programação da produção, qualidade, projeto e construção de moldes, entre outros, são bem mais acentuados neste tipo de indústria, apresentando uma inerente complexidade e dificultando a obtenção de índices de produtividade elevados.

O relatório americano “*Metalcasting Industry Technology Roadmap*”, procura dividir os fatores que influenciam os processos de fundição, para cada seção, em áreas específicas de estudo. A seguir é resumido cada área de estudo para a seção de tecnologia de manufatura (CMC, 1998):

- Redução do “*leadtime*”: este fator envolve principalmente as fundições de mercado, sendo que, avanços nesta área podem representar grandes possibilidades de novos mercados;
- Produtividade: pode-se afirmar como um dos fatores mais importantes que afetam a competitividade do setor industrial da fundição, ainda mais, considerando que existe uma capacidade produtiva mundial maior que o mercado necessita;
- Qualidade: a melhoria da qualidade dos produtos fundidos deve ser alcançada como um todo, visando aumentar a competitividade do setor;
- Eficiência energética: o setor de fundições é um grande consumidor energético, pois utiliza energia em suas principais operações. Uma melhor eficiência do processo de consumo de energia conduzirá a uma redução considerável do custo dos produtos finais, além de maior conformidade com os requisitos de proteção ambiental; e
- Processos novos ou alternativos: o desenvolvimento de novos ou alternativos processos de produção de fundidos, trará consigo novos produtos e oportunidades para as fundições.

O “*Roadmap*” aponta ainda diversas sub-áreas, para as áreas citadas, com maiores prioridades de desenvolvimento e pesquisas, visando atender aos fatores abordados anteriormente, como descrito a seguir (CMC, 1998):

- Desenvolvimento de tecnologias para o rápido desenvolvimento de moldes a um baixo custo;
- Melhorar o projeto de moldes para reduzir o tempo total de entrega do fundido;

- Desenvolvimento de processos de construção de moldes de areia mais acurados e a um custo mais efetivo;
- Desenvolvimento de controle e sensores para a supervisão automática da produção;
- Desenvolvimento de uma metodologia ou sistema para realizar a programação e acompanhamento da produção;
- Melhoria do processo de preenchimento dos moldes;
- Desenvolvimento de tecnologias que livre o processo de vazamento da introdução de gases nos fundidos; e
- Desenvolvimento de modelos matemáticos para melhorar o controle de processos e o controle de máquinas.

A análise detalhada das sub-áreas de pesquisas apontadas para o setor de fundição norte-americano, proporciona um direcionador inicial para guiar os desenvolvimentos e trabalhos no setor de fundição nacional. Os envolvidos com a elaboração deste “*Roadmap*” tiveram o cuidado também de analisar as urgências destes investimentos, detalhando cada sub-área em pesquisas distintas. Dentre as sub-áreas selecionadas como de urgência maior estão, entre outras, desenvolvimentos em programação e acompanhamento da produção (CMC, 1998). Estes direcionadores vem ao encontro das expectativas deste trabalho, uma vez que se acredita que, as fundições nacionais possuem na programação da produção uma de suas áreas mais problemáticas e que, desenvolvimentos neste campo, poderão proporcionar um grande impacto no aumento da produtividade das indústrias brasileiras de fundição.

O relatório norte-americano anual de desenvolvimentos no setor de fundição do ano de 1999 “*Metal Casting Annual Report*” (MCAR, 2000), relaciona os principais projetos de pesquisa que já estão sendo desenvolvidos, divididos pelas seções de desenvolvimento abordado anteriormente dentro de cada área e sub-área, estas pesquisas estão sendo conduzidas em sua maioria por um esforço conjunto entre o setor público, privado e universidades e visam atingir os objetivos de desenvolvimento do guia “*Beyond 2000: A vision for the American Metalcasting Industry*” (MCAR, 2000).

Os esforços descritos reforçam a necessidade de investimentos em pesquisas e trabalhos em controle da produção para fundições, uma vez que, as grandes particularidades do controle da produção deste setor, envolvendo desde projeto e análise de moldes, engenharia simultânea, otimização da reserva de espaço para a secagem e

tratamento das peças, entre outros, justificam a dificuldade que as fundições encontram ao procurar por sistemas computacionais comerciais para este fim (HENSHELL, 1996).

Dentre as pesquisas existentes para este fim, pode-se citar um trabalho realizado na Índia, onde a partir de um “*survey*” direcionado a 500 fundições, procurou-se levantar os principais problemas do setor naquele país e justificar o estudo e aplicação de um projeto piloto de re-engenharia, visando o uso mais efetivo da tecnologia da informação (SHIVAPPA & BABU, 1997).

Pode-se relatar também o trabalho desenvolvido por JARDIM (1982). Neste trabalho, o autor realizou uma ênfase maior no processo de elaboração do planejamento e organização da produção. Para isto, tomou como base os pedidos realizados, não sendo considerada uma metodologia para programação da produção, se limitando à utilização de um sistema computacional que calculava índices produtivos, possibilitando também a avaliação de regras de liberação de ordens.

A programação da produção em fundições também foi tratada por VIANNA & ARENALES (1995), apesar dos autores não considerarem as fundições de mercado e sim o problema de uma fundição automatizada que fabrica peças pré-definidas. Neste trabalho, os autores desenvolveram um modelo de programação linear inteira mista para a obtenção desta programação. VIANNA & ARENALES (1995) através da hibridização de um modelo de transporte com heurísticas, conseguiram a solução do modelo em um tempo razoável.

ARAUJO & ARENALES (2003) também propuseram um trabalho para programação da produção de uma fundição automatizada, que possui apenas um forno em operação por período e várias máquinas de moldagem. Neste trabalho foi proposto um modelo de dimensionamento de lotes monoestágio, com restrições de capacidade, consideração de máquinas paralelas e múltiplos itens.

Um trabalho sobre a programação da produção de lingotes metálicos em uma fundição pode ser encontrado em PACCIARELLI & PRANZO (2004). Neste trabalho os autores empregaram um método de busca em árvore para encontrar a solução do problema de programação.

Relativamente às fundições de mercado, pode-se citar o trabalho realizado no Brasil, para programação dos fornos, proposto por SILVA (2001). Neste trabalho, emprega-se um modelo com base em uma heurística “gulosa” de aspiração de

demanda em conjunto com um modelo baseado no problema da mochila para determinar quais combinações de peças, para cada liga, criará uma programação da produção mais eficiente, respeitando as restrições de carga de forno da indústria considerada (SILVA, 2001).

O trabalho proposto por SILVA (2001) se restringe à programação das corridas dos fornos, não realizando a consideração das operações produtivas, fornecendo, para o horizonte de um dia, a programação das corridas de fornos e das peças que irão constituir cada corrida, considerando uma melhor utilização dos fornos. Para validação do modelo proposto, foi feita uma comparação entre as programações de corridas que foram efetivamente realizadas pelos encarregados de produção da empresa considerada, com as que seriam programadas pelo modelo, caso o mesmo fosse empregado. Nos testes realizados, o modelo proposto, apresentou, melhores aproveitamentos dos recursos produtivos, no caso, as corridas dos fornos de fundição.

Outro trabalho envolvendo a programação da produção em fundições de mercado foi publicado por VOORHIS, PETERS & JOHNSON (2001). Este trabalho se fundamentou na dificuldade das fundições de mercado em realizar a programação da produção, onde, tomando por base um “*survey*” realizado em várias fundições americanas pôde-se constatar que a grande maioria das fundições analisadas ou realizavam a programação da produção manualmente, ou utilizava sistemas computacionais que não consideravam as restrições reais do ambiente produtivo. Os autores citam também o fato da teoria existente para controle da produção requerer demasiada informação para ser operacionalizada em um ambiente produtivo deste tipo, mais do que dispõem as fundições de mercado.

O trabalho proposto por VOORHIS, PETERS & JOHNSON (2001) utiliza uma formulação com base em um modelo de programação inteira, considerando, como apregoam os autores, a maior parte das restrições existentes na programação da produção em fundições de mercado, inclusive as operações produtivas de moldagem e acabamento. Devido à natureza combinatorial do problema, os autores propuseram algumas heurísticas que fornecem resultados em tempos aplicáveis. Os autores também chamam a atenção sobre o tempo envolvido para a resolução de problemas de programação da produção considerando grande número de variáveis, pois o mesmo pode não ser viável.

3.4 Avaliação Das Fundições De Mercado Do Interior Do Estado De São Paulo

A avaliação das fundições de mercado do interior de São Paulo fornecem as informações necessárias para avaliar no Brasil o que defende o relatório americano “*Beyond 2000: A vision for the American Metalcasting Industry*” (MCAR, 2000). A avaliação detalhada do setor nacional de fundições é fundamental para que se possa produzir resultados aplicáveis às principais necessidades das indústrias. Para isto, foi elaborado e aplicado um questionário estruturado sobre várias características que se desejam conhecer sobre as fundições de mercado, principalmente sobre o planejamento e controle da produção destas indústrias. Este questionário estruturado fez parte de um “*survey*” aplicado nas fundições que trabalham sob encomenda no interior do estado de São Paulo, contendo informações pertinentes ao ambiente produtivo deste setor. A elaboração e aplicação deste questionário foi parte de uma pesquisa de iniciação científica relacionada com o projeto desta tese sendo realizada por FERNANDES & LEITE (2002).

No guia da Associação Brasileira das Indústrias de Fundição (ABIFA) de 1999, existem catalogadas 101 fundições para o interior de São Paulo, destas 51 são pequenas e médias² fundições de mercado. Outras 10 fundições, não catalogadas pela ABIFA, com estas características foram localizadas também no interior de São Paulo totalizando a população considerada em 61 indústrias.

Devido às limitações de tempo e recursos da referida pesquisa, a amostra teve que se restringir a 30 fundições, apesar disto, como relata FERNANDES & LEITE (2002), acredita-se que a amostra considerada represente bem o setor estudado³.

A seguir algumas informações importantes do “*survey*” aplicado como descrito por FERNANDES & LEITE (2002). Com base na *tabela 3.2* é possível ter uma visão do número de trabalhadores na maioria das empresas pesquisadas.

² Foi considerado pequena e média a indústria com no mínimo 10 funcionários e no máximo 250

³ Quando se possuem populações pequenas, para que se obtenha uma generalização estatística, é conveniente que se utilize, na amostragem, toda a população, ou uma boa parte dela

TABELA 3.2: Faixa de número de trabalhadores das empresas (Fonte: FERNANDES & LEITE (2002))

Faixa de no. Total de Trabalhadores	% de empresas
De 10 a 20	30,00
De 20 a 50	43,34
De 50 a 100	13,33
De 100 a 250	13,33

A análise da *tabela 3.2* revela que a grande maioria das empresas possuem até 50 trabalhadores (73,34%) e, tomando por base a *tabela 3.3*, é possível constatar que mais da metade das indústrias pesquisadas possuem um faturamento anual menor que R\$ 1 milhão.

TABELA 3.3: Faixa de faturamento das empresas (Fonte: FERNANDES & LEITE (2002))

Faixa de faturamento durante 1998	% de empresas
Menor que R\$ 1 milhão	53,33
Entre R\$ 1 e 5 milhões	36,67
Entre R\$ 5 e 20 milhões	10,00

Quanto ao tipo de produção, os autores procuraram avaliar o tamanho médio dos lotes de produção, que, como se imaginava, a maioria das indústrias pesquisadas trabalha com lotes pequenos e com uma grande diversidade de produtos, como pode ser verificado na *tabela 3.4*. Este fato aumenta a complexidade do controle da produção destas indústrias.

TABELA 3.4: Tamanho médio de lote das empresas (Fonte: FERNANDES & LEITE (2002))

Faixa de Tamanho Médio de Lote	% das linhas de produtos
Unitário	05,88
De 2 a 100	68,33
De 101 a 1000	21,57
Acima de 1000	03,92

Os autores levantaram também que 73,3% das indústrias pesquisadas possuem interesse em automação industrial e 80% estão interessadas em sistemas informatizados para gestão da produção. Dentre as barreiras atuais existentes para estes investimentos as empresas justificaram a falta de recursos financeiros (76,7%), a perspectiva de crescimento da economia (43,3%), o volume de produção (46,7%), o nível tecnológico do mercado concorrencial (23,3%), a qualidade da mão de obra (23,3%) e a necessidade de mais informações sobre o assunto (10%). A pesquisa

constatou que apesar do elevado interesse por automação/sistemas informatizados de gestão, é baixo o nível atual de investimentos nesta área.

Segundo FERNANDES & LEITE (2002), cada uma das empresas pesquisadas apontou os seus principais problemas e necessidades da área de produção. Várias dezenas de problemas e necessidades foram levantadas e agrupadas em seis classes distintas de acordo com a *tabela 3.5*. Como pode ser visto na referida tabela, 30% das empresas apontaram os problemas relativos ao planejamento e controle da produção entre seus principais problemas.

TABELA 3.5: Principais problemas e necessidades relativos à produção (Fonte: FERNANDES & LEITE (2002))

Tipos de problemas e necessidades	% de empresa
Treinamento e produtividade da mão-de-obra	36,67
Equipamentos e problemas do processo de fabricação	66,67
Instalações industriais	13,33
Planejamento e controle da produção	30,00
Qualidade	30,00
Suprimentos	16,67

Visando classificar as indústrias estudadas por linha de produtos foi realizada uma divisão dos produtos em três linhas: Linha A, Linha B e Linha C, sendo que a importância dos produtos para o faturamento da empresa decresce da Linha A para a C. Na Linha A se destaca o ferro como principal liga dos produtos (56,67%), na Linha B se destaca o aço (60%) e na Linha C se destaca o Alumínio (33,32%).

De forma geral as indústrias avaliadas desejam aumentar seus fatores de competitividade, para isto, foram avaliados os principais fatores de competitividade para este tipo de indústria, a importância relativa do fator⁴ e a força atual da empresa para o mesmo fator. Estes dados estão tabulados na *tabela 3.6* de acordo com cada linha de produto.

⁴ Visando avaliações estatísticas foi definido uma medida absoluta de importância para cada fator, variando de 1 a 5

TABELA 3.6: Valores médios para a importância e força dos fatores de competitividade (Fonte: FERNANDES & LEITE (2002))

Fator de competitividade:	Linha A		Linha B		Linha C		Diferença entre importância e força		
	Importância	Força atual	Importância	Força atual	Importância	Força atual	Linha A	Linha B	Linha C
Custos diretos de produção	4,27	3,53	4,33	3,47	4,00	3,17	0,73	0,87	0,83
Custos indiretos de produção	4,07	3,20	4,40	3,27	3,83	3,33	0,87	1,13	0,50
Flexibilidade do processo para produzir novos produtos	4,20	3,63	4,07	3,60	4,00	3,50	0,57	0,47	0,50
Flexibilidade do processo para variar o volume de produção de cada produto	3,87	3,67	3,87	3,53	4,17	3,50	0,20	0,33	0,67
Qualidade do produto segundo as especificações do cliente	4,70	4,13	4,87	4,20	5,00	4,33	0,57	0,67	0,67
Atendimento dos prazos de entrega estipulados pelo cliente	4,67	4,03	4,73	3,93	4,83	4,00	0,63	0,80	0,83
Rápido atendimento de pedidos urgentes	4,67	4,20	4,73	4,20	4,67	4,00	0,47	0,53	0,67
Serviços de pós-venda	3,67	3,50	3,87	3,60	3,67	3,33	0,17	0,27	0,33

Para o tipo de indústria estudado é importante a qualidade do produto fundido segundo as especificações do cliente, o atendimento dos prazos de entrega estipulados pelo cliente e o rápido atendimento de pedidos urgentes, sendo que, o atendimento dos prazos é o que mais deve ser melhorado.

A *tabela 3.7* procura identificar os índices ou medidas de desempenho mais importantes para as empresas e se as mesmas mantêm registros formais informatizados ou algum outro tipo de registro para estas medidas.

TABELA 3.7: Medidas de acompanhamento do desempenho apontado pelas empresas (Fonte: FERNANDES & LEITE (2002))

Medida de Acompanhamento	Import. Média	Registro formal + informal (%)	Tem Registro formal (%)	Está Informa-tizado (%)	Tem Registro Informal (%)
Custo de mão de obra direta	4,57	96,67	96,67	66,67	0,00
Custo de materiais	4,53	96,67	96,67	66,67	0,00
Índice de refugo	4,53	76,67	63,33	46,67	13,33
Volume de produção	4,50	100,00	96,67	70,00	3,33
% de atendimento dos prazos de entrega	4,47	83,33	56,67	33,33	26,67
Índice de devolução de produtos	4,37	90,00	73,33	40,00	16,67
Custo da energia	4,20	93,33	90,00	63,33	3,33
Utilização da mão-de-obra	4,20	86,67	70,00	26,67	16,67
Estoques de matérias primas	4,17	96,67	83,33	53,33	13,33
Índice de reclamações referente à qualidade do produto	4,13	70,00	33,33	13,33	36,67
Índice de retrabalho	3,90	50,00	30,00	13,33	20,00
Utilização de equipamentos	3,87	76,67	53,33	13,33	23,33
Índice de reclamações por não atendimento dos prazos de entrega	3,83	66,67	20,00	6,67	46,67
Índice de quebra de equipamentos	3,67	63,33	30,00	10,00	33,33
Tempo de processamento	3,63	73,33	43,33	20,00	30,00
Índice de reclamações referente à assistência técnica	3,57	50,00	16,67	10,00	33,33
Estoques em processo	3,50	80,00	63,33	43,33	16,67
Estoques de produtos acabados	3,10	66,67	53,33	30,00	13,33
Tempo de preparação de máquina	2,70	36,67	13,33	3,33	23,33

As *tabelas 3.8 e 3.9* apontam os projetos de melhorias implantados ou que despertam interesse na implantação, para as indústrias estudadas, assim como a avaliação da importância média do projeto.

TABELA 3.8: Projetos de Melhoria apontados pelas empresas (Fonte: FERNANDES & LEITE (2002))

Projeto de melhoria	Importância média	% Gostariam apoio	% Não implantará	Manual		Informatizado	
				% Já implantado	% a implantar ou aperfeiçoar	% Já implantado	% a implantar ou aperfeiçoar
Melhoria na manufatura do fundido	4,50	46,67	0,00	76,67	6,67	10,00	33,33
Melhoria no projeto do fundido	4,43	46,67	0,00	70,00	6,67	10,00	33,33
Programação da produção visando redução de refugos	4,40	40,00	10,00	70,00	3,33	10,00	40,00
Programação da produção visando melhor cumprimento de prazos	4,37	40,00	3,33	70,00	3,33	13,33	40,00
Programação da produção visando fechar os pedidos para faturar (\$) o quanto antes	4,37	36,67	6,67	80,00	0,00	10,00	40,00
Implantação de roteiro de produção	4,07	43,33	13,33	53,33	10,00	6,67	43,33
Implantação de codificação de materiais	4,07	20,00	13,33	36,67	6,67	40,00	26,67
Planejamento da capacidade de produção de curto prazo	4,03	26,67	16,67	60,00	6,67	13,33	33,33
Previsão de vendas de curto prazo	4,00	23,33	26,67	36,67	6,67	23,33	23,33
Implantação de sistema de planejamento e controle da produção	3,97	23,33	6,67	53,33	3,33	30,00	43,33
Programação da produção para maximizar o volume de produção sujeito a restrições de espaço disponível	3,93	36,67	26,67	46,67	3,33	13,33	26,67
Programação da produção visando melhor utilização dos equipamentos para aumentar a produção	3,93	33,33	13,33	70,00	3,33	6,67	36,67
Implantação de sistema de compra de materiais	3,87	23,33	3,33	53,33	3,33	30,00	50,00
Programação da produção visando redução de consumo de energia	3,83	40,00	20,00	60,00	10,00	6,67	26,67
Planejamento da capacidade de produção de longo prazo	3,50	33,33	30,00	50,00	13,33	3,33	20,00

TABELA 3.9: Projetos de Melhoria apontados pelas empresas (Fonte: FERNANDES & LEITE (2002))

Projeto de melhoria	Importância média	% Gostariam apoio	% Não implantará	% Já implantado	% a implantar ou aperfeiçoar
Melhoria da qualidade dos produtos entregues aos clientes	4,60	53,33	3,33	83,33	60,00
Redução das taxas de refugo ou retrabalho para redução de custos	4,40	43,33	13,33	56,67	56,67
Implantar Gestão da Qualidade Total	4,13	46,67	33,33	23,33	53,33
Implantar ISO 9000	4,10	53,33	30,00	26,67	50,00
Implantação da Gestão de Processos	3,90	60,00	23,33	23,33	63,33
Software que defina as quantidades das matérias-primas para atingir a composição a um mínimo custo (problema da mistura)	3,73	40,00	43,33	13,33	46,67
Redução de estoques de matérias primas	3,67	26,67	20,00	56,67	30,00
Software para simulação de solidificação	3,63	56,67	53,33	0,00	46,67
Redução de estoques em processo	3,60	20,00	40,00	36,67	26,67
Implantação de Reengenharia de Processos de Negócio	3,30	46,67	63,33	3,33	36,67
Redução de estoques de produtos finais	3,23	16,67	36,67	46,67	20,00
Implantar equipamentos automatizados controlados por computador	2,97	26,67	66,67	3,33	30,00
Redução do número de fornecedores	2,90	20,00	40,00	40,00	33,33
Uso do sistema CAD para modelação	2,87	26,67	66,67	10,00	23,33
Prototipagem rápida	2,70	30,00	80,00	3,33	16,67
Aumento do número de fornecedores	2,63	13,33	60,00	3,33	36,67

A *tabela 3.8* mostra os projetos de melhoria diretamente relacionados com o planejamento e controle da produção, enquanto a *tabela 3.9* mostra outras necessidades de melhorias apontadas pelas empresas. De forma geral os projetos da *tabela 3.8* que serão implantados nas empresas serão na forma informatizada. Dentre os projetos de melhoria relativo ao planejamento e controle da produção que apresentaram maior importância média tem-se: a melhoria na manufatura do fundido e a melhoria no projeto do fundido. Estes projetos representam um grande aumento da produtividade das indústrias, justificando seu grande número de implantações e também as indústrias que pretendem implantá-lo em versões informatizadas.

A melhoria da programação da produção, objeto de estudo deste trabalho, obteve uma importância média relativamente alta, principalmente visando à redução de refugos e o cumprimento dos prazos, em detrimento à elaboração da programação da produção para maximizar o uso de equipamentos ou minimizar o consumo de energia, que obteve uma importância relativamente baixa. Quanto ao planejamento, as empresas pesquisadas apontaram como mais importante a melhoria na elaboração do

planejamento de curto prazo e da previsão de demanda. Estas informações justificam o estudo de um sistema para elaboração da programação da produção em fundições de mercado, visando propor alternativas eficazes para sanar as necessidades deste tipo de indústria.

Estas informações representam um breve resumo dos resultados obtidos por FERNANDES & LEITE (2002) através de um esforço conjunto com este estudo com o intuito de corroborar a primeira questão de pesquisa definida neste trabalho.

3.5 O controle Da Produção De Uma Fundição De Mercado

Uma vez respondida a primeira questão de pesquisa, este trabalho procurou, seguindo a estratégia de pesquisa definida, uma unidade de análise que fosse acessível e atendesse aos fatores necessários para o objeto de estudo definido. Na realização da primeira etapa de pesquisa (FERNANDES & LEITE, 2002), procurou-se avaliar, ainda que informalmente, o potencial das unidades analisadas em se adequarem às características desejadas para o objeto de estudo deste trabalho, viabilizando a execução da segunda etapa da pesquisa. Para isto, diversos fatores foram levados em consideração, como: localização, facilidade de acesso, interesse pelo trabalho, organização, entre outros. Dentre as fundições analisadas, a Engemasa, situada na cidade de São Carlos, foi a que melhor atendeu a estes requisitos.

A Engemasa possui uma considerável importância no setor nacional de fundidos. A empresa vem atuando também em outras áreas como aço forjado, tubos centrifugados e válvulas, mas devido à natureza deste trabalho somente a área industrial de produtos fundidos sob encomenda foi considerada. Seguindo a estratégia para a segunda questão de pesquisa, foi realizado um estudo de caso na Engemasa, envolvendo o ambiente de produção da empresa, em particular a elaboração da programação da produção. Os resultados deste estudo de caso serão apresentados a seguir.

A característica mais marcante relativamente ao controle da produção do setor das fundições de mercado, sem dúvida, é a diversidade dos produtos fabricados. Em função do tipo de material, peso, formato da peça, características físicas desejadas, teste de controle de qualidade requeridos e acabamentos finais, os trabalhos realizados e as operações de produção, assim como os tempos e as ações envolvidas nestas operações podem variar completamente.

Particularmente em relação às operações de produção existem variabilidades difíceis e até inviáveis de serem previstas. Por exemplo, peças que apresentam pequenos problemas de fabricação decorrente de fatores difíceis de rastrear, devem ser re-trabalhadas para corrigir o defeito, percorrendo uma nova seqüência de operações e competindo com outros produtos na linha de produção. Como a maior parte dos produtos fabricados são inéditos, a mensuração dos tempos envolvidos com as operações produtivas envolve incertezas e variabilidades difíceis de serem previstas. Diversas operações produtivas, devido à natureza das atividades realizadas, não podem ser automatizadas, como: corte, lixamento, solda, entre outros. Desta forma, é difícil realizar uma padronização de tempos ou até mesmo estimá-los.

Apesar desta diversidade de combinações, no geral, as indústrias de fundição voltadas ao mercado possuem as mesmas etapas básicas de fabricação, quais sejam:

- Moldagem: produzir moldes a partir de modelos fornecidos pelos clientes;
- Vazamento: Fundir ligas de metais e introduzi-las nos moldes; e,
- Acabamento: Retirar o sólido resultante dos moldes e separar a peça resultante dos anexos do processo de fundição, trabalhar as rebarbas e defeitos de fundição, além de realizar uma série de tratamentos físicos e controle de qualidade, e também, em alguns casos sofrer usinagem e/ou polimentos.

Os meios de produção e as tecnologias empregadas pelas fundições de mercado para realizar estas etapas variam significativamente de acordo com a indústria considerada e o grau de organização e desenvolvimento que a mesma se encontra. Particularmente na Engemasa, as etapas produtivas anteriormente descritas podem ser divididas nas seguintes operações de produção: Busca de modelos e preparação do projeto de fundição; Pré-moldagem; Moldagem final - fechamento; Vazamento; Desmoldagem; Cortes; Lixamentos e Soldas; Tratamentos térmicos; Controle de qualidade; e, Acabamento final.

É importante ressaltar que após a desmoldagem as operações podem não acontecer necessariamente nesta ordem para todos os produtos fabricados. Estas características adicionam uma complexidade inerente ao processo produtivo e ao controle da produção desta empresa. Este esquema produtivo é melhor visualizado na *figura 3.2*.

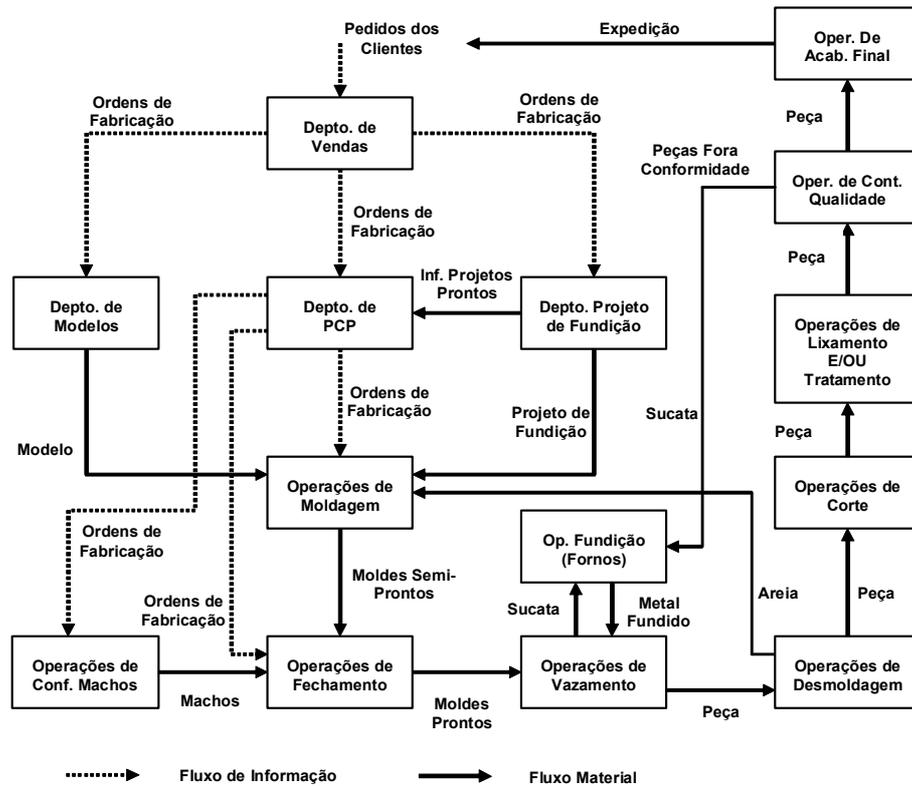


FIGURA 3.2: Visão geral do processo de produção em uma fundição de mercado

A seguir este processo de produção será descrito com mais detalhes.

3.5.1 Processo de vendas

Para se compreender o processo de fabricação da Engemasa este trabalho tomará como ponto de partida onde se origina um novo trabalho de produção, que nessa empresa é especificamente no departamento de vendas. Para isto, a Engemasa conta com um sistema de informação empresarial que gerencia todo o processo de vendas e a produção.

Uma nova ordem de fabricação se origina no momento em que é definida uma venda. Esta venda se inicia a partir da procura do cliente, o departamento de vendas é composto pelo diretor de vendas e duas vendedoras, além do “*staff*” necessário. No momento do início da venda uma série de negociações são realizadas como preço, prazo de entrega, testes de qualidade, entre outras. É importante ressaltar que não são considerados, a título de negociação de preços e prazos de entrega, muitos requisitos técnicos, e os preços e prazos fixados tomam como base uma padronização existente em relação ao tipo de material, estimativa do peso total da peça e a carteira de

pedidos já agendados. A estimativa do peso total da peça, quando a peça for inédita, deve primeiro ser realizada pelo pessoal de projeto de fundido para só então, passar o orçamento para o cliente. Em algumas peças mais elaboradas realiza-se também este procedimento, com o intuito de definir um orçamento mais realista. Por último é requisitado ao cliente que mande via carta, e.mail ou fax a proposta final de pedido de compra. No momento em que a proposta do cliente é recebida, a mesma é conferida e arquivada, para que, em seguida, caso não tenha ocorrido nenhum problema, se registre no sistema uma nova ordem de fabricação correspondente ao pedido realizado. Neste momento é enviado ao cliente uma comunicação da liberação de fabricação do seu pedido de compra, e a requisição do(s) modelo(s) da(s) peça(s) a ser(em) fabricada(s) caso a Engemasa não a(s) tenha(m) em seu estoque de modelos de clientes.

3.5.2 Busca dos modelos e preparação dos projetos de fundição

Para cada pedido de venda é gerada, no sistema, uma ordem de fabricação (OF) correspondente. O departamento de modelos periodicamente lista as novas OF's, em seguida, é identificado, através do sistema, os modelos correspondentes. Caso o modelo não seja encontrado, o mesmo é requisitado ao cliente e a OF fica suspensa até este recebimento. Caso seja encontrado o modelo, depois de realizado alguns ajustes necessários, este modelo é enviado para a área de pré-moldagem.

O departamento de projeto de fundição também verifica periodicamente as novas OF's e ao receber uma nova OF, no caso de peças inéditas, calcula-se o peso teórico da peça. Em seguida a OF fica disponível para o departamento de planejamento e controle da produção para que se realize a emissão da ordem de moldagem por material e uma previsão do vazamento. O departamento de projeto de fundição realiza, no caso de peças inéditas, o projeto de fundição. Este projeto consiste de um desenho da peça a ser fundida sem muitos detalhes técnicos, mas, com as designações técnicas necessárias para a fundição, como “canaletas” de vazamento do metal, posição dos “macelotes” e “resfriadores”, entre outros. Este processo requer conhecimento técnico além de cálculos matemáticos realizados por softwares especializados, sendo empreendido na Engemasa por dois especialistas. Quando a peça não acompanha seu desenho técnico, o departamento de fundição necessita desenhar o projeto a partir do molde em madeira, o que adiciona morosidade ao processo. Uma vez realizado o

projeto, o mesmo fica armazenado em um banco de dados de projetos, construído em um aplicativo específico de banco de dados e não interligado com o sistema de informação principal.

A esta altura, o modelo já deverá estar disponível na área de pré-moldagem e, assim que o projeto de fundido estiver pronto, o mesmo é impresso e inserido em um plástico protetor, para que em seguida seja manualmente anexado ao modelo que espera na área de pré-moldagem. Feito isto, é informado ao departamento de PCP para que possa ser programada a pré-moldagem. O departamento de PCP programa diariamente os moldes que serão preparados, de acordo com a relação de modelos e projetos prontos. Esta programação segue, em geral, uma ordenação de acordo com a ordem de chegada da OF do pedido.

O encarregado de pré-moldagem segue o programa estabelecido pelo departamento de PCP para a construção dos moldes. Para resolver os desníveis produtivos entre os departamentos de projeto de fundido e moldagem, utilizam-se estoques de amortecimento. Para isto, a pré-moldagem possui um certo estoque de modelos disponíveis já com o projeto de fundição esperando para serem moldados, desta forma, o departamento de moldes e o departamento de projeto de fundição podem trabalhar dessincronizados.

A preparação do molde na pré-moldagem envolve a preparação do modelo externo e também dos "machos"; estas operações são realizadas em separado e envolvem diversos operários. Devido às características específicas de cada peça não se pode prever com precisão os detalhes das atividades envolvidas nesta operação produtiva, por exemplo, em peças grandes é necessário construir um sistema de "canaletas" cerâmicas para escoamento do metal líquido, algumas peças requerem "resfriadores", outras já possuem "canaletas" impressas no próprio modelo, enquanto outras, não se fazem as "canaletas", ficando sob responsabilidade da área de moldagem e fechamento. O tamanho da peça também possui grande influência, assim como a quantidade de machos e a forma como o modelo se apresenta.

A areia usada é misturada com uma resina de secagem rápida, por isto, deve ser manuseada rapidamente. Percebe-se uma grande movimentação neste setor, que em um primeiro momento pode-se justificar devido à diversidade de peças a serem

produzidas sendo necessário um baixo nível de padronização e uma elevada flexibilidade de produção.

Para movimentação utiliza-se um sistema de ponte rolante. Este sistema é utilizado para movimentação de quase todas as operações, tanto de areia, como de moldes, caixas e insumos de produção.

Uma vez terminado o molde, o mesmo é armazenado em um estoque intermediário que se localiza no próprio chão de fábrica; este estoque requer uma grande área de armazenagem, pois alguns moldes possuem dimensões consideráveis, ocupando assim uma razoável área da fábrica. Uma vez estocados, os moldes ficam aguardando a moldagem final e o vazamento.

Este estoque funciona como um amortecedor entre a pré-moldagem e a moldagem final, possuindo um tamanho considerável em relação a área total da fábrica, pois a moldagem final segue uma programação diária que deve obedecer a uma série de restrições de fabricação, determinadas pelo departamento de PCP. Em outras palavras, são disponibilizados muitos moldes pré-montados para que se possa realizar a programação da moldagem final utilizando-se de um sub-conjunto destes moldes estocados, podendo-se assim obedecer às várias restrições de fabricação.

3.5.3 Moldagem final - Fechamento

A moldagem final é realizada para um dia, de acordo com a programação diária do departamento de PCP, sendo realizada da seguinte forma: diariamente, no início do expediente, o departamento de PCP emite a relação de produção, agrupando por liga de materiais e por corridas dos fornos. Esta relação é emitida para o encarregado do setor de moldagem/fechamento para o início da produção.

A moldagem final ocorre em linha. Os moldes a serem trabalhados são localizados dentre os moldes estocados sendo então movimentados para a linha para serem lixados, pintados e fechados para que, em seguida, sejam dirigidos para o setor de vazamento para serem preenchidos com o metal fundido. Cabe ressaltar que peças muito grandes não seguem a linha de produção, para estas, o fechamento é realizado no chão por um ou mais operadores e podem envolver até mais de um dia de trabalho.

A movimentação ocorre de duas formas. Na linha de moldagem utiliza-se uma esteira roliça e os moldes são empurrados manualmente para o próximo operador.

Existe um pequeno número de estoques na própria linha, que visa amortecer as diferenças produtivas de cada operação. Para a movimentação do molde pré-pronto para a linha e do molde fechado para o setor de vazamento utiliza-se ponte rolante, assim como para os moldes que estão sendo fechados no chão e para moldes na linha que necessitam serem revirados. Observa-se também neste setor uma movimentação demasiada e uma grande agitação dos operadores. Pode-se justificar da mesma forma que o processo anterior para explicar estes fatos.

3.5.4 Vazamento

O vazamento ocorre de acordo com a programação dos fornos. Esta programação é definida para um dia e é realizada no início do mesmo pelo departamento de PCP. A programação da produção para a etapa do vazamento é organizada de forma empírica. Utiliza-se para isto a experiência do encarregado do setor de fechamento, de forma que os fornos fiquem prontos à medida que os moldes fechados e prontos para vazarem estejam dispostos em frente aos mesmos. Observa-se um pequeno estoque neste setor para coordenar o fechamento e o vazamento. É responsabilidade do encarregado de fechamento a garantia desta sincronização entre o fechamento e o vazamento, realizado para um horizonte de um dia.

Após o vazamento, as peças ficam dispostas por algum tempo até que ocorra a solidificação do metal líquido dentro do molde. O tempo de solidificação também é variado e depende de diversos fatores como: tipo de liga metálica utilizada e o tamanho e forma das peças.

3.5.5 Desmoldagem

A desmoldagem ocorre com a quebra do molde de areia e a retirada da peça fundida de seu interior. Esta atividade pode ser realizada via impacto, devido à rigidez da peça fundida, e não requer muitos operários. Uma vez retirado o molde, as peças são amontoadas em grelhas de transporte e transportadas para o setor de corte.

Após o transporte, que também ocorre via ponte rolante, as peças são separadas por tipo de liga metálica e estocadas antes de cada posto de trabalho para a operação de corte. Este estoque intermediário tem a função de amortecer os desníveis entre o vazamento e o corte.

3.5.6 Corte

A operação de corte é responsável por retirar os anexos de fundição das peças fundidas. Estes anexos são necessários para o processo de fundição e, em geral, correspondem em termos de peso à metade do peso bruto da peça fundida. Antes de se iniciar o corte, cada peça recebe uma identificação numérica em relevo, correspondente à corrida do forno que originou a peça. Isto é necessário para que se possa relacionar a peça ao corpo de prova metálico que é retirado de cada corrida para fins de controle de qualidade. Uma vez cortados os anexos, utiliza-se uma denominação de cores com o objetivo de identificá-los para que possam ser fundidos novamente.

Para esta operação existem diversos postos de trabalho. Cada posto contém um estoque intermediário de peças a serem cortadas. O processo de corte é grosseiro, pois os anexos possuem considerável dimensão, sendo que o trabalho mais fino é realizado posteriormente na operação de lixamento.

As próximas operações produtivas variam muito de acordo com o tipo de peça, os seus destinos de uso, o tipo de liga metálica, entre outros. Em algumas peças são realizados o tratamento térmico e depois o lixamento, em outras o lixamento e o tratamento térmico e em algumas o tratamento térmico é realizado até mesmo antes do corte, algumas peças sofrem o tratamento térmico, o lixamento e novamente o tratamento térmico, entre outras possíveis seqüências de produção.

3.5.7 Lixamento

O lixamento consiste em uma série de operações de lixamento diferentes. Cada uma destas operações são realizadas por um posto operativo que se encontra em linha e é composto por um operário e uma lixadeira fixa ou móvel, dependendo do tipo de operação de lixamento realizada. O tempo em que uma peça demora em cada posto operativo depende das características da peça e também do processo de fundição e de corte, ou seja, uma peça vazada em um bom molde terá menos rebarbas, assim como uma peça bem cortada será mais fácil de remover o relevo do processo de corte.

As peças movimentadas para o lixamento ficam estocadas antes do primeiro posto operativo desta operação, e são puxadas do primeiro posto para os seguintes, é natural que ocorram pequenos estoques de peças antes de cada posto operativo, para minimizar os desníveis produtivos.

Na última operação as peças fundidas já estão com suas características finais desejadas; neste momento, realiza-se um controle de qualidade visual para encontrar possíveis defeitos de superfície. Uma vez encontrados, caso o mesmo não inviabilize a peça, esta é soldada para que sejam realizados novamente os processos de lixamento e tratamento térmico.

A coordenação dos trabalhos em cada posto operativo e também nas operações de tratamento térmico, controle de qualidade e acabamento, menos a usinagem, é responsabilidade do encarregado do setor de lixamento, de tal forma que organiza os trabalhos por ordem de chegada, tipo de material e também via contato com a direção e urgência do pedido.

3.5.8 Tratamento térmico

O tratamento térmico é realizado para fins de alterar as características físicas da peça fundida, como dureza, resistência, entre outros. As peças que devem sofrer tratamento térmico são estocadas em frente a fornos de tratamento térmico e, de acordo com a ordem de chegada ou urgência da peça, são aquecidas nestes fornos para que, em seguida, sejam resfriadas em um tanque que se encontra em frente aos mesmos. O processo de movimentação também é via ponte rolante.

Os fornos de tratamento térmico possuem um tempo de aquecimento para cada lote de peça tratada e também existe o tempo necessário para carregamento de um lote e acomodação no forno; este tempo varia de acordo com os tipos de peças que estão sendo carregadas e as características físicas desejadas.

3.5.9 Controle de qualidade

O controle de qualidade é realizado, como já foi dito, após o lixamento e após o re-trabalho. Este controle de qualidade é realizado de forma visual e tem por objetivo encontrar possíveis furos e pequenos buracos superficiais. Algumas peças sofrem também um controle de qualidade mais específico, dependendo do uso a que se destina a peça; dentre estes pode-se citar: banho químico, raio-x, entre outros.

O tempo gasto com o controle de qualidade varia de acordo com os testes necessários e o tamanho e características da peça. As peças para serem testadas ficam estocadas logo após o lixamento e, geralmente, são testadas por ordem de chegada ou por urgência da peça.

3.5.10 Acabamento final

As operações de acabamento final são realizadas apenas em algumas peças, de acordo com as especificações de pedido, e pode envolver o polimento, banhos de ácidos e a usinagem, ou qualquer um deles em separado ou em conjunto.

Existem diversos postos operativos que realizam o polimento final da peça. As peças são então armazenadas antes de cada um destes postos e são trabalhadas geralmente na ordem de chegada. O tempo de polimento varia de acordo com as características da peça e do trabalho final desejado.

A usinagem é realizada em prédio separado e consiste de diversos postos operativos que são utilizados em seqüência diversa, dependendo do tipo de trabalho que se deseja na peça. Os tempos de usinagem também não são determinados previamente e variam de acordo com o trabalho realizado e características da peça.

O transporte para estas operações é realizado via carrinho transportador e, uma vez movimentadas, as peças são estocadas em processo, aguardando serem trabalhadas.

3.5.11 Restrições e informações existentes no processo produtivo

A seguir serão detalhados as principais restrições existentes no processo de produção das fundições de mercado.

3.5.11.1 Restrições e informações relativas à pré-moldagem

Em relação à pré-moldagem as seguintes restrições podem ser encontradas:

- Se o modelo está emplacado, o tempo de preparação do molde é menor;
- Se o modelo emplacado está em placas separadas, o tempo de preparação é ainda menor;
- Se o modelo além de emplacado estiver com os anexos já impressos, por exemplo, canaletas de escoamento e caixa, o tempo será ainda menor;
- Modelos com "macho" envolvem um tempo bem maior de preparação, sendo este tempo diretamente proporcional ao número de "machos" e à complexidade do modelo;

- Em modelos que existam "machos" maiores, estes “machos” devem ser modelados com armações de aço, aumentando a complexidade produtiva; e
- A armação deve ser construída no momento em que o "macho" será moldado.

3.5.11.2 Restrições e informações relativas à moldagem final e fechamento

Quanto à moldagem final e fechamento são verificadas as seguintes restrições:

- Se o molde é simples, o acabamento do molde e o fechamento, são rápidos;
- Moldes complexos com diversos "machos" podem ser bastante demorados; e,
- Devem-se mesclar moldes simples com complexos para que não se estagne a produção nesta operação produtiva e falem moldes prontos para o vazamento.

3.5.11.3 Restrições e informações relativos ao vazamento

Na etapa de vazamento podem-se verificar as seguintes restrições:

- Algumas peças podem ser desmoldadas logo após o vazamento, outras devem resfriar no molde, dependendo do tipo de liga metálica e características da peça;
- Os fornos de fundição possuem capacidades diferentes;
- Percebe-se que existe uma relação entre a capacidade do forno e o volume das peças a serem vazadas, ou seja, um forno não se deve deixar ligado por muito tempo. Sendo assim, um forno grande será mais rapidamente esvaziado se forem utilizadas para isto “panelas” grandes, e as “panelas” grandes são utilizadas para vazar peças grandes;
- A seqüência de ligas metálicas fundidas no forno de fundição influencia na preparação do forno e na qualidade do fundido, pois algumas ligas metálicas podem contaminar outras;
- Na empresa considerada cada quatro fornos possuem dois conversores elétricos, impedindo que todos os fornos possam ser ligados simultaneamente. Dependendo do tamanho do forno somente dois ou três fornos podem ser operados ao mesmo tempo;

- Se o forno for utilizado para fundir a mesma liga, ou uma liga que agilize o processo de fundição, em seqüência, o tempo de preparação da segunda fornada será mais rápido; e,
- O forno deve ser operado cheio.

3.5.11.4 Restrições e informações relativos ao tratamento térmico

A seguir são listadas as principais restrições relativas ao tratamento térmico:

- Algumas peças, de acordo com as características desejadas e o tipo de ligas metálicas, sofrem o tratamento térmico antes do lixamento e também após. Já outras peças sofrem o tratamento térmico somente após o lixamento;
- O tratamento térmico é realizado em um forno específico, devendo-se considerar o volume e dimensões das peças a serem tratadas e não o peso;
- Algumas peças não necessitam de tratamento térmico; e,
- Alguns tratamentos térmicos, para se alcançar às características físicas desejadas, devem ser repetidos duas ou mais vezes.

3.5.12 Problemas existentes no processo produtivo

O entendimento dos principais problemas existentes no processo produtivo das fundições de mercado, assim como o entendimento de suas restrições, permite delinear as dificuldades que este tipo de empresa enfrenta, permitindo também priorizar as ações a serem executadas na concepção de um sistema para programação da produção que atenda a estas dificuldades.

3.5.12.1 Problemas relativos ao departamento de vendas

Em relação ao departamento de vendas, pode ser verificado os seguintes problemas potenciais:

- O departamento de vendas não possui nenhum mecanismo elaborado para fixar os prazos de entrega dos pedidos com os clientes; e,
- Alguns prazos de entrega fixados pelo setor de vendas são impossíveis de se alcançar, devido aos tempos operativos envolvidos em todas as operações produtivas.

3.5.12.2 Problemas relativos à movimentação

A excessiva movimentação é responsável por vários problemas existentes no processo produtivo das fundições, podendo-se caracterizá-los da seguinte forma:

- O excesso de movimentação em geral diminui a produtividade da fábrica, entre outros problemas pode-se relacionar: diminuição da qualidade do molde e, consecutivamente, diminuição da qualidade da peça fundida, ocasionando re-trabalhos ou até mesmo perda da peça, dificuldade em atender os prazos de entrega e ineficiência produtiva.

3.5.12.3 Problemas relativos ao departamento de PCP

Dentre os problemas que são originários da forma existente de se realizar o planejamento e controle da produção, pode-se citar:

- Não existe um processo de programação da produção com um horizonte de pelo menos alguns dias que norteie o planejamento geral de capacidade da fábrica e, também, forneça subsídios para melhorar o processo de vendas;
- Não se tem um histórico de tempos de processamento e, consecutivamente, não são utilizados para a determinação do programa de produção; e
- A programação da produção leva em conta poucos fatores determinantes do processo e a programação da produção, por isto, é elaborado com base apenas no conhecimento subjetivo e experiência dos envolvidos.

3.5.12.4 Problemas relativos aos estoques entre processos

Os estoques em processo são responsáveis por vários problemas produtivos, dentre estes pode-se citar:

- Os estoques em processo aumentam o tempo de resposta aos pedidos;
- Os estoques em processo além de aumentar a movimentação de peças, ocupam uma área demasiada e, também, podem causar problemas com os moldes, diminuindo a qualidade; e
- O emprego de estoques para realizar um amortecimento entre os processos dificulta a identificação e a eliminação de problemas no processo produtivo.

3.5.12.5 Problemas relativos à qualidade da moldagem

Por fim, o processo de moldagem também é responsável por problemas produtivos, podendo-se citar:

- A falta de qualidade e padronização na moldagem pode causar diversos problemas de qualidade final como, muita rebarba e defeitos de superfície. Isto aumenta consideravelmente o re-trabalho no setor de lixamento e também o número de peças perdidas.

3.5.13 Considerações finais sobre a empresa analisada

A análise das informações anteriores permite relacionar muito dos problemas produtivos existentes na Engemasa com a forma atual na qual é realizada a sua programação da produção. O procedimento empregado para gerar esta programação da produção é calcado na manutenção de grandes níveis de estoques em processo, causando, consecutivamente, uma série de outros problemas produtivos, como grande nível de movimentação, re-trabalho, maiores tempos de resposta, aumento das taxas de refugo, entre outros. Existem também dificuldades para se programar e nivelar a capacidade de produção, assim como levantar os custos efetivos relacionados com cada peça produzida, além das dificuldades de se estimar prazos de entrega para os clientes e de se cumprir os prazos de entregas prometidos.

3.6 Conclusão

A análise das pesquisas e direcionadores existentes para o setor de fundições, em conjunto com a avaliação deste setor industrial no interior do estado de São Paulo (FERNANDES & LEITE, 2002), corroborou a primeira hipótese deste trabalho, ou seja, as fundições de mercado encontram na elaboração da programação da produção uma das atividades mais críticas para a efetividade da operacionalização de sua produção, enfrentando, atualmente, sérias dificuldades para sanar seus problemas nesta área.

Estes resultados iniciais estimularam a realização de análises mais detalhadas em uma unidade de estudo escolhida, a Engemasa, de forma que os problemas e restrições de produção existentes puderam ser elencados, avaliados e

devidamente caracterizados, permitindo corroborar a segunda hipótese levantada por este trabalho. A análise detalhada do ambiente de produção da Engemasa revela, também, que existe uma dificuldade na aplicação direta das técnicas e metodologias de controle da produção existentes em ambientes com maior complexidade operacional.

Estes resultados direcionam uma análise mais detalhada da contextualização das atividades envolvidas com o controle da produção e dos ambientes produtivos complexos, visando propor alternativas para a aplicação efetiva do corpo de conhecimento existente em controle da produção, sob a forma de sistemas de apoio à decisão, para a operacionalização de ambientes produtivos de maior complexidade.

4 CONTROLE DA PRODUÇÃO

4.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é contextualizar as principais atividades envolvidas com a área de conhecimento existente em controle da produção e também sustentar e justificar as ações e escolhas futuras.

Será realizada também a caracterização de um ambiente produtivo complexo, assim como seus principais problemas, restrições e as dificuldades existentes para aplicação do corpo de conhecimento teórico disponível em controle da produção.

Por fim, serão apresentados alguns “*ordering systems*” mais comuns e uma proposta de simplificação da operacionalização da produção em fundições de mercado por meio da aplicação do sistema PBC.

4.2 Contextualização Das Principais Atividades Envolvidas Com O Controle Da Produção

A função do gerenciamento empresarial que trata do controle da produção é a função produção. Considerando o ambiente global de uma empresa, a função produção pode ser representada como uma função principal, possuindo, as empresas, também outras funções interligadas, como a função vendas, a função contábil-financeira, a função desenvolvimento de produtos/serviços, além de outras funções, dependendo da empresa analisada (SLACK *et al.*, 1999) (BONNEY, 2000) (GAITHER & FRAZIER, 2001). É responsabilidade primordial da função produção a elaboração do planejamento e controle da produção (PCP), além da elaboração das estratégias de produção ou planos de produção de longo prazo, projeto do produto, projeto do processo, previsão, planejamento da capacidade, tecnologias de produção, gerenciamento da qualidade, entre outras. Apesar de alguns autores como SIPPER & BULFIN (1998) não realizarem claramente uma separação destas atividades e as atividades do PCP.

Tanto o planejamento da produção quanto o controle da produção envolvem atividades de planejar e controlar. As diferenças fundamentais estão no

horizonte de tempo e grau de detalhe considerado. Assim, o planejamento da produção se envolve com questões de médio prazo, enquanto que no controle da produção tomam-se decisões de curto prazo e detalhadas, para execução de suas atividades. Na *figura 4.1* é realizado um esforço no sentido de contextualizar as principais atividades envolvidas com o controle da produção.

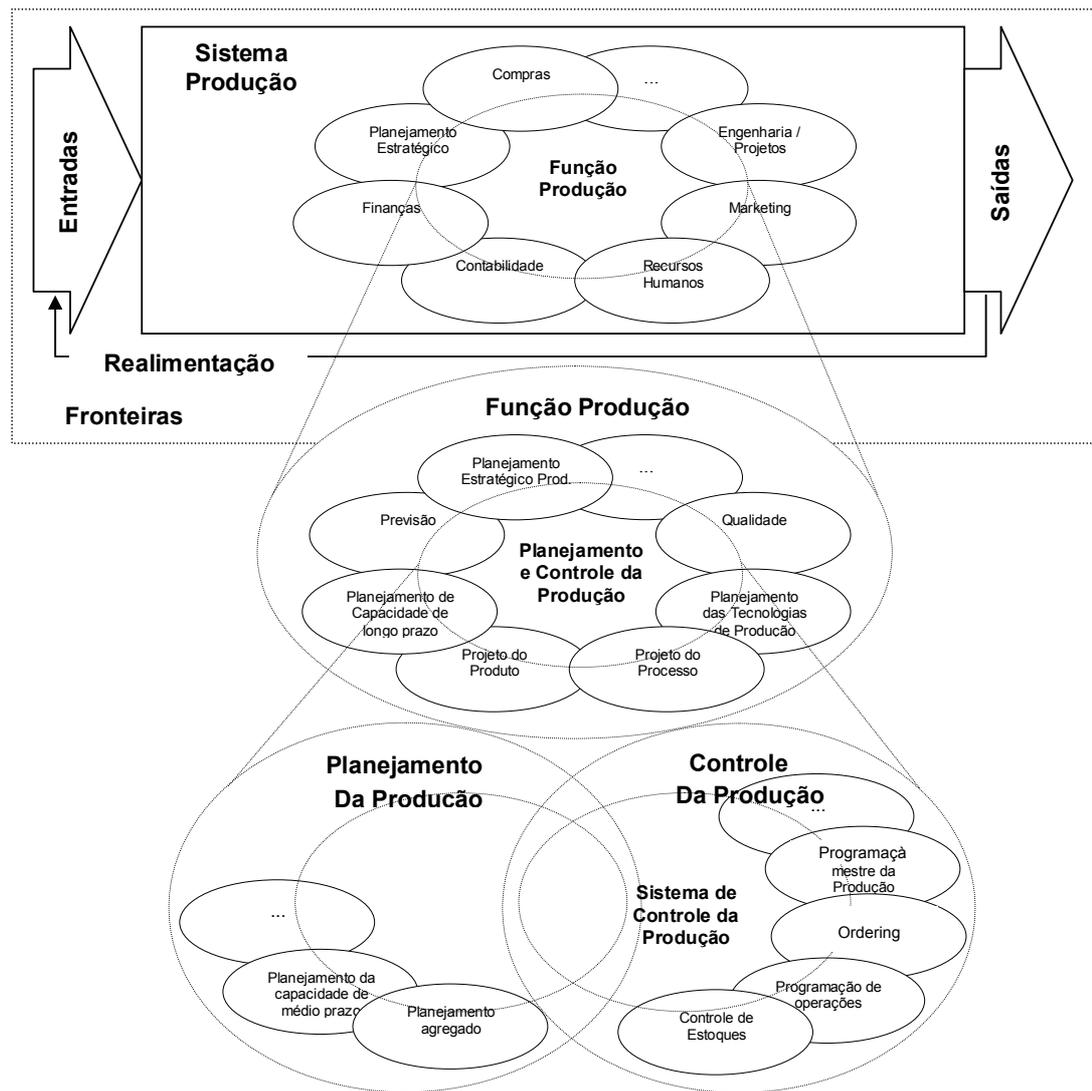


FIGURA 4.1: Visão geral do planejamento e controle da produção e do sistema de controle da produção

A operacionalização do controle da produção é realizada em etapas sucessivas, partindo do mais abrangente em direção ao mais particular. Entretanto, é possível que a técnica ou metodologia utilizada para operacionalizar o controle da produção possa realizar varias destas etapas concomitantemente.

Quanto à programação mestre da produção, seu principal objetivo, é criar um plano de produção de curto prazo, desagregado, que reflita os planos de produção de médio prazo, assim como os pedidos firmes e compromissos de produção já definidos. Para isto, este plano deve considerar a quantidade e quando cada produto será produzido, além dos estoques existentes, restrições de capacidade de produção, disponibilidade de material e “*leadtime*” de cada item componente (SIPPER & BULFIN, 1997).

Já a etapa de “*ordering*”, principal interesse de estudo deste trabalho, tem o objetivo de atender à programação mestre da produção, caso exista, de forma efetiva, tomando por base a necessidade de produção de cada produto final e suas listas de materiais, definindo as quantidades e datas de fabricação/requisição/compra para cada item componente, podendo considerar os estoques e/ou o fluxo de materiais, e considerando principalmente as restrições do ambiente produtivo, emitindo as ordens de produção necessárias, para cada item componente, para atender ao objetivo inicial.

O termo “*ordering*” (abordado em BURBIDGE (1981, 1996)) foi traduzido por ZACARELLI (1987) como “emissão de ordens”. Porém este termo limita o verdadeiro escopo da etapa de “*ordering*”. Uma tradução melhor é a de FERNANDES (2002): Coordenação de ordens de compras e de produção. Este autor classifica os sistemas de coordenação de ordens em: i) sistemas de pedido controlado; ii) sistemas de fluxo programado; iii) sistemas controlados pelo nível de estoque; iv) sistemas híbridos. Como na proposta deste trabalho será considerado um sistema de fluxo programado, o sistema *PBC*, considerar-se-á neste trabalho “*ordering*” como sendo a programação da produção. Dada a importância fundamental dos “*ordering systems*” para o controle da produção, os mesmos serão tratados por “sistemas de controle da produção”. Na próxima seção será feito um rápido resumo de alguns deles.

Por fim, a programação de operações é responsável por alocar todos os recursos produtivos, ao longo do tempo, com o intuito de realizar tarefas para se alcançar um determinado objetivo e obedecendo a um conjunto de restrições produtivas (MACCARTHY & LIU, 1993) (CÂNDIDO, 1997) (GUPTA, 2002). A literatura internacional utiliza comumente o termo “*scheduling*” para a programação de operações, o que pode levar a uma tradução equivocada do termo para a literatura nacional como frisado por FERNANDES (1991). Como define CONWAY *et al.* (1967)

o termo seqüenciamento e “*scheduling*” não são sinônimos. Seqüenciamento continuam os autores, é a ordenação das tarefas em uma única máquina e “*scheduling*” é o seqüenciamento simultâneo e sincronizado em várias máquinas. Visando evitar divergências, este trabalho prefere empregar o termo programação de operações.

4.3 – Visão geral de alguns “*Ordering Systems*”

Atualmente existem vários tipos de sistemas de controle da produção aplicáveis, dependendo das características particulares de cada ambiente produtivo. A análise detalhada do ambiente de produção e dos sistemas de controle da produção disponíveis cria direcionadores para a aplicação efetiva destes sistemas. É importante ressaltar que a escolha adequada de um sistema deste tipo, de acordo com um ambiente produtivo em particular, poderá simplificar a operacionalização de sua produção.

A seguir os principais sistemas de controle da produção atualmente disponíveis serão descritos resumidamente:

- Sistema de programação por contrato ou sistema grande projeto: este tipo de sistema é aplicável a um ambiente produtivo onde se produz produtos complexos feitos de acordo com projetos especiais, geralmente sob encomenda. Na operacionalização deste sistema deverá ser programada desde as operações de projeto inicial do produto, até mesmo as operações envolvidas com sua produção. É importante ressaltar que a maioria dos projetos são inéditos e envolvem a realização de estimativas sobre as durações das operações produtivas. Exemplos da operacionalização de sistemas grande projeto podem ser encontrados em SIPPER & BULFIN (1997), NAHMIA (2001), BUFFA & SARIN (1987), GAITHER & FRAZIER (2001) e TUBINO (1987);
- Sistema de alocação de carga por encomenda: sistemas deste tipo são aplicáveis em ambientes produtivos nos quais produtos especiais ou inéditos são produzidos sob encomenda. A principal diferença com o sistema anterior reside na complexidade dos produtos produzidos, se referindo, neste caso, a produtos mais simples. Uma das grandes dificuldades existentes em sistemas deste tipo é a determinação de prazos de entrega, uma vez que os produtos a serem fabricados podem ser inéditos, é necessária a realização de estimativas de durações das operações produtivas, o que

nem sempre é possível, por falta de informações ou, até mesmo, desconhecimento de técnicas adequadas para realizá-las;

- Sistema de estoque controlado: estes sistemas são aplicáveis quando se regula o ambiente produtivo pelos níveis de estoques, garantindo o suprimento, tanto de produtos acabados, como de itens componentes e matérias primas, por meio da manutenção de estoques destes itens. Eventualmente emprega-se o cálculo do lote econômico para a determinação da quantidade a ser produzida ou comprada. Maiores detalhes sobre sistemas de estoques controlados assim como as nuances envolvidas com os mesmos poderá ser encontrado em SIPPER & BULFIN (1997), NAHMIAS (2001), BUFFA & SARIN (1987), GAITHER & FRAZIER (2001), TUBINO (1987) e JOHNSON & MONTGOMERY (1974).
- Sistema de planejamento das necessidades de materiais, também conhecido como sistema *MRP*: este sistema é principalmente aplicável à produção de produtos ou itens componentes, de acordo com um programa mestre de produção. Diferentemente dos sistemas de estoques controlados, estes têm por base o controle do fluxo de produção por meio do planejamento mestre da produção e do lote de produção para cada componente. A determinação das datas de término previstas é realizada com base nas informações sobre a lista de materiais dos produtos e também de seus processos de produção. Para isto, é realizada uma série exaustiva de cálculos considerando um grande número de informações do processo produtivo. Neste tipo de sistema, a programação da produção e operações, muitas vezes, pode inviabilizar o programa mestre de produção, por falta de capacidade produtiva, necessitando elaborá-lo novamente. A consideração, em conjunto, da programação mestre da produção e da programação da produção e operações ficou conhecida como sistema de planejamento dos recursos de produção ou *MRP II*, existindo atualmente vários fornecedores comerciais de ferramentas computacionais para a implantação deste tipo de sistema. Maiores detalhes sobre os sistemas *MRP* e *MRP II* podem ser encontrados em SIPPER & BULFIN (1997), NAHMIAS (2001), BUFFA & SARIN (1987), GAITHER & FRAZIER (2001), TUBINO (1987), CORRÊA & GIANESI (1993) (1998), FOGARTY (1991);
- O sistema *Kanban* consiste em um sistema de informação manual que puxa a produção, possuindo como principal vantagem a facilidade de operacionalização e a

diminuição dos custos de armazenagem. Maiores detalhes sobre este tipo de sistema podem ser encontrados em SIPPER & BULFIN (1997) e GAITHER & FRAZIER (2001);

- O sistema com base na teoria das restrições, também conhecido como sistema *OPT* (*Optimized Production Theory*), foi desenvolvido por um grupo de pesquisadores israelenses, com base em uma série de procedimentos heurísticos. Este sistema é baseado no uso de um sistema computacional, entretanto, o algoritmo que o implementa não está disponível para domínio público. A base do sistema é aumentar o fluxo de produção ao mesmo tempo em que se reduzem os estoques e as despesas operacionais (CORRÊA & GIANESI, 1993). Para aumentar o fluxo, este sistema atua nos recursos tidos como “gargalos” que determinam o ritmo de produção. A partir daí são propostos nove enunciados que atuam sobre os recursos “gargalos” e “não-gargalos”, assim como no dimensionamento dos tamanhos dos lotes de produção e de transporte, balanceamento do fluxo e a consideração conjunta da programação da produção e operações (CORRÊA & GIANESI, 1993). Estes nove enunciados constituem a filosofia do sistema *OPT*, sendo conhecidos como teoria das restrições (GAITHER & FRAZIER, 2001)(SIPPER & BULFIN, 1997).

Por fim, outro sistema de controle da produção possível de aplicação em um grande número de ambientes produtivos é conhecido como sistema de período padrão ou *PBC* (*Period Batch Control*). Este tipo de sistema toma por base a divisão da produção em períodos iguais, ou estágios de produção, e o dimensionamento dos itens a serem produzidos é realizado de forma a atender a capacidade de produção de cada operação em cada estágio produtivo para o período considerado (BURBDIGE, 1981). Como comparação, o sistema *MRP* visa atender as necessidades previstas de itens a serem produzidos, para isto, calcula o número de períodos necessários, visando produzir estes itens em cada operação. Já no sistema *PBC*, o dimensionamento dos itens a serem produzidos obedece ao período de tempo único determinado para todas as operações. Esta característica primordial do *PBC* o classifica como um sistema de ciclo único enquanto o *MRP* é um sistema multi-ciclo.

A operacionalização de um sistema deste tipo segue as seguintes etapas primordiais, de acordo com BURBDIGE (1981):

- Com base no planejamento mestre da produção é realizada a determinação das necessidades de itens componentes; e,
- A seguir as ordens de fabricação e de compras destes itens componentes, ou seja, a programação da produção, é elaborada de forma balanceada, obedecendo às capacidades produtivas para o período considerado para cada estágio de produção no ciclo.

Neste tipo de sistema a programação da produção é muito importante. Já a programação de operações, em cada estágio do processo produtivo, poderá ser realizada de forma mais conveniente, desde que o período padrão seja obedecido. É importante considerar que a programação de operações em um sistema do tipo *PBC* tende a ser simplificada, devido à repetição dos ciclos e também ao horizonte de tempo reduzido em cada estágio de produção. Por fim, devido a sua estrutura de ciclo único, um sistema *PBC* possibilita, geralmente, uma considerável simplificação do ambiente produtivo, podendo ser aplicado tanto em ambientes de produção em série como também em lotes (BURBDIGE, 1996).

Dentre as vantagens da aplicação de um sistema deste tipo, pode-se citar, segundo BURBDIGE (1996):

- Minimização das perdas por obsolescência em virtude de todas as ordens serem emitidas em conjuntos balanceados;
- A emissão de ordens de produção é realizada somente para as peças realmente necessárias, mantendo o nível de materiais em processo reduzido;
- Maior simplicidade, permitindo um controle mais eficaz e com baixo custo;
- Maior flexibilidade, necessitando de uma menor quantidade de pedidos firmes para realizar a programação da produção, permitindo também maiores alterações neste programa;
- As ordens de produção de todos os componentes são emitidas ao mesmo tempo, permitindo que os itens que exigem um preparo similar sejam realizados em seqüência; e
- O sistema permite facilmente a adaptação e/ou hibridização com outros sistemas visando atender a ambientes produtivos específicos.

Em BURBDIGE (1996) poderá ser encontrado maiores detalhes de sistemas deste tipo, assim como sua aplicação em vários tipos de ambientes produtivos.

Por fim, podem-se organizar os principais sistemas de controle da produção da seguinte forma: Dentre os sistemas de fluxo controlado podem-se citar, o sistema *MRP*, o sistema *PBC* e o sistema *OPT*. São sistemas de ciclo único em nível de planejamento os sistemas *Kanban*, *PBC* e *OPT*, enquanto o sistema *PBC* também o é em nível de operações. Já na categoria dos sistemas multi-ciclo se enquadra todos os sistemas de estoque base e também o sistema *MRP*. São sistemas “*Just-in-time*” os sistemas *Kanban* e *PBC*, enquanto os sistemas “*Just-in-case*” envolvem os sistemas de estoque base e o sistema *MRP*.

4.4 Análise Dos Fatores Que Podem Adicionar Complexidade À Operacionalização da Produção

Vários são os fatores que podem adicionar complexidade a um ambiente de produção. Por maior que seja o esforço empreendido no sentido de enumerá-los, invariavelmente, não se teria êxito, pois todas e quaisquer particularidades da maioria dos tipos de indústrias de produção deverão ser consideradas, tornando esta tarefa no mínimo inviável. Por outro lado, a consideração das particularidades produtivas que mais comumente adicionam complexidade à operacionalização de um ambiente produtivo, à luz de um ambiente de produção industrial complexo, pode elucidar várias hipóteses e guiar futuros desenvolvimentos no sentido de garantir maior aplicabilidade das técnicas e metodologias de controle da produção em ambientes produtivos complexos. A seguir alguns destes fatores são citados, tomando por base a experiência adquirida com o ambiente de produção das fundições de mercado:

- Grau de repetibilidade. Por ordem de relevância, um dos fatores que comumente adicionam complexidade a um ambiente de produção é o grau de repetibilidade de sua produção. Quanto maior o grau de repetibilidade, mais o ambiente de produção se caracteriza como um ambiente de produção em massa, simplificando consideravelmente o controle da produção, desde a programação mestre da produção até a realização da programação de operações. Por outro lado, uma baixa repetibilidade conduz a um ambiente de difícil gerenciamento, produzindo um elevado número de produtos diferentes. Este ambiente produtivo geralmente é

caracterizado como “*Job shop*”, exigindo grandes investimentos em controle da produção para se conseguir uma operacionalização efetiva;

- Dificuldade de se realizar previsões de demanda. Este fator é também de considerável importância para um ambiente de produção complexo, pois dificulta a realização de planejamentos de longo e médio prazo (ÖZDAMAR & YAZGAÇ, 1997) (BAYKASOGLU, 2001) (BYRNE & BAKIR, 1999), até mesmo, dependendo do caso, de planejamentos de curto prazo para a realização do controle da produção, adicionando incertezas a estes ambientes;
- Produtos personalizados e/ou sob encomenda. Atualmente, cada vez mais os clientes exigem personalização, dificultando a realização da padronização do ambiente produtivo, aumentando consecutivamente sua desestruturação, contribuindo também com a diminuição da repetibilidade produtiva e adicionando incertezas;
- A variação dos tempos de “*setup*” com a variação da seqüência de produção, também conhecida como “*setups dependentes*”;
- Dificuldade na definição dos tempos das operações e do processo de produção. Em alguns ambientes de produção, devido a vários fatores como: produção personalizada, procedimentos rústicos, dificuldade de automação, entre outros, não é possível determinar com precisão os tempos envolvidos em cada operação produtiva ou, até mesmo, as próprias operações de produção necessárias, assim como o fluxo produtivo; e
- Restrições produtivas. É comum encontrar várias restrições produtivas em um ambiente de produção, o próprio limite de capacidade ou de materiais disponíveis é um exemplo. Entretanto, procedimentos simples, geralmente baseados no conhecimento e bom senso do responsável pela produção, permite lidar com restrições mais simplificadas com uma eficiência considerável. Por outro lado, em ambientes complexos, estas restrições produtivas não podem ser solucionadas facilmente e podem causar grande ineficiência produtiva se for solucionada sem tomar por base procedimentos mais sofisticados.

Vários autores têm discorrido sobre a problemática de aplicar os métodos e técnicas de controle da produção existentes em ambientes de produção complexos, envolvendo todos ou alguns dos fatores citados. FERNANDES & MACCARTHY (1999) reclamam por maior aplicabilidade dos desenvolvimentos na área de

planejamento e controle da produção, apontando a lacuna existente entre a teoria e a prática na área, através de várias preposições que procuram explicar este fato, estas preposições são listadas a seguir:

- Muitos problemas em planejamento e controle da produção são demasiados complexos e o grande número de modelos, técnicas, conceitos e ferramentas tornam impossível para um indivíduo conhecer todos os aspectos importantes da área, o que demanda a ação de equipes interdisciplinares;
- Várias pesquisas na área não consideram a programação de operações dentro da estrutura geral do planejamento e controle da produção, não considerando desta forma sua influência na natureza do problema (MACCARTHY & LIU, 1993) (CÂNDIDO, 1997) (GRABOT, BÉRARN & NGUYEN, 1999);
- Grande parte das teorias desenvolvidas em planejamento e controle da produção pela pesquisa operacional não especificam suficientemente o sistema de controle da produção que se aplica;
- Cada vez mais os sistemas produtivos estão produzindo por encomenda em detrimento dos sistemas de produção para estoques;
- Devido à complexidade matemática envolvida, existem dificuldades em aplicar no planejamento e controle da produção os modelos desenvolvidos em pesquisa operacional;
- Os jornais acadêmicos de planejamento e controle da produção dão maior importância a relações matemáticas complexas do que para soluções aplicáveis na área;
- Teorias de planejamento e controle da produção baseadas em condições operacionais de estado de equilíbrio possuem cada vez menos importância prática, já que hoje o que se prepondera são as mudanças e não os estados de equilíbrio dos sistemas de produção;
- O grande paradoxo da área de planejamento e controle da produção é que os critérios utilizados nas teorias existentes são cada vez mais simplistas em relação aos modernos sistemas de manufatura atuais, mas a matemática utilizada na elaboração da teoria é cada vez mais complexa;
- O elevado nível de soluções particulares e o baixo nível de repetição aumenta a lacuna existente; e

- O grande nível de automação flexível contribui para que mais recursos físicos aumentem a desestruturação do ambiente produtivo.

A natureza dinâmica e complexa dos ambientes produtivos atuais também foi abordada por FUNG *et al.* (1997), onde os autores salientaram o fato dos sistemas tradicionais de manufatura não apresentarem a agilidade, flexibilidade, capacidade de lidar com incertezas, além da capacidade de se auto-adaptar às mudanças contínuas destes ambientes. Os autores reclamam por maior capacidade de tomada de decisões nos sistemas atuais além da consideração de várias restrições produtivas.

Ainda sobre os fatores que adicionam complexidade em um ambiente produtivo, SÉNÉCHAL (1998) relacionou os seguintes:

- Aumento da flexibilidade dos recursos produtivos. Esta característica exige cada vez mais a realização da programação da produção e programação de operações com uma grande combinação de possibilidades para execução destes programas;
- Organização por células produtivas. O elevado emprego de células de produção tornaram estes grupos produtivos mais independentes e responsáveis por uma grande variedade de produtos, necessitando de um suporte efetivo para realizar suas atividades;
- Aumento da importância da logística. O aumento da importância relacionada com fatores de logística exige a otimização dos fluxos físicos e de informação, assim como a inter-relação entre clientes, empresas e consumidores. Como consequência, o ambiente produtivo é pressionado para uma redução dos ciclos de produção, sincronização de atividades e aceleração dos fluxos de materiais e produtos; e,
- Aumento das atividades indiretas, como consequência dos fatores anteriores. Existem cada vez mais atividades indiretas que dificultam a alocação dos custos e o relacionamento com a capacidade dos recursos físicos de produção.

Os fatores levantados pelos autores citados não extinguem as possibilidades de caracterização das complexidades envolvidas com a operacionalização dos ambientes produtivos, podendo-se relacionar várias outras dependendo do ambiente de produção considerado. Apesar disto, os fatores relacionados traçam um perfil geral de muitas complexidades envolvidas com a operacionalização dos ambientes produtivos atuais e justifica os esforços no sentido de aumentar a aplicabilidade do corpo de

conhecimento existente visando propor soluções para uma operacionalização efetiva destes tipos de ambientes de produção.

4.5 Análise De Aplicabilidade Do Sistema *PBC* Em Fundições De Mercado

A partir da análise dos vários sistemas de controle da produção tratados anteriormente e das características principais dos ambientes produtivos complexos, especificamente, no que se refere este trabalho, ao ambiente produtivo das fundições de mercado, acredita-se que o sistema *PBC* apresente uma alternativa viável, simplificada, a custos acessíveis e adequada ao ambiente produtivo deste setor industrial. Para que se possa justificar esta afirmação, é conveniente uma investigação inicial da origem do sistema *PBC*.

O sistema *PBC* foi inicialmente desenvolvido por R. J. Gigli no Reino Unido durante a década de 1930, e usado para regular a produção do caça “*Spitfire*” durante a segunda guerra mundial. Baseando sua produção em uma série de programas de produção de curto prazo e de períodos idênticos em um único ciclo, pôde apresentar altas taxas de giro de estoques, sendo um dos sistemas de coordenação de ordens pioneiros na aplicação dos conceitos “*Just-in-time*” (BURBDIGE, 1996).

Para que se possa entender como o sistema *PBC* pôde proporcionar estes avanços, é importante analisar o contexto no qual foi criado. Nos anos anteriores e também durante a II guerra mundial o Reino Unido sofria uma grande escassez de recursos produtivos, além de trabalhar com datas de entregas apertadíssimas, principalmente em sua indústria bélica. O ambiente de produção do “*Spitfire*”, por sua vez, possuía elevada complexidade, devido, principalmente, à própria complexidade do produto produzido, além de, naquela época, várias técnicas sofisticadas de produção ainda não estarem disponíveis como, por exemplo, a manufatura flexível, a troca rápida de ferramentas e a organização celular, sem contar que, ainda não existiam recursos computacionais para auxiliar no controle da produção. Este contexto limitou as alternativas disponíveis para se alcançar eficácia nos ambientes de produção ingleses. À revelia das dificuldades existentes, R. J. Gigli, que na época era diretor de uma importante consultoria industrial no Reino Unido, se baseou na utilização de programas de produção de curto prazo, possuindo a mesma duração e sendo emitidos

conjuntamente, para superar os problemas existentes e atender, com eficácia, às necessidades produtivas da indústria bélica inglesa (BURBDIGE, 1996).

Findado a guerra, o ocidente experimentou um grande crescimento de sua economia e uma massificação de sua produção através de uma filosofia produtiva centrada em estoques. Neste novo contexto, as ineficácias dos ambientes produtivos não tinham grandes reflexos, em termos competitivos, em um mercado ávido por consumo, ao mesmo tempo em que trabalhar com escassez de estoques, e de recursos materiais, remetiam à lembrança da guerra. Por outro lado, os sistemas com base em estoques traziam a idéia de fartura e pujança. Estes e também vários outros fatores menores contribuíram para que o ocidente, como um todo, criasse uma filosofia de produção com base em estoques, em contra-senso ao que já se tinha sido alcançado. Enquanto o leste, principalmente o Japão, passava dificuldades gravíssimas com o pós-guerra, absorvendo as filosofias produtivas com base em baixos estoques e ciclos únicos e curtos de produção.

Com a nova realidade competitiva atual, as indústrias ocidentais se viram frente a uma indústria oriental enxuta, rápida e flexível, apresentando uma grande eficácia produtiva, enquanto as indústrias ocidentais, por outro lado, apresentam complexidades e ineficiências demasiadas em seus ambientes produtivos, possuindo, em muitos casos, sérias desvantagens em relação a seus competidores orientais, ainda mais, em um mercado de competição acirrada onde pequenos detalhes fazem diferença. O principal responsável pela eficácia das indústrias orientais foi à adoção de filosofias de produção do tipo “*Just-in-time*”, através do sistema de controle da produção Kanban. Este fato fez com que as indústrias ocidentais realizassem uma corrida em direção a sistemas de controle da produção deste tipo.

O sistema Kanban é simples e eficaz, por outro lado, possui algumas limitações de aplicação, principalmente em empresas com produção do tipo baixo volume e alta variedade e/ou com dificuldades de diminuição dos tempos de produção e preparo de operações, além de apresentar sérias dificuldades quando se consideram incertezas produtivas. Apesar disto, muito se tem evoluído na adoção de sistemas do tipo Kanban em indústrias, proporcionando a simplicidade e eficácia desejada quando sua aplicação é possível. Por outro lado, o sistema *PBC* foi pouco difundido e seu potencial continua quase que inexplorado atualmente.

A vantagem do sistema *PBC* é que, pode-se conseguir a agilidade e eficácia conseguida com sistemas do tipo Kanban, tanto em ambientes produtivos aptos aos sistema Kanban, como também em ambientes nos quais o sistema Kanban não se aplica, devido ao efeito volume/variedade, restrições de produção e/ou incertezas relacionadas. Por fim, o sistema de controle de produção *PBC* representa uma alternativa de controle da produção eficaz para vários setores industriais.

Considerando particularmente o ambiente produtivo das fundições de mercado, como mostrou o “*survey*” desenvolvido por FERNANDES & LEITE (2002), os principais interesses destas indústrias quanto a seus fatores de competitividade, são: a qualidade do produto fundido segundo as especificações do cliente, o atendimento dos prazos de entrega estipulados pelo cliente e o rápido atendimento de pedidos urgentes, sendo que, o atendimento dos prazos é o que mais deve ser melhorado.

O sistema de controle da produção *PBC* poderá vir ao encontro destes objetivos principalmente devido ao fato de:

- O término de todos os trabalhos serem realizados ao mesmo tempo, no final do ciclo, garantindo a determinação de prazos de entrega mais realísticos e, consecutivamente, o atendimento aos prazos fixados;
- O emprego de ciclos curtos de produção permitir a redução do prazo de entrega e a possibilidade de um atendimento mais rápido aos pedidos urgentes, sem causar grandes transtornos aos pedidos já agendados;
- A emissão de ordens de produção ser realizada somente para os itens realmente necessários, mantendo o nível de estoques reduzidos e melhorando, conseqüentemente, a qualidade do produto, devido à redução do manuseamento, transporte e o tempo de armazenagem dos moldes;
- Possuir maior simplicidade, permitindo um controle mais eficaz e com baixo custo;
- Apresentar também maior flexibilidade, necessitando de uma menor quantidade de pedidos firmes para realizar a programação da produção, possibilitando maiores alterações neste programa e permitindo que os pedidos urgentes possam ser programados com maior agilidade;
- A necessidade de uma menor quantidade de pedidos firmes para realizar a programação da produção também colabora para o emprego de métodos sofisticados

para a elaboração da programação da produção e também para a programação de operações;

- Os ciclos curtos de produção facilitam o emprego de estimativas de capacidade das operações e consumo das mesmas pelos itens a produzir, diminuindo o impacto causado pela falta de acuidade destas estimativas e permitindo que soluções simples como intercâmbio de capacidade entre operações, banco de horas, horas-extras, entre outras, possam resolver a maior parte dos problemas decorrentes;
- Os ciclos curtos de produção também facilitam a elaboração da programação de operações, principalmente no ambiente produtivo das fundições de mercado, onde a necessidade de flexibilidade para este tipo de programação é essencial; e,
- O agrupamento das operações produtivas em estágios distintos e ordenados facilita a coordenação entre operações de estágios separados e simplifica a consideração das restrições do ambiente produtivo.

Pode-se avaliar que, tão importante quanto a proposta de um método para a elaboração da programação da produção para fundições de mercado, é a consideração do sistema de controle da produção *PBC*, pois o mesmo fornece o pilar no qual o método de elaboração da programação da produção se fundamentará. Garantindo também que os esforços da proposta deste trabalho estejam indo ao encontro dos principais interesses das fundições de mercado pesquisadas e fornecendo a base para a operacionalização do controle da produção na realidade deste ambiente industrial, aproximando a proposta deste trabalho à realidade prática destas empresas.

4.6 Conclusão

Tomando por base a literatura existente e também a experiência adquirida em contato com o ambiente de produção das fundições de mercado, é possível perceber a lacuna de aplicação do corpo de conhecimento existente em controle da produção de forma efetiva em ambientes produtivos complexos.

Por outro lado, o extenso corpo de conhecimento disponível em controle da produção fornece a base para resolver problemas que levem em conta as principais características dos ambientes produtivos complexos, de forma que, desde que aplicada

convenientemente, a teoria disponível poderá ser efetivamente aplicada na prática de um ambiente de produção complexo.

Por fim, a análise dos sistemas de controle da produção mais comuns apontam para o sistema *PBC* como uma alternativa viável para simplificar o controle da produção de uma fundição de mercado, possibilitando uma operacionalização efetiva de seu ambiente de produção.

5 TEORIA DA DECISÃO E SISTEMAS DE APOIO À DECISÃO

5.1 Introdução

O estudo da teoria da decisão e sistemas de apoio à decisão tem por objetivo fornecer subsídios para que a aplicação do corpo de conhecimento disponível em controle da produção, especialmente para se elaborar a programação da produção, possam alcançar maior flexibilidade e capacidade de lidar com incertezas e desestruturações características de um ambiente produtivo complexo.

Visando assegurar a efetividade do processo decisório para operacionalização do controle da produção em ambientes de produção complexos, especialmente, no que se refere este trabalho, à programação da produção em fundições de mercado, poder-se-á criar um maior entendimento deste processo de tomada de decisões, fornecendo direcionadores para a sistematização de uma situação decisória em particular, auxiliando no entendimento da mesma e na sua operacionalização em ambientes produtivos reais.

Quando se está lidando com situações com alguma incerteza relacionada é de grande importância a consideração de valores e informações subjetivas, ou seja, nestas situações decisórias o fator humano é crucial para se alcançar os resultados desejados. De fato, na realidade destes ambientes produtivos, a operacionalização do controle da produção tem contado em grande parte com a experiência e bom senso do tomador de decisões, principalmente como alternativa à falta de soluções aplicáveis a estes tipos de ambientes. Entretanto, contar apenas com estes fatores não é suficiente para garantir a efetividade destas decisões, por outro lado, este conhecimento não pode ser descartado, pois representa o elo de uma possível ligação entre a teoria disponível na área e a realidade destes ambientes menos estruturados.

Desta forma, este capítulo procura avaliar a área de conhecimento da teoria da decisão e também o tomador de decisão na área de controle da produção, assim como a sistematização do processo de tomada de decisões em situações operacionais de ambientes de produção complexos. Para isto, as principais técnicas e metodologias disponíveis para apoiar decisões operacionais serão analisadas, assim como, as formas possíveis de aplicação em situações práticas, por meio dos modelos de decisão. Por fim,

é realizada a escolha dos tipos de modelos decisórios mais adequados ao objetivo do sistema de decisão proposto neste trabalho.

5.2 Teoria Da Decisão

A teoria da decisão abrange a área do conhecimento que visa auxiliar indivíduos envolvidos com algum tipo de decisão, a escolher, dentre as alternativas possíveis, a mais apropriada para uma certa situação, considerando as conseqüências de cada alternativa, assim como os valores, riscos e incertezas relacionadas, visando um objetivo, ou objetivos, previamente definidos.

Devido ao seu caráter amplo, a teoria da decisão é uma área exaustivamente elaborada e relacionada a vários outros campos do conhecimento, tanto fornecendo soluções, como empregando suas técnicas e metodologias. Sua origem data de tempos remotos, envolvendo desde estudos de leis e estratégias de guerra na idade média e evoluindo continuamente com o passar do tempo, abrangendo novas áreas de aplicação como administração, engenharia e medicina, modernizando as técnicas e metodologias utilizadas, assim como as ferramentas empregadas, como, por exemplo, o uso do computador.

A teoria da decisão emprega estas técnicas e metodologias através de modelos decisórios, usados para avaliar as alternativas possíveis. Em decisões que envolvem riscos, cada alternativa possui um conjunto de conseqüências e a probabilidade de ocorrência de cada uma pode ser conhecida e representada segundo alguma distribuição probabilística. Em decisões sob incerteza, não é possível conhecer estas distribuições, exigindo soluções mais sofisticadas.

Decisões que envolvem riscos e seus valores e objetivos podem ser de alguma forma quantificados atualmente podem ser otimizadas e automatizadas, transferindo a responsabilidade humana para sistemas computacionais especializados e ágeis. Por sua vez, decisões sob riscos e incertezas envolvendo valores de difícil quantificação ou subjetivos não podem excluir o fator humano tornando-o peça essencial do seu processo, adicionando complexidade e exigindo um processo mais elaborado, que envolva não apenas o modelo de decisão em si, mas também o tomador de decisão. Este tipo de decisão, devido justamente à complexidade envolvida, é o

principal campo de investimentos e pesquisas na área e também onde se concentrará os esforços deste trabalho.

A área de conhecimento que abrange o controle da produção por muito se concentrou em sua estruturação, visando quantificar seus objetivos, diminuir e quantificar os riscos associados e eliminar as incertezas, o que resultou no grande número de sistemas computacionais especializados e na automação das decisões relacionadas. O atual ambiente competitivo, por sua vez, vem acarretando uma grande desestruturação a esta área, adicionando complexidades e incertezas ao ambiente industrial.

O estudo da teoria da decisão para elaboração da programação da produção em ambientes complexos tem por objetivo a adequação e sistematização do processo decisório às suas necessidades, buscando alternativas para as exigências de desestruturação que esse ambiente impõe sem criar um distanciamento com o tomador de decisões, justamente por entender que o mesmo representa um fator crucial para obter êxito neste contexto. Para isto, é necessário criar sistemas sofisticados que permaneçam simples e intuitivos para o tomador de decisões e também que sejam viáveis em termos de sistematização e operacionalização na realidade industrial.

5.3 – Os Tomadores De Decisões No Controle Da Produção

Assim como é importante analisar o ambiente de decisão para auxiliar sua racionalização e sistematização, o estudo do tomador de decisões, ou seja, a forma como este indivíduo procede e reage quando toma decisões, também pode contribuir para este objetivo.

Quando se considera o controle da produção, a figura do tomador de decisões é representada pelo gerente de produção ou, de forma geral, pelo profissional responsável por esta área. Neste contexto o tomador de decisões será um componente participante do processo decisório, e não uma etapa deste processo. Com efeito, uma decisão sofrerá uma grande influência das características, valores e forças que atuam sobre este indivíduo e que vão determinar seu estilo decisório, não podendo negligenciar sua importância ou o fato deste processo decisório, por si só, não garantir seus objetivos isoladamente do tomador de decisão. Desta forma, a análise do estilo do tomador de decisões é fundamental para a efetividade das mesmas.

De acordo com MARAKAS (1999) um certo estilo decisório reflete a forma como o tomador de decisões reage a um determinado contexto, podendo-se citar desde a sua percepção ao que acredita ser valioso ou ter importância, até mesmo em como as informações são interpretadas e a forma como os fatores externos e forças diversas pressionam suas decisões.

A análise desta informação permite direcionar o processo decisório para refletir as características do tomador de decisão, criando-se técnicas e metodologias que mais se ajustam a este estilo, assim como, caso existam tomadores de decisões de estilos diferentes, poderão ser desenvolvidos processos decisórios alternativos, podendo-se até escolher indivíduos com o perfil necessário para lidar com um certo tipo de decisão.

Por fim, é importante que se faça uma análise detalhada de todos os indivíduos envolvidos com as situações de tomada de decisões para elaboração da programação da produção. Desta forma, a empresa poderá conhecer os estilos decisórios de seus tomadores de decisões, assim como seu perfil de tomada de decisões frente a várias situações diferentes. Estas informações apoiarão na definição de melhorias necessárias no sistema decisório proposto e também auxiliarão na tomada de novas decisões. Este trabalho, devido ao escopo a que se propõe, se limita a propor a avaliação e análise do tomador de decisões, uma vez que a sistematização do processo de tomada de decisões é focado no mesmo, não fornecendo metodologias nem sugestões de como realizar estas avaliações e análises. Desenvolvimentos neste sentido poderão ser encontrados em PYY (2000) e FOX & SPENCE (1996).

5.4 Sistematização E Operacionalização Do Processo Decisório No Controle Da Produção

De uma forma simplista, como propõe MALLACH (2000), uma decisão é uma escolha racional entre alternativas. Quando se considera a programação da produção em ambientes complexos, em decorrência da variedade de situações possíveis, das incertezas envolvidas e da multiplicidade de possíveis ações por parte dos responsáveis, o processo decisório se acentua. É de se imaginar que estas pessoas utilizem um processo racional de tomada de decisões, prevendo consequências e analisando consistentemente possíveis alternativas decisórias.

Realmente muito está envolvido com estas decisões produtivas e basear-se apenas em experiências e sentimentos não parece ser algo eficiente. Apesar dos riscos visíveis, grande parte das decisões é realizada desta forma quando se trata da operacionalização de ambientes produtivos complexos. Até mesmo atualmente, com as ferramentas e tecnologias disponíveis, um processo racional de tomada de decisões ainda é pouco aplicado para este fim, principalmente pela dificuldade inerente à sua aplicação e a falta de soluções viáveis a estes ambientes. Sobre o processo de tomada de decisões envolvendo incertezas, de uma forma geral, como relata CLEMEN (1995), a evidência experimental é que as empresas geralmente não tomam decisões de acordo com alguma metodologia de análise de decisões.

Pode-se perguntar o por quê, mesmo tendo consciência dos riscos e problemas ocasionados, dos responsáveis pela operacionalização do controle da produção de ambientes produtivos complexos não empregarem métodos formais e cientificamente elaborados de tomada de decisões. De forma geral, vários autores sugerem diversos fatores que tornam o processo decisório tão custoso. CLEMEN (1995) cita principalmente a complexidade do processo decisório, incertezas envolvidas, a busca de múltiplos objetivos além dos tomadores de decisão possuírem diferentes perspectivas, ocasionando diferentes conclusões em cada etapa do processo decisório. MARAKAS (1999) justifica que as dificuldades envolvidas podem ser explicadas a partir de múltiplas combinações, envolvendo complexidade, incerteza, pressões e limitações do tomador de decisões. Especificamente em decisões envolvendo a programação da produção de ambientes produtivos complexos, como já discutido no capítulo anterior, a desestruturação, incertezas relacionadas e o distanciamento das técnicas e teorias existentes, acabam limitando sua aplicação, deixando os tomadores de decisões à margem de soluções viáveis à sua realidade produtiva, contando apenas com sua experiência e bom senso.

Sobre o processo decisório de forma geral, uma das primeiras tentativas de se racionalizá-lo, partiu de Simon em 1960, por meio um elegante modelo de tomada de decisões baseado em três etapas principais, quais sejam (MARAKAS, 1999):

- Inteligência: processo no qual procura-se por situações nas quais existem necessidades decisórias, envolvendo geralmente problemas ou oportunidades, definindo os objetivos a serem alcançados e um escopo do processo decisório;

- Projeto: realiza-se a construção de um modelo decisório e análises de alternativas para a solução do problema ou oportunidade encontrados; e,
- Escolha: neste momento é escolhido dentre as alternativas desenvolvidas a que melhor vai ao encontro dos objetivos traçados.

Este modelo do processo decisório envolve o tomador de decisões de forma direta ou indireta, através da consideração de seus valores subjetivos nas três etapas anteriores. Este modelo é muito utilizado na literatura atual e está presente na grande maioria dos trabalhos existentes na área, sendo aplicado como referência nos principais modelos de sistemas decisórios desenvolvidos em trabalhos e pesquisas (CLEMEN, 1995) (MARAKAS, 1999) (MALLACH, 2000) (LAUDON & LAUDON, 1998) (O'BRIEN, 1996).

Além de um modelo geral sobre o processo decisório, é de grande importância também, para sua racionalização, um estudo das principais características das decisões geralmente existentes no ambiente empresarial. Esta análise permite extrair características comuns de decisões similares, agilizando as etapas envolvidas no processo decisório e as escolhas de métodos e ferramentas para auxiliar estas etapas (ADAM, FAHY & MURPHY, 1998). Um dos trabalhos mais reconhecidos neste tema foi o desenvolvido por Gorry & Morton em 1971 (MALLACH, 2000). Neste trabalho foi realizado um estudo das categorias decisórias, criando uma conveniente classificação dos tipos de decisões empresariais de acordo com a natureza e o escopo da situação de decisão.

O modelo de Gorry & Morton teve por base o trabalho de Anthony realizado em 1965 sobre os três níveis de atividade gerencial e o trabalho realizado por Simon em 1962 sobre decisões programadas e não-programadas (ADAM, FAHY & MURPHY, 1998). A contribuição de Anthony é representada pela dimensão “escopo” referindo ao nível organizacional típico onde as decisões são tomadas. O nível estratégico é caracterizado pela alta direção empresarial, decisões tomadas por este escalão tende a ter um grande impacto na organização e envolver geralmente períodos de tempo consideráveis. No outro extremo, o nível operacional é formado geralmente por gerentes responsáveis pela operacionalização dos recursos organizacionais, suas ações possuem um caráter mais imediatista, visando alcançar os objetivos definidos na alta administração, sendo que, o nível tático representa um meio termo entre estes dois

primeiros níveis descritos, constituindo-se geralmente por gerentes de nível médio com o intuito de criar direcionadores para a realização das decisões tomadas pela alta gerencia, criando um elo de ligação desta ultima com a gerencia operacional.

A contribuição de Simon representa a outra dimensão do modelo, ou seja, a “natureza decisória”, este conceito refere-se ao grau de estruturação de uma decisão, apesar de acontecerem decisões de toda natureza nos três níveis organizacionais, percebe-se que, em cada nível, os gerentes lidam com decisões mais características de uma certa natureza. Nos níveis mais altos existe uma tendência em lidar com decisões menos estruturadas, assim como no nível operacional observa-se uma grande incidência de situações decisórias com maior estruturação. A seguir é detalhada cada uma das três naturezas decisórias segundo MALLACH (2000):

- Uma decisão estruturada se refere ao processo decisório no qual todas suas etapas estão bem definidas e podem ser totalmente especificadas, podendo ser programadas em um algoritmo computacional. É importante deixar claro que, dependendo da forma na qual seja implementado computacionalmente, um sistema de um processo decisório deste tipo não poderá ser considerado um sistema de apoio à decisão;
- As decisões semi-estruturadas são aquelas nas quais uma ou mais etapas do processo decisório possuem algum grau de desestruturação. Esta categoria de decisões possui necessariamente alguns aspectos estruturados, de forma que os sistemas computacionais possam colaborar grandemente para uma boa decisão;
- Por ultimo, as decisões desestruturadas possuem todas as etapas do processo decisório desestruturados, de forma que, não se tem como especificar nenhuma etapa deste processo.

Na *figura 5.1* este modelo de categorias decisórias pode ser melhor visualizado.

Natureza	Escopo		
	Operacional	Tático	Estratégico
Estruturada	Contabilidade Vendas Estoques	Análise de orçamentos Engenharia de custos Previsão de curto prazo	Carteira de produtos Localização de fabricas e depósitos
Semiestruturada	Programação da produção	Análise de variância de orçamentos	Aquisições e fusões
Desestruturada	Fluxo de caixa Custos	Preparação de orçamentos Vendas e gerenciamento da produção	Planejamento de novos produtos Planejamento de pesquisas e desenvolvimentos

FIGURA 5.1: Modelo de categorias decisórias de Gorry & Morton. (Fonte: ADAM, FAHY e MURPHY (1998))

Com base na *figura 5.1* percebe-se que o processo de elaboração da programação da produção possui características semi-estruturadas e pode ser classificado como de natureza operacional. Estas constatações são fundamentais para a proposta de um sistema de apoio decisorial adequado a esta finalidade. A rotina que acompanha as decisões de natureza operacional sugere uma busca de sistematização do apoio a estas decisões.

Desta forma, o processo de sistematização da tomada de decisões não deverá se iniciar na identificação de problemas e oportunidades, e sim, na definição do próprio sistema de controle da produção, para que possa garantir que as situações de decisões geradas sejam menos complexas e possíveis de serem abordadas no processo decisório proposto.

Desta forma, o início da sistematização da tomada de decisões para programação da produção em ambientes complexos não deverá se preocupar em resolver os problemas, e sim, encontrar os problemas certos para se resolver. Para isto, é necessário entender claramente as situações de decisão e contar com a criatividade e experiência do pesquisador, principalmente ao definir o sistema de controle da produção que mais simplificará os problemas e oportunidades que se apresentarão para ser solucionados pelo tomador de decisões por meio do sistema de apoio a decisões para programação da produção.

Uma vez definido o sistema de controle da produção a ser usado, poder-se-á definir as situações de decisão provenientes deste sistema, assim como os objetivos a serem alcançados nestas situações. É importante frisar que a definição da situação de decisão envolve também a definição de várias características do problema decisório

envolvendo suas restrições, como tempo, custo e recursos, assim como todas as entidades que serão de alguma forma afetadas pela decisão. Após identificar estas situações de decisão, inicia-se a fase de projeto do processo decisório que será sistematizado. Este projeto visa criar uma visão geral dos componentes envolvidos na tomada de decisão, assim como os relacionamentos entre eles, por meio da criação ou uso dos modelos de decisão.

Esta modelagem possui importância fundamental para o processo de tomada de decisão utilizando tanto fatores subjetivos como objetivos, visando criar cenários do ambiente de decisão, onde as alternativas poderão ser testadas e analisadas convenientemente. Existe uma variedade de formas na qual estes modelos poderão ser construídos, dependendo do tipo de aplicação, permitindo a análise conveniente das alternativas possíveis, para se alcançar os objetivos definidos.

Por fim, o processo de decisão definido deverá ser iterativo e interativo, ou seja, deverá ser iterativo, pois as etapas do processo serão repetidas até que se encontrem alternativas que se aproximem o máximo possível dos objetivos iniciais definidos. E interativo, pois todos os passos exigem a interação direta com o tomador de decisão de forma intelectual e criativa, ou seja, dificilmente um processo decisório para elaboração da programação da produção em ambientes complexos poderá ser totalmente automatizado. Poder-se-á testar convenientemente, pelo tomador de decisões, vários modelos e valores decisórios até se chegar o mais próximo possível do objetivo produtivo almejado. Desta forma, em cada interação do processo decisório as próprias convicções e análises do tomador de decisões são alteradas, podendo-se mudar até mesmo os objetivos iniciais traçados.

5.4.1 A etapa de inteligência

A etapa de inteligência é o início do processo decisório onde as situações de decisões são identificadas e os objetivos definidos. Ao contrário da definição do sistema de controle da produção, que só será definido na racionalização do processo decisório, esta etapa será realizada sistematicamente a cada novo problema ou oportunidade que necessite de um processo de tomada de decisões. Desta forma, a cada nova decisão, a situação de decisão deverá ser reconhecida e definida, ou seja, os valores, objetivos, restrições, assim como as incertezas envolvidas.

No processo de elaboração da programação da produção os problemas que demandam a tomada de decisões geralmente estão relacionados a um conjunto de ordens de produção que devem atender a uma data de término previamente definida e às restrições do ambiente produtivo. O tomador de decisão ao entender a situação decisória, definirá os valores subjetivos relacionados com os objetivos decisórios e buscará quantificar as informações necessárias sobre o ambiente produtivo para que as restrições que o mesmo impõe possam ser satisfeitas. A definição destes valores subjetivos e/ou estimados é uma atividade importante desta etapa, pois visa suprir informações desconhecidas, difíceis de obter, ou que envolvem incertezas relacionadas principalmente ao objetivo decisório, lembrando que estes valores sofrerão grande influência do estilo decisório do tomador de decisões, potencializando sua influência nos resultados obtidos pelo processo de tomada de decisões.

5.4.2 A etapa de projeto e análise

Após a etapa de inteligência, onde, sistematicamente, a cada nova situação de decisão os valores e a própria situação de decisão são definidas, é iniciada a etapa de projeto, que consiste na construção ou escolha dos modelos decisórios e a posterior análise da situação decisória com base nos resultados obtidos com estes modelos. Esta etapa terá dois momentos distintos, quando da racionalização do processo decisório, far-se-á nesta etapa a análise dos tipos de modelagem que mais sejam adequados às possíveis situações de decisão geradas no ambiente produtivo em questão, e a posterior construção destes modelos de acordo com as características do ambiente produtivo particular. Uma vez construídos os modelos, os mesmos ficarão disponíveis no banco de modelos para escolha sistemática do tomador de decisões em cada nova situação de decisão, para que sejam realizadas as análises, desde que devidamente implementados e disponibilizados de forma transparente ao tomador de decisões, ou seja, transparecendo as complexidades referentes à sua metodologia de solução, fornecendo os resultados gerados para análise de forma clara e intuitiva.

A definição e construção dos modelos de decisão possuem uma importância primordial para se alcançar os objetivos desejados, possibilitando de forma efetiva a posterior geração e análise das possíveis alternativas decisórias. Com efeito, o processo de decisão está intrinsecamente ligado aos modelos, sem os quais pouco se

faria em termos de criação, análise e escolhas de alternativas. Segundo MALLACH (2000) a essência da utilização de modelos para a tomada de decisões reside no fato de que, para se tomar decisões, é necessário a observação de sua realidade envolvida, uma vez que os modelos podem proporcionar esta observação com diversas vantagens, com certeza, será uma importante ferramenta para o processo de tomada de decisões.

Muito se tem avançado na criação de modelos para o processo decisório, principalmente devido à evolução computacional. Modelos podem ser construídos utilizando uma grande variedade de técnicas e metodologias e tanto relações quantitativas como qualitativas podem ser consideradas, além de incertezas e julgamentos pessoais. As opções existentes em modelos devem ser empregadas de acordo com o tipo de situação decisória em questão. É importante que o pesquisador ou responsável pela sistematização do processo de decisão opte por uma modelagem conveniente, evitando complicações desnecessárias e garantindo melhores resultados (GOODWIN & WRIGHT, 1999)(WEATHERFORD *et. al.*, 1998).

WEATHERFORD *et. al.* (1998) propõem sérias razões para o uso de modelos para a tomada de decisões, segundo os autores, a criação de modelos:

- Forçam os tomadores de decisões a explicitar seus objetivos;
- Contribuem para a identificação dos tipos de decisões que influenciam os objetivos definidos;
- Exigem a identificação e entendimentos das interações entre as decisões e também as dificuldades de se empregá-las;
- Forçam os tomadores de decisões a pensar cuidadosamente sobre as variáveis que devem ser consideradas e o quanto as mesmas são quantificáveis;
- Exigem a consideração de quais dados são pertinentes de serem quantificáveis nas variáveis consideradas e a interação entre estes dados;
- Forçam o reconhecimento das restrições decisórias e dos valores que as variáveis quantificáveis podem assumir; e,
- Possibilitam melhor entendimento e comunicação das idéias geradas.

O autor justifica também que os modelos criados podem ser continuamente ajustados e melhorados, através do uso e experiência, possibilitando um modo conveniente de transmissão e melhoria do aprendizado empresarial. GUARISO, HITZ & WERTHNER (1996) ressaltam a importância da criação de modelos em

situações pouco estruturadas, possibilitando a posterior aplicação de várias técnicas como a simulação e a otimização.

Dentre as áreas de conhecimento que lidam com algum tipo de modelagem será particularmente importante para a tomada de decisões para programação da produção os modelos tratados pela área conhecida como pesquisa operacional ou ciência gerencial, pois se refere à aplicação de métodos científicos a problemas complexos, incorporando também fatores como riscos e probabilidades, possibilitando a previsão e predição, além da comparação de saídas, alternativas e estratégias possíveis, possibilitando ao tomador de decisões a determinação científica de política de ações (PHILLIPS, RAVINDRAN & SALBERG, 1976) (HO & SCULLI, 1997).

A pesquisa operacional será a base principal que estruturará e guiará os procedimentos para a definição dos modelos envolvidos no processo de tomada de decisões para programação da produção considerada por este trabalho. Desta forma, este trabalho adotará os princípios defendidos pela pesquisa operacional, se guiando por esta área de estudos. Dentre estes princípios pode-se citar com base em PHILLIPS, RAVINDRAN & SALBERG (1976):

- Não se deve construir um modelo complicado quando um modelo simples já é suficiente;
- Deve-se preocupar mais com a modelagem da realidade do que em ajustá-la a uma técnica ou metodologia;
- A fase de concepção e construção da lógica do modelo deverá ser conduzida rigorosamente;
- Um modelo deverá ser validado antes de sua implementação;
- Um modelo não deve ser tomado literalmente como a própria realidade, e sim, apenas avaliado em relação a sua utilidade;
- Um modelo não deve nem ser aplicado, nem ser criticado, por não se aplicar a situações nas quais não foi intencionalmente desenvolvido;
- Um dos primeiros benefícios de um modelo está associado com o próprio processo de seu desenvolvimento, pois permite aos modeladores um melhor conhecimento e entendimento do sistema a ser modelado;
- Um modelo não pode ser melhor do que a informação utilizada para criá-lo; e,

- Um modelo não poderá substituir o tomador de decisões, e sim, permitir a estes que tomem melhores decisões, pois certamente a experiência, intuição e julgamento do tomador de decisões é insubstituível.

Quanto aos riscos e incertezas envolvidas com as decisões para elaboração da programação da produção, como já foi frisado, este trabalho procurará introduzi-las de forma subjetiva, por meio da consideração dos valores, pelo tomador de decisões, envolvidos com vários dados do ambiente produtivo.

Quanto à escolha do tipo de modelo mais indicado para cada situação decisória, esta deve ser realizada à luz do objetivo desta situação. No geral, não existe uma regra prática para esta escolha, sendo que, tomar por base o objetivo e as características das possíveis situações de decisão é um guia conveniente para se proceder nesta escolha. Um trabalho neste sentido pode ser observado em MALHOTRA, SHARMA & NAIR (1999). O auxílio neste processo também pode ser encontrado em BANERJEE & BASU (1993). Já esforços no sentido de auxiliar a formulação de modelos decisórios podem ser encontrados em BINBASIOGLU (1995) e BENBASAT & TODD (1996). A seguir um esforço no sentido de auxiliar a escolha do tipo de modelo decisório mais apto a uma certa situação de decisão, por meio de uma proposta de classificação baseada na aplicabilidade dos modelos decisórios, é apresentada.

5.4.2.1 Classificação de modelos

Existem várias formas de se classificar um modelo de acordo com a forma na qual podem ser construídos. Em GOLDBARG & LUNA (2000) os autores realizam uma classificação dos tipos de modelos com base em sua natureza, separando-os em modelos físicos ou concretos e modelos abstratos. Dentre estes, os modelos abstratos são particularmente interessantes para o desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão. Quanto às propriedades dos modelos os autores os dividem em modelos icônicos, analógicos e simbólicos.

Já MARAKAS (1999), especificamente quanto aos modelos abstratos, classifica-os em modelos determinísticos, estocásticos, de simulação e conceituais, sobre este último, o autor descreve como modelos baseados em situações reais e experiências anteriores sobre o sistema modelado. MALLACH (2000), por sua vez,

também classifica os modelos abstratos quanto ao fator tempo, dividindo-os em modelos estáticos e dinâmicos e também em relação à forma na qual as variáveis que compõem o modelo podem ser alteradas, classificando-os em modelos contínuos e discretos.

Em decorrência da riqueza de possibilidades das situações de decisão nas quais os modelos abstratos são aplicáveis, verifica-se que uma classificação única seria insuficiente para sua devida caracterização, pertencendo um modelo, por sua vez, a várias classificações concomitantemente.

Apesar das classificações anteriores auxiliarem a melhor entender os vários tipos de modelos abstratos existentes, este trabalho entende que existe uma dificuldade em auxiliar o direcionamento na escolha de modelos em situações de aplicação para controle da produção. Em vista disto, este trabalho irá propor uma classificação de acordo com o tipo de objetivo desejado, visando facilitar a aplicação prática dos principais tipos de modelos existentes. A seguir esta classificação será apresentada tomando por base as possíveis situações decisórias em controle da produção, especialmente para o processo de elaboração da programação da produção.

5.4.2.1.1 Modelos de previsão

Os modelos de previsão são empregados quando se deseja prever os possíveis valores de uma certa situação ou decorrentes de uma decisão. De fato, as empresas estão freqüentemente tendo que prever valores futuros para uma série de decisões gerenciais, como, por exemplo: prever a demanda de um certo produto, visando regular os estoques e a programação da produção (JOHNSON & MONTGOMERY, 1974).

No controle da produção, os modelos de previsão são empregados principalmente para a realização de planejamentos de curto prazo. Dentre os modelos disponíveis para este fim podem-se citar os modelos de regressão, os modelos de séries temporais, entre outros. Um detalhamento destes modelos pode ser encontrado em SIPPER & BULFIN (1997), NAHMIA (2001), BUFFA & SARIN (1987), GAITHER & FRAZIER (2001) e JOHNSON & MONTGOMERY (1974). A aplicação de modelos de regressão pode ser encontrada em SCHLEIFER & BELL (1994). Em MCHANNEY &

DOUGLAS (1997) é apresentado um trabalho de aplicação de modelos de regressão múltipla para apoiar as decisões de gerentes de produção.

5.4.2.1.2 Modelos de simulação

Um modelo de simulação é um modelo dinâmico, geralmente envolvendo elementos estocásticos, que descreve o comportamento de um sistema de acordo com as interações entre seus elementos através do tempo. A utilização de modelos de simulação é aplicável para analisar cenários de decisão quando se consegue modelar analiticamente o comportamento de cada elemento do sistema, mas seria inviável analisar todas as interações entre estes elementos ao mesmo tempo (MALLACH, 2000).

Em situações complexas, principalmente onde existem muitos fatores de interação entre os componentes do sistema, torna-se difícil ou até impossível sua análise e modelagem analítica. Situações deste tipo exigem considerar a dinâmica sistêmica para se analisar convenientemente o problema, através de modelos de simulação. Esta situação é bem característica dos sistemas produtivos, justificando a utilização de modelos de simulação nestas situações (MCHANEY & DOUGLAS, 1997). Existem atualmente um grande número de técnicas e ferramentas para a construção de um modelo de simulação para apoio à decisão nas mais diversas áreas empresariais (OAKSHOTT, 1997) (KELTON & LAW, 1991).

Segundo KRAJEWSKI & RITZMAN (1996) existem várias razões para se utilizar modelos de simulação para controle da produção, dentre estes pode-se citar:

- Quando a relação entre as variáveis não é linear;
- Quando existem muitas variáveis ou restrições;
- Quando é necessário testar os resultados;
- Quando é necessário avaliar diferentes configurações ou alternativas;
- Quando é necessário obter estimativas operacionais do sistema; e,
- Para a realização de treinamentos e verificação de decisões gerenciais.

KRAJEWSKI & RITZMAN (1996) citam também que a aplicação de modelos de simulação para controle da produção possibilita a análise e obtenção de alternativas sub-ótimas de um problema, principalmente quando não é viável aplicar

métodos de otimização. A aplicação de modelos de simulação para controle da produção também pode ser encontrado em EVAN, OLSON & EVANS (1998), PHILLIPS, RAVINDRAN & SALBERG (1976), HILLIER & LIEBERMAN (1967), PRADO (1999), TAHA (1976), MCHANEY & DOUGLAS (1997).

5.4.2.1.3 Modelos de otimização e métodos aproximativos

O fato de uma situação de decisão em programação da produção considerar múltiplas opções decisórias torna os modelos de otimização altamente indicados, principalmente quando é fundamental a seleção da melhor opção dentro das alternativas possíveis. Dependendo do tipo de situação envolvida esta seleção é demasiada complexa para ser obtida pelo tomador de decisões sem considerar algum apoio. É justamente isto que propõe os modelos de otimização, auxiliar na busca das melhores soluções. Para isto, emprega métodos matemáticos e lógicos diversos, buscando envolver a maior parte das situações decisórias possíveis (DIMKOU & PAPALEXANDRI, 1998).

Uma das principais formas de se criar um modelo de otimização é através de uma ou mais equações matemáticas. Para estas equações a equação principal é conhecida como função objetivo sendo que as outras equações visam principalmente descrever as restrições na qual a situação decisória esta sujeita, estes modelos são conhecidos como modelos de programação matemática. Modelos de programação matemática são muito empregados em problemas práticos, principalmente devido à possibilidade de se usar, como método de solução, ferramentas computacionais genéricas disponíveis comercialmente. Outra forma comum de se criar um modelo de otimização é através de algoritmos lógicos. Estes algoritmos geralmente são específicos ao problema modelado e seu método de solução dependerá da devida implementação computacional do algoritmo.

Os modelos de otimização teriam uma aplicabilidade restrita, para auxílio à tomada de decisões, se só pudessem considerar variáveis determinísticas. Uma saída para este problema seria a aplicação de elementos sob incerteza, em conjunto com estes modelos de otimização. É importante considerar que a natureza combinatorial dos problemas de otimização poderá facilmente inviabilizar este procedimento, principalmente quando se consideram modelos inteiros de otimização. Uma possível

solução é a utilização de modelos de otimização em conjunto com modelos que consideram algum tipo de incerteza, como os modelos de simulação. Segundo SHERALI & DRISCOLL (2000) a área de otimização estocástica é relativamente nova e se encontra em construção. Em DENTCHEVA & PRÉKOPA (2002) é possível encontrar uma revisão sobre o tema.

A pesquisa operacional atualmente disponibiliza uma variedade de técnicas e metodologias para solução destes modelos. Existe um grande número de ferramentas computacionais que disponibilizam métodos de solução para modelos de otimização em aplicações práticas sendo usadas para o apoio a decisões empresariais. Entretanto, devido à natureza combinatória dos problemas de otimização, nem sempre é possível dispor de métodos eficientes para sua solução exata em tempos viáveis. Em detrimento da busca de uma solução exata, mas inviável, tem se verificado nos últimos anos, como cita GOLDBARG & LUNA (2000), um aumento no surgimento de métodos e algoritmos de solução computacionalmente eficientes, mas que não garantem sua solução exata. Estes algoritmos são conhecidos como heurísticos ou aproximativos. Apesar disto, a importância dos métodos exatos para problemas aplicáveis é grande, sendo sempre desejado, caso possível, que um problema seja resolvido desta forma.

Quanto aos métodos exatos de solução existentes, um algoritmo de solução altamente eficiente é conhecido como algoritmo “*simplex*”, fornecendo soluções para vários tipos de problemas aplicáveis, desde que o modelo possa ser descrito como um conjunto de equações lineares de variáveis contínuas. Para os problemas contínuos, mas não lineares, geralmente é possível aplicar métodos de linearização e resolvê-los também pelo algoritmo “*simplex*”, apesar de existirem atualmente vários métodos especializados para estes tipos de problemas. Já os problemas lineares, nos quais uma ou mais variáveis não são contínuas, carecem de um método tão eficiente como o algoritmo “*simplex*”. Entretanto, vários métodos de solução têm sido propostos visando criar estratégias de soluções possíveis de serem resolvidas em um tempo computacionalmente viável. Dentre os métodos disponíveis para lidar com estes tipos de problemas, as estratégias enumerativas são as mais efetivas. Dentre os métodos existentes podem-se citar: “*Branch & Bound*”, “*Cutting Planes*”, “*Branch & Cut*”, “*Branch & Price*”, programação dinâmica, entre outros. Uma revisão sobre métodos de solução exatos para modelos de otimização poderá

ser encontrado em HILLIER & LIEBERMAN (1967), TAHA (1975) (1976), PHILLIPS, RAVINDRAN & SALBERG (1976), BRADLEY, HAX & MAGNANTI (1977), GOLDBARG & LUNA (2000) e PRADO (1999).

Quanto aos métodos aproximativos ou heurísticos de solução disponíveis GOLDBARG & LUNA (2000) sugerem uma classificação de acordo com a *figura 5.2*. Esta classificação representa um conveniente ponto de partida no momento de se buscar um método aproximativo.

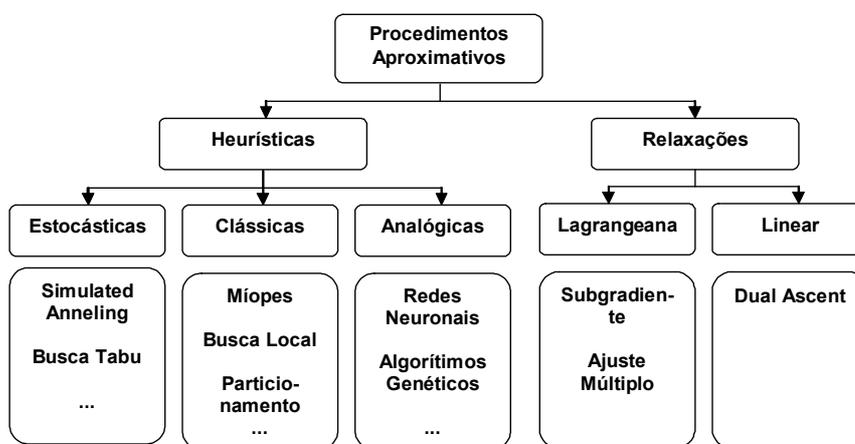


FIGURA 5.2: Classificação das abordagens aproximativas (Fonte: GOLDBARG & LUNA (2000), p. 245))

Alguns destes métodos são descritos com maiores detalhes a seguir:

- “*Simulated Annealing*”, este método baseia-se em um tipo de algoritmo de busca local utilizando conceitos de termodinâmica, onde um estado físico final, ou seja, a solução, é alcançada com o mínimo do consumo de energia. Para ter início, a técnica utiliza uma solução possível inicial e, em cada iteração, aleatoriamente, um vizinho é selecionado e a solução gerada é avaliada, através da avaliação de uma função de decréscimo energético, prosseguindo com a redução da temperatura até que um valor considerado como temperatura de congelamento é encontrado e a busca é terminada (GARETTI & TAISCH, 1999);
- “*Busca tabu*”, neste método se toma por base uma solução inicial possível e procede-se definindo mudanças nesta solução, sendo que, todas as soluções possíveis de serem obtidas com uma única mudança são conhecidas como vizinhança desta solução. Todas as soluções das mudanças vizinhas são avaliadas e, em cada iteração, as mudanças que apresentaram soluções piores do que as originais são armazenadas em uma lista, para que não sejam mais realizadas. Caso

uma mudança gere uma solução melhor que a original esta solução passa a ser considerada e novas mudanças são realizadas e analisadas para esta solução, de forma que, o critério de parada possa ser definido de vários modos dependendo da aplicação (GARETTI & TAISCH, 1999). Este tipo de método de otimização é comumente aplicado em problemas de programação da produção e programação de operações, sendo disponíveis vários trabalhos sobre este tema como em CÂNDIDO (1997), BAYKASOGLU (2001), e LOKKETANGEN & GLOVER (1998). BRUCKER, HURINK & WERNER (1996) (1997) apresentam esforços no sentido de melhorar os métodos “*Simulated Annealing*” e “Busca tabu” quando aplicados em problemas de programação da produção. Em VIANA & SOUSA (2000) é possível encontrar aplicações de técnicas de “*Simulated Annealing*” e “Busca tabu” para programação de atividades em projetos com restrições de recursos; e,

- Algoritmos genéticos, este método realiza um processo de busca adaptativa que imita o processo natural de seleção genética, como será visto com mais detalhes a seguir.

Em JÓZEFOWSKA *et al.* (1998) é possível encontrar uma comparação de aplicação entre três importantes meta-heurísticas, quais sejam, “*Simulated Annealing*”, “Busca Tabu” e algoritmos genéticos, aplicadas a problemas de programação da produção.

Já as heurísticas clássicas buscam explorar casuisticamente a estrutura do problema. BLUM (2005) realiza uma conveniente divisão dos métodos aproximativos em dois grupos principais, quais sejam:

- Métodos de busca em árvore: a maioria são originários da área de inteligência artificial. Estes métodos possuem uma natureza construtiva. Seu mecanismo de busca mapeia a estrutura da árvore de forma que o caminho entre a raiz e a extremidade corresponde ao processo de formação da solução. Como exemplo pode-se citar os métodos de “*backtracking*” e “*beam search*”; e,
- Métodos de busca local: estes métodos exploram um espaço de busca movendo de solução a solução por meio de um limite imposto por uma estrutura de vizinhança da solução parcial analisada.

Os métodos heurísticos também podem ser hibridizados com outros métodos visando melhorar a sua efetividade. O emprego destas estratégias de

otimização é amplamente difundido existindo uma grande variedade de aplicação em situações reais. Estes tipos de aplicações podem ser encontrados em DUTTA (1996), TEGHEM, PIRLOT & ANTONIADIS (1995), JASZKIEWICZ (2002) e CÂNDIDO (1997).

Por fim, os modelos de otimização também possuem uma importante aplicação como entrada de outros modelos, por exemplo, pode-se utilizá-los para melhorar a definição inicial dos valores das variáveis controláveis e dos eventos de um modelo de simulação, reduzindo consideravelmente seu tempo de execução (BYRNE & BAKIR, 1999).

5.4.2.1.4 Modelos multi-critério

Os modelos multi-critério para apoio à decisão se originaram da dificuldade existente em lidar com a grande desestruturação do processo decisório e os inúmeros fatores subjetivos envolvidos com este processo. Para isto, vários fatores são considerados ao se avaliar uma decisão como a opinião de todos os envolvidos, imprevistos possíveis de acontecer, além de fatores intangíveis relacionados com a situação de decisão.

Devido à grande aplicabilidade dos modelos multi-critério de apoio à decisão existem atualmente um extensivo número de trabalhos e métodos disponíveis, aplicados a várias áreas do conhecimento, principalmente para apoiar decisões empresariais. Um direcionador para aplicação de técnicas de apoio à decisão multi-critério pode ser encontrada em PARKAN & WU (2000), AL-SHEMMERI, AL-KLOUB & PEARMAN (1997), GRAVEL *et al.* (1994) e BUTLER, JIA & DYER (1997). Um importante “*survey*” sobre a aplicação de modelos multi-critério em problemas de programação de operações pode ser encontrado em T'KINDT & BILLAUT (2001).

5.4.2.1.5 Modelos baseados em conhecimento

Os modelos baseados em conhecimento procuram criar algum modo de imitação do raciocínio e experiência humana, com o intuito de auxiliar ou melhorar a performance do tomador de decisões, através de alguma forma de captura do

conhecimento de especialistas humanos e da armazenagem e recuperação efetiva deste conhecimento, de forma aplicável em situações decisórias. Dentre as principais características destes modelos estão a habilidade de transferir conhecimentos, raciocínios e explicar situações, sendo aplicáveis para auxiliar a tomada de decisões, tanto de não especialistas, como também de especialistas no assunto, na forma de um assistente, com o intuito de potencializar suas decisões (KIVIJÄRVI, 1997) (ABDALLAH, 1995).

Os modelos baseados em conhecimento fazem parte da área de estudos conhecida com inteligência artificial. Segundo MOCKLER & DOLOGITE (1992) inteligência artificial é a capacidade de um dispositivo, como um computador, realizar funções ou tarefas que poderiam ser consideradas como de inteligência, se fossem observadas em humanos. Os modelos desenvolvidos com base nos preceitos da inteligência artificial têm como principal objetivo uma interação com o usuário ou o seu ambiente, simulando os principais comportamentos humanos como o aprendizado, entendimento, capacidade de realização de análises, planejamento, adequação ao ambiente, entre outros. Apesar dos modelos baseados em conhecimento serem bastante difundidos, como citado por BINDER (1994), existem ainda alguns obstáculos que se opuseram à sua utilização definitiva nas empresas, dentre estes, pode-se citar a dificuldade em se averiguar todo o conhecimento de determinada área e o embaraço do computador em lidar com atividades completamente desconhecidas, onde vale a regra da “tentativa e erro”.

Como relata LUCAS & GAAG (1991) os modelos baseados em conhecimento foram uma das primeiras áreas da inteligência artificial a se tornar aplicável comercialmente. Uma análise da aplicação de modelos baseados em conhecimento para apoio a decisões pode ser encontrada em DENG & TSACLE (2000), sendo que, como relata LIEBOWITZ (2000) problemas de programação de operações representam uma das áreas comerciais que mais se encontram aplicações de modelos baseados em conhecimento, justamente pela complexidade destes problemas e, também, devido à sua natureza combinatorial.

Dentre os principais tipos de modelos baseados em conhecimento pode-se citar os modelos baseados em regras que utilizam regras lógicas da mesma forma que o raciocínio humano. A construção de um sistema deste tipo se baseia em desvios

condicionais aplicados a uma certa área de conhecimento (ABDALLAH, 1995) (KINGMAN & SOUZA (1997). Outro tipo de modelo baseado em conhecimento são os modelos baseados em casos, nestes modelos procura-se utilizar o conhecimento obtido em casos anteriores para resolver os problemas em questão. O problema é resolvido recuperando um caso que seja similar ao problema e realizando as alterações necessárias, podendo-se reutilizar casos resolvidos na solução de problemas futuros (DENG & TSACLE, 2000).

Podem-se citar também os modelos de redes neurais que procuram imitar o processo de aprendizagem humana da mesma forma como ocorre com o cérebro. As redes neurais são uma das tecnologias mais eficientes para se realizar generalizações ou traçar panoramas de situações quando se considera informações incompletas (DENG & TSACLE, 2000), além de, como relata BOLLOJU (1999), ser também amplamente utilizada para se realizar classificações e encontrar padrões em dados que envolvem, muitas vezes, grande nível de subjetividade. WANG *et al.* 1997 citam a grande possibilidade de aplicação das redes neurais principalmente para encontrar relações não lineares entre várias entradas e saídas. WONG, BODNOVICH & SELVI (1997) realizaram um importante “*survey*” de aplicação de redes neurais em problemas empresariais. Devido à grande aplicabilidade das redes neurais nos mais diversos tipos de situações, tem-se registrado muitos trabalhos de aplicação desta técnica em planejamento e controle da produção (GARETTI & TAISCH, 1999).

Já os modelos com base na lógica “*fuzzy*” são utilizados para lidar com situações vagas, ambíguas, imprecisas e incompletas. Devido a estas características, os modelos construídos com base na lógica “*fuzzy*” possuem uma vasta aplicabilidade principalmente para apoio a decisões pouco estruturadas. A capacidade da lógica *fuzzy* em lidar com situações pouco estruturadas e de incerteza tem direcionado várias pesquisas no intuito de integrá-la com outras técnicas, como algoritmos genéticos (SAKAWA & MORI, 1999) (LIU & IWAMURA, 2001) (DAHAL, ALDRIDGE & MCDONALD, 1999), redes neurais (BOLLOJU, 1999), modelos de otimização (LIU, 1998), entre outros. Em MIRCHANDANI & PAKATH (1999) é possível encontrar comparações entre tipos de modelagem baseada em conhecimento.

5.4.2.1.6 Modelos analíticos de dados

Os modelos analíticos de dados são aplicados quando se deseja gerar conhecimentos com base no conjunto de dados operacionais criados por meio dos sistemas de informações empresariais. A operacionalização de um ambiente empresarial gera uma infinidade de dados relacionados com as atividades desenvolvidas neste sistema. Estes dados, por sua vez, conservam intrinsecamente muitas informações relevantes sobre a empresa. Apesar disto, estes dados são utilizados apenas para gerenciamento e monitoramento das funções empresariais, desperdiçando seu grande potencial, que é o apoio às decisões empresariais.

De acordo com o conceito de modelo, os modelos analíticos de dados visam criar uma compreensão da realidade empresarial, se baseando nos dados gerados por esta realidade, armazenados convenientemente em um banco de dados computacional. Os modelos analíticos de dados podem ser concebidos por meio de tabelas ou gráficos multidimensionais, com aplicações de formulações matemáticas convenientes nos cruzamentos destas dimensões, como somas, totalizações ou análise estatísticas. A construção destes modelos reside justamente na definição de quais dados farão parte das dimensões e quais dados serão totalizados, somados ou estatisticamente analisados.

Outra forma de conceber um modelo analítico de dados é por meio da definição de correlações entre elementos de um sistema, com base na análise dos dados gerados por estes elementos e armazenados em um banco de dados. A definição de modelos que consigam extrair informações relevantes destes dados operacionais, auxiliando os tomadores de decisões, principalmente em atividades táticas e estratégicas, possuem atualmente uma grande importância para as empresas por proporcionar um suporte efetivo ao processo de tomada de decisões.

Os modelos analíticos tomam por base os dados empresariais devidamente armazenados em um armazém de dados ou “*data warehouse*”. Este armazém possui por objetivo armazenar os dados empresariais de várias fontes, organizando-os por assunto e separando-os fisicamente dos sistemas de informação operacionais da empresa. Segundo KIMBALL (1996) os armazéns de dados são basicamente tecnologias computacionais criadas para aumentar a integridade dos dados

operacionais provenientes de várias fontes e proporcionar um meio efetivo para que se realize uma posterior extração de informações relevantes destes dados visando auxiliar o processo decisório empresarial.

Dentre os modelos disponíveis para realização de análises em armazém de dados, um dos mais utilizados é conhecido como processamento analítico “*On-Line*” (*OLAP – On-Line Analytical Processing*). Esta metodologia foi desenvolvida no início da década de noventa a partir de considerações realizadas por E. F. Codd e, mais recentemente, o termo “*OLAP*” é utilizado para representar uma vasta categoria de ferramentas computacionais que possibilitam que tomadores de decisões construam modelos multi-dimensionais sobre um armazém de dados e realizem a análise conveniente destes modelos, encontrando correlações e tendências (MARAKAS, 1999)(KOUTSOUKIS, MITRA & LUCAS, 1999).

Outro método de se criar um modelo analítico de dados é por meio da determinação de correlações existentes entre elementos do sistema a ser analisado, tomando por base o conjunto de dados gerados por este sistema e armazenados no armazém de dados. Geralmente empregam-se métodos estatísticos para a obtenção destas correlações ou métodos baseados em inteligência artificial como, por exemplo, redes neurais. O processo de buscar estas relações entre os elementos do sistema no armazém de dados é conhecido como mineração de dados, que empresta o nome ao método.

5.4.2.2 Análises com modelos

Como já frisado, a confecção de modelos tem por objetivo viabilizar um processo interativo e analítico com o tomador de decisões. Neste processo as alternativas podem ser analisadas, assim como buscas por objetivos podem ser empreendidas, para que considerações iniciais possam ser melhoradas.

Dentre os métodos de análises possíveis, a análise de cenários, também conhecida como análise do tipo “E se”, que se referem às mudanças empreendidas nas variáveis de decisão de um modelo, com o intuito de verificar as performances do sistema analisado, de acordo com os resultados apresentados pela função objetivo, são as mais utilizadas. Existem também outros métodos de análise decisória usuais como a análise de sensibilidade onde busca-se encontrar o quão sensível os resultados

apresentados pela função objetivo é, em relação a alterações nos valores das variáveis de decisão. A análise por busca de metas, onde procede-se ao contrário da análise de cenários, ou seja, determinam-se o valor desejado para a função objetivo e busca-se pelos valores das variáveis de decisão que corresponderiam a esta performance. E também a análise de otimização, que por sua vez, é uma extensão sofisticada das outras análises. Por fim, os métodos de análise podem ser empregados separadamente ou em conjunto, dependendo da situação de decisão e do modelo decisório considerado (O'BRIEN, 1996).

Por fim, é importante ressaltar que o projeto de modelos será realizado apenas durante a busca de racionalização do processo de tomada de decisões, onde, a partir do entendimento das situações de decisão, poderão ser construídos modelos decisórios adequados a esta situação e que seja possível de solução em um tempo razoavelmente curto sem transparecer para o usuário as dificuldades desta solução. Pode-se considerar que a posterior sistematização do processo decisório já contará com os modelos prontos e implementados em alguma ferramenta computacional, restando para o tomador de decisão, nesta etapa, a escolha dos modelos e a posterior análise dos resultados gerados pelo método de solução do mesmo.

5.4.3 A etapa de escolha

A etapa de escolha é a decisão propriamente dita, sendo assim, esta etapa será realizada sistematicamente a cada nova situação de decisão. É neste momento que o tomador de decisão escolherá entre as alternativas possíveis e se comprometerá com um caminho a seguir e suas conseqüências. Uma vez que a devida consideração das etapas anteriores tenha sido realizada, será na etapa de escolha onde os fatores, ambientais, culturais, políticos, comportamentais, valores, entre outros, realmente tem efeito e também, quando o tomador de decisão assume seu papel mais importante.

5.5 Sistemas De Apoio À Decisão

Os sistemas de apoio à decisão são sistemas computacionais que visam sistematizar e apoiar os processos decisórios empresariais, sendo comumente compostos pelos mesmos componentes básicos como: interface com o usuário, banco de dados e banco de modelos, visando fornecer apoio em decisões semi-estruturadas e

desestruturadas. É amplo o número de definições para sistemas de apoio à decisão e uma busca na literatura existente traz várias definições que, apesar de, no geral, não diferir da definição anterior, pode variar em alguns detalhes. Dentre estas definições pode-se citar SPRAG & WATSON (1991) que definem estes sistemas como sistemas computacionais que visam apoiar os tomadores de decisões através de uma interação direta com modelos, dados e análises. STAIR (1998) os definem como sistemas computacionais flexíveis que fornecem apoio a decisões não rotineiras e não estruturadas, empregando modelos, cenários de decisões, formulações, sugestões e cruzamento de informações, adicionando qualidade às decisões que freqüentemente são formuladas apenas parcialmente. Já para MARAKAS (1999) um sistema de apoio à decisão é um sistema que apóia o processo de tomada de decisões, estando sob controle do tomador de decisões, disponibilizando um conjunto de ferramentas para estruturar e aumentar a efetividade das decisões. Mais definições de SAD podem ser encontradas em KIVIJÄRVI (1997), ECKER, GUPTA & SCHMIDT (1997), BINDER (1996) e FERNANDES (1991). Por fim, os referidos autores definem sistemas de apoio à decisão como sistemas computacionais nos quais o trabalho analítico de propor uma solução para um dado cenário é realizado pelo computador, enquanto são reservadas para o tomador de decisões as atividades de pensamento e julgamento.

A origem dos sistemas de apoio à decisão tem por base os estudos teóricos sobre a tomada de decisão realizados no instituto Carnegie na década de cinquenta e trabalhos técnicos sobre o tema realizado no MIT na década de sessenta (SHIM *et al.*, 2002). Na década de setenta os esforços em aplicar modelos quantitativos em situações decisórias empresariais consolidaram o conceito de sistemas de apoio à decisão. Pesquisadores desta época observaram que um dos grandes problemas com os modelos gerenciais eram que os gerentes raramente os utilizavam, sugerindo um sistema que fosse simples, intuitivo, robusto, fácil de controlar, funcional, além de se adaptar as necessidades dos usuários (MARAKAS, 1999).

Como cita EOM (1996), o termo sistema de apoio à decisão tem sido alterado e criticado, como quando, há duas décadas atrás, chegou a ser questionado por alguns pesquisadores que afirmaram não existir qualquer modelo conceitual formal sobre o tema, causando sérias dúvidas sobre sua substantividade, existindo apenas nas mentes de acadêmicos visionários. Desde então, a área de SAD tem se desenvolvido

continuamente e uma crescente quantidade de pesquisas sobre o tema tem sido apresentada, buscando estabelecer uma tradição de pesquisa cumulativa tornando a área de estudos coerente e substantiva.

Um estudo inicial visando identificar a estrutura intelectual da área pode ser encontrada em EOM (1996), buscando definir também sua tradição de pesquisa, disciplinas de referência, principais temas de pesquisa e difusão, no intuito de proporcionar um guia para desenvolvimentos teóricos e pesquisas futuras. Neste trabalho, uma análise da área envolvendo as décadas de 70 e 80 e início da década de 90 mostra a evidência de uma tradição de pesquisa cumulativa, entretanto, resultados conflitantes e/ou inconsistentes têm sido acumulados, principalmente nas sub-área de SAD em grupo, interfaces com o usuário e implementação, apesar de, existir sinais encorajadores de progressos científicos. Neste período de tempo as pesquisas se concentraram nos componentes de um SAD, sendo que, pesquisas em projeto e avaliação não foram substantivas. Por outro lado, a área de gerenciamento de dados e modelos experimentou grande progresso, principalmente as sub-áreas de representação, processamento, integração e aplicação de inteligência artificial no gerenciamento de modelos.

EOM (1996) conclui que o futuro da pesquisa em SAD deve redirecionar sua atenção para o desenvolvimento de especialidades que proporcionem um guia aplicável de princípios para o processo integrado de projeto, implementação e avaliação. Segundo EOM (1996) um pesquisador em SAD deve se ater às seguintes questões (pp. 330): *“Nós estamos desenvolvendo teorias, conceitos, modelos, métodos, técnicas, e ferramentas que possam ser aplicadas na prática? Nossa pesquisa em SAD tem sido relevante para prover as necessidades dos gerentes?”*. Ainda EOM (1996), ao analisar o crescente nível de implementação de SAD em organizações, evidenciando-o como uma ferramenta gerencial bem aceita na qual os benefícios tangíveis e intangíveis têm sido evidenciados levanta a questão que permanece sem resposta (pp. 330) *“Quais têm sido as contribuições dos pesquisadores em SAD para alcançar estes inúmeros e significantes benefícios?”*, pois, como cita o autor, uma análise das pesquisas em um importante periódico da área de meados da década de oitenta a meados da década de noventa revela que nenhum dos artigos aponta que significantes benefícios em SAD são atribuídos à aplicação de teorias, técnicas ou conceitos desenvolvidos por

pesquisadores. Por fim, o autor conclui que as pesquisas na área não realizarão contribuições significativas a menos que encontrem um denominador comum entre pesquisadores e práticos, criando uma teoria articulada para a prática.

5.5.1 Componentes de um sistema de apoio à decisão

Tradicionalmente, um sistema de apoio a decisões consiste de três componentes principais, quais sejam:

- Sistema gerenciador de banco de dados: é onde se realiza o gerenciamento das atividades associadas com armazenagem, recuperação e organização de dados relevantes para uma decisão em particular;
- Sistema gerenciador de modelos: as atividades relacionadas com a armazenagem, recuperação e organização, desta vez, dos vários modelos que proporcionam as capacidades analíticas de um sistema de apoio à decisão; e,
- Interface do usuário: representa um elemento chave de um sistema de apoio à decisão, permitindo que os outros componentes do SAD possam ser facilmente acessados e manipulados.

MARAKAS (1999) introduz mais dois componentes a um sistema de apoio à decisão:

- Mecanismo de conhecimento: são responsáveis por atividades relacionadas com o reconhecimento do problema e geração das soluções, geralmente utilizam alguma metodologia baseada em conhecimento; e,
- Usuário: é o tomador de decisão ou o envolvido com o processo de tomada de decisão propriamente dito. Como cita o autor, assuntos relacionados às características do usuário, motivação, conhecimento, costumes, entre outros, são elementos essenciais para o sucesso de uma aplicação de um sistema de apoio à decisão.

Componentes baseados em conhecimento são cada vez mais defendidos para fazerem parte de um SAD, transformando a área de inteligência artificial como uma importante fonte de trabalhos em SAD. Um dos aspectos fundamentais desta aplicação é o fato de criar uma característica mais ativa ao sistema, tornando-o capaz de inferir, aprender e se adaptar ao meio no qual está aplicado. Um modelo para a construção de um SAD com estas características pode ser encontrado em CHUANG &

YADAV (1998). Uma importante revisão sobre as áreas de aplicação de sistemas baseados em conhecimento, assim como métodos de validação e implementação destes sistemas, podem ser encontrados em O'KEEFE & PREECE (1996).

5.5.2 Características, desenvolvimento e tendências para os sistema de apoio à decisão

Apesar do grande número de trabalhos na área, pode-se perceber um consenso entre as características desejadas para um sistema de apoio à decisão. As análises dos principais trabalhos referentes a este tipo de sistema convergem para as seguintes características primordiais:

- São utilizados para a resolução de problemas mais complexos e menos estruturados;
- Envolvem grandes volumes de dados e de diferentes fontes;
- Combinam modelos e técnicas analíticas com funções tradicionais de análise e recuperação de dados;
- Possuem flexibilidade de relatórios e apresentações;
- São voltados para estilos individuais de tomada de decisões;
- Possuem formato modular;
- Realizam análises sofisticadas;
- Possuem orientação gráfica;
- Utilizam abordagens de otimização e/ou heurísticas;
- Usam modelos e sugestões; e
- Podem realizar análises de simulações e atingimento de metas.

Em um trabalho mais recente, MARAKAS (1999) sugere as seguintes características desejadas para um sistema deste tipo:

- Lidar com contextos semi-estruturados e desestruturados;
- Auxiliar o tomador de decisões ao invés de substituí-lo;
- Suportar todas as fases do processo de tomada de decisões;
- Focar na eficácia do processo decisório e não na sua eficiência;
- Ficar sob controle do tomador de decisões;
- Ser fundamentado em dados e modelos;
- Facilitar o aprendizado do tomador de decisões;

- Ser interativo e intuitivo;
- Ser desenvolvido geralmente utilizando um processo evolucionário e interativo;
- Proporcionar suporte a todos os níveis organizacionais;
- Auxiliar tanto em decisões independentes como também em decisões interdependentes; e,
- Suportar decisões individuais e também em grupo.

Ultimamente uma busca maior de integração entre as decisões favorecem as pesquisas em sistemas com maior integração e cooperação entre os tomadores de decisões, um estudo neste sentido pode ser encontrado também em KIM, ROHAE & EMDAD (2001).

O delineamento das características desejadas para um sistema de apoio à decisão auxilia no processo de concepção e desenvolvimento de um sistema deste tipo, criando um guia genérico para sua obtenção e verificação. Segundo SHIM *et al.* (2002), as pesquisas em sistemas de apoio à decisão focam principalmente em como se pode melhorar a eficiência e a efetividade no processo de tomada de decisões.

Quanto ao desenvolvimento de um SAD, um dos principais fatores que influenciam é sua aplicação. Em uma abordagem macro, sistemas de apoio à decisão podem ser institucionais ou específicos. Sistemas de apoio à decisão institucionais são usualmente aplicados a uma área fabril ou a toda a organização, sendo utilizados regularmente e envolvendo várias pessoas. Enquanto um sistema de apoio à decisão específico é desenvolvido geralmente para um único uso e freqüentemente envolvendo apenas um único tomador de decisões (MALLACH, 2000). Em KIVIJÄRVI (1997) pode-se encontrar direcionadores sobre o método de desenvolvimento de um SAD. JEUSFELD & BUI (1997) realizaram dois “*surveys*” em revistas americanas sobre este tema e endereçam as seguintes dificuldades envolvidas no desenvolvimento e/ou adoção de um SAD em empresas:

- Dificuldade em adequar os problemas empresariais na forma de um SAD apropriado, pois os tomadores de decisões freqüentemente possuem dificuldades para encontrar modelos analíticos disponíveis para seus problemas decisórios;
- Dificuldade em manter o SAD atualizado, devido à constante atualizações e novidades nas técnicas e modelos disponíveis; e,

- Especificidades das aplicações disponíveis, grande parte das aplicações existentes em SAD são dirigidas a domínios específicos, além de utilizarem formatos de entrada e saídas de informações específicos, dificultando sua utilização de forma mais generalizada.

O acompanhamento da área de sistemas de apoio à decisão permite ainda avaliar o estado de aplicação e também tecnológico que se encontram estes tipos de sistemas, além de projetar tendências futuras para a área visando guiar novos desenvolvimentos e pesquisas sobre o tema. Shim *et al.* (2002) realizaram um importante trabalho neste sentido traçando um perfil das principais ferramentas, tecnologias e aplicações de sistemas de apoio à decisão. Segundo os autores, poderosas ferramentas estão emergindo para este tipo de sistemas, dentre estas, os armazéns de dados emergiram em conjunto com as ferramentas analíticas de acesso aos dados e também as ferramentas de mineração de dados. Os autores relatam ainda a “*Internet*” como uma das plataformas de desenvolvimento mais importantes para sistemas de apoio à decisão, representando o centro das atividades de desenvolvimento para a área. Através dos sistemas de apoio à decisão para “*Internet*” as empresas podem diminuir suas barreiras tecnológicas tornando mais fácil e menos custoso o acesso a estes sistemas. Um trabalho sobre o uso de uma plataforma comum, baseada na “*Internet*”, para intercâmbio de modelos decisórios pode ser encontrado em KIM (2001).

Outras importantes tendências para a área são os sistemas colaborativos e de trabalho em grupo. O processo de tomada de decisão geralmente envolve equipes multidisciplinares em complexas decisões e em vários locais. Para isto, os sistemas de apoio à decisão estão absorvendo tecnologias chaves para suportar estas necessidades (SHIM *et al.*, 2002). Na área de otimização os principais progressos têm sido realizados no suporte dos sistemas de apoio à decisão à formulação e análise de problemas, aproveitando a constante evolução nos algoritmos e métodos computacionais, tanto exatos como heurísticos, disponíveis para lidar com problemas aplicáveis (SHIM *et al.*, 2002). Sistemas de apoio à decisão estão tornando o processo de otimização mais ao alcance dos tomadores de decisões, buscando criar formas mais intuitivas e acessíveis de se formular e analisar a grande variedade de problemas práticos existentes. Por fim, é importante considerar que estas técnicas e ferramentas não são aplicáveis isoladamente, e sim em conjunto, criando uma maior sinergia e efetividade de aplicação.

5.6 Revisão Das Aplicações Existentes De SAD Para Controle Da Produção

Este tópico tem por objetivo avaliar os principais trabalhos e aplicações de sistemas de apoio à decisão para controle da produção em indústrias, visando contribuir com a proposta de direcionadores para a aplicação de sistemas de apoio à decisão à área operacional de ambientes produtivos complexos.

Quanto aos trabalhos revisados, a maioria não trata isoladamente a programação da produção, isto se deve, em alguns casos, ao fato de abranger detalhes específicos do controle da produção, ou, em sua maioria, por não dividir e tratar convenientemente as ações realizadas no controle da produção. Por exemplo, em vários trabalhos pesquisados, percebeu-se que o sistema proposto para elaboração da programação mestre da produção realizava também a programação da produção, ou principalmente, nos trabalhos propostos para programação de operações, considerava-se também a programação da produção. Entretanto, todos os trabalhos revisados foram de alguma forma importantes, pois tratam de aplicações de sistemas de apoio à decisão dirigidos à área operacional da produção, justamente o que pretende a proposta deste trabalho. A seguir os principais trabalhos revisados são resumidamente apresentados.

Sobre a aplicação de SAD para elaboração da programação mestre da produção, LEE, CHO & KLEPPLER (1996) desenvolveram um sistema de apoio à decisão com base na combinação de sistemas baseados em conhecimento e técnicas de simulação. Ainda sobre este tipo de programa SUNDARARAJAN *et al.* (1998) propuseram um sistema de apoio à decisão integrado com sistemas *ERP* para a elaboração da programação mestre da produção para um sistema de controle da produção do tipo *MRP* utilizando modelos de otimização. Um outro trabalho nesta linha foi realizado por DUCOTE & MALSTROM (1999) que desenvolveram um sistema de apoio à decisão para a elaboração da programação da produção em um sistema de controle da produção do tipo *MRP* que incorpora a determinação da capacidade de produção, programação de operações e análise de custos.

PFLUGHOEFT, HUTCHINSON & NAZARETH (1996) consideraram as decisões do controle da produção de forma integrada para ambientes de manufatura flexível. Para isto, os autores utilizaram um simulador genérico, no qual o ambiente de produção pudesse ser devidamente configurado, considerando várias particularidades de

um ambiente produtivo real e diversas heurísticas para programação de operações, possibilitando a análise pelo tomador de decisões dos resultados das simulações. Por fim, um sistema baseado em conhecimento foi empregado para armazenar o caso de produção e as heurísticas que melhor apresentaram resultados, para que, em próximas simulações, este conhecimento possa auxiliar o tomador de decisões (PFLUGHOEFT, HUTCHINSON & NAZARETH, 1996).

Em um trabalho similar para sistemas flexíveis de manufatura PRIORE *et al.* (2001) propuseram a utilização de um modelo de raciocínio baseado em casos sobre os resultados de um simulador do ambiente de produção, considerando diversas situações de produção e também várias heurísticas de programação de operações. Já FERNANDES (1991) propôs um sistema de apoio à decisão para o controle da produção integrado em sistemas de manufatura semi-repetitivos. Outras iniciativas no intuito de criar um sistema de apoio à decisão integrado para controle da produção pode ser encontrado em RICO *et al.* (1997), CALIUSCO *et al.* (1998), CASTRO *et al.* (1998) e ROSSI *et al.* (1998).

Ainda sobre o tema, GRABOT, BLANC & BINDA (1996) propuseram o uso de um sistema de apoio à decisão envolvendo desde problemas clássicos de programação de operações até a programação da produção. Um ponto importante do trabalho destes autores foi à ênfase dada na quantificação dos objetivos produtivos, por meio de modelos matemáticos, pois, em grande parte das empresas, estes objetivos acabam ficando apenas implícitos e sem formalização, dificultando sua correlação com as ações produtivas.

Um sistema de apoio à decisão para controle da produção obedecendo à filosofia *JIT* pode ser encontrado em GRAVEL *et al.* (1994). O sistema desenvolvido é aplicável particularmente a ambientes de produção que utilizam o sistema de controle da produção do tipo “*Kanban*”. O referido sistema visa dar subsídios para o gerente de produção determinar, para uma certa ordem de produção, quais valores adotar para o número de lotes de *kanbans*, assim como o número de *kanbans* em cada lote e, também, escolher entre várias regras de programação de operações específicas.

Especificamente sobre a programação de operações, SCHNIEDERJANS & CARPENTER (1996) citam vários “*surveys*” onde é constatado a existência de grande interesse por parte dos pesquisadores neste tipo de aplicação. WIERS &

SCHAAF (1997) relatam também a necessidade do envolvimento dos gerentes de produção na solução de problemas de programação de operações pouco definidos e que não podem ser modelados facilmente, visando preencher as lacunas existentes para a solução destes problemas através de conhecimento tácito do usuário, utilizando sistemas de apoio à decisão.

Pode-se citar também SCHMIDT (1992) que desenvolveu um sistema de três etapas visando integrar o tomador de decisões com o uso de modelos teóricos de programação de operações. Com o intuito de aperfeiçoar o sistema proposto por SCHMIDT (1992), ECKER, GUPTA & SCHMIDT (1997), frente à grande diversidade de problemas de programação de operações que podem acontecer em um sistema produtivo e a sua dificuldade de caracterização, desenvolveram um sistema para gerenciamento da base de problemas como uma possível forma de facilitar a obtenção de suas características e as escolhas dos modelos de programação de operações.

Um sistema de apoio à decisão para apoio em tarefas de programação de operações também foi proposto por SCHNIEDERJANS & CARPENTER (1996) por meio do desenvolvimento de um modelo para programação de operações baseado em métodos aproximativos, de forma que o resultado de uma programação de operações realizada ficasse disponível em uma interface apropriada. Esta interface foi projetada de tal forma que o usuário possa realizar modificações desejadas, inserindo sua experiência e conhecimento prático, ou seja, o ajuste fino da programação de operações é realizado pelo próprio tomador de decisões.

NORBIS & SMITH (1996) propuseram uma solução para problemas de programação de operações sob restrições considerando múltiplos objetivos por meio da aplicação da teoria da decisão em conjunto com métodos aproximativos. Os autores, com base na literatura disponível sobre o tema, verificaram que, a interação com o usuário é um dos fatores mais importantes para lidar com problemas com objetivos múltiplos.

A dificuldade dos tomadores de decisão para criação de modelos para problemas de programação de operações dirigidos a situações específicas foi tratada por PILLUTLA & NAG (1996). Neste trabalho, empregando técnicas de programação orientada a objetos, os autores propuseram um sistema gerenciador de modelos aplicáveis à área de programação de operações onde, a partir de uma série de questões

propostas pelo sistema, são configurados os parâmetros do modelo para a situação decisória. Desta forma, estes parâmetros podem ser convenientemente transformados em um modelo matemático, para que, posteriormente seja resolvido. Outro trabalho neste sentido pode ser encontrado em RIZZOLI, DAVIS & ABEL (1998).

WIERS & SCHAAF (1997) visando à concepção de um sistema de apoio à decisão para problemas de programação de operações que considerasse a experiência do tomador de decisões, realizaram pesquisas sobre o modelo comportamental de decisão. Outro trabalho em programação de operações que também toma por base modelos comportamentais foi apresentado por KUO & HWANG (1998). Os autores apontam para a falta de interação com os usuários como uma das possíveis razões da lacuna existente entre a teoria e a prática na área, justificando o fato de que a interação com o sistema ocorre somente no início do processo de programação de operações, não possibilitando que se considere as opiniões dos tomadores de decisão durante este processo. KUO & HWANG (1998) iniciaram o desenvolvimento através da construção de um modelo do comportamento humano em tarefas de programação de operações, desenvolvendo uma interface computacional adequada para auxiliar os tomadores de decisão nestas tarefas.

MESGHOUNI *et al.* (1999) propuseram um sistema de apoio à decisão híbrido para programação de operações baseado em três modelos. Um modelo baseado em métodos aproximativos modernos, especificamente algoritmos genéticos, um algoritmo exato para programação de operações da produção conhecido como *CLP* (“*Constraint Logic Programming*”) e também um modelo multi-critério.

Ainda sobre a aplicação de modelos baseados em conhecimento para apoio à decisão em programação de operações pode-se encontrar uma extensa revisão dos trabalhos existentes em SZELKE & KERR (1994). Uma aplicação de um sistema de apoio à decisão baseado em conhecimento para problemas de programação de operações em ambientes do tipo “*Job shop*” foi proposto por ABDALLAH (1995). Neste trabalho, o autor propõe um interessante mecanismo para este tipo de decisão utilizando, em conjunto com regras de liberação para programação de operações, sistemas baseados em conhecimento e métodos de previsão e simulação. Uma proposta nesta linha também foi realizada por SCHMIDT (1998) utilizando modelos baseados em casos.

Visando criar soluções para problemas de reprogramação de operações LI *et al.* (2000a) propuseram um sistema de apoio à decisão em reprogramação de operações baseado em seis módulos, utilizando, para isto, várias técnicas diferentes como: simulação, redes neurais, sistema baseado em regras e regras de liberação. Um outro trabalho que considera problemas de reprogramação de operações foi proposto por BISTLINE, BANERJEE & BANERJEE (1998). Neste trabalho, os autores, visando propor uma solução aplicável às condições reais de um ambiente produtivo, consideraram, além das possíveis restrições produtivas, fatores relacionados com o valor do trabalho a ser programado, o valor do cliente que requisitou o trabalho e também valores de prioridades.

Problemas de reprogramação de operações também foram abordados por BELZ & MERTENS (1996) por meio de um sistema de apoio à decisão envolvendo simulação e sistemas baseados em conhecimento. O sistema proposto pelos autores, por meio de uma interface que emprega a utilização de um sistema baseado em conhecimento, disponibiliza os distúrbios que aconteceram no ambiente de produção para que possíveis alternativas sejam geradas e analisadas. Um segundo sistema baseado em conhecimento analisa estes dados, realiza algumas sugestões e conclusões, além das alternativas mais promissoras. Um terceiro sistema baseado em conhecimento é utilizado para supervisionar as execuções das simulações.

A aplicação de sistemas de apoio à decisão em problemas de programação de operações em conjunto com características específicas do ambiente produtivo foi proposto por CHRYSSOLOURIS, PAPAKOSTAS & MOURTZIS (2000). Neste trabalho, os autores empregam uma metodologia na qual busca-se criar alternativas de programação de operações em um primeiro momento, para que, em seguida, através de um modelo baseado em regras, problemas de empacotamento sejam introduzidos. Por fim, utilizando uma interface de interação com o usuário, a solução pode ser avaliada de acordo com os critérios produtivos desejados.

Um problema similar envolvendo a programação de carga no carregamento de navios pode ser encontrado em KIM & LEE (1997). Neste trabalho, os autores aplicam um modelo de programação inteira para calcular as cargas que serão realizadas em cada navio, para que, em uma segunda etapa, utilizando um modelo de grafos transversais, é determinada a programação de operações. O modelo de

otimização utilizado para realizar o empacotamento é criado no momento da utilização, através da determinação das restrições e dos objetivos a serem alcançados, utilizando para isto uma interface de interação com o tomador de decisões.

Quanto à aplicação de sistemas de apoio à decisão para a estimativa de prazos de entrega pode-se citar o PARK *et al.*, (1999) que realizou um trabalho dirigido a empresas eu trabalham com produtos inéditos sob encomenda. Como citam os autores, nestas empresas, atender as datas de entrega possui importância fundamental, mas por outro lado, se constitui em um complexo problema a ser resolvido, que ultimamente vem recebendo considerável atenção da literatura.

DAWOOD (1996) analisou vários trabalhos sobre este tema e as principais técnicas e metodologias utilizadas, como, por exemplo, os modelos matemáticos, os modelos de julgamento, os modelos baseados em conhecimento e a tecnologia da informação. Sobre os modelos matemáticos o autor se refere ao fato de que, apesar de existirem vários trabalhos, os mesmos não foram satisfatoriamente empregados nas empresas, principalmente devido à falta de conhecimento gerencial sobre estes modelos e também a lacuna de viabilidade na prática do ambiente empresarial. Os modelos de julgamento, por sua vez, possuem maior popularidade nas empresas, pois levam em conta conhecimentos e a visão do negócio dos envolvidos com este processo e por fim, o autor cita os modelos baseados em conhecimento e a tecnologia da informação como os investimentos mais recentes nesta área, através de modelos para apoiar decisões. O referido autor, tomando por base trabalhos disponíveis sobre este assunto, propôs um sistema baseado em regras, levando em conta os fatores dos pedidos a serem considerados. A significância dos fatores considerados nas regras do sistema especialista é obtida com base nas produções passadas, através de um modelo de regressão multi-variada.

PARK *et al.* (1999), com o intuito de propor soluções para este problema, propuseram um sistema de apoio à decisão para auxiliar nas negociações sobre o prazo de entrega de um pedido. Inicialmente o sistema proposto pelos autores divide os pedidos em dois tipos distintos, pedidos com data de entrega fixa e aqueles no qual a data de entrega pode ser negociada. Em ambos os casos utiliza-se um algoritmo heurístico que leva em conta a capacidade atual da fábrica e a carga de trabalho corrente e gera uma data possível de entrega. Existe um tempo de atraso entre a entrada do

pedido e o início da produção, este tempo de atraso fica reservado para que se possa ter mais flexibilidade de cálculo do algoritmo, movendo projetos que ainda não se iniciaram para frente ou para trás na programação, esta decisão é tomada em conjunto usuário-sistema. Depois de realizado os cálculos, caso a data pré-determinada não atenda o prazo de entrega do pedido, utiliza-se uma re-negociação com o cliente ou, no caso de pedidos de data fixa, tenta-se aumentar a capacidade da fábrica ou rejeita-se o pedido. O algoritmo empregado utiliza o conceito de gargalos produtivos para realizar os cálculos e considerar a capacidade corrente.

KINGSMAN & SOUZA (1997) realizaram um trabalho correlato aplicável a empresas que produzem produtos personalizados por encomenda, neste trabalho, foi tomado como ponto principal a versatilidade necessária por estas empresas para lidar com o alto grau de incerteza em sua produção, além da dificuldade que estas empresas apresentam para formar os preços de venda no momento da realização do pedido, utilizando, quase sempre, apenas a experiência, levando-as a praticar preços muitas vezes não realísticos e dificultando a obtenção de vantagens competitivas, principalmente em termos de negociação com os clientes.

Visando propor soluções para este problema KINGSMAN & SOUZA (1997), com base em uma avaliação dos trabalhos realizados na área, conceberam um sistema de apoio à decisão com base na experiência do tomador de decisões em conjunto com estimativas do processo de produção e os tempos envolvidos com as operações. Neste sistema, utilizando os conceitos de custeio baseado em atividades, as estimativas fornecem um parâmetro inicial de custos, envolvendo os custos de produção e os custos de materiais, em seguida, um sistema especialista baseado em regras, com mais de duzentas regras extraídas de especialistas no assunto sobre fatores que influenciam na formação do preço de venda é utilizado pelo tomador de decisões para apoiar na formação deste preço de venda.

TAGAWA (1996) propôs um modelo aplicável tanto em nível de negociação de pedidos, como também para programação de operações deste pedido. O sistema toma por base um esquema decisório hierárquico dividido em cinco etapas distintas. A primeira etapa é constituída do módulo de pedidos, neste módulo, um sistema de apoio à decisão baseado em três filtros é aplicado a cada novo pedido realizado. O primeiro filtro analisa se a margem de lucro do pedido é aceitável, o

segundo filtro analisa se a data de entrega do pedido poderá ser atendida e o ultimo filtro analisa se o sistema produtivo tem capacidade de produção necessária para atender este pedido.

A divisão de todo o processo de produção em uma série de etapas, como proposto por TAGAWA (1996), simplifica a solução para cada etapa, simplificando também os modelos utilizados em cada módulo. É importante considerar que cada nível hierárquico inferior deverá obedecer às restrições traçadas no nível mais superior de forma a manter a coerência entre os planos. Uma vez que as ações realizadas, principalmente nos níveis superiores, envolvem valores estimados, a interação com o tomador de decisões permite que sua experiência supra as incertezas do modelo.

Neste mesmo tema, em um trabalho desenvolvido por MOHSEN (2000), o autor endereçou a lacuna de aplicação dos modelos disponíveis para problemas operacionais, como o problema de fixação do preço e prazo de entrega e, visando atender a esta lacuna, considerou o uso de um sistema de apoio à decisão aplicado à negociação do tempo de entrega com o cliente. Para a determinação dos tempos de entrega o sistema considera dois casos específicos, quais sejam, pedidos de produtos regulares e pedidos de produtos pouco freqüentes. Para o primeiro caso, é considerado também o atendimento total ou parcial do pedido, procurando minimizar o custo operacional envolvido, para isto, dois modelos podem ser empregados, um modelo com base em um algoritmo de programação dinâmica mista ou um modelo heurístico.

Outro sistema nesta linha foi proposto por EASTON & MOODIE (1999). Neste trabalho, os autores consideraram principalmente a problemática de se estimar o preço e o prazo de entrega para clientes que estão realizando licitações de compras, utilizando um procedimento similar ao “*overbooking*”, empregado por companhias aéreas, visando relacionar a capacidade de produção e os pedidos possíveis. Os autores realizaram um tratamento estatístico do processo de “*overbooking*” de pedidos em conjunto com um método enumerativo de otimização considerando um ambiente de produção simples e estático com apenas um centro produtivo.

Por fim, a aplicação de sistemas de apoio à decisão para diminuição do tempo de fila em processo pode ser encontrado em KUIK & TIELEMANS (1998). Os referidos autores propuseram um sistema de apoio à decisão para este propósito, aplicável a empresas multi-produtos com um único centro de trabalho. Neste trabalho os

autores utilizaram um modelo numérico de uma fila de produção, possibilitando que fossem realizadas análises de possíveis cenários de filas, alterando os parâmetros de lote e capacidade.

5.7 Escolha E Revisão Dos Tipos De Modelos Decisórios Para O Sistema De Apoio À Decisão Para Programação Da Produção Em Fundições De Mercado

Tomando por base a natureza do sistema de apoio à decisão proposto, a classificação dos tipos de modelos decisórios e a revisão dos trabalhos publicados sobre a aplicação de SAD para controle da produção, foi possível direcionar as escolhas dos tipos de modelos decisórios mais indicados para este trabalho.

Apesar da revisão existente sobre a aplicação de SAD para controle da produção revelar o uso generalizado dos principais tipos de modelos decisórios revisados, a natureza combinatória dos problemas práticos de programação da produção em fundições de mercado, aliado ao grande número de restrições em seu ambiente produtivo e, também, ao caráter otimizador das situações decisórias envolvendo a programação da produção nestas indústrias, contribuíram fortemente para direcionar a escolha de modelos de otimização e métodos aproximativos.

Dentre a variedade de modelos de otimização e métodos aproximativos existentes, buscou-se escolher modelos decisórios baseados em técnicas distintas, visando, desta forma, proporcionar maior potencial de aplicabilidade do sistema proposto em aplicações reais e, também, a comparação de resultados entre estas técnicas, buscando compreender o problema a partir de diferentes perspectivas, enriquecendo o processo de aprendizagem e evolução dos modelos propostos. Desta forma, escolheu-se primeiramente os modelos de programação matemática, por permitirem criar uma estruturação geral do problema tratado, contribuindo com seu entendimento, além de proporcionar a posterior aplicação de ferramentas computacionais disponíveis comercialmente para a solução exata de problemas práticos.

Apesar da importância dos modelos de programação matemática é necessário considerar a possibilidade destes modelos não serem viáveis de aplicação em algumas situações práticas ou, também, caso se consiga contornar esta dificuldade, de não se viabilizar a aquisição, por parte das fundições de mercado, das ferramentas

computacionais disponíveis comercialmente para sua solução. Desta forma, procurou-se escolher também modelagens alternativas que, em detrimento da garantia de se obter uma solução exata, possa fornecer soluções aproximadas, por meio da proposta, por esta tese, também dos métodos de solução para estes modelos.

Para isto, tomou-se por base a *figura 5.2* no intuito de direcionar a escolha dos tipos alternativos de modelagem. Procurou-se, visando principalmente a comparação entre técnicas distintas, considerar modelos que possibilitassem sua solução por métodos aproximativos clássicos e modernos. Sendo assim, foram escolhidas outras duas técnicas de modelagem, quais sejam, modelos baseados em métodos aproximativos clássicos, especificamente um método de solução de busca em árvore conhecido como “*beam search*”, e também modelos baseados em algoritmos genéticos, totalizando, então, três técnicas de modelagem escolhidas. Uma revisão sobre estas técnicas de modelagem de otimização será realizada a seguir.

5.7.1 Modelos de programação matemática

Dentre os possíveis tipos de modelos de otimização, os modelos de programação matemática representam um dos mais importantes e constituem uma das mais significativas variedades de modelos quantitativos (GOLDBARG & LUNA, 2000). Os modelos de programação matemática se aplicam ao uso ou alocação de recursos escassos da melhor maneira possível para que os custos possam ser minimizados ou os lucros maximizados. O uso do termo “melhor” implica em algum tipo de escolha ou ação alternativa realizado pelo tomador de decisões e, neste caso, a melhor alternativa é encontrada através da solução de um problema matemático (PHILLIPS, RAVINDRAN & SALBERG, 1976).

Quando se tem problemas lineares utiliza-se o termo programação linear. As técnicas de programação linear podem ser empregadas para resolver problemas militares, econômicos, empresariais e sociais. Para modelos nos quais exista algum tipo de não-linearidade em quaisquer de suas equações matemáticas, define-se como um modelo de programação não linear. A linearidade é um importante fator para se considerar a viabilidade de sua solução. Como citam PHILLIPS, RAVINDRAN & SALBERG (1976), os modelos lineares de programação matemática são particularmente importantes pelo fato de:

- Uma grande variedade de problemas em diversas áreas pode ser representada ou no mínimo aproximada por modelos de programação linear;
- Existem disponíveis métodos eficientes para a solução de problemas de programação linear; e,
- Pode-se realizar mais facilmente análises sobre as variações nos dados de problemas de programação linear.

Os modelos de programação matemática podem envolver tanto variáveis contínuas como discretas, representando outra importante característica do modelo. Os modelos de programação matemática que envolvem variáveis discretas são convenientemente conhecidos como modelos de programação inteiros ou modelos de programação mistos e possuem um significativo número de possíveis aplicações práticas, principalmente para programação da produção,

Maiores informações sobre modelagem e solução de problemas de programação matemática, especialmente programação inteira ou mista, podem ser encontradas em KIM & LEE (1996), SRIVASTAVA & FAHIM (2001), OGRYCZAK (1996), KARAIVANOVA *et al.* (1995), YEOM & LEE (1996) e BALAS (2002). Já em GOLDBARG & LUNA (2000), SHERALI & DRISCOLL (2000), HOFFMAN (2000) e TOTH (2000) pode-se ter uma visão geral dos avanços e dificuldades existentes para a solução destes tipos de modelos.

5.7.2 Modelos baseados em métodos aproximativos clássicos

Os métodos aproximativos clássicos ou heurísticos visam encontrar uma solução boa sob um esforço computacional considerado razoável. Como citam GOLDBARG & LUNA (2000), os primeiros métodos clássicos aproximativos estavam associados a estratégias de enumeração incompleta, solução parcial ou relaxações.

Em uma busca enumerativa, caso todas as possíveis configurações de solução forem analisadas, poder-se-á garantir que se encontre a solução ótima para um dado problema. Entretanto, esta análise poderá ser inviável para um grande número de aplicações de modelos de otimização em situações práticas, devido, principalmente, ao caráter combinatório “explosivo” destes problemas. Sendo assim, uma heurística tem por objetivo contornar estas dificuldades, não analisando todas as possíveis

configurações de solução para um dado problema, abrindo mão, desta forma, da garantia de se encontrar sua solução ótima.

De acordo com GOLDBARG & LUNA (2000) existem dois procedimentos que permitem a gerência do risco de não se encontrar a solução ótima:

- Examinar um crescente número de combinações entre as variáveis selecionadas em um determinado estágio da decisão e as variáveis dos estágios seguintes, ou seja, aplicar uma estratégia de intensificação; e,
- Considerar um número cada vez maior de variáveis em cada estágio decisório, ou seja, aplicar uma estratégia de diversificação.

Desta forma, é importante definir uma heurística de solução, para um dado problema de otimização, de tal forma que sua estratégia de busca seja suficientemente inteligente para encontrar o equilíbrio entre a diversificação e a intensificação, caminhando economicamente em relação ao esforço empreendido (GOLDBARG & LUNA, 2000). Em AL-AYYOUB & MASOUD (2000) é apresentado uma proposta geral para se estimar tempo de solução e consumo de recursos de algoritmos heurísticos de busca.

Dentre os métodos aproximativos clássicos, como citam SHAYAN & AL-HAKIN (2002), o método conhecido como “*beam search*” possibilita uma eficiente “mistura” entre a estratégia de intensificação e a estratégia de diversificação. Este método heurístico, toma por base um processo de busca em árvore e foi proposto originariamente na área de inteligência artificial, procurando avaliar um certo número de soluções em paralelo. O número de soluções examinadas será o diâmetro ou largura da busca (“*Beam width*”).

O método foi inicialmente empregado em sistemas de reconhecimento de voz e reconhecimento de imagem tendo sido também comumente aplicado em problemas na área de programação de operações em ambientes “flow-shop”, “job-shop”, “open-shop” e também em sistemas de manufatura flexível, proporcionando resultados satisfatórios (LEU, 1997) (COLIN, 1998) (SABUNCUOGLU & KARABUK, 1998) (SABUNCUOGLU & BAYIZ, 1999, 2000) (MATANACHAI & YANO, 2001) (KORBAA, CAMUS & GENTINA, 2002) (GHIRARDI & POTTS, 2003) (MCMULLEN & TARASEWICH, 2003) (CROCE, GUIRARDI & TADEI, 2004). Uma aplicação do método para programação da produção de lingotes metálicos

em uma fundição pode ser encontrado em PACCIARELLI & PRANZO (2004). Já a aplicação do método para roteamento de veículos pode ser encontrado em (KIM & KIM, 1999).

O método consiste em um “*branch and bound*” truncado onde apenas um número pré-definido de soluções mais promissoras em cada nível da árvore, de acordo com o diâmetro de busca, são selecionadas para posterior investigação. Esta seleção é baseada em algum método de avaliação que procura medir o potencial das soluções parciais consideradas. Entretanto, quanto maior o número de soluções consideradas em cada nível maior será o tempo de execução do algoritmo (LEU, 1997) (CROCE, GUIRARDI & TADEI, 2004). Por outro lado, devido ao fato do método considerar um número fixo de soluções em cada estágio decisório, o número de vértices analisados cresce linearmente apresentando uma complexidade computacional polinomial (LEU, 1997). Desta forma, o processo de avaliação das soluções parciais em cada estágio da árvore de busca será a “chave” para sua aplicação em um problema específico (CROCE, GUIRARDI & TADEI, 2004).

É comum a aplicação do método em duas fases, também conhecido como “*filtered beam search*” onde, em uma primeira fase, também chamada de fase de filtro, é aplicado uma avaliação simplista dos possíveis vértices no estágio decisório, visando reduzir o número de vértices necessários para uma avaliação mais acurada a ser realizada na segunda fase do método (CROCE, GUIRARDI & TADEI, 2004). Na *figura 5.3* é apresentada uma visão geral do esquema de busca do método “*beam search*”.

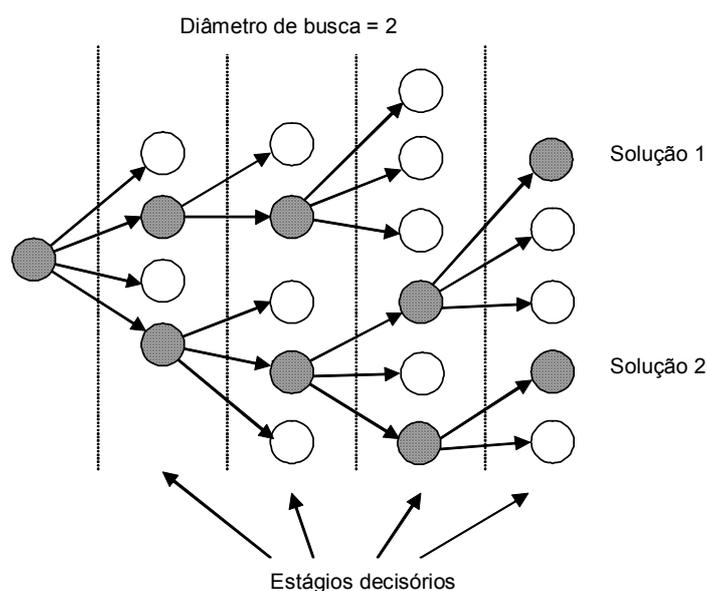


Figura 5.3: Esquema de busca do método “*beam search*”

A principal desvantagem do método é o fato de que, caso uma solução parcial promissora seja mal avaliada, a mesma será podada da árvore de decisão e não poderá ser recuperada. Este fato poderá, caso em um estágio decisório todas as melhores soluções sejam podadas, desviar a busca para uma região de soluções significativamente distante da solução ótima. A única forma de prevenir esta possibilidade é considerar um diâmetro de busca suficientemente grande, entretanto, isto comprometeria a viabilidade de aplicação do método (CROCE, GUIRARDI & TADEI, 2004). Como citam SABUNCUOGLU & KARABUK (1998), a forma “agressiva” na qual o método poda as soluções que não apresentaram uma boa avaliação é o que garante sua rapidez.

Para a construção de modelos de decisão com base no método heurístico “*beam search*”, são necessárias duas tarefas principais: Primeiramente, deve-se criar uma representação do problema a ser solucionado na forma de uma árvore de busca multi-estágio, onde cada vértice em cada estágio decisório representa uma solução parcial. Por fim, é necessário definir a forma de avaliação das soluções parciais em cada estágio para aplicar a metodologia de busca do método (SABUNCUOGLU & KARABUK, 1998) (SABUNCUOGLU & BAYIZ, 1999, 2000).

5.7.3 Modelos baseados em algoritmos genéticos

Algoritmos genéticos (AG) são algoritmos adaptativos de busca de propósito geral, baseados no mecanismo de seleção natural e adaptação, tendo sido inicialmente propostos por J. Holland na década de 60 (GOLDBERG, 1989). Devido a

esta analogia, estes algoritmos são também conhecidos como meta-heurísticos ou métodos heurísticos modernos.

Em um *AG* soluções são representadas como indivíduos em uma população onde as características de cada indivíduo, ou seja, atributos de uma solução, estão adequadamente codificados em um ou mais cromossomos. A idéia básica é partir de um conjunto inicial de soluções, ou seja, de uma população inicial, geralmente criada por algum método randômico, e obter novas soluções por meio de um mecanismo de reprodução, “*crossover*” e mutação, evoluindo gradualmente estas soluções através de várias gerações de indivíduos (KIMMS, 1999).

Na natureza as informações sobre um indivíduo estão em uma seqüência de “*genes*” chamados cromossomos. Em um *AG* cromossomos serão seqüências de atributos representando soluções, onde cada atributo corresponde a um “*gene*” do cromossomo e os valores destes atributos ou “*genes*” são chamados “*alelos*”, assim como sua posição no cromossomo é conhecida como “*locus*”. Em um sistema natural um “genótipo” será todo o pacote genético disponível para compor os cromossomos e um “fenótipo” será a interação deste pacote genético com o ambiente formando indivíduos particulares. Em um *AG* o pacote total de possíveis soluções é chamado de estrutura ou codificação e um “fenótipo” será sua decodificação em uma possível solução. Em um *AG* geralmente usam-se símbolos binários, ou combinações de letras e números para a decodificação dos atributos em um cromossomo, como, por exemplo, $\{0, 1, 0, 0, 0\}$ ou $\{A, H, F, R\}$.

Para que um indivíduo sobreviva em um determinado meio seus cromossomos devem possuir algumas características que possibilitem seu sucesso competitivo com outros indivíduos, ou seja, que possibilitem que tenham um melhor grau de adequação. A probabilidade que um indivíduo possui de se reproduzir, propagando assim seu material genético para próximas gerações, está relacionado ao seu grau de adequação. Em um *AG* este grau de adequação é medido por alguma função definida de avaliação, visando simular o processo natural de seleção, onde os melhores sobrevivem podendo vir a se reproduzirem e passar características desejadas a novos indivíduos, enquanto as características indesejadas tendem a desaparecer, junto com os indivíduos menos adaptados.

O processo iterativo de criação de novas gerações, por meio do mecanismo de reprodução dos indivíduos mais adaptados, é que proporcionará a evolução dos indivíduos iniciais. O que torna este mecanismo possível são os operadores genéticos envolvidos com a reprodução, especificamente o “*crossover*” e a mutação. O “*crossover*” é o mais importante operador genético, agindo simultaneamente nos dois indivíduos “pais” e gerando soluções “filhas” por meio da recombinação do material genético dos seus “pais”, ou seja, da recombinação dos atributos das soluções “pais”, podendo gerar indivíduos mais evoluídos caso esta recombinação seja apropriada. O “*crossover*” é que possibilita que o *AG* explore outras regiões de solução promissoras. A mutação, apesar de ser aplicada com uma frequência bem menor que o “*crossover*”, representa um importante mecanismo para preservar a diversidade populacional e recuperar material genético importante que, eventualmente, possa ter se perdido, atuando diretamente no novo indivíduo por meio de mudanças randômicas em seus genes ou atributos, proporcionando um mecanismo de escape de regiões de ótimos locais (LIAW, 2000) (DENG & TSACLE, 2000) (DENG, 1999). Como cita (DENG & TSACLE, 2000) um importante propósito dos operadores de mutação é prevenir uma convergência prematura da população para uma certa região de solução, antes que uma exploração mais extensa de outras regiões tenha sido realizada. Na *figura 5.4* pode-se ter uma idéia geral da forma de atuação dos operadores genéticos. Em GOLDBERG (1989) é possível encontrar esquemas sofisticados de operadores genéticos além de suas avaliações formais.

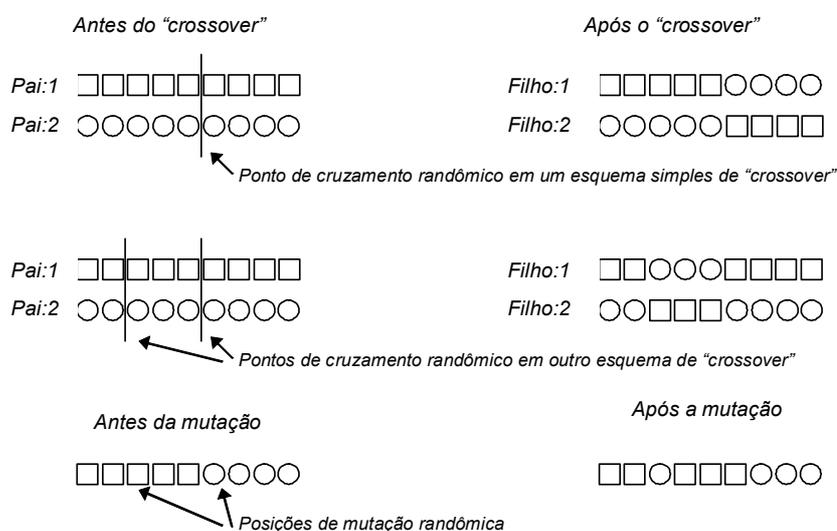


FIGURA 5.4: Esquemas hipotéticos de operadores de “*crossover*” e “*mutação*”

Para se entender o sucesso dos sistemas naturais de seleção e adaptação e, por conseguinte, dos *AG* é preciso definir o conceito de similaridade ou “*schema*” (no plural diz-se “*Schemata*”). Um “*schema*” é uma estrutura de conhecimento representando padrões de atributos comuns de soluções em uma região do espaço de solução. Por exemplo, considere as seqüências de atributos, ou cromossomos, de duas possíveis soluções de um problema hipotético $\{4, 5, 1, 3, 9, 2, 4\}$ e $\{3, 8, 1, 6, 9, 2, 7\}$, podendo-se encontrar, nestes cromossomos, o “*schema*” $\{*, *, 1, *, 9, 2, *\}$ ⁵. Um “*schema*” deve ser avaliado a partir de duas medidas importantes, seu tamanho e ordem. O tamanho de um “*schema*” refere-se à distância entre o primeiro e o último atributo do esquema, no exemplo anterior o “*schema*” possui tamanho quatro. A ordem, por sua vez, especifica o seu número de posições fixas, no exemplo anterior o “*schema*” possui ordem três. Para um *AG* a introdução do conceito de “*schema*” permite obter sua validação matemática formal (GOLDBERG, 1989). “*Schemata*” de elevada performance geralmente são curtos e de baixa ordem, sendo menos susceptíveis a sofrerem rupturas durante a aplicação dos operadores genéticos, possuindo assim maior probabilidade de serem transmitidos a novas gerações, por isto são chamados de “blocos de construção”. Estes “*schemata*” são combinados por meio dos operadores genéticos no processo de reprodução, de forma que “*schemata*” de maior performance são exponencialmente mais comuns nas novas gerações, produzindo provavelmente indivíduos mais adaptados, enquanto “*schemata*” de performance menor tendem a desaparecer (GOLDBERG, 1989).

Este mecanismo torna os *AG* métodos robustos de busca, ao mesmo tempo eficientes e eficazes, sendo melhores em encontrar soluções, em problemas complexos, próximas ao ótimo (GOLDBERG, 1989). Dentre suas aplicações, os *AG* tem sido amplamente utilizados em problemas de otimização, sendo atualmente um dos métodos mais amplamente empregados (KIMMS, 1999). Justamente por não lidar diretamente com as propriedades analíticas do problema combinatório que está sendo otimizado, *AG* são adequados para aplicação em um grande número de problemas de otimização (AL-HAKIM, 2000). Estes fatores contribuem para o aumento gradativo de atenção para aplicação dos *AG* em situações práticas de otimização (GOLDBERG, 1989).

⁵ O símbolo * se refere a atributos gerais que não fazem parte do “*schema*”

Quanto aos métodos tradicionais de otimização, em sua maior parte são determinísticos. Enquanto estes métodos apresentam resultados satisfatórios quando exploram uma região de solução promissora, em um espaço local de soluções, podem estar ignorando outras regiões promissoras no amplo espaço de soluções (DENG & TSACLE, 2000) (DENG, 1999). Em contraste, *AG* buscam pelo ótimo em um espaço de soluções operando em uma população de soluções em paralelo. Desta forma, os *AG* são mais propensos a não se prenderem a ótimos locais, realizando, de forma intrínseca, uma exploração de várias regiões potencialmente promissoras ao mesmo tempo, mudando de região de forma estocástica por meio de um processo iterativo de reprodução (TSACLE, 2000) (AL-HAKIM, 2000).

Em um *AG* o mecanismo de seleção é que auxilia a exploração das regiões de solução mais promissoras, em geral, estes mecanismos buscam refletir, na probabilidade de seleção para reprodução, o grau de adequação de um indivíduo. Em GOLDBERG (1989) é possível encontrar uma descrição detalhada dos principais métodos de seleção mais comumente empregados, como, por exemplo, o “*Tournament*” que sorteia aleatoriamente vários indivíduos da população, escolhendo o indivíduo de melhor adequação deste grupo sorteado e o “*Roulette-wheel*” que escolhe um indivíduo para ser genitor com uma probabilidade igual a sua adequação.

Quando se analisa uma população inicial, principalmente quando são empregadas populações pequenas, é comum a existência de alguns poucos indivíduos extraordinários em meio a uma maioria de indivíduos medíocres. Nestas situações, basear a probabilidade de escolha para reprodução no grau de adequação destes indivíduos poderá acarretar em uma significativa proporção, na próxima geração, de descendentes destes poucos indivíduos mais adequados, diminuindo a diversidade das novas gerações, podendo causar uma convergência prematura (GOLDBERG, 1989). Como cita GOLDBERG (1989), nestas situações, é conveniente a normalização do grau de adequação destes indivíduos. Dentre as formas mais empregadas para este fim, pode-se citar a normalização linear. Por exemplo, considere ρq o grau de adequação de um indivíduo, seu grau de adequação normalizado será $\rho n q = a \cdot \rho q + b$ onde os coeficientes a e b podem ser determinados de várias formas, desde que se tome por base o valor médio do grau de adequação da população. É comum, para a determinação destes coeficientes, o uso de um valor máximo esperado de seleção dos melhores indivíduos.

De acordo com GOLDBERG (1989) valores em torno de 2 tem sido aplicados com sucesso. É comum usar o termo “pressão de seleção” para este valor máximo de seleção, ou seja, quanto maior a “pressão de seleção” maior o número esperado de seleção para reprodução dos indivíduos mais adequados, e mais rápido será o processo de convergência, por outro lado, menor será a diversidade das novas gerações⁶.

Outra importante estratégia comumente empregada em *AG* é conhecida como sobreposição de populações ou “elitismo” (GOLDBERG, 1989). Quando se considera “elitismo”, caso a nova geração de indivíduos não possua um ou mais indivíduos melhores ou iguais aos indivíduos mais adequados da geração anterior, estes indivíduos são repostos na nova geração no lugar dos indivíduos menos adequados. Caso se empregue a estratégia de “elitismo” é necessário definir o número de indivíduos ou porcentagem da população que será sobreposta. Esta estratégia também poderá causar um processo prematuro de convergência, dependendo da proporção da população que será sobreposta, entretanto, o uso de números pequenos de indivíduos repostos nas novas gerações garante a manutenção de material genético importante sem alterar demasiadamente o processo de convergência.

Quando se considera a aplicação prática de um *AG* um dos principais desafios encontrados é o desenvolvimento de uma representação apropriada de um ou mais cromossomos que representem uma solução factível para um problema, assim como dos operadores genéticos, de forma a garantir que o processo evolucionário possa gerar indivíduos melhores e factíveis. A decodificação binária simples possivelmente não permitirá a representação de soluções para problemas mais complexos. Nestes problemas, geralmente ocorre o conceito de “epistase”, ou seja, as mudanças nas frequências dos “genes” em diferentes “lócus” não são independentes. Em problemas com “epistase” geralmente são necessários operadores genéticos elaborados para garantir que as soluções geradas sejam factíveis ao mesmo tempo em que preservam importantes “schemata” (GOLDBERG, 1989). Em CHENG, GEN & TSUJIMURA (1996) pode ser encontrado um “survey” sobre formas de representação dos cromossomos e dos operadores genéticos em problemas práticos de “job-shop” que podem fornecer idéias interessantes para outros tipos de problemas práticos.

⁶ GOLDBERG (1989) sugere a seguinte forma para determinação dos coeficientes para uma estratégia de normalização linear, quais sejam: $a = \frac{(\text{Pr essão} - 1) \cdot \rho q_{\text{médio}}}{\rho q_{\text{maior}} - \rho q_{\text{médio}}}$ e $b = \frac{\rho q_{\text{médio}} \cdot (\rho q_{\text{maior}} - \text{Pr essão} \cdot \rho q_{\text{médio}})}{\rho q_{\text{maior}} - \rho q_{\text{médio}}}$

Quanto às aplicações de *AG* em problemas reais, em GOLDBERG (1989), pode ser encontrado um “*survey*” sobre aplicações práticas deste método. Atualmente os esforços se concentram em explorar novas aplicações, assim como melhorar sua performance, principalmente por meio de melhorias nos operadores genéticos, processo de seleção, entre outros (LIU & TANG, 1999). Já SIKORA (1996) realizou uma aplicação de *AG* para integração entre as decisões de programação da produção e dimensionamento de lotes. Em MIN & CHENG (1999) é possível encontrar uma aplicação de *AG* para programação da produção em máquinas iguais e paralelas. Os autores realizaram ainda uma comparação, para o referido problema, entre *AG*, “*Simulated Annealing*” e métodos heurísticos, obtendo vantagens na aplicação de *AG*. Aplicações de *AG* em problemas de programação da produção também poderão ser encontradas em GILKINSON, RABELO & BUSH (1995), WANG & FANG (1996), LI *et al.* (2000b), CHAN & HU (2001), PONNAMBALAM, RAMKUMAR & JAWAHAR (2001) e KNOSALA & WAL (2001).

Já a performance de um *AG* é dependente do problema que está sendo tratado, de forma que as configurações dos parâmetros e esquemas de representação da solução dependerão da natureza do problema, envolvendo, normalmente, considerável esforço e tempo neste processo (AL-HAKIM, 2000). Fatores como a forma de elaboração da população inicial, o número de indivíduos na população, o número de iterações, ou seja, novas gerações, método de seleção para reprodução, sobreposição de populações, taxa de incidência dos operadores genéticos, entre outros, são fatores importantes para garantir a performance de um *AG* frente à uma aplicação particular e demandará considerável esforço para se alcançar uma parametrização que possibilite melhor performance do *AG*.

Por fim, em CHENG, GEN & TSUJIMURA (1999) são descritas algumas das principais estratégias de aplicação de *AG*, que, como descrevem os autores, podem ser resumidas em três situações principais:

- Adaptar o problema para o *AG*: esta técnica envolve modificar o problema de forma apropriada para que uma solução possa ser representada como uma seqüência binária. Este tipo de estratégia é limitada a problemas simples;
- Adaptar o *AG* ao problema: principalmente em problemas complexos os atributos dos problemas são tratados de forma conveniente por operadores genéticos

adequados que lidam com possíveis infactibilidades das soluções. Geralmente estes operadores realizam combinações ou permutações dos atributos das soluções “pais” levando em contas as restrições do problema considerado; e,

- Adaptar tanto o problema como o *AG*: usa-se criar representações de cromossomos elaboradas que possam representar uma possível solução para o problema aplicando operadores genéticos adequados que considerem as restrições impostas ao problema. Esta técnica tem sido aplicada com sucesso na área de engenharia industrial e tem representado uma das principais técnicas de aplicação prática de *AG* (CHENG, GEN & TSUJIMURA, 1999).

Existem muitas variações formais de um modelo básico de um *AG* (GOLDBERG, 1989) (CHENG, GEN & TSUJIMURA, 1999) (GOLDBARG & LUNA, 2000) (DENG & TSACLE, 2000) (AL-HAKIM, 2000). Como entendido por esta tese, com base nos autores citados, um *AG* poderá ser descrito genericamente da seguinte forma:

1. Gerar uma população inicial (geralmente de forma randômica);
2. Avaliar o grau de adequação dos indivíduos da população;
3. Iniciar uma nova geração populacional;
4. Selecionar indivíduos da geração populacional anterior para reprodução de acordo com seu grau de adequação normalizada até que a nova geração populacional esteja completa;
 - 4.1. Caso aconteça “*crossover*”, de acordo com sua probabilidade de ocorrência, aplicar os operadores genéticos de “*crossover*” nos indivíduos pais obtendo novos indivíduos filhos. Caso o “*crossover*” não aconteça, criar os indivíduos filhos como réplicas dos indivíduos pais;
 - 4.2. Caso aconteça “mutação”, de acordo com sua probabilidade de ocorrência, aplicar os operadores de mutação nos indivíduos gerados;
 - 4.3. Insira os novos indivíduos na nova geração populacional;
5. Avaliar o grau de adequação dos indivíduos da nova população;
6. Caso o melhor ou melhores indivíduos da geração anterior não estejam na nova geração de indivíduos, de acordo com a estratégia de sobreposição populacional,

deve-se inseri-lo(s) no lugar do(s) indivíduo(s) menos adequado(s) da nova geração;

7. Caso o critério de término não esteja satisfeito, retorne ao passo 3.

Como cita LIAW (2000), apesar dos *AG* terem provado sua versatilidade e efetividade como técnica de busca em problemas de otimização existem ainda muitas situações onde a simples aplicação de algoritmos genéticos não alcança bons resultados. Nestas situações várias estratégias de hibridização têm sido sugeridas. Uma estratégia de hibridização envolve incorporar heurísticas convencionais como, por exemplo, procedimentos de busca local. Desta forma, os *AG* são aplicados para explorar uma região ampla de soluções, enquanto procedimentos de busca local são usados para explorações locais durante a aplicação dos operadores genéticos ou diretamente nas soluções geradas. Como citam CHENG, GEN & TSUJIMURA (1999) devido ao fato da dificuldade na qual os *AG* enfrentam para buscar soluções próximas ao ótimo, é fortemente aconselhado o uso de métodos de hibridização para compensar este problema. Continuam os autores que, dentre os métodos mais utilizados para este fim, pode se citar o uso de operadores genéticos adaptados ou guiados por heurísticas e a aplicação de métodos de busca local para melhorar as soluções filhas geradas antes de introduzi-las na população.

Tomando por base a forma genérica de um *AG*, métodos de hibridização podem ser introduzidos da seguinte forma (CHENG, GEN & TSUJIMURA, 1999):

- No passo 1, utilizando métodos elaborados para criar a população inicial;
- No passo 4.1, por meio da criação de operadores genéticos que considerem o problema em questão, levando em conta tanto as restrições como também formas mais efetivas de “*crossover*”;
- No passo 4.2, criando também, como no método anterior, operadores de mutação que levem em conta as restrições do problema e a efetividade da “mutação”; e,
- No passo 4.3, antes de se inserir os novos indivíduos na população podem-se aplicar métodos heurísticos e/ou de busca local para melhorar o grau de adequação dos novos indivíduos gerados. Como citam CHENG, GEN & TSUJIMURA (1999), este processo tem uma certa analogia com os sistemas naturais, pois na natureza um indivíduo não é selecionado para reprodução apenas pela sua carga genética inicial,

mas também pelo grau de adaptabilidade com o meio. Em um *AG* a busca de melhoria dos indivíduos gerados seria uma forma análoga ao processo de “envelhecimento” desta solução, tornando-a mais adequada antes mesmo de inseri-la na população.

A aplicação do conceito de *AG*, para a elaboração da programação da produção em fundições de mercado, complementa o banco de modelos propostos, visando proporcionar alternativas viáveis em várias situações possíveis de um ambiente produtivo deste setor industrial. O uso de um modelo baseado em uma meta-heurística visa também a comparação entre métodos de modelagem distintos, tornando possível a exploração dos pontos fortes de cada modelagem de acordo com suas possibilidades de aplicação. Por fim, visualizar o problema de elaboração da programação da produção em fundições de mercado sob o ponto de vista dos *AG* pode proporcionar novas formas de entender sua problemática e lidar com sua dificuldade combinatorial.

5.8 Conclusão

Este capítulo permite criar direcionadores para a proposta de sistemas de apoio à decisão dirigido à área operacional da produção, especificamente, ao que interessa este trabalho, para operacionalizar o processo de elaboração da programação da produção em fundições de mercado, por meio de uma proposta de racionalização e sistematização do processo decisório no controle da produção e, também, por meio da avaliação de trabalhos existentes sobre a aplicação de SAD no controle da produção.

Particularmente sobre as conclusões obtidas com a revisão dos trabalhos sobre a aplicação de SAD no controle da produção, primeiramente, a grande maioria dos trabalhos referenciados justifica o emprego de sistemas de apoio à decisão para melhorar a aplicação prática das técnicas e metodologias de controle da produção. Em segundo lugar, é quase unanimidade, entre as obras consultadas, a aplicação de SAD na busca de viabilização do controle da produção de ambientes produtivos complexos e, também, que estes ambientes, na forma que se encontram, exigem uma maior flexibilidade nas técnicas e metodologias de controle da produção para que possam atender seus requisitos produtivos e, conseqüentemente, serem aplicáveis.

Dentre as características dos sistemas de apoio à decisão mais empregadas nos trabalhos pesquisados pode-se relatar: a divisão da solução do problema em etapas distintas, o desenvolvimento de interfaces com o usuário intuitivas, a consideração do tomador de decisão durante o processo de solução e a utilização do conhecimento e experiência do tomador de decisões para suprir parâmetros desconhecidos ou difíceis de serem quantificados.

Em relação aos modelos de decisão utilizados por estas pesquisas, foi possível encontrar soluções envolvendo a maior parte dos modelos considerados neste trabalho, dentre estes, os mais utilizados são os modelos de otimização e métodos aproximativos, de simulação e os baseados em conhecimento.

Sobre o emprego do corpo de conhecimento disponível em controle da produção pelos trabalhos consultados, pode-se encontrar as mais diversas aplicações, dependendo do tipo de problema envolvido, de forma que, uma técnica ou metodologia em particular não se mostrou mais aplicável à modelagem das características desejadas em um sistema de apoio à decisão. Ou seja, os direcionadores das pesquisas analisadas, apontam uma ampla aplicação das técnicas e metodologias existentes em controle da produção sob a forma de sistemas de apoio à decisão.

Há de se supor, com estas conclusões, que a efetividade de um SAD para controle da produção não dependerá somente das técnicas e modelos considerados para sua construção e sim, antes disto, na definição do sistema de controle da produção que mais se adapta ao ambiente produtivo em questão e que consiga simplificá-lo. Entretanto, a maioria dos trabalhos analisados não realizou uma consideração explícita sobre este assunto. O que se constata é uma busca de sofisticação de técnicas e modelos visando lidar com a complexidade do ambiente produtivo através de sistemas mais flexíveis e interativos, levando ao questionamento sobre o quanto desta sofisticação poderia ser desnecessária caso se considerasse um sistema de controle da produção mais apto a um ambiente produtivo específico.

É importante ressaltar que não existem receitas prontas para se alcançar esta simplificação prévia e, sim, manter em mente que a proposta de um SAD para controle da produção se inicia na redefinição do próprio ambiente produtivo. Outro fator importante para se garantir maior efetividade de um SAD para controle da produção é o tipo de modelagem de decisões utilizada, devendo-se escolher um tipo de modelagem

que mais seja adequado a uma situação decisória específica. É importante ressaltar também que, para cada situação particular de aplicação de SAD em controle da produção pode-se usar vários tipos de modelos para se conseguir resultados viáveis e eficazes, ficando sob responsabilidade do pesquisador o sucesso neste sentido.

Por fim, a revisão bibliográfica realizada neste capítulo e no capítulo anterior, permitiu corroborar a terceira questão de pesquisa deste trabalho quanto à efetividade de aplicação de sistemas de apoio à decisão à área operacional de ambientes produtivos complexos, permitindo, também, criar os direcionadores necessários para a proposta de um sistema de apoio à decisão para programação da produção em fundições de mercado, assim como auxiliar nas escolhas dos tipos de modelos que farão parte deste SAD.

6 – PROPOSTA DO SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PARA PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO EM FUNDIÇÕES DE MERCADO

6.1 Introdução

A proposta deste sistema tem por objetivo contribuir com a redução da lacuna de aplicabilidade existente entre a teoria e a prática no controle da produção em ambientes produtivos complexos, por meio da flexibilização na aplicação do corpo de conhecimento existente em controle da produção, seguindo a tendência de flexibilidade exigida atualmente nos ambientes produtivos.

Desta forma, este trabalho procurou considerar modelagens para o processo de elaboração da programação da produção que estivessem de acordo com os requisitos necessários para sua aplicação na forma de um sistema de apoio à decisão, visando conseguir a flexibilidade e aplicabilidade desejada.

6.2 Visão Geral Do Sistema Proposto

De acordo com a visão sistêmica que rege um sistema produtivo, suas saídas, principalmente em termos de prazos e quantidades dos produtos produzidos, incluindo também lucratividade, níveis de estoques, eficiência, entre outros, dependem das entradas deste sistema, assim como da organização interna e da dinâmica de interação de seus componentes inter-relacionados.

Em relação a estas entradas, pode-se dividi-las em duas categorias principais. Primeiramente têm-se as que são influenciadas pelo ambiente de produção, ou seja, as que são principalmente governadas pelo ambiente produtivo no qual o sistema está inserido. A outra, diz respeito às que podem ser controladas pelo sistema, ou seja, são as variáveis de decisão.

A proposta deste trabalho parte naturalmente desta concepção sistêmica, como pode ser visto na *figura 6.1*, devidamente aplicada ao ambiente produtivo das fundições de mercado, com o intuito de proporcionar o apoio na tomada de decisão para a elaboração da programação da produção deste setor industrial. Para isto, é necessária a identificação das variáveis independentes controláveis disponíveis, ou seja, das

variáveis de decisão do sistema, assim como os parâmetros deste ambiente produtivo, para que a interação entre seus componentes internos possa ser modelada e, por meio da sistematização de um processo decisório adequado, possa ser viabilizada a obtenção dos objetivos produtivos desejados, racionalizando e sistematizando o processo de tomada de decisões para programação da produção em fundições de mercado.

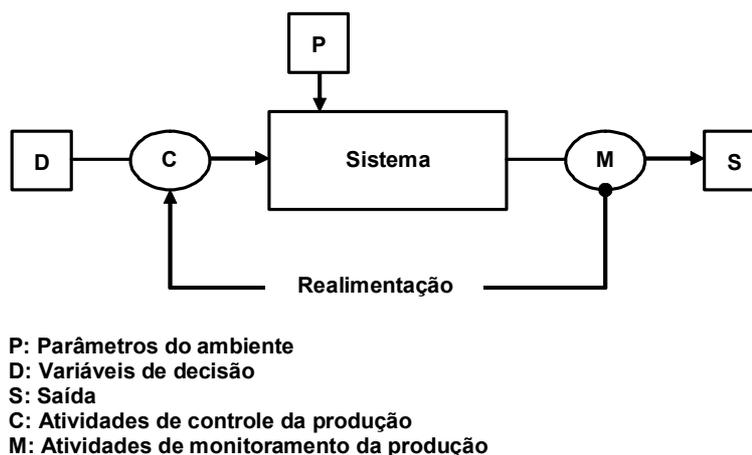


FIGURA 6.1: Concepção sistêmica do controle da produção (Baseado em Burbidge (1996, p. 43))

A base para esta racionalização e sistematização será o sistema de controle da produção *PBC* e também o ambiente produtivo das fundições de mercado. Devido à complexidade existente em um ambiente produtivo típico deste setor industrial o sistema de controle da produção *PBC* terá uma importante função no sentido de simplificar o processo de elaboração e operacionalização da programação da produção, buscando com isto simplificar também a criação dos modelos decisórios e a interação destes modelos com o tomador de decisões. Para isto, as principais operações produtivas de uma fundição de mercado foram divididas em estágios produtivos específicos que farão parte do ciclo único do sistema *PBC*, ou seja, a cada novo ciclo produtivo, todos os estágios de produção serão realizados, de acordo com sua ordem. Na *figura 6.2* este esquema pode ser melhor visualizado.

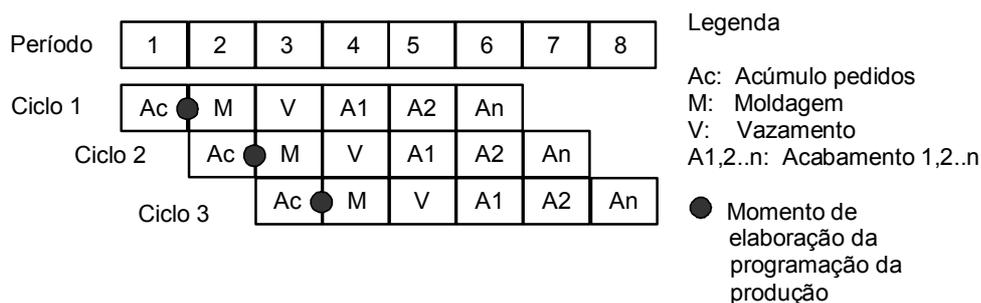


FIGURA 6.2: Sistema de controle da produção PBC aplicado a um ambiente produtivo típico das fundições de mercado

De acordo com o processo produtivo de uma fundição de mercado, como já discutido no capítulo 3, suas principais operações produtivas poderão ser convenientemente divididas nos seguintes estágios principais quais sejam:

- Estágio de acúmulo de pedidos: Neste estágio é realizado um acúmulo das ordens de produção de acordo com os pedidos dos clientes e também outras necessidades produtivas provenientes do planejamento da produção da empresa, percebe-se que, durante este estágio, nenhuma operação produtiva é realizada;
- Estágio de moldagem: Neste estágio todas as operações necessárias para concluir os moldes dos itens de pedidos programados para vazamento são realizadas, envolvendo o projeto do fundido, moldagem, confecção dos machos, fechamento do molde, entre outras;
- Estágio de vazamento: Neste estágio, de posse dos moldes prontos para vazarem, é realizada a fundição das ligas metálicas nos fornos para que as mesmas então sejam inseridas nos moldes; e,
- Estágios de acabamento: Por fim, nestes estágios, realizam-se todas as operações necessárias para terminar os itens de pedidos, envolvendo desde a desmoldagem, corte, rebarba, lixamentos, tratamentos térmicos e físicos, controle de qualidade e acabamentos finais.

A programação da produção terá por objetivo decidir quais itens de pedido disponíveis na carteira de pedidos a programar, proveniente do estágio de acúmulo de pedidos serão programados para o ciclo. Para isto, todas as restrições produtivas deverão ser satisfeitas, pois todos os itens programados deverão ser completados em seu próprio ciclo de programação. Perceba que o momento de elaboração da programação da produção será logo após o término do estágio de acúmulo de pedidos e imediatamente antes do estágio de moldagem.

Uma das grandes conveniências do sistema de controle da produção *PBC* é a possibilidade de se prever o término da produção dos itens programados, pois os mesmos deverão ser completados no final de cada ciclo produtivo, além da possibilidade de se trabalhar com tempos de resposta baixos quando se consideram ciclos curtos de produção. Tomando como exemplo a *figura 6.2*, considerando uma fundição de mercado que possua apenas um estágio de acabamento, um pedido que foi programado no ciclo um, necessariamente estará disponível para entrega no final do período quatro.

Quanto à duração considerada em cada estágio, pode-se usar o que é mais conveniente para a empresa em questão; o importante é que esta duração seja sempre a mesma para todos os estágios. A análise do ambiente de produção das fundições mostra que este período deverá ser de, no mínimo, dois dias, devido ao tempo necessário para secagem das peças no estágio de vazamento e também devido as incertezas relacionadas com os tempos das operações. Em RACHAMADUGU & TU (1997) é apresentado um procedimento prático para determinar a duração dos ciclos de produção em um sistema *PBC*. O uso de períodos curtos nos estágios facilita para o tomador de decisões avaliar as estimativas de capacidade disponível das operações e também resolver possíveis problemas produtivos, principalmente os relacionados com a falta de acuidade das informações relacionadas ao consumo das operações produtivas, além de reduzir os estoques em processo e os tempos de entrega, fatores apontados como primordiais nas empresas pesquisadas.

A grande responsabilidade da programação da produção será, de posse de todos os itens disponíveis a programar, escolher quais itens maximizam o retorno esperado da produção no ciclo, e que, ao mesmo tempo, obedeçam as suas restrições produtivas. A seguir serão propostos os possíveis modelos decisórios para elaboração de uma programação da produção que atenda a estes requisitos.

6.3 Proposta Dos Modelos Decisórios Para Elaboração Da Programação Da Produção Em Fundições De Mercado

Como já tratado anteriormente, tomando por base o sistema de controle da produção *PBC* aplicado ao ambiente produtivo das fundições de mercado, o processo

de elaboração da programação da produção consiste em determinar quais itens de pedidos serão produzidos em cada ciclo do sistema, visando maximizar o retorno esperado da produção no ciclo, considerando todas as restrições produtivas dos estágios de produção envolvidos no ciclo.

Em uma empresa com fins lucrativos, como é o caso da grande maioria das fundições de mercado, é plausível que este retorno esperado seja expresso em termos financeiros. Por outro lado, principalmente em empresas que trabalham com produtos personalizados sob encomenda, existem também outros tipos de retornos que podem estar sendo avaliados como, por exemplo, atender preferencialmente a clientes especiais ou produzir preferencialmente itens de pedido que estão com suas datas de entrega atrasadas ou prestes a atrasar. Para que o modelo possa considerar estes e outros fatores que influenciam a decisão de programar ou não um item de pedido, estas informações poderão ser consideradas como prêmios ou penalidades mensuradas ou estimadas sob a forma financeira para cada item de pedido que pertence à carteira de pedidos em aberto, além de prêmios e penalidades decorrentes do impacto do programa de produção gerado no processo de produção, por exemplo, aumento dos estoques em processo, ou seqüenciamento ineficiente das corridas de um forno. Estes dados poderão ser, por fim, considerados concomitantemente com a lucratividade estimada para cada item de pedido, permitindo uma análise do retorno financeiro esperado em uma certa programação da produção para um ciclo.

Como já foi frisado, o programa de produção em um sistema *PBC* tem seu início e término no mesmo ciclo, de forma que não haja impactos entre um programa de produção que está sendo gerado e os ciclos produtivos que estão acontecendo. Este fato minimiza o número de penalidades, a serem consideradas, decorrentes de impactos causados no ambiente de produção pela programação gerada, permitindo também que estes impactos possam ser mais facilmente mensurados ou estimados. Já os prêmios e penalidades relacionadas aos itens de pedidos que compõem a carteira de pedidos em aberto podem sofrer grande influência de fatores subjetivos, além dos valores objetivos que incidem diretamente sobre os mesmos.

De fato, é comum a consideração de prêmios ou penalidades subjetivas ao se avaliar a programação da produção de um item de pedido. Como exemplo de prêmios geralmente considerados podem-se citar: a estimativa do seu lucro financeiro, o

potencial de fidelização do cliente, o potencial de abertura de um novo mercado, entre outros. Como exemplo de penalidades podem-se citar: uma estimativa das multas geradas por atraso de um pedido ou o potencial de se perder clientes ou mercado devido a atrasos nas datas de entrega.

O atual ambiente competitivo torna necessária a consideração de vários fatores ao se decidir por programar ou não um item de pedido, estes fatores e a forma de mensuração ou estimativa de cada um é o que define a estratégia competitiva de cada empresa. Por outro lado, este fato dificulta a criação de um modelo único para elaboração da programação da produção que possa contemplar todas as possíveis estratégias competitivas das fundições de mercado, além de, um esforço neste sentido poder-se-ia tornar rapidamente obsoleto ou exigir mudanças à medida que novos prêmios e penalidades fossem identificados. Como alternativa este trabalho propõe o uso de um valor único relacionado a cada item de pedido a programar, de forma que este valor reflita, em uma unidade de fácil visualização, por exemplo, a unidade financeira, todos os prêmios e penalidades que incidem sob o item de pedido considerado, tantos os objetivos como os subjetivos, de acordo com a percepção do tomador de decisão responsável pela elaboração da programação da produção.

Sendo assim, este trabalho propõe, para fins de aplicação, que o “valor” de um item de pedido, seja definido à luz do ambiente produtivo considerado, com base nos principais prêmios e penalidades envolvidos com a programação e não programação de um item de pedido. Os prêmios e penalidades deverão ser somados para compor o “valor” de um item de pedido, pois é de se esperar que as penalidades envolvidas com um item de pedido aumentam com o tempo de espera para ser programado deste item, por exemplo, dois itens com os mesmos prêmios relacionados, terá “valor” maior o item que tiver mais penalidades relacionadas, tendo, este ultimo, uma chance maior de fazer parte do próximo programa de produção para que suas penalidades cessem de evoluir.

A programação da produção deve considerar também as restrições produtivas de cada estágio do ciclo de produção, assim como as restrições de coordenação entre os estágios e também entre os ciclos, devido às restrições existentes nos fornos de fundição relativas ao seqüenciamento das ligas a serem fundidas. Por fim, a programação para cada ciclo partirá dos itens de pedidos recebidos durante o estágio de acúmulo de pedidos e também dos itens de pedidos em aberto recebidos em ciclos

anteriores para definir quais destes itens serão programados com base no “valor” de cada item e considerando também as restrições de capacidade agregada de todas as operações do estágio de moldagem e dos estágios de acabamento e, para o estágio de vazamento, considerando, para cada forno disponível, as restrições de capacidade dos fornos, as restrições do número de corridas possíveis, e as restrições e economias conseguidas com o ordenamento de ligas, definindo, para cada corrida de forno, quais itens serão vazados na mesma. A seguir os modelos propostos para realizar esta programação são apresentados.

6.3.1 Modelo de programação matemática

A proposta deste modelo considera as principais constantes e variáveis importantes da prática da programação da produção em fundições de mercado, incorporando, também, as restrições necessárias para se obter um programa de produção viável considerando um único ciclo de produção. Sua principal característica é a possibilidade de fornecer a solução exata que maximize a somatória dos valores dos itens de pedido desta programação da produção. Os modelos propostos de programação são apresentados a seguir.

6.3.1.1 Modelo de programação matemática não-linear inteira

A formulação deste modelo considera a definição dos seguintes índices:

- $i = 1..I$ é o índice do conjunto S_I de itens de pedidos em aberto;
- $l = 1..L$ é o índice do conjunto S_L de ligas de metais que podem ser usadas para fundir os itens de pedidos;
- $r = 1..R$ é o índice do conjunto S_R de reatores;
- $f = 1..F$ é o índice do conjunto S_F de fornos;
- $c = 1..C$ é o índice do conjunto S_C de corridas de cada forno;
- $om = 1..OM$ é o índice do conjunto S_{OM} de operações do processo produtivo do estágio de moldagem;
- $ea = 1..EA$ é o índice do conjunto S_{EA} de estágios de acabamento;
- $oa = 1..OA$ é o índice do conjunto S_{OA} de operações do processo produtivo de cada estágio de acabamento.

- Considere ainda os índices $m=1..L$ e $n=1..L$ como analogias, para efeito de modelagem, ao índice l ;

A solução do modelo envolve decidir os valores das seguintes variáveis de decisão binárias:

$$a_{i,c,f,r} = \begin{cases} 1 & \text{se o item } i \text{ for vazado na corrida } c \text{ do forno } f \text{ do reator } r \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}; e,$$

$$b_{l,c,f,r} = \begin{cases} 1 & \text{se a liga } l \text{ for fundida na corrida } c \text{ do forno } f \text{ do reator } r \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Os dados do modelo são definidos em letras gregas como segue:

- ω_r é o número máximo de corridas possíveis para o reator de índice r no horizonte de tempo considerado;
- π_i é o peso do item de pedido de índice i ;
- ρ_i é o valor do item de pedido de índice i ;
- $\lambda_{i,l}$ será $\begin{cases} 1 & \text{se o item } i \text{ usar a liga } l \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$;
- $\varphi_{f,r}$ é a capacidade do forno de índice f do reator de índice r ;
- $\kappa_{f,r}$ é o custo de uma corrida do forno de índice f do reator de índice r ;
- $\xi_{f,r}$ é o valor da economia conseguida caso o forno de índice f do reator de índice r realize duas corridas em seguida de ligas que agilizam o processo de fundição.
- $\eta_{m,n}$ será $\begin{cases} 1 & \text{se, em um forno, é possível fundir a liga } m \text{ após ter fundido a liga } n \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$;
- $\gamma_{m,n}$ será $\begin{cases} 1 & \text{se, em um forno, for econômico fundir a liga } m \text{ após ter fundido a liga } n \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$;
- $\varepsilon_{l,f,r}$ será $\begin{cases} 1 & \text{se a liga } l \text{ foi a última usada pelo forno } f \text{ do reator } r \text{ no ciclo anterior} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$;
- ψ_{om} é a capacidade máxima da operação de índice om do estágio de moldagem;
- $\tau_{ea,oa}$ é a capacidade máxima da operação de índice oa do estágio de acabamento de índice ea ;

- δ_{om} é a capacidade cambiável⁷ máxima da operação de índice om do estágio de moldagem;
- $\mu_{ea,oa}$ é a capacidade cambiável máxima da operação de índice oa do estágio de acabamento de índice ea ;
- $\alpha_{i,om}$ é o consumo total pelo item de índice i da operação de índice om do estágio de moldagem;
- $\beta_{i,ea,oa}$ é o consumo total pelo item de índice i da operação de índice oa do estágio de acabamento de índice ea ;
- A solução do modelo possui o seguinte objetivo (1):

$$\max \left(\sum_{i=1}^I \sum_{c=1}^C \sum_{f=1}^F \sum_{r=1}^R (a_{i,c,f,r} \cdot \rho_i) - \sum_{l=1}^L \sum_{c=1}^C \sum_{f=1}^F \sum_{r=1}^R \left(b_{l,c,f,r} \cdot \left(\kappa_{f,r} - \xi_{f,r} \cdot \sum_{m=1}^L (se\ c > 1\ e\ \gamma_{m,l} = 1\ \text{então}\ b_{m,c-1,f,r}) \right) \right) \right)$$

Sujeito às restrições:

$$\sum_{f=1}^F \sum_{c=1}^C \sum_{l=1}^L b_{l,c,f,r} \leq \omega r_r \quad \forall r \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^I (a_{i,c,f,r} \cdot \pi_i) \leq \varphi_{f,r} \quad \forall c, f, r \quad (3)$$

$$\sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \sum_{c=1}^C a_{i,c,f,r} \leq 1 \quad \forall i \quad (4)$$

$$a_{i,c,f,r} \cdot \lambda_{i,l} \leq b_{l,c,f,r} \quad \forall i, l, c, f, r \quad (5)$$

$$se\ c > 1\ \text{então}\ \sum_{l=1}^L b_{l,c,f,r} \leq \sum_{l=1}^L b_{l,c-1,f,r} \quad \forall c, f, r \quad (6)$$

$$se\ (c > 1\ e\ \eta_{m,n} = 0)\ \text{então}\ b_{m,c-1,f,r} + b_{n,c,f,r} \leq 1 \quad \forall m, n, c, f, r \quad (7)$$

$$se\ (c = 1\ e\ \eta_{m,n} = 0)\ \text{então}\ \varepsilon_{m,f,r} + b_{n,c,f,r} \leq 1 \quad \forall m, n, c, f, r \quad (8)$$

$$\sum_{l=1}^L b_{l,c,f,r} \leq 1 \quad \forall c, f, r \quad (9)$$

⁷ No sistema de controle da produção *PBC* é possível que a capacidade sub-utilizada de algumas operações sejam redirecionadas para outras operações com necessidade de sobrecarga. É importante lembrar que a soma total das capacidades destas operações que permitem intercambiamento deve ser respeitada, ou seja, qualquer utilização de uma capacidade extra por uma operação cambiável deve ter uma contrapartida de igual valor em outra operação também cambiável que teve sua capacidade sub-utilizada

$$\sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \sum_{c=1}^C (a_{i,c,f,r} \cdot \alpha_{i,om}) \leq \psi_{om} + \delta_{om} \quad \forall om \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \sum_{c=1}^C (a_{i,c,f,r} \cdot \beta_{i,ea,oa}) \leq \tau_{ea,oa} + \mu_{ea,oa} \quad \forall ea, oa \quad (11)$$

$$\sum_{om=1}^{OM} \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \sum_{c=1}^C (se \delta_{om} > 0 \text{ então } a_{i,c,f,r} \cdot \alpha_{i,om}) \leq \sum_{om=1}^{OM} (se \delta_{om} > 0 \text{ então } \psi_{om}) \quad (12)$$

$$\sum_{oa=1}^{OA} \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \sum_{c=1}^C (se \mu_{ea,oa} > 0 \text{ então } a_{i,c,f,r} \cdot \beta_{i,ea,oa}) \leq \sum_{oa=1}^{OA} (se \mu_{ea,oa} > 0 \text{ então } \tau_{ea,oa}) \quad \forall ea \quad (13)$$

A formulação do modelo proposto visa maximizar a função objetivo (1) que é composta por duas parcelas distintas. A primeira parcela consiste na soma dos valores de todos os itens de pedido programados e a segunda parcela é formada pelo custo total de todas as corridas de fornos necessárias para compor o programa⁸. Cabe observar que a formulação da função objetivo, como já tratado anteriormente, concentrou em ρ_i todos os prêmios e penalidades que podem incorrer em um item de pedido em particular, sendo expresso em unidades financeiras, para que possa estar de acordo com a segunda parcela da função objetivo. Cabe ao operador do sistema estimar, de forma acurada, o valor de ρ_i para cada item de pedido segundo o ambiente produtivo em questão.

O modelo propõe também duas variáveis de decisão distintas que devem ser solucionadas $a_{i,c,f,r}$ e $b_{l,c,f,r}$, ambas variáveis binárias e discretas, caracterizando o modelo como um modelo de programação inteira binária ou 0-1. A variável $a_{i,c,f,r}$ informa se o item de pedido de índice i será vazado na corrida de índice c do forno de índice f do reator de índice r , recebendo o valor 1 caso isto aconteça e 0 caso contrário. Já a variável $b_{l,c,f,r}$ diz respeito às ligas que serão vazadas em cada corrida, informando se a liga de índice l será vazada na corrida de índice c do forno de índice f do reator de índice r , recebendo, da mesma forma, o valor 1 caso isto aconteça e 0 caso contrário.

⁸ Como se pode perceber a função objetivo (1) não contempla os custos das operações produtivas dos estágios de moldagem e acabamento. Isto se deve ao fato de se considerar que os custos destas operações são compostos pelo consumo de mão de obra e depreciação dos equipamentos utilizados nestas operações, custos estes que são independentes de quais itens serão processados em um ciclo. Outros custos diretos relativos a cada um dos itens processados são levados em conta ao se calcular o retorno financeiro total do item no momento de se estimar seu valor ρ_i .

Quanto às restrições do modelo, a restrição (2) cuida para que o número de corridas de fornos total em um ciclo não seja maior que a capacidade dos reatores destes fornos, enquanto que a integridade da capacidade máxima do forno utilizado em cada corrida é garantida pela restrição (3). A restrição (4) cuida para que um item de pedido não seja programado em mais de uma corrida de forno, enquanto que a restrição (5) garante que um item de pedido só seja programado em uma corrida de forno que irá fundir a liga metálica na qual o mesmo é composto. Cabe observar também que a restrição (5) garante que um item de pedido não seja incluído em uma corrida que não irá acontecer.

As restrições (6), (7) e (8) são responsáveis por ordenar as corridas nos fornos. A restrição (6) cuida para que as corridas aconteçam em ordem. As restrições (7) e (8) garantem que uma seqüência de ligas inviáveis não ocorra, a restrição (7) garante as corridas que acontecem durante o ciclo de produção e a restrição (8) garante que a primeira corrida de um forno, em um ciclo, seja viável com a última corrida deste forno no ciclo de produção anterior. Já a restrição (9) cuida para que em uma corrida de forno só seja fundido um único tipo de liga metálica.

Quanto às operações produtivas do estágio de moldagem e dos estágios de acabamento, as equações (10) e (11) garantem que a soma da capacidade máxima e do adicional de capacidade que uma operação poderá contar cambiando com a capacidade de uma outra operação para as operações para cada estágio de produção, tanto para o estágio de moldagem como para os estágios de acabamento, respectivamente, sejam respeitadas pelos itens de pedidos programados. Por fim, as restrições (12) e (13) tratam especificamente da possibilidade de se cambiar as capacidades das operações, garantindo que, para as operações que possibilitam cambiar sua capacidade, a capacidade total destas operações no estágio de moldagem e nos estágios de acabamento, respectivamente, sejam respeitadas.

A análise do modelo proposto mostra que todas as equações técnicas de restrição que o compõem são lineares, entretanto, sua função objetivo não o é, o que o caracteriza como um modelo de programação matemática inteira binária não linear. Apesar de existirem métodos de solução para modelos de programação inteira não linear, não é de se esperar que a solução de uma possível aplicação deste modelo em um caso prático seja algo viável. Entretanto, esta modelagem poderá representar um

importante ponto de partida para a definição de outros modelos, ainda de programação matemática, que ofereçam maior viabilidade de solução. A seguir serão propostas modificações deste modelo inicial no intuito de se alcançar maior viabilidade de aplicação.

6.3.1.2 Modelo de programação matemática linear inteira - *PLI*

Este modelo parte da proposta do modelo de programação inteira não linear buscando conseguir maior viabilidade do seu processo de solução por meio da garantia de linearidade em todas suas equações.

A análise do modelo de programação inteira não linear revela que é justamente o cálculo da economia conseguida com o ordenamento das ligas nos fornos que causa a não linearidade de sua função objetivo. Infelizmente este dado é por demais importante para desconsiderá-lo. Sendo assim, é apresentada uma possível alternativa para garantir sua linearização sem comprometer sua abrangência e complexidade. Para facilitar a abordagem, a proposta deste novo modelo será tratada como *PLI*. Segue então sua formulação completa.

A formulação do modelo *PLI*, da mesma forma que o modelo inteiro não linear, considera os índices como segue⁹:

- $i = 1..I$ é o índice do conjunto S_I de itens de pedidos em aberto;
- $l = 1..L$ é o índice do conjunto S_L de ligas de metais que podem ser usadas para fundir os itens de pedidos;
- $r = 1..R$ é o índice do conjunto S_R de reatores;
- $f = 1..F$ é o índice do conjunto S_F de fornos;
- $c = 1..C$ é o índice do conjunto S_C de corridas de cada forno;
- $om = 1..OM$ é o índice do conjunto S_{OM} de operações do processo produtivo do estágio de moldagem;
- $ea = 1..EA$ é o índice do conjunto S_{EA} de estágios de acabamento;
- $oa = 1..OA$ é o índice do conjunto S_{OA} de operações do processo produtivo de cada estágio de acabamento.

⁹ Visando facilitar a leitura deste trabalho, os índices, dados e equações do modelo não linear, usados no modelo *PLI*, serão novamente apresentados, como definidos no modelo não linear

- Considere ainda os índices $m=1..L$ e $n=1..L$ como analogias, para efeito de modelagem, ao índice l ;

A solução do modelo envolve decidir os valores das seguintes variáveis de decisão binárias:

$$a_{i,c,f,r} = \begin{cases} 1 & \text{se o item } i \text{ for vazado na corrida } c \text{ do forno } f \text{ do reator } r ; \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$b_{l,c,f,r} = \begin{cases} 1 & \text{se a liga } l \text{ for fundida na corrida } c \text{ do forno } f \text{ do reator } r ; \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Entretanto o modelo *PLI* introduz também a nova variável de decisão binária:

$$e_{l,c,f,r} = \begin{cases} 1 & \text{se for econômico fundir a liga } l \text{ na corrida } c \text{ do forno } f \text{ do reator } r ; \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Os dados do modelo são definidos em letras gregas como segue:

- ω_r é o número máximo de corridas possíveis para o reator de índice r no horizonte de tempo considerado;
- π_i é o peso do item de pedido de índice i ;
- ρ_i é o valor do item de pedido de índice i ;
- $\lambda_{i,l}$ será $\begin{cases} 1 & \text{se o item } i \text{ usar a liga } l ; \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$;
- $\varphi_{f,r}$ é a capacidade do forno de índice f do reator de índice r ;
- $\kappa_{f,r}$ é o custo de uma corrida do forno de índice f do reator de índice r ;
- $\xi_{f,r}$ é o valor da economia conseguida caso o forno de índice f do reator de índice r realize duas corridas em seguida de ligas que agilizam o processo de fundição.
- $\eta_{m,n}$ será $\begin{cases} 1 & \text{se, em um forno, é possível fundir a liga } m \text{ após ter fundido a liga } n ; \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$;
- $\gamma_{m,n}$ será $\begin{cases} 1 & \text{se, em um forno, for econômico fundir a liga } m \text{ após ter fundido a liga } n ; \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$;
- $\varepsilon_{l,f,r}$ será $\begin{cases} 1 & \text{se a liga } l \text{ foi a última usada pelo forno } f \text{ do reator } r \text{ no ciclo anterior} ; \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$;
- ψ_{om} é a capacidade máxima da operação de índice om do estágio de moldagem;

- $\tau_{ea,oa}$ é a capacidade máxima da operação de índice oa do estágio de acabamento de índice ea ;
- δ_{om} é a capacidade cambiável máxima da operação de índice om do estágio de moldagem;
- $\mu_{ea,oa}$ é a capacidade cambiável máxima da operação de índice oa do estágio de acabamento de índice ea ;
- $\alpha_{i,om}$ é o consumo total pelo item de índice i da operação de índice om do estágio de moldagem;
- $\beta_{i,ea,oa}$ é o consumo total pelo item de índice i da operação de índice oa do estágio de acabamento de índice ea ;

A solução do novo modelo *PLI* possui o objetivo representado pela equação linear a seguir (14):

$$\max \left(\sum_{i=1}^I \sum_{c=1}^C \sum_{f=1}^F \sum_{r=1}^R (a_{i,c,f,r} \cdot \rho_i) - \sum_{l=1}^L \sum_{c=1}^C \sum_{f=1}^F \sum_{r=1}^R (b_{l,c,f,r} \cdot \kappa_{f,r} - e_{l,c,f,r} \cdot \xi_{f,r}) \right) \quad (14)$$

Sujeito às restrições:

$$\sum_{f=1}^F \sum_{c=1}^C \sum_{l=1}^L b_{l,c,f,r} \leq \omega r \quad \forall r \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^I (a_{i,c,f,r} \cdot \pi_i) \leq \varphi_{f,r} \quad \forall c, f, r \quad (3)$$

$$\sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \sum_{c=1}^C a_{i,c,f,r} \leq 1 \quad \forall i \quad (4)$$

$$a_{i,c,f,r} \cdot \lambda_{i,l} \leq b_{l,c,f,r} \quad \forall i, l, c, f, r \quad (5)$$

$$\text{se } c > 1 \text{ então } \sum_{l=1}^L b_{l,c,f,r} \leq \sum_{l=1}^L b_{l,c-1,f,r} \quad \forall c, f, r \quad (6)$$

$$\text{se } (c > 1 \text{ e } \eta_{m,n} = 0) \text{ então } b_{m,c-1,f,r} + b_{n,c,f,r} \leq 1 \quad \forall m, n, c, f, r \quad (7)$$

$$\text{se } (c = 1 \text{ e } \eta_{m,n} = 0) \text{ então } \varepsilon_{m,f,r} + b_{n,c,f,r} \leq 1 \quad \forall m, n, c, f, r \quad (8)$$

$$\sum_{l=1}^L b_{l,c,f,r} \leq 1 \quad \forall c, f, r \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \sum_{c=1}^C (a_{i,c,f,r} \cdot \alpha_{i,om}) \leq \psi_{om} + \delta_{om} \quad \forall om \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \sum_{c=1}^C (a_{i,c,f,r} \cdot \beta_{i,ea,oa}) \leq \tau_{ea,oa} + \mu_{ea,oa} \quad \forall ea, oa \quad (11)$$

$$\sum_{om=1}^{OM} \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \sum_{c=1}^C (se \delta_{om} > 0 \text{ então } a_{i,c,f,r} \cdot \alpha_{i,om}) \leq \sum_{om=1}^{OM} (se \delta_{om} > 0 \text{ então } \psi_{om}) \quad (12)$$

$$\sum_{oa=1}^{OA} \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \sum_{c=1}^C (se \mu_{ea,oa} > 0 \text{ então } a_{i,c,f,r} \cdot \beta_{i,ea,oa}) \leq \sum_{oa=1}^{OA} (se \mu_{ea,oa} > 0 \text{ então } \tau_{ea,oa}) \quad \forall ea \quad (13)$$

E também às novas restrições:

$$se \ c=1 \ \text{então} \ e_{l,c,f,r} = 0 \quad \forall l, c, f, r \quad (15)$$

$$e_{l,c,f,r} \leq b_{l,c,f,r} \quad \forall l, c, f, r \quad (16)$$

$$se \ (c > 1 \ \text{e} \ \gamma_{m,n} = 0) \ \text{então} \ b_{m,c-1,f,r} + e_{n,c,f,r} \leq 1 \quad \forall m, n, c, f, r \quad (17)$$

A busca da linearização do modelo forçou a consideração de uma nova variável de decisão, também binária, de forma que o modelo possa continuar sendo caracterizado como um modelo de decisão binário ou 0-1. A variável binária $e_{l,c,f,r}$, apesar de ser uma variável de decisão, é dependente da variável $b_{l,c,f,r}$ e reflete os valores escolhidos para esta última, ou seja, a principal função de se introduzir esta variável no modelo foi garantir a linearidade do mesmo. Sendo assim, a variável $e_{l,c,f,r}$ informa se a corrida de índice c do forno de índice f do reator de índice r que irá vaziar a liga de índice l , será uma corrida econômica ou não.

Como pode ser visto, a consideração da economia nas corridas de forno forçou também, além da nova variável e das mudanças na função objetivo, a definição de três novas restrições. A restrição (15) tem por objetivo garantir que as primeiras corridas de cada forno em um ciclo não sejam consideradas econômicas¹⁰. A restrição (16) garante que uma corrida só poderá ser considerada econômica caso a mesma aconteça. Por fim, a restrição (17) garante que uma corrida que foi precedida por uma liga que não agilize o processo de fundição não seja considerada econômica. Já as restrições (2) a (13) continuam tendo a mesma função que desempenham no modelo não linear.

¹⁰ Como tratado no capítulo 3, uma corrida de um forno conseguirá economia de recursos caso seja precedida por uma corrida que fundiu uma liga que agilize o processo de fundição

A análise do modelo *PLI* proposto, quanto à sua implementação em instâncias reais de problemas de programação da produção em fundições de mercado, sugere uma explosão combinatorial decorrente do número possível de variáveis de decisão e equações de restrição. No capítulo 5 é exposto a dificuldade existente para se obter soluções para os modelos aplicáveis de programação linear inteira, em GOLDBARG & LUNA (2000), SHERALI & DRISCOLL (2000) e HOFFMAN (2000) pode-se ter uma visão geral dos avanços e dificuldades existentes para a solução destes tipos de modelos de programação matemática. Como defendem SHERALI & DRISCOLL (2000) e também HOFFMAN (2000), em modelos discretos de programação matemática, apesar das conquistas obtidas na área, a forma como se realiza a modelagem do problema é crucial para se garantir maior sucesso na solução de uma possível aplicação do modelo em instâncias reais.

Desta forma, pretende-se realizar modificações no modelo *PLI*, visando obter maior viabilidade de solução, abrindo mão de uma possível solução exata, sem que se perda a noção de proximidade da solução obtida com esta possível solução exata. Para isto, serão propostos dois modelos, com base no modelo *PLI*, que forneçam, respectivamente, um limite superior e inferior para a solução exata. Estes limites poderão ser usados para avaliar a qualidade das soluções obtidas por um outro modelo, também baseado em *PLI*, mas que possua maior viabilidade de apresentar soluções factíveis para problemas reais, ao custo de abrir mão da solução exata. Estes limites poderão ser usados também para avaliar a qualidade das soluções apresentadas pelos outros tipos de modelos alternativos.

A seguir será apresentada a proposta do modelo que fornecerá o limite superior para a solução exata de *PLI*. Este modelo será tratado como modelo *PLIRX*.

6.3.1.3 Modelo relaxado de programação matemática linear inteira - PLIRX

A relaxação do modelo *PLI* tem por base diminuir o número de equações de restrição e de variáveis de decisão do modelo, visando aumentar sua factibilidade¹¹. Para isto, considere a equação de restrição (3) do modelo *PLI* como segue.

¹¹ É importante frisar que este tipo de relaxação não garante que o modelo resultante apresente um potencial maior de viabilidade de solução. Por outro lado, é um importante ponto de partida neste sentido, de forma que, a melhoria da viabilidade na solução do modelo deve ser comprovada em instâncias reais do problema decisório

$$\sum_{i=1}^I (a_{i,c,f,r} \cdot \pi_i) \leq \varphi_{f,r} \quad \forall c, f, r \quad (3)$$

Esta equação de restrição cuida, como já foi explicado anteriormente, para que, em uma corrida de forno, o peso dos itens de pedido programados nesta corrida não seja maior que a capacidade em peso do referido forno. Considere então a seguinte relaxação desta equação como segue.

$$\sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^I (a_{i,c,f,r} \cdot \pi_i \cdot \lambda_{i,l}) \leq \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \sum_{c=1}^C (b_{l,c,f,r} \cdot \varphi_{f,r}) \quad \forall l \quad (18)$$

A equação de restrição (18) garante que o peso total dos itens de pedido fundidos de uma certa liga seja menor ou igual à somatória das capacidades de todas as corridas de fornos que irão fundir a referida liga. Porém, não garante que, em uma certa corrida de forno, o mesmo terá capacidade para vaziar todos os itens de pedidos programados para a referida corrida. A equação de restrição (18) pode ser interpretada como se os itens de pedidos pudessem usar ligas fundidas em várias corridas de fornos para serem vazados.

Caso a equação de restrição (3) fosse substituída pela equação (18), a solução do modelo poderia não gerar uma programação da produção possível de ser implementada em um ambiente de produção real, devido ao fato de que, em uma fundição, uma vez fundida uma liga metálica em uma corrida de forno, esta liga fundida deve ser imediatamente vazada no interior das peças relacionadas à corrida, não podendo restar liga fundida esperando para vaziar itens de uma outra corrida, ou itens semi-preenchidos de liga fundida esperando uma nova corrida da mesma liga para serem completados.

Apesar da substituição da equação de restrição (3) pela equação (18) não garantir uma solução viável, quanto à sua aplicação prática, é trivial que esta substituição causa uma relaxação da solução do modelo *PLI*, uma vez que toda a solução para *PLI*, considerando a restrição (3), será uma solução válida para *PLI* considerando a restrição alternativa (18), apesar do contrário não ser verdadeiro. Desta forma, pode-se afirmar que esta substituição fornecerá um modelo onde sua solução exata pode ser considerada como um limite superior para solução de *PLI*, ou seja, uma relaxação de *PLI*.

Considere ainda a'_i como uma variável de decisão binária onde:

$$a'_i = \begin{cases} 1 & \text{se o item de pedido } i \text{ for vazado na programação do ciclo} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Considerando a nova variável de decisão, a equação (18) poderá ser reescrita, sem perda de funcionalidade, da seguinte forma:

$$\sum_{i=1}^I (a'_i \cdot \pi_i \cdot \lambda_{i,l}) \leq \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \sum_{c=1}^C (b_{l,c,f,r} \cdot \varphi_{f,r}) \quad \forall l \quad (19)$$

A substituição da variável $a_{i,c,f,r}$ por a'_i permite simplificar a equação (18). Por outro lado, a equação de restrição (19) não pode ser aplicada ao modelo *PLI* pois o mesmo não considera a variável de decisão a'_i . Como alternativa, pode-se avaliar se a substituição da variável $a_{i,c,f,r}$ por a'_i e da restrição (3) pela equação (19) no modelo *PLI*, não irá alterar sua estrutura principal de forma a garantir que a solução exata com esta alteração continue fornecendo um limite superior para *PLI*, ou seja, que estas substituições continuem representando uma relaxação de *PLI*. Analisando todas as equações de *PLI* que serão alteradas com a substituição da variável $a_{i,c,f,r}$ por a'_i tem-se:

A função objetivo (14) será alterada da seguinte forma:

$$\max \left(\sum_{i=1}^I (a'_i \cdot \rho_i) - \sum_{l=1}^L \sum_{c=1}^C \sum_{f=1}^F \sum_{r=1}^R (b_{l,c,f,r} \cdot \kappa_{f,r} - e_{l,c,f,r} \cdot \xi_{f,r}) \right) \quad (20)$$

Como é possível avaliar, a substituição da variável $a_{i,c,f,r}$ por a'_i não afeta a estrutura geral da função objetivo, pois os resultados fornecidos pela parte afetada não serão alterados pela falta da informação sobre a corrida na qual o item de pedido será vazado.

Quanto às equações de restrição que serão afetadas pela mudança na variável de decisão do modelo, pode-se perceber que a equação de restrição (4) deixará de ser necessária, pois a substituição da nova variável a reduziria a $a'_i \leq 1 \quad \forall i$.

Por sua vez, a equação de restrição (5) também não será mais necessária, pois a mesma cuida para que os itens de pedido sejam programados em uma corrida na qual seja fundido a liga metálica desejada para este item, como pode ser visto a seguir.

$$a_{i,c,f,r} \cdot \lambda_{i,l} \leq b_{l,c,f,r} \quad \forall i, l, c, f, r \quad (5)$$

Entretanto, a equação de restrição (18) já desobrigava este relacionamento entre os itens de pedidos e as corridas particulares pois a mesma garante

que a somatória dos pesos dos itens de pedido programados para serem fundidos, de uma mesma liga metálica, não seja maior que a capacidade total da referida liga que estará sendo fundida nas corridas de fornos. Conseqüentemente, a equação (19) também atende esta funcionalidade de forma que a equação de restrição (5) se torna desnecessária.

Por fim, as equações de restrições (10), (11), (12) e (13) dizem respeito ao consumo das operações produtivas pelos itens de pedido programados no estágio de moldagem e também nos estágios de acabamento, não sendo influenciadas pela falta de informação da corrida na qual os itens de pedido serão vazados. Desta forma, estas equações poderão ser substituídas, sem perda de generalismo, pelas seguintes equações de restrição, respectivamente.

$$\sum_{i=1}^I (a'_i \cdot \alpha_{i,om}) \leq \psi_{om} + \delta_{om} \quad \forall om \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^I (a'_i \cdot \beta_{i,ea,oa}) \leq \tau_{ea,oa} + \mu_{ea,oa} \quad \forall ea, oa \quad (22)$$

$$\sum_{om=1}^{OM} \sum_{i=1}^I (se \delta_{om} > 0 \text{ então } a'_i \cdot \alpha_{i,om}) \leq \sum_{om=1}^{OM} (se \delta_{om} > 0 \text{ então } \psi_{om}) \quad (23)$$

$$\sum_{oa=1}^{OA} \sum_{i=1}^I (se \mu_{ea,oa} > 0 \text{ então } a'_i \cdot \beta_{i,ea,oa}) \leq \sum_{oa=1}^{OA} (se \mu_{ea,oa} > 0 \text{ então } \tau_{ea,oa}) \quad \forall ea \quad (24)$$

Sendo assim, pode-se definir a formulação do modelo *PLIRX* como segue:

- $i = 1..I$ é o índice do conjunto S_I de itens de pedidos em aberto;
- $l = 1..L$ é o índice do conjunto S_L de ligas de metais que podem ser usadas para fundir os itens de pedidos;
- $r = 1..R$ é o índice do conjunto S_R de reatores;
- $f = 1..F$ é o índice do conjunto S_F de fornos;
- $c = 1..C$ é o índice do conjunto S_C de corridas de cada forno;
- $om = 1..OM$ é o índice do conjunto S_{OM} de operações do processo produtivo do estágio de moldagem;
- $ea = 1..EA$ é o índice do conjunto S_{EA} de estágios de acabamento;

- $oa = 1..OA$ é o índice do conjunto S_{OA} de operações do processo produtivo de cada estágio de acabamento.
- Considere ainda os índices $m = 1..L$ e $n = 1..L$ como analogias, para efeito de modelagem, ao índice l ;
- A solução do modelo envolve decidir os valores das seguintes variáveis de decisão binárias:

$$a'_i = \begin{cases} 1 & \text{se o item de pedido } i \text{ for vazado na programação do ciclo;} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases};$$

$$b_{l,c,f,r} = \begin{cases} 1 & \text{se a liga } l \text{ for fundida na corrida } c \text{ do forno } f \text{ do reator } r; \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}; e,$$

$$e_{l,c,f,r} = \begin{cases} 1 & \text{se for econômico fundir a liga } l \text{ na corrida } c \text{ do forno } f \text{ do reator } r \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}.$$

Os dados do modelo são definidos em letras gregas como segue:

- or_r é o número máximo de corridas possíveis para o reator de índice r no horizonte de tempo considerado;
- π_i é o peso do item de pedido de índice i ;
- ρ_i é o valor do item de pedido de índice i ;
- $\lambda_{i,l}$ será $\begin{cases} 1 & \text{se o item } i \text{ usar a liga } l; \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$;
- $\varphi_{f,r}$ é a capacidade do forno de índice f do reator de índice r ;
- $\kappa_{f,r}$ é o custo de uma corrida do forno de índice f do reator de índice r ;
- $\xi_{f,r}$ é o valor da economia conseguida caso o forno de índice f do reator de índice r realize duas corridas em seguida de ligas que agilizam o processo de fundição.
- $\eta_{m,n}$ será $\begin{cases} 1 & \text{se, em um forno, é possível fundir a liga } m \text{ após ter fundido a liga } n; \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$;
- $\gamma_{m,n}$ será $\begin{cases} 1 & \text{se, em um forno, for econômico fundir a liga } m \text{ após ter fundido a liga } n; \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$;
- $\varepsilon_{l,f,r}$ será $\begin{cases} 1 & \text{se a liga } l \text{ foi a última usada pelo forno } f \text{ do reator } r \text{ no ciclo anterior;} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$;
- ψ_{om} é a capacidade máxima da operação de índice om do estágio de moldagem;

- $\tau_{ea,oa}$ é a capacidade máxima da operação de índice oa do estágio de acabamento de índice ea ;
- δ_{om} é a capacidade cambiável máxima da operação de índice om do estágio de moldagem;
- $\mu_{ea,oa}$ é a capacidade cambiável máxima da operação de índice oa do estágio de acabamento de índice ea ;
- $\alpha_{i,om}$ é o consumo total pelo item de índice i da operação de índice om do estágio de moldagem;
- $\beta_{i,ea,oa}$ é o consumo total pelo item de índice i da operação de índice oa do estágio de acabamento de índice ea ;
- A solução do novo modelo *PLIRX* possui a seguinte equação objetivo (20):

$$\max \left(\sum_{i=1}^I (a'_i \cdot \rho_i) - \sum_{l=1}^L \sum_{c=1}^C \sum_{f=1}^F \sum_{r=1}^R (b_{l,c,f,r} \cdot \kappa_{f,r} - e_{l,c,f,r} \cdot \xi_{f,r}) \right) \quad (20)$$

Sujeito às restrições:

$$\sum_{f=1}^F \sum_{c=1}^C \sum_{l=1}^L b_{l,c,f,r} \leq \omega r, \quad \forall r \quad (2)$$

$$\text{se } c > 1 \text{ então } \sum_{l=1}^L b_{l,c,f,r} \leq \sum_{l=1}^L b_{l,c-1,f,r} \quad \forall c, f, r \quad (6)$$

$$\text{se } (c > 1 \text{ e } \eta_{m,n} = 0) \text{ então } b_{m,c-1,f,r} + b_{n,c,f,r} \leq 1 \quad \forall m, n, c, f, r \quad (7)$$

$$\text{se } (c = 1 \text{ e } \eta_{m,n} = 0) \text{ então } \varepsilon_{m,f,r} + b_{n,c,f,r} \leq 1 \quad \forall m, n, c, f, r \quad (8)$$

$$\sum_{l=1}^L b_{l,c,f,r} \leq 1 \quad \forall c, f, r \quad (9)$$

$$\text{se } c = 1 \text{ então } e_{l,c,f,r} = 0 \quad \forall l, c, f, r \quad (15)$$

$$e_{l,c,f,r} \leq b_{l,c,f,r} \quad \forall l, c, f, r \quad (16)$$

$$\text{se } (c > 1 \text{ e } \gamma_{m,n} = 0) \text{ então } b_{m,c-1,f,r} + e_{n,c,f,r} \leq 1 \quad \forall m, n, c, f, r \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^I (a'_i \cdot \pi_i \cdot \lambda_{i,l}) \leq \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \sum_{c=1}^C (b_{l,c,f,r} \cdot \varphi_{f,r}) \quad \forall l \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^I (a'_i \cdot \alpha_{i,om}) \leq \psi_{om} + \delta_{om} \quad \forall om \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^I (a'_i \cdot \beta_{i,ea,oa}) \leq \tau_{ea,oa} + \mu_{ea,oa} \quad \forall ea, oa \quad (22)$$

$$\sum_{om=1}^{OM} \sum_{i=1}^I (se \delta_{om} > 0 \text{ então } a'_i \cdot \alpha_{i,om}) \leq \sum_{om=1}^{OM} (se \delta_{om} > 0 \text{ então } \psi_{om}) \quad (23)$$

$$\sum_{oa=1}^{OA} \sum_{i=1}^I (se \mu_{ea,oa} > 0 \text{ então } a'_i \cdot \beta_{i,ea,oa}) \leq \sum_{oa=1}^{OA} (se \mu_{ea,oa} > 0 \text{ então } \tau_{ea,oa}) \quad \forall ea \quad (24)$$

Apesar de não se poder garantir que o modelo *PLIRX* terá maior potencial em apresentar soluções viáveis para instâncias reais, quando comparado a *PLI*, é de se esperar que este fato aconteça, devido à relaxação ocorrida com várias restrições importantes do modelo *PLI*. Entretanto, isto só poderá ser avaliado quando da aplicação deste modelo em instâncias reais de problemas de programação da produção em fundições de mercado.

A seguir é apresentado o modelo proposto para se obter o limite inferior para a solução exata de *PLI*. Este modelo será tratado como *PLIRT*.

6.3.1.4 Modelo restrito de programação matemática linear inteira - *PLIRT*

Como já foi mencionado, o objetivo do modelo restrito é obter um limite inferior para a solução exata de *PLI*. Para isto, será utilizada como base a solução fornecida pelo modelo *PLIRX* quanto às corridas de fornos e economias, ou seja, será tomado por base os valores das variáveis binárias $b_{l,c,f,r}$ e $e_{l,c,f,r}$ fornecidos pela solução do modelo *PLIRX*.

Os valores destas variáveis poderão ser considerados no modelo *PLIRT* por meio da definição dos seguintes dados:

- $h_{l,c,f,r} = \begin{cases} 1 & \text{se a liga } l \text{ for fundida na corrida } c \text{ do forno } f \text{ do reator } r \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}; e,$
- $k_{l,c,f,r} = \begin{cases} 1 & \text{se for econômico fundir a liga } l \text{ na corrida } c \text{ do forno } f \text{ do reator } r \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$.

Para isto, estes dados são iniciados como segue:

$$h_{l,c,f,r} = b_{l,c,f,r} \quad \forall l, c, f, r \quad (25)$$

$$k_{l,c,f,r} = e_{l,c,f,r} \quad \forall l, c, f, r \quad (26)$$

Onde os valores de $b_{l,c,f,r}$ e $e_{l,c,f,r}$ são provenientes do processo de solução do modelo *PLIRX*.

A formulação do modelo *PLIRT* pode ser então definida como segue:

- $i = 1..I$ é o índice do conjunto S_I de itens de pedidos em aberto;
- $l = 1..L$ é o índice do conjunto S_L de ligas de metais que podem ser usadas para fundir os itens de pedidos;
- $r = 1..R$ é o índice do conjunto S_R de reatores;
- $f = 1..F$ é o índice do conjunto S_F de fornos;
- $c = 1..C$ é o índice do conjunto S_C de corridas de cada forno;
- $om = 1..OM$ é o índice do conjunto S_{OM} de operações do processo produtivo do estágio de moldagem;
- $ea = 1..EA$ é o índice do conjunto S_{EA} de estágios de acabamento;
- $oa = 1..OA$ é o índice do conjunto S_{OA} de operações do processo produtivo de cada estágio de acabamento.
- Considere ainda os índices $m = 1..L$ e $n = 1..L$ como analogias, para efeito de modelagem, ao índice l ;

A solução do modelo envolve decidir os valores das seguintes variáveis de decisão binárias do modelo não linear, como segue:

$$a_{i,c,f,r} = \begin{cases} 1 & \text{se o item } i \text{ for vazado na corrida } c \text{ do forno } f \text{ do reator } r; \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases};$$

$$b_{l,c,f,r} = \begin{cases} 1 & \text{se a liga } l \text{ for fundida na corrida } c \text{ do forno } f \text{ do reator } r; \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}; e,$$

$$e_{l,c,f,r} = \begin{cases} 1 & \text{se for econômico fundir a liga } l \text{ na corrida } c \text{ do forno } f \text{ do reator } r; \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}.$$

Os dados do modelo são definidos como segue:

- or_r é o número máximo de corridas possíveis para o reator de índice r no horizonte de tempo considerado;
- π_i é o peso do item de pedido de índice i ;
- ρ_i é o valor do item de pedido de índice i ;

- $\lambda_{i,l}$ será $\begin{cases} 1 \text{ se o item } i \text{ usar a liga } l ; \\ 0 \text{ caso contrário} \end{cases}$;
- $\varphi_{f,r}$ é a capacidade do forno de índice f do reator de índice r ;
- $\kappa_{f,r}$ é o custo de uma corrida do forno de índice f do reator de índice r ;
- $\xi_{f,r}$ é o valor da economia conseguida caso o forno de índice f do reator de índice r realize duas corridas em seguida de ligas que agilizam o processo de fundição.
- $\eta_{m,n}$ será $\begin{cases} 1 \text{ se, em um forno, é possível fundir a liga } m \text{ após ter fundido a liga } n ; \\ 0 \text{ caso contrário} \end{cases}$;
- $\gamma_{m,n}$ será $\begin{cases} 1 \text{ se, em um forno, for econômico fundir a liga } m \text{ após ter fundido a liga } n ; \\ 0 \text{ caso contrário} \end{cases}$;
- $\varepsilon_{l,f,r}$ será $\begin{cases} 1 \text{ se a liga } l \text{ foi a última usada pelo forno } f \text{ do reator } r \text{ no ciclo anterior} ; \\ 0 \text{ caso contrário} \end{cases}$;
- ψ_{om} é a capacidade máxima da operação de índice om do estágio de moldagem;
- $\tau_{ea,oa}$ é a capacidade máxima da operação de índice oa do estágio de acabamento de índice ea ;
- δ_{om} é a capacidade cambiável máxima da operação de índice om do estágio de moldagem;
- $\mu_{ea,oa}$ é a capacidade cambiável máxima da operação de índice oa do estágio de acabamento de índice ea ;
- $\alpha_{i,om}$ é o consumo total pelo item de índice i da operação de índice om do estágio de moldagem;
- $\beta_{i,ea,oa}$ é o consumo total pelo item de índice i da operação de índice oa do estágio de acabamento de índice ea ;
- $h_{l,c,f,r} = \begin{cases} 1 \text{ se a liga } l \text{ for fundida na corrida } c \text{ do forno } f \text{ do reator } r ; \\ 0 \text{ caso contrário} \end{cases}$ e,
- $k_{l,c,f,r} = \begin{cases} 1 \text{ se for econômico fundir a liga } l \text{ na corrida } c \text{ do forno } f \text{ do reator } r ; \\ 0 \text{ caso contrário} \end{cases}$.

A solução do modelo *PLIRT*, assim como o modelo *PLI*, possui o seguinte objetivo:

$$\max \left(\sum_{i=1}^I \sum_{c=1}^C \sum_{f=1}^F \sum_{r=1}^R (a_{i,c,f,r} \cdot \rho_i) - \sum_{l=1}^L \sum_{c=1}^C \sum_{f=1}^F \sum_{r=1}^R (b_{l,c,f,r} \cdot \kappa_{f,r} - e_{l,c,f,r} \cdot \xi_{f,r}) \right) \quad (14)$$

Sujeito às restrições do modelo *PLI*:

$$\sum_{f=1}^F \sum_{c=1}^C \sum_{l=1}^L b_{l,c,f,r} \leq \omega r \quad \forall r \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^I (a_{i,c,f,r} \cdot \pi_i) \leq \varphi_{f,r} \quad \forall c, f, r \quad (3)$$

$$\sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \sum_{c=1}^C a_{i,c,f,r} \leq 1 \quad \forall i \quad (4)$$

$$a_{i,c,f,r} \cdot \lambda_{i,l} \leq b_{l,c,f,r} \quad \forall i, l, c, f, r \quad (5)$$

$$\text{se } c > 1 \text{ então } \sum_{l=1}^L b_{l,c,f,r} \leq \sum_{l=1}^L b_{l,c-1,f,r} \quad \forall c, f, r \quad (6)$$

$$\text{se } (c > 1 \text{ e } \eta_{m,n} = 0) \text{ então } b_{m,c-1,f,r} + b_{n,c,f,r} \leq 1 \quad \forall m, n, c, f, r \quad (7)$$

$$\text{se } (c = 1 \text{ e } \eta_{m,n} = 0) \text{ então } \varepsilon_{m,f,r} + b_{n,c,f,r} \leq 1 \quad \forall m, n, c, f, r \quad (8)$$

$$\sum_{l=1}^L b_{l,c,f,r} \leq 1 \quad \forall c, f, r \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \sum_{c=1}^C (a_{i,c,f,r} \cdot \alpha_{i,om}) \leq \psi_{om} + \delta_{om} \quad \forall om \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \sum_{c=1}^C (a_{i,c,f,r} \cdot \beta_{i,ea,oa}) \leq \tau_{ea,oa} + \mu_{ea,oa} \quad \forall ea, oa \quad (11)$$

$$\sum_{om=1}^{OM} \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \sum_{c=1}^C (se \delta_{om} > 0 \text{ então } a_{i,c,f,r} \cdot \alpha_{i,om}) \leq \sum_{om=1}^{OM} (se \delta_{om} > 0 \text{ então } \psi_{om}) \quad (12)$$

$$\sum_{oa=1}^{OA} \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \sum_{c=1}^C (se \mu_{ea,oa} > 0 \text{ então } a_{i,c,f,r} \cdot \beta_{i,ea,oa}) \leq \sum_{oa=1}^{OA} (se \mu_{ea,oa} > 0 \text{ então } \tau_{ea,oa}) \quad \forall ea \quad (13)$$

$$\text{se } c = 1 \text{ então } e_{l,c,f,r} = 0 \quad \forall l, c, f, r \quad (15)$$

$$e_{l,c,f,r} \leq b_{l,c,f,r} \quad \forall l, c, f, r \quad (16)$$

$$\text{se } (c > 1 \text{ e } \gamma_{m,n} = 0) \text{ então } b_{m,c-1,f,r} + e_{n,c,f,r} \leq 1 \quad \forall m, n, c, f, r \quad (17)$$

E também às novas restrições:

$$\text{se } (h_{l,c,f,r} = 1) \text{ então } b_{l,c,f,r} = 1 \quad \forall l, c, f, r \quad (27)$$

$$\text{se } (k_{l,c,f,r} = 1) \text{ então } e_{l,c,f,r} = 1 \quad \forall l, c, f, r \quad (28)$$

As duas novas equações de restrição (27) e (28) tem por objetivo garantir que toda a corrida de forno que for definida para acontecer por meio do processo de solução do modelo *PLIRX*, também terá que, obrigatoriamente, acontecer na solução do modelo *PLIRT*.

Uma vez que o modelo *PLIRT* possui a mesma função objetivo (14) que *PLI*, e considera também todas as restrições de *PLI*, incluindo as duas novas restrições (27) e (28), pode-se então afirmar que *PLIRT* é um modelo restrito de *PLI* e que toda a solução fornecida por *PLIRT* também será solução de *PLI*, de forma que sempre apresente uma solução igual ou inferior à solução exata de *PLI*.

A aplicação conjunta de *PLIRX* e *PLIRT* permitirá obter uma programação da produção viável através da solução fornecida por *PLIRT*, como já foi esclarecido. É possível supor também que, caso a diferença entre os limites fornecidos por *PLIRX* e *PLIRT* não seja muito expressiva, a solução fornecida por *PLIRT* poderá ser considerada uma boa solução. Desta forma, é de se esperar que os modelos *PLIRX* e *PLIRT* sejam avaliados também para aplicação em conjunto no sistema de apoio à decisão proposto. Entretanto, as análises dos resultados apresentados pela aplicação destes modelos, como será visto no próximo capítulo, mostraram que o modelo *PLIRX* é, na maioria dos casos experimentais analisados, inviável de aplicação sob a forma de um SAD, principalmente por não apresentar soluções factíveis em tempos viáveis. Já o modelo *PLIRT* apresenta um potencial maior de viabilidade de aplicação na forma de um SAD.

Sendo assim, será apresentado um modelo de programação matemática alternativo ao modelo *PLIRX* para que seja aplicado, em conjunto com o modelo *PLIRT*, no SAD proposto por este trabalho. Este modelo alternativo, que será tratado como *PLIA*, será exposto a seguir.

6.3.1.5 Modelo alternativo de programação matemática linear inteira - *PLIA*

O modelo alternativo a *PLIRX* proposto procura abordar de outra forma o modo de compor as corridas de fornos. Nesta nova abordagem, a partir do peso total de cada tipo de liga metálica a ser fundida de acordo com a carteira de pedidos em aberto, buscam-se quais corridas de forno que melhor possam realizar esta fundição. Para isto, todos os itens de pedidos de uma mesma liga são agrupados como uma entidade única,

de forma que seu peso e valor sejam resultantes do somatório de todos os pesos e valores, respectivamente, dos itens de pedidos que a compõe. Visa-se então encontrar uma combinação de corridas de fornos para cada liga metálica que forneça uma somatória de capacidade em peso menor ou igual à soma dos pesos dos itens de pedidos desta liga.

Como é possível perceber, os itens de pedidos não são considerados individualmente, desta forma, perde-se totalmente a informação sobre os mesmos, não podendo ser determinado nem mesmo se um certo item de pedido será ou não considerado. Consecutivamente não se pode considerar no modelo as restrições referentes ao consumo das operações produtivas nos estágios de produção. Por outro lado, o modelo define as corridas de fornos que irão ser programadas, assim como se a mesma será ou não econômica, de forma que, o modelo *PLIA* poderá ser empregado como uma alternativa ao modelo *PLIRX* para fornecer os dados iniciais para a aplicação no modelo *PLIRT*.

A formulação do modelo *PLIA* pode ser definida como segue:

- $l = 1..L$ é o índice do conjunto S_L de ligas de metais que podem ser usadas para fundir os itens de pedidos;
- $r = 1..R$ é o índice do conjunto S_R de reatores;
- $f = 1..F$ é o índice do conjunto S_F de fornos;
- $c = 1..C$ é o índice do conjunto S_C de corridas de cada forno;
- Considere ainda os índices $m = 1..L$ e $n = 1..L$ como analogias, para efeito de modelagem, ao índice l ;

A solução do modelo envolve decidir os valores das seguintes variáveis de decisão binárias como segue:

$$b_{l,c,f,r} = \begin{cases} 1 & \text{se a liga } l \text{ for fundida na corrida } c \text{ do forno } f \text{ do reator } r \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}; e,$$

$$e_{l,c,f,r} = \begin{cases} 1 & \text{se for econômico fundir a liga } l \text{ na corrida } c \text{ do forno } f \text{ do reator } r \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}.$$

Os dados do modelo são definidos em letras gregas como segue:

- ω_r é o número máximo de corridas possíveis para o reator de índice r no horizonte de tempo considerado;

- $\varphi_{f,r}$ é a capacidade do forno de índice f do reator de índice r ;
- $\kappa_{f,r}$ é o custo de uma corrida do forno de índice f do reator de índice r ;
- $\xi_{f,r}$ é o valor da economia conseguida caso o forno de índice f do reator de índice r realize duas corridas em seguida de ligas que agilizam o processo de fundição.
- $\eta_{m,n}$ será $\begin{cases} 1 \text{ se, em um forno, é possível fundir a liga } m \text{ após ter fundido a liga } n ; \\ 0 \text{ caso contrário} \end{cases}$;
- $\gamma_{m,n}$ será $\begin{cases} 1 \text{ se, em um forno, for econômico fundir a liga } m \text{ após ter fundido a liga } n ; \\ 0 \text{ caso contrário} \end{cases}$;
- $\varepsilon_{l,f,r}$ será $\begin{cases} 1 \text{ se a liga } l \text{ foi a última usada pelo forno } f \text{ do reator } r \text{ no ciclo anterior ;} \\ 0 \text{ caso contrário} \end{cases}$;

É necessário também introduzir os seguintes dados:

- θ_l é o peso total da liga de índice l ;
- σ_l é o valor total da liga de índice l ;

A solução do modelo relaxado *PLIA* possui o seguinte objetivo (29):

$$\max \left(\sum_{l=1}^L \sum_{c=1}^C \sum_{f=1}^F \sum_{r=1}^R \left(b_{l,c,f,r} \cdot \left(\frac{\sigma_l}{\theta_l} \cdot \varphi_{f,r} - \kappa_{f,r} \right) + e_{l,c,f,r} \cdot \xi_{f,r} \right) \right) \quad (29)$$

O modelo *PLIA* estará sujeito às seguintes restrições:

$$\sum_{f=1}^F \sum_{c=1}^C \sum_{l=1}^L b_{l,c,f,r} \leq \omega r_r \quad \forall r \quad (2)$$

$$\text{se } c > 1 \text{ então } \sum_{l=1}^L b_{l,c,f,r} \leq \sum_{l=1}^L b_{l,c-1,f,r} \quad \forall c, f, r \quad (6)$$

$$\text{se } (c > 1 \text{ e } \eta_{m,n} = 0) \text{ então } b_{m,c-1,f,r} + b_{n,c,f,r} \leq 1 \quad \forall m, n, c, f, r \quad (7)$$

$$\text{se } (c = 1 \text{ e } \eta_{m,n} = 0) \text{ então } \varepsilon_{m,f,r} + b_{n,c,f,r} \leq 1 \quad \forall m, n, c, f, r \quad (8)$$

$$\sum_{l=1}^L b_{l,c,f,r} \leq 1 \quad \forall c, f, r \quad (9)$$

$$\text{se } c = 1 \text{ então } e_{l,c,f,r} = 0 \quad \forall l, c, f, r \quad (15)$$

$$e_{l,c,f,r} \leq b_{l,c,f,r} \quad \forall l, c, f, r \quad (16)$$

$$\text{se } (c > 1 \text{ e } \gamma_{m,n} = 0) \text{ então } b_{m,c-1,f,r} + e_{n,c,f,r} \leq 1 \quad \forall m, n, c, f, r \quad (17)$$

E também à nova restrição:

$$\sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \sum_{c=1}^C (b_{l,c,f,r} \cdot \varphi_{f,r}) \leq \theta_l \quad \forall l \quad (30)$$

A formulação do modelo *PLIA* visa maximizar o retorno das corridas de fornos de um ciclo de produção. É importante observar que o valor total de cada liga é obtido a partir da somatória do valor de cada item de pedido em aberto da referida liga metálica. Para isto, a função objetivo (29) maximiza a relação entre o valor total de cada liga metálica e seu peso total multiplicado pela capacidade dos fornos nos quais a referida liga metálica será fundida, ou seja, o modelo considera que o peso total de uma liga metálica poderá ser fundido em uma ou mais corridas de fornos.

A nova restrição (30) definida no modelo *PLIA* cuida para que as corridas de fornos se limitem ao peso total disponível de cada liga metálica, não permitindo que uma corrida de forno aconteça caso não exista liga suficiente para completar o forno.

Por fim, os modelos de programação matemática propostos terão aplicações distintas como já definido anteriormente. A aplicação conjunta dos modelos *PLIRX* e *PLIRT* será usada apenas para avaliação de performance dos modelos disponíveis para o SAD proposto por este trabalho, fornecendo os limites superiores e inferiores para os casos experimentais que serão analisados. Enquanto que a aplicação conjunta dos modelos *PLIA* e *PLIRT* ficará disponível para uso no SAD proposto, ou seja, a aplicação conjunta dos modelos *PLIA* e *PLIRT* representará, para o SAD proposto, o tipo de modelagem baseada em programação matemática. Desta forma, visando facilitar o entendimento, o modelo *PLIRT*, quando aplicado a partir dos dados fornecidos pelo modelo *PLIRX*, será tratado como modelo *PLIRT1*. Por outro lado, quando o modelo *PLIRT* utilizar como dados de entrada os resultados fornecidos por *PLIA*, este será tratado como modelo *PLIRT2*.

6.3.2 Modelo aproximativo clássico - HE

O modelo aproximativo clássico proposto toma por base o método heurístico de busca conhecido como “*beam search*”. Como citam SABUNCUOGLU & KARABUK (1998) e SABUNCUOGLU & BAYIZ (1999) (2000), para a aplicação deste método heurístico primeiramente é necessário realizar uma estruturação conveniente do problema a ser resolvido segundo uma árvore decisória multi-estágio. A

proposta deste modelo tem por objetivo justamente criar esta representação para o problema envolvido com o processo de elaboração da programação da produção em uma fundição de mercado, para que, em um segundo momento, se defina uma estratégia de busca na árvore decisória proposta segundo o método heurístico considerado.

A árvore decisória proposta é estruturada de tal forma que cada vértice, ou nó, $v_y \in V$, onde $V = \{v_1..v_n\}$, o conjunto de vértices da árvore, representa uma solução parcial para o problema. Neste modelo, cada arco $a_x \in A$ representa uma decisão isolada, onde $A = \{a_1..a_m\}$ é o conjunto de arcos ou conexões entre as soluções parciais do problema.

Uma vez que se está considerando um árvore de decisão, cada arco $a_x \in A$ será uma opção para se passar de um vértice $v_y \in V$ a outro, entre estágios decisórios subseqüentes, desde que este outro vértice exista, representando uma solução parcial subseqüente a $v_y \in V$ que seja factível. Desta forma, cada vértice $v_y \in V$ irá possuir um e apenas um arco de entrada possível e nenhum, um ou vários arcos de saída para seus vértices sucessores no próximo estágio decisório.

Seja ainda para cada arco $a_x \in A$ o seu vértice sucessor e antecessor representado, respectivamente, por $suc_{a_x} = \{v_y \setminus v_y \in V\}$ e $ant_{a_x} = \{v_y \setminus v_y \in V\}$. Seja ainda $SA_{v_y} \subset A$ o conjunto composto pelo arco $a_x \in A$ de entrada de $v_y \in V$ e também pelo arco de entrada de seu vértice vizinho antecessor e assim recursivamente, até o vértice de origem, constituindo um caminho único da origem da árvore ao vértice $v_y \in V$. Considere também $SU_{v_y} \subset A$ o conjunto de todos os arcos decisórios $a_x \in A$ sucessores ao vértice $v_y \in V$.

Considere ρ_{a_x} o valor de cada arco decisório $a_x \in A$, ou seja, o valor relacionado com a decisão. Seja $\rho_{v_y} = \sum_{SA_{v_y}} \rho_{a_x}$ o valor da solução parcial do problema em cada vértice $v_y \in V$, de forma que, $\rho_{v_y} = 0$ para o vértice de origem. Este esquema pode ser melhor visualizado no exemplo da *figura 6.3*.

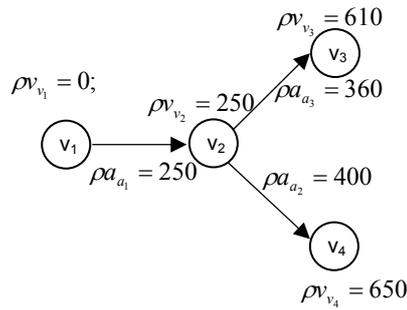


FIGURA 6.3: Detalhe da árvore de busca como proposta

Este tipo de modelagem proposta representa uma árvore decisória com uma ramificação que poderá se apresentar “explosiva”, em problemas práticos, à medida que se distância do vértice de origem. O objetivo da solução deste modelo se resume em encontrar o vértice solução $v_y \in V$ que apresente ρv_{v_y} máximo. A estruturação de um problema decisório hipotético no modelo proposto pode ser visualizada no exemplo da *figura 6.4*.

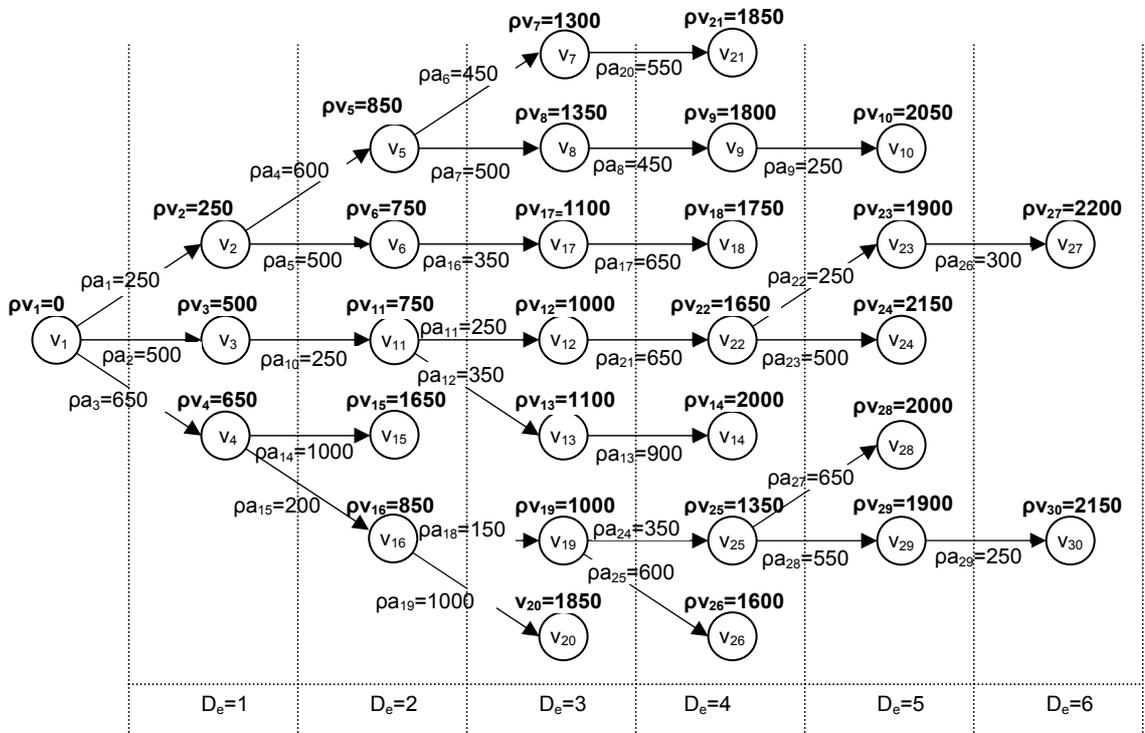


FIGURA 6.4: Estruturação de um problema hipotético na árvore de busca como proposto

Na *figura 6.4*, D_e é o estágio decisório, de forma que, em cada um destes estágios decisórios o processo de solução do método “*beam search*” “caminha” para o próximo estágio através da escolha de um ou mais arcos decisórios $a_x \in SU_{v_y}$, onde $v_y \in V$ é o vértice solução do estágio atual.

Por fim, considerando que o processo de solução resulte no vértice $v_y \in V$ de acordo com o objetivo do modelo proposto, a solução do problema será representada por $S = (VS, AS)$, onde $AS = SA_{v_y}$ e $VS = \{suc_{a_x} \setminus a_x \in AS\}$. A seguir será realizada a adequação desta modelagem ao problema de elaboração da programação da produção em fundições de mercado. Este modelo proposto será tratado convenientemente como modelo *HE*.

Para que o modelo proposto possa ser estruturado como um modelo de programação da produção em uma fundição de mercado é necessário realizar as seguintes considerações. Considere que cada arco decisório a_x , de entrada de um vértice v_y , represente uma possível corrida de forno, de forma que, $SA_{v_y} \subset A$, ou seja, o caminho de arcos decisórios que ligam v_y ao vértice de origem, representem o seqüenciamento destas corridas no programa de produção gerado, onde, para cada vértice solução v_y deste caminho, sejam \bar{l}_{v_y} a liga, \bar{r}_{v_y} o reator e \bar{f}_{v_y} o forno da corrida do seu arco de entrada a_x .

Considere também $\bar{\psi}_{v_y,om} \forall om$ e $\bar{\tau}_{v_y,ea,oa} \forall ea,oa$ os valores das capacidades restantes das operações de moldagem e das operações de todos os estágios de acabamento em cada vértice solução v_y e $\bar{\delta}_{v_y,om} \forall om$ e $\bar{\mu}_{v_y,ea,oa} \forall ea,oa$ os valores das capacidades cambiáveis restantes de moldagem e das operações de todos os estágios de acabamento em cada vértice v_y . Considere ainda $SIA_{a_x} \subset S_I$ o conjunto de itens de pedidos programados na corrida de forno do arco a_x . Seja $SIV_{v_y} = \bigcup_{a_x \in SA_{v_y}} SIA_{a_x}$ o conjunto dos itens de pedidos programados, em todos os arcos $a_x \subset A$ do caminho SA_{v_y} .

Cabe lembrar que os primeiros vértices da árvore, ou os vértices de origem, representam as ultimas corridas do ciclo anterior, de forma que $\rho v_{v_y} = 0$,

$\bar{\psi}_{v_y,om} = 0 \quad \forall om$ e $\bar{\tau}_{v_y,ea,oa} = 0 \quad \forall ea,oa$ para estes vértices, mas a liga \bar{l}_{v_y} , o reator \bar{r}_{v_y} e o forno \bar{f}_{v_y} estão caracterizados de acordo com a ultima corrida do ciclo anterior, devendo-se obedecer as relações de ordenamento das ligas nos fornos.

A seguir é apresentada a estratégia de seleção das soluções parciais em cada estágio decisório para a árvore de busca proposta.

6.3.2.1 Método heurístico de solução

De acordo com CROCE, GUIRARDI & TADEI (2004), o processo de avaliação das soluções parciais em cada estágio da árvore de busca será a “chave” para a aplicação eficiente do método de busca “*beam search*” em um problema específico.

O método utilizado para esta escolha foi inspirado em uma racionalização da observação, pelo autor deste trabalho, do procedimento atual de programação da produção das fundições de mercado. Nestas empresas, o processo empregado para compor as corridas dos fornos, toma por base uma listagem ordenada de forma decrescente das corridas de fornos mais interessantes. Uma vez que o número de corridas de fornos possível, considerando todos os fornos, em um período de programação típico de uma fundição de mercado é relativamente pequeno, buscou-se avaliar, em cada vértice possível de um estágio decisório, qual seria a seqüência de corridas de fornos resultante da aplicação de uma estratégia “gulosa” de intensificação. Ou seja, em cada estágio subsequente da árvore de decisão, tomando por base um vértice de solução $v_y \in V$ do estágio decisório atual, escolhe-se o arco decisório $a_x \in SU_{v_y}$ de maior valor ρa_x . Esta estratégia pode ser considerada como uma estratégia “gulosa” e irá caminhar através dos vértices conexos sucessivos mais valorados. Uma vez que o caminho entre a raiz e o extremo da árvore de decisão proposta será relativamente curto, é de se esperar que a aplicação desta estratégia gulosa de seleção seja computacionalmente viável.

Desta forma, considere $ASG_{v_y} \subset A$ ao conjunto de arcos do caminho resultante da aplicação desta estratégia a partir do vértice solução $v_y \in V$ e $\rho g_{v_y} = \rho v_{v_y} + \sum_{ASG_{v_y}} \rho a_x$ o valor deste caminho para o vértice solução $v_y \in V$. Considere

também Θ o diâmetro de busca do método e $VSE \in V$ o conjunto dos vértices solução em um estágio decisório.

A seguir será apresentada uma visão geral do esquema de funcionamento da proposta de implementação do método “*beam search*” para a solução da árvore de decisão proposta por este trabalho, considerando um exemplo hipotético. Para isto, será tomado por base o exemplo da *figura 6.4* sendo considerado o diâmetro de busca Θ igual a 3.

Fazendo a primeira análise considerando o vértice de origem $v_1 \in V$ e analisando todos os seus arcos de saída $a_x \in SU_{v_1}$, resultará da aplicação da estratégia gulosa para escolha dos vértices no estágio $D_e = 1$ os valores $\rho g_{v_2} = 2050$, $\rho g_{v_3} = 2000$ e $\rho g_{v_4} = 1650$, incluindo então os vértices solução v_2, v_3 e $v_4 \in V$ em VSE . Para o estágio $D_e = 2$ tomando por base agora os vértices solução em VSE e analisando para cada vértice $v_y \in VSE$ todos os seus arcos de saída $a_x \in SU_{v_y}$, consegue-se os seguintes valores para escolha $\rho g_{v_5} = 2050$, $\rho g_{v_6} = 1750$, $\rho g_{v_{11}} = 2000$, $\rho g_{v_{15}} = 1650$ e $\rho g_{v_{16}} = 1850$ escolhendo-se então os vértices solução v_5, v_{11} e $v_{16} \in V$ para compor o novo conjunto solução VSE . Para o estágio $D_e = 3$ considerando agora os vértices $v_y \in VSE$ e analisando, para cada um destes vértices em VSE todos os seus arcos de saída $a_x \in SU_{v_y}$, é possível chegar aos seguintes valores para os novos vértices analisados $\rho g_{v_7} = 1850$, $\rho g_{v_8} = 2050$, $\rho g_{v_{12}} = 2150$, $\rho g_{v_{13}} = 2000$, $\rho g_{v_{19}} = 1600$ e $\rho g_{v_{20}} = 1850$ escolhendo-se então os vértices solução v_8, v_{12} e $v_{13} \in V$ para compor o novo conjunto solução VSE . Seguindo o mesmo raciocínio para o estágio decisório $D_e = 4$ cada vértice solução em VSE possui apenas um único arco de saída forçando a se chegar nos seguintes vértices solução v_9, v_{22} e $v_{14} \in V$ com os valores $\rho g_{v_9} = 2050$, $\rho g_{v_{22}} = 2150$ e $\rho g_{v_{14}} = 2000$ compondo o novo conjunto VSE . Para o estágio $D_e = 5$ é possível escolher entre o valor do vértice solução $\rho g_{v_{14}} = 2000$ que não possui arco de saída ou analisando os arcos de saída $a_x \in SU_{v_1}$ dos outros dois vértices que compõe VSE chega-se aos os seguintes valores para escolha $\rho g_{v_{10}} = 2050$, $\rho g_{v_{23}} = 2200$ e

$\rho g_{v_{24}} = 2150$ para os vértices sucessores dos vértices em VSE , escolhendo-se então os vértices v_{10}, v_{23} e $v_{24} \in V$ para compor o novo conjunto VSE . A decisão do último estágio $D_e = 6$ envolve escolher entre os valores dos vértices $\rho g_{v_{10}} = 2050$ e $\rho g_{v_{24}} = 2150$ que não possuem arcos de saída ou o valor do vértice sucessor ao vértice $v_{23} \in V$ que será $\rho v_{27} = \rho g_{v_{27}} = 2200$, escolhendo-se então os vértices v_{10}, v_{24} e $v_{27} \in V$ para compor o novo conjunto VSE . Perceba que para um novo estágio decisório $D_e = 7$ nenhum dos vértices em VSE apresentariam sucessores, escolhendo-se então como resultado da solução o valor do vértice em VSE que possua o maior valor ρv_y onde $v_y \in VSE$, o que, no caso considerado, geraria como solução o caminho que leva a origem da árvore ao vértice $v_{27} \in V$, ou seja, $AS = SA_{v_{27}} \subset A$ e $VS = \{suc_{a_x} \setminus a_x \in SA_{v_{27}}\}$.

No exemplo tratado, o uso de um diâmetro de busca $\Theta = 3$ levou ao ótimo global. Infelizmente, não se pode garantir previamente qual será o diâmetro mais econômico que levará ao caminho da solução ótima para cada caso particular, ou até mesmo, que exista um diâmetro que seja computacionalmente viável para a obtenção desta solução ótima. Por outro lado, o uso de diâmetros de busca suficientemente amplos e que ainda possibilitem a execução em um tempo viável poderá apresentar excelentes soluções a problemas reais.

A seguir o algoritmo proposto que implementa o método heurístico é apresentado. Perceba que o algoritmo procura não manter os vértices e arcos que já foram analisados e que não foram escolhidos, este procedimento tem o objetivo de economizar recursos computacionais.

Por fim, considere ainda $v_{gg} \in V$ e $v_{gl} \in V$ vértices gerais usados no algoritmo de solução. E $VSE^* \subset V$ um conjunto temporário de vértices que serão analisados em cada estágio decisório. Seja o algoritmo como segue:

1. **Inicialize** Θ ; e **Faça** $x = 0$; $y = 0$; $V = \emptyset$; $A = \emptyset$; $AS = \emptyset$; $VS = \emptyset$; $VSE = \emptyset$;
 $VSE^* = \emptyset$; $v_{gg} = \emptyset$; $v_{gl} = \emptyset$;

2. **Para todo** vértice de origem **faça:** $y = y + 1$; $SA_{v_y} = \emptyset$; $SU_{v_y} = \emptyset$; e inclua v_y em V e VSE ;
3. **Para todo** $v_k \in VSE$ **faça:**
- 3.1. $v_{gg} = v_k$;
- 3.2. **Enquanto** $v_{gg} \neq \emptyset$ **faça:**
- 3.2.1. $v_{gl} = v_{gg}$;
- 3.2.2. **Enquanto** $v_{gl} \neq \emptyset$ **faça:**
- 3.2.2.1. **Se** $SU_{v_{gl}} = \emptyset$ **Então:**

Para toda possibilidade de um novo arco de saída de v_{gl} **faça:**
 $x = x + 1$ crie a_x determine ρa_{a_x} e inclua a_x em A e $SU_{v_{gl}}$;

Para todo arco $a_x \in SU_{v_{gl}}$ **faça:** $ant_{a_x} = v_{gl}$; crie seu vértice sucessor fazendo $y = y + 1$ e criando v_y de forma que $suc_{a_x} = v_y$, inclua v_y em V e faça $SA_{v_y} = a_x + SA_{v_{gl}}$, $SU_{v_y} = \emptyset$ e

$$\rho v_{v_y} = \sum_{SA_{v_y}} \rho a_{a_x};$$

- 3.2.2.2. **Se** $v_{gl} = v_k$

Então:

Se $SU_{v_{gl}} \neq \emptyset$

Então:

Faça: **Para todo** $a_x \in SU_{v_{gl}}$ Inclua suc_{a_x} em VSE^* ;

Senão:

Faça: Inclua v_{gl} em VSE^* ;

Faça $v_{gl} = \emptyset$;

Senão:

Se $SU_{v_{gl}} \neq \emptyset$

Então:

Faça: $v_{gl} = \{v \mid v \in SU_{v_{gl}} \text{ onde } v \text{ possua o maior } \rho v\}$

Senão:

Faça: $\rho g_{v_{gg}} = \rho v_{v_{gl}}; v_{gl} = \emptyset;$

3.2.3. **Se** $VSE^* \neq \emptyset$ **e** ($v_{gg} \notin VSE$ ou v_{gg} é a última posição de VSE)

Então:

Se $v_{gg} = v_k$ **e** $v_{gg} \neq \{ \text{vértice da primeira posição de } VSE^* \}$

Então:

$v_{gg} = \{ \text{vértice da primeira posição de } VSE^* \};$

Senão:

Se $v_{gg} \in VSE^*$ **e** $v_{gg} \neq \{ \text{vértice da última posição de } VSE^* \}$

Então:

$v_{gg} = \{ \text{vértice da próxima posição de } VSE^* \};$

Senão:

$v_{gg} = \emptyset;$

Senão:

Se $v_{gg} \in VSE$

Então: $v_{gg} = \emptyset;$

4. **Ordene** VSE^* de forma decrescente de ρg_{v_z} onde $v_z \in VSE^*$;

Monte o conjunto $VSE = \{v_z \in VSE^* \mid z \leq \Theta\};$

Retire do conjunto V os vértices $v_z \in VSE^* \mid z > \Theta$ e para cada $v \in V$ a retirar, retire antes de V para cada $a_w \in SU_v$ os vértices $v_q = suc_{a_w}$ e em seguida retire de A todos os arcos $a_w \in SU_v$;

Se $VSE^* \neq VSE$

Então

Faça $VSE^* = \emptyset;$

Vá para o passo 3;

Senão:

Faça $AS = \{SA_v \mid v \text{ é o vértice de maior } \rho g \text{ em } VSE\}$

Faça $VS = \{v_1 + suc_{a_x} \mid a_x \in SA_v\}$

FIM.

O algoritmo heurístico proposto visa ser aplicado em problemas decisórios reais de programação da produção em fundições de mercado, para isto, sua robustez e viabilidade deverá ser devidamente avaliada em problemas aplicáveis. No “Apêndice A1” é possível visualizar a tabela solução deste algoritmo aplicado ao problema decisório da *figura 6.4*.

6.3.2.2 Aplicação do método heurístico de solução para o modelo *HE*

Como já definido, o modelo *HE* é uma proposta de uma árvore de decisão para o problema de elaboração da programação da produção em fundições de mercado. É importante ressaltar que a aplicação do método heurístico de solução para o modelo *HE* considera, no momento de escolher os itens de pedidos que irão compor uma corrida de forno, as operações de moldagem e acabamento, incluindo sua capacidade de intercambiamento, além de todas as restrições que compõe o modelo *PLI*, ou seja, toda solução para o modelo *HE* também deverá ser solução de *PLI*. Seja então o método heurístico de solução para *HE* como segue.

Considere para o método heurístico de solução para o modelo *HE* os seguintes conjuntos de dados:

- S_I o conjunto de itens de pedidos em aberto;
- S_L o conjunto de ligas de metais que podem ser usadas para fundir os itens de pedidos;
- S_R o conjunto de reatores;
- $S_{R,F}$ o conjunto de fornos de cada reator $r \in S_R$;
- S_{OM} o conjunto de operações do processo produtivo do estágio de moldagem;
- S_{EA} o conjunto de estágios de acabamento; e,
- $S_{EA,OA}$ o conjunto de operações do processo produtivo de cada estágios de acabamento $ea \in S_{EA}$.

Considere também os seguintes dados como segue:

- ω_r é o número máximo de corridas possíveis para o reator $r \in S_R$ no horizonte de tempo considerado;
- π_i é o peso do item de pedido $i \in S_I$;
- ρ_i é o valor do item de pedido $i \in S_I$;
- $\lambda_{i,l}$ será $\begin{cases} 1 & \text{se o item } i \in S_I \text{ usar a liga } l \in S_L ; \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$;
- $\omega_{r,f}$ é o número máximo de corridas no reator $r \in S_R$ que o forno $f \in S_{r,F}$ pode fazer em um ciclo;
- $\varphi_{r,f}$ é a capacidade, considerando o reator $r \in S_R$, que o forno $f \in S_{r,F}$ possui;
- $\kappa_{r,f}$ é o custo, considerando o reator $r \in S_R$, de uma corrida do forno $f \in S_{r,F}$;
- $\xi_{r,f}$ é o valor, considerando o reator $r \in S_R$, da economia conseguida caso o forno $f \in S_{r,F}$ realize duas corridas em seguida de ligas que agilizam o processo de fundição.
- $\eta_{m,n}$ será $\begin{cases} 1 & \text{se, em um forno, é possível fundir a liga } m \in S_L \text{ após ter fundido a liga } n \in S_L ; \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$;
- $\gamma_{m,n}$ será $\begin{cases} 1 & \text{se, em um forno, for econômico fundir a liga } m \in S_L \text{ após ter fundido a liga } n \in S_L ; \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$;
- $\varepsilon_{l,r,f}$ será $\begin{cases} 1 & \text{se a liga } l \in S_L \text{ foi a última usada pelo forno } f \in S_{r,F} \text{ do reator } r \in S_R \text{ no ciclo anterior ;} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$;
- ψ_{om} é a capacidade máxima da operação $om \in S_{OM}$ do estágio de moldagem;
- $\tau_{ea,oa}$ é a capacidade máxima da operação $oa \in S_{OA}$ do estágio de acabamento $ea \in S_{EA}$;
- δ_{om} é a capacidade cambiável máxima da operação $om \in S_{OM}$ do estágio de moldagem;
- $\mu_{ea,oa}$ é a capacidade cambiável máxima da operação $oa \in S_{OA}$ do estágio de acabamento $ea \in S_{EA}$;
- Ω_{om} é a soma, em um ciclo, da capacidade máxima disponível e da capacidade cambiável disponível da operação $om \in S_{OM}$ do estágio de moldagem;

- $\Phi_{ea,oa}$ é a soma, em um ciclo, da capacidade máxima disponível e da capacidade cambiável disponível da operação $oa \in S_{OA}$ do estágio de acabamento $ea \in S_{EA}$;
- $\alpha_{i,om}$ é o consumo total pelo item $i \in S_I$ da operação de índice $om \in S_{OM}$ do estágio de moldagem;
- $\beta_{i,ea,oa}$ é o consumo total pelo item $i \in S_I$ da operação de índice $oa \in S_{OA}$ do estágio de acabamento $ea \in S_{EA}$;

Seja ainda $SIL_L \subset S_I$ o conjunto de itens de pedidos, em um dado momento, de cada liga $l \in S_L$. Seja então o método de solução para o modelo *HE* como segue:

1. **Inicialize** $\Theta; S_I; S_L; S_R; S_{R,F}; S_{OM}; S_{EA}; S_{EA,OA}; \omega_r \forall r \in S_R;$
 $\omega_{r,f} \forall r \in S_R, \forall f \in S_{r,F}; \pi_i, v_i \forall i \in S_I; \lambda_{i,l} \forall i \in S_I, \forall l \in S_L; \eta_{m,n} \forall m, n \in S_L;$
 $\gamma_{m,n} \forall m, n \in S_L; \varepsilon_{l,r,f} \forall l \in S_L, \forall r \in S_R, \forall f \in S_F; \kappa_{r,f} \forall r \in S_R, \forall f \in S_F;$
 $\xi_{r,f} \forall r \in S_R, \forall f \in S_F; \psi_{om}, \delta_{om} \forall om \in S_{OM}; \tau_{ea,oa}, \mu_{ea,oa} \forall ea \in S_{EA}, \forall oa \in S_{OA};$
 $\alpha_{i,om} \forall i \in S_I, \forall om \in S_{om}; \beta_{i,ea,oa} \forall i \in S_I, \forall ea \in S_{EA}, \forall oa \in S_{OA};$ e **Faça** $x = 0; y = 0;$
 $V = \emptyset; A = \emptyset; AS = \emptyset; VS = \emptyset; VSE = \emptyset; VSE^* = \emptyset; vgg = \emptyset; vgl = \emptyset;$
2. **Para todo** $l \in S_L$ **faça:**
 Para todo $r \in S_R$ **faça:**
 Para todo $f \in S_{r,F}$ **faça:**
 Se $\varepsilon_{l,r,f} = 1$ **então:**
 Faça: $y = y + 1; SA_{v_y} = \emptyset; SU_{v_y} = \emptyset;$ e inclua v_y em V e VSE ;
 $\bar{f}_{v_y} = f; \bar{r}_{v_y} = r; \bar{l}_{v_y} = l; \bar{\psi}_{v_y,om} = \psi_{om}, \bar{\delta}_{v_y,om} = \delta_{om} \forall om \in S_{OM};$
 $\bar{\tau}_{v_y,ea,oa} = \tau_{ea,oa}, \bar{\mu}_{v_y,ea,oa} = \mu_{ea,oa} \forall ea \in S_{EA}, \forall oa \in S_{OA};$
3. **Para todo** $v_k \in VSE$ **faça:**
 - 3.1. $vgg = v_k;$
 - 3.2. **Enquanto** $vgg \neq \emptyset$ **faça:**

3.2.1. $vgl = vgg$;

3.2.2. **Enquanto** $vgl \neq \emptyset$ **faça**:

3.2.2.1. **Se** $SU_{vgl} = \emptyset$ **então**:

Para todo $l \in S_L$ **faça**:

Se $\eta_{l, \bar{l}_{vgl}} = 1$ **então**:

Para todo $r \in S_R$ **faça**:

Para todo $f \in S_{r,F}$ **faça**:

Se $\sum_{a_n \in SA_{vgl}} (se \bar{r}_{suc_{a_n}} = r \text{ então } 1) < \omega_r$ **e** $\sum_{a_n \in SA_{vgl}} (se \bar{f}_{suc_{a_n}} = f \text{ então } 1) < \omega_{r,f}$

Então:

a. **Faça**: $x = x + 1$; $y = y + 1$; $\bar{r}_{v_y} = r$; $\bar{f}_{v_y} = f$;

$\bar{l}_{v_y} = l$; $suc_{a_x} = v_y$; $ant_{a_x} = vgl$; $SA_{v_y} = SA_{vgl}$;

$SIV_{v_y} = SIV_{vgl}$;

$\rho_{v_y} = \rho_{vgl} - \kappa_{\bar{r}_{v_y}, \bar{f}_{v_y}} + \left(Se \gamma_{\bar{l}_{v_y}, \bar{l}_{vgl}} = 1 \text{ então } \xi_{\bar{r}_{v_y}, \bar{f}_{v_y}} \right)$;

$\bar{\psi}_{v_y, om} = \bar{\psi}_{vgl, om}$; $\bar{\delta}_{v_y, om} = \bar{\delta}_{vgl, om} \quad \forall om \in S_{OM}$;

$\Omega_{om} = \psi_{om} + \delta_{om} - \left(\bar{\psi}_{v_y, om} + \bar{\delta}_{v_y, om} \right) \quad \forall om \in S_{OM}$;

$\bar{\tau}_{v_y, ea, oa} = \bar{\tau}_{vgl, ea, oa}$; $\bar{\mu}_{v_y, ea, oa} = \bar{\mu}_{vgl, ea, oa}$; $\forall ea \in S_{EA}, \forall oa \in S_{OA}$;

$\Phi_{ea, oa} = \tau_{ea, oa} + \mu_{ea, oa} - \left(\bar{\tau}_{v_y, ea, oa} + \bar{\mu}_{v_y, ea, oa} \right) \quad \forall ea \in S_{EA}, \forall oa \in S_{OA}$;

b. **Inclua**: v_y em V ; a_x em A , SU_{vgl} e SA_{v_y} ;

c. **Faça** $SIL_l = \emptyset$;

d. **Para todo** $i \in SIV_{v_y}^c$ ¹² **faça**:

Se $\lambda_{i,l} = 1$ **então**:

Inclua i em SIL_l ;

e. **Ordene** SIL_l de forma decrescente de ρ_i / π_i ¹³;

¹² $SIV_{v_y}^c$ é o conjunto complementar de SIV_{v_y} considerando o conjunto universo como S_l

f. **Faça** $\bar{\pi} = 0$;

g. **Para todo** $i \in SIL_l$ **faça:**

Se $\pi_i + \bar{\pi} \leq \varphi_{f,r}$ **e**

$$\alpha_{i,om} \leq \Omega_{om} \quad \forall om \in S_{OM} \quad \underline{e}$$

$$\beta_{i,ea,oa} \leq \Phi_{ea,oa} \quad \forall ea \in S_{EA}, \forall oa \in S_{OA} \quad \underline{e}$$

$$\alpha_{i,om} \leq \sum_{om=1}^{OM} \text{Se } \delta_{om} > 0 \text{ então } \bar{\psi}_{v_y,om} \quad \forall om \in S_{OM} \quad \underline{e}$$

$$\beta_{i,ea,oa} \leq \sum_{oa=1}^{OA} \text{Se } \mu_{ea,oa} > 0 \text{ então } \bar{\tau}_{v_y,ea,oa} \quad \forall ea \in S_{EA}, \forall oa \in S_{OA}$$

Então:

i. **Retire** i de SIL_l **e inclua em**

$$SIV_{v_y} \text{ e } SIA_{a_x};$$

ii. **Faça:**

$$\rho_{v_y} = \rho_{v_y} + \rho_i;$$

$$\bar{\pi} = \bar{\pi} + \pi_i;$$

$$\Omega_{om} = \Omega_{om} - \alpha_{i,om} \quad \forall om \in S_{OM};$$

$$\Phi_{ea,oa} = \Phi_{ea,oa} - \beta_{i,ea,oa} \quad \forall ea \in S_{EA}, \forall oa \in S_{OA};$$

iii. **Para todo** $om \in S_{OM}$ **faça:**

Se $\Omega_{om} > \delta_{om}$

Então:

$$\bar{\psi}_{v_y,om} = \Omega_{om} - \delta_{om};$$

$$\bar{\delta}_{v_y,om} = \delta_{om};$$

Senão:

$$\bar{\psi}_{v_y,om} = 0;$$

$$\bar{\delta}_{v_y,om} = \Omega_{om};$$

iv. **Para todo** $ea \in S_{EA}$ **faça:**

¹³ Ou de forma decrescente de ρ_i dependendo da performance dos resultados apresentados em um certa situação prática

Para todo $oa \in S_{OA}$ **faça:**

Se $\Phi_{ea,oa} > \mu_{ea,oa}$

Então:

$$\bar{\tau}_{v_y,ea,oa} = \Phi_{ea,oa} - \mu_{ea,oa};$$

$$\bar{\mu}_{v_y,ea,oa} = \mu_{ea,oa};$$

Senão:

$$\bar{\tau}_{v_y,ea,oa} = 0;$$

$$\bar{\mu}_{v_y,ea,oa} = \Phi_{ea,oa};$$

3.2.2.2. **Se** $vgl = v_k$

Então

Se $SU_{vgl} \neq \emptyset$

Então:

Faça: **Para todo** $a_x \in SU_{vgl}$ Inclua suc_{a_x} em VSE^* ;

Senão:

Faça: Inclua vgl em VSE^* ;

Faça $vgl = \emptyset$;

Senão

Se $SU_{vgl} \neq \emptyset$

Então

Faça: $vgl = \{v \mid v \in SU_{vgl} \text{ onde } v \text{ possua o maior } \rho v\}$

Senão

Faça: $\rho_{g_{vgg}} = \rho_{v_{vgl}}$; $vgl = \emptyset$;

3.2.3. **Se** $VSE^* \neq \emptyset$ **e** ($v_{gg} \notin VSE$ ou v_{gg} é a última posição de VSE)

Então:

Se $v_{gg} = v_k$ **e** $v_{gg} \neq \{\text{vértice da primeira posição de } VSE^*\}$

Então:

$$v_{gg} = \{\text{vértice da primeira posição de } VSE^*\};$$

Senão:

$$\underline{\text{Se}} \ v_{gg} \in VSE^* \ \underline{\text{e}} \ v_{gg} \neq \{\text{vértice da última posição de } VSE^*\}$$

Então:

$$v_{gg} = \{\text{vértice da próxima posição de } VSE^*\};$$

Senão:

$$v_{gg} = \emptyset;$$

Senão:

$$\underline{\text{Se}} \ v_{gg} \in VSE$$

$$\underline{\text{Então:}} \ v_{gg} = \emptyset;$$

4. **Ordene** VSE^* de forma decrescente de $\rho_{g_{v_z}}$ onde $v_z \in VSE^*$;

$$\underline{\text{Monte o conjunto}} \ VSE = \{v_z \in VSE^* \mid z \leq \Theta\};$$

Retire do conjunto V os vértices $v_z \in VSE^* \mid z > \Theta$ e para cada $v \in V$ a retirar, retire antes de V para cada $a_w \in SU_v$ os vértices $v_q = \text{suc}_{a_w}$ e em seguida retire de A todos os arcos $a_w \in SU_v$;

$$\underline{\text{Se}} \ VSE^* \neq VSE$$

Então

$$\underline{\text{Faça}} \ VSE^* = \emptyset;$$

Vá para o passo 3;

Senão:

$$\underline{\text{Faça}} \ AS = \{SA_v \mid v \text{ é o vértice de maior } \rho_g \text{ em } VSE\}$$

$$\underline{\text{Faça}} \ VS = \{v_1 + \text{suc}_{a_x} \mid a_x \in SA_v\}$$

FIM.

Perceba que a composição das corridas de fornos disponíveis para escolha em cada estágio decisório ocorre no passo 3.2.2.1 do algoritmo. Em cada corrida de forno possível os itens de pedidos são selecionados em ordem decrescente da relação entre seu valor e seu peso bruto, avaliando, também, a capacidade disponível do

forno e as capacidades agregadas disponíveis das operações do estágio de moldagem e dos estágios de acabamento.

A aplicação deste algoritmo em instâncias reais de programação da produção em fundições de mercado sugere um grande número de vértices criados em cada estágio decisório. Este fato justifica o emprego de um método simplificado para a composição dos itens que farão parte de cada vértice, ou seja, da corrida de forno de seu arco de entrada, pois métodos mais elaborados, para este fim, poderão inviabilizar sua implementação computacional.

Quanto o critério para a escolha da corrida de forno, dentre as possíveis corridas de fornos disponíveis, para compor o caminho guloso, isto será realizado no passo 3.2.2.2 do algoritmo. É importante notar que esta escolha poderá levar em conta vários fatores como, por exemplo, a corrida de maior valor, ou a corrida de maior relação entre seu valor e sua capacidade, ou, também, a corrida de maior relação entre seu valor e seu custo, ou seja, será possível avaliar, em cada situação de aplicação prática, a forma de se definir este critério. Esta flexibilidade de implementação do algoritmo proposto proporciona maior potencial de aplicabilidade em situações reais e, também, maior controle do método de solução pelo tomador de decisões.

6.3.3 Modelo baseado em algoritmos genéticos - AG

Para a definição do modelo baseado em algoritmos genéticos, este trabalho procurou adaptar tanto o problema de elaboração da programação da produção como também o AG, como defendem CHENG, GEN & TSUJIMURA (1999). Para isto, primeiramente, é necessário definir uma estrutura conveniente para estruturar a solução do problema como um ou mais cromossomos. Desta forma, são propostos dois cromossomos para representar um indivíduo ou solução q .

O primeiro cromossomo armazena em cada “gene” uma corrida de forno programada, de forma que a ordem dos “genes”, ou seja, seu “*locus*”, será a ordem na qual as corridas de fornos irão acontecer no referido programa. Cada gene deste cromossomo possui três informações, quais sejam: a identificação do reator r , a identificação do forno f , e a identificação da liga metálica l que será fundida na referida corrida. O segundo cromossomo armazena em cada “gene” um item de pedido que será fundido neste programa, de forma que, o ordenamento de seus “genes” irá

determinar a maneira na qual os fornos serão carregados, como será visto adiante. Neste segundo cromossomo cada gene possui apenas uma informação armazenada, qual seja, a identificação do item de pedido i correspondente a este “gene”. Na *figura 6.5* este esquema de representação é melhor ilustrado.

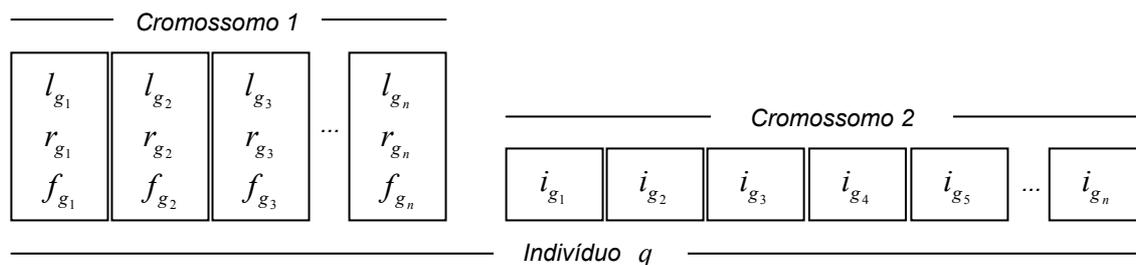


FIGURA 6.5: Esquema de representação de um indivíduo

Na *figura 6.6* pode ser visualizado um indivíduo hipotético onde é possível entender como seus dois cromossomos se inter-relacionam; considere $\varphi_{r,f}$ a capacidade do forno f do reator r e π_i o peso total do item de pedido i e $\lambda_{i,l}$ como sendo igual a 1 se o item de pedido i usar a liga metálica l e 0 caso contrário.

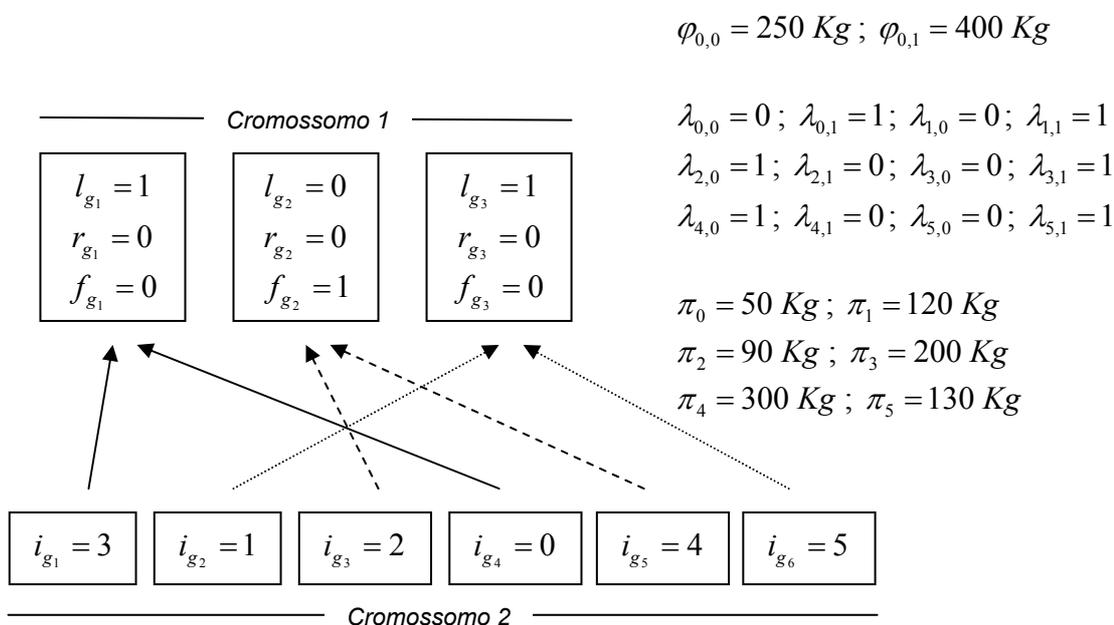


FIGURA 6.6: Inter-relacionamento entre os cromossomos de um indivíduo hipotético

Tomando por base a *figura 6.6*, o esquema de inter-relacionamento é realizado da seguinte forma: inicia-se com a primeiro “gene”, ou seja, g_1 , do

“cromossomo 1”, que representa uma corrida do reator $r = 0$, do forno $f = 0$ que possui capacidade $\varphi_{0,0} = 250 \text{ Kg}$ e irá fundir a liga metálica $l = 1$. Conhecido estas informações em g_1 do “cromossomo 1”, busca-se no “cromossomo 2”, na ordem de seus “genes”, as peças metálicas que poderiam ser vazadas nesta corrida. Analisando o “cromossomo 2”, o seu primeiro “gene” g_1 corresponde ao item de pedido $i = 3$ que usa a liga metálica 1, ou seja, $\lambda_{3,1} = 1$ e possui o peso bruto $\pi_3 = 200 \text{ Kg}$. Como g_1 do “cromossomo 2” atende as restrições do tipo de liga e da capacidade do forno da referida corrida de forno, estes “genes” serão, então, relacionados, ou seja, este item de pedido será vazado nesta corrida. Como a capacidade do forno da referida corrida ainda não está completa, busca-se outro “gene” do “cromossomo 2” que ainda possa ser relacionado. O “gene” g_2 corresponde ao item de pedido $i = 1$ que também usa a liga metálica 1, entretanto, seu peso bruto é $\pi_1 = 120 \text{ Kg}$, que excede a capacidade restante do forno da corrida analisada, desta forma, estes genes não serão relacionados. O “gene” g_3 , por sua vez, corresponde ao item de pedido $i = 2$, que não usa a liga metálica 1, portanto, também, não será relacionado. Já o “gene” g_4 , continuando, corresponde ao item de pedido $i = 0$ que usa a liga metálica 1 e possui o peso bruto $\pi_0 = 50 \text{ Kg}$, obedecendo a restrição de capacidade restante da referida corrida, desta forma, seu “gene” será relacionado, terminando o inter-relacionamento do gene g_1 do “cromossomo 1” com os “genes” do “cromossomo 2”. Este mesmo procedimento é repetido para cada “gene” do primeiro cromossomo até que todos¹⁴ os “genes” do segundo cromossomo estejam relacionados, obtendo-se assim a descrição do indivíduo, ou seja, a solução para o problema.

É importante ressaltar que neste exemplo hipotético não foram considerados as capacidades e consumos das operações no estágio de moldagem e nos estágios de acabamento. Já, em uma aplicação real, estas restrições também serão consideradas no momento de se relacionar os “genes” dos cromossomos. É importante notar que o inter-relacionamento é intrínseco, dependendo apenas das características dos

¹⁴ É importante ressaltar que no cromossomo 2 não deverá haver “gene” que não esteja relacionado a algum “gene” do cromossomo 1

“genes” e de suas posições nos cromossomos. A seguir são apresentados os operadores genéticos para o *AG* proposto.

Quanto aos operadores genéticos de “*crossover*” e “mutação”, foram propostos, respectivamente para cada tipo de operação genética, dois operadores distintos, um para cada cromossomo. Como ressaltam GOLDBERG (1989) e CHENG, GEN & TSUJIMURA (1999), em problemas complexos, quando existe “epistase” não é possível aplicar diretamente permutações ou inversões entre “cromossomos” dos indivíduos “pais”, devendo-se propor alguma forma elaborada para realizar esta operação para que as restrições possam ser obedecidas, gerando soluções filhas factíveis, ao mesmo tempo em que preserva os “*Schemata*” importantes.

Para entender os operadores genéticos propostos, considere um exemplo hipotético de elaboração da programação das corridas de fornos em uma empresa com as seguintes características: considere que existam dois fornos $f = 0$ e $f = 1$ em um mesmo reator $r = 0$ para fundir as ligas $l = 0, l = 1, l = 2$.

Na *figura 6.7*, o esquema de funcionamento do operador genético de “*crossover*”, para o “cromossomo 1”, considerando indivíduos hipotéticos, é visualizado para o exemplo proposto. Perceba na *figura 6.7* que os “genes” externos aos pontos aleatórios de corte receberão sempre, em sua devida ordem, os “genes” do cromossomo “Pai1”. Quanto aos “genes” internos aos pontos aleatórios de corte, cada “gene” é analisado separadamente, de acordo com sua seqüência. Primeiramente todos os “genes” internos recebem, em sua devida ordem, os “genes” de “Pai1”. Em seguida, para cada um destes “genes” internos aos pontos de corte é verificado se, caso seja permutado este “gene” com o correspondente “gene” do cromossomo “Pai2”, as restrições da capacidade máxima dos fornos e dos reatores serão obedecidas, assim como as restrições do ordenamento das ligas metálicas e, caso também seja econômico realizar esta permutação, o “gene” do cromossomo “filho” será permutado com o respectivo “gene” de “Pai2”, caso contrário, o cromossomo “filho” continuará com o “gene” de “Pai1” e termina-se o processo de “*crossover*”¹⁵.

¹⁵ Perceba que, caso não seja possível inserir no cromossomo filho um “gene” de Pai2 o processo de permutação é interrompido e o cromossomo filho termina de receber os “genes” restantes, nos pontos internos de corte, do cromossomo de Pai2. Este procedimento tem o objetivo criar no cromossomo filho uma certa homogeneidade na origem de seus “genes”, não alternando, no cromossomo filho, “genes” provenientes de “Pai1” e de “Pai2”

$$\omega_{0,0} = 3, \omega_{0,1} = 3 - \eta_{0,0} = 1, \eta_{0,1} = 1, \eta_{0,2} = 1, \eta_{1,0} = 1, \eta_{1,1} = 1, \eta_{1,2} = 1, \eta_{2,0} = 1, \eta_{2,1} = 0, \eta_{2,2} = 1$$

$$\gamma_{0,0} = 1, \gamma_{0,1} = 1, \gamma_{0,2} = 1, \gamma_{1,0} = 1, \gamma_{1,1} = 1, \gamma_{1,2} = 0, \gamma_{2,0} = 0, \gamma_{2,1} = 0, \gamma_{2,2} = 1$$

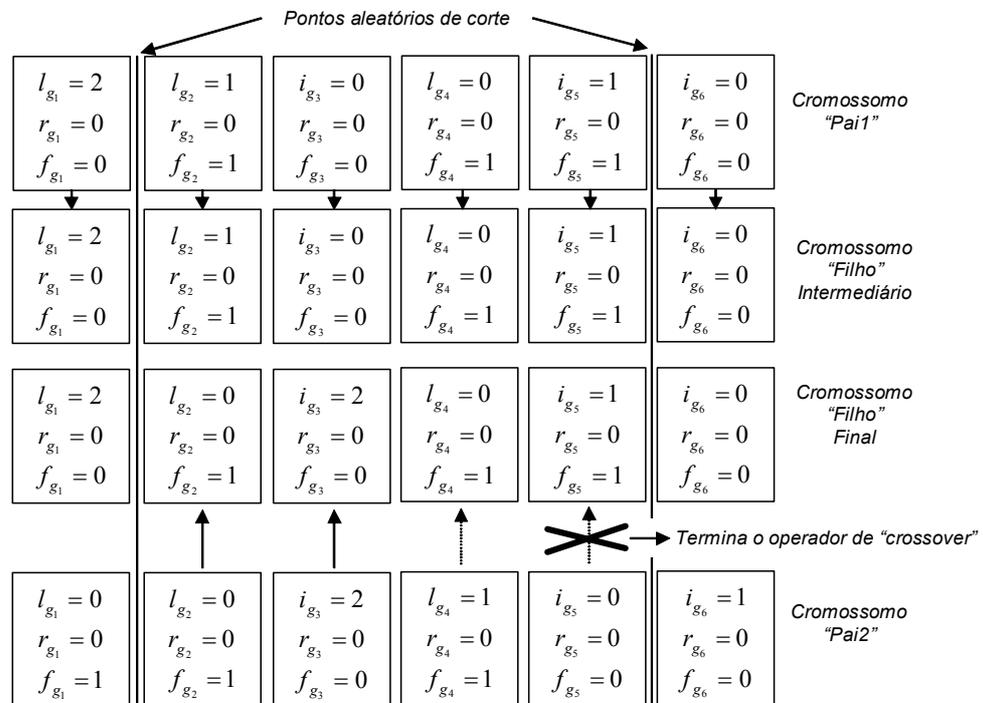


FIGURA 6.7: Esquema de funcionamento do operador genético de “crossover” para o “cromossomo 1”

Note que qualquer não atendimento às restrições para programação das corridas de fornos, assim como não atendimento ao objetivo de criar uma seqüência de corridas econômicas, irá causar o término do operador de “crossover” para o “cromossomo 1”. Perceba que, no exemplo da *figura 6.7*, a operação de “crossover” foi interrompida no momento em que não seria possível atender a restrição do número máximo de corridas para o forno 0. Por fim, é importante frisar que o operador de “crossover” deverá ser aplicado em um “gene” de cada vez, visando garantir o contínuo atendimento das restrições do problema.

Já o operador de “crossover” para o “cromossomo 2” é realizado em duas etapas distintas. Em uma primeira etapa é criado um repositório intermediário onde os “genes” serão armazenados em ordem, para que, em uma segunda etapa, a partir deste depósito, seja criado o cromossomo “Filho”. Durante a primeira etapa, primeiramente, realiza-se o corte dos cromossomos “Pais” a partir de dois pontos aleatórios. Feito isto, inicia-se preenchendo o repositório com os “genes” de “Pai1”, em

sua devida ordem, até o ponto que corresponde ao primeiro corte aleatório, tal que, os itens de pedidos correspondentes a estes “genes” provenientes do cromossomo de “Pai1” não estejam nos “genes” da parte interna do corte aleatório do cromossomo de “Pai2”. Feito isto, todos os “genes” da parte interna de corte do cromossomo de “Pai2” são transferidos para este repositório, em sua devida ordem. Neste momento, os “genes” de “Pai1” correspondentes a itens de pedidos que ainda não estejam nos “genes” do repositório são adicionados ao repositório, também em sua devida ordem. Por fim, este mesmo procedimento é realizado com os “genes” restantes de “Pai2”. Finalmente, o repositório de “genes” é completado com novos “genes” correspondentes a itens de pedidos que não estavam nos “genes” de “Pai1” nem de “Pai2”, até que todos os itens de pedidos a programar tenham um gene correspondente neste repositório. Na segunda etapa, tomando por base o “cromossomo 1” que já foi gerado para este novo indivíduo, segue-se o esquema de inter-relacionamento entre os cromossomos como ilustrado na *figura 6.6*, este esquema garantirá que todas as restrições de capacidade dos fornos e das operações produtivas sejam satisfeitas, “marcando” os cromossomos que foram relacionados neste procedimento. Por fim, o “cromossomo 2” para o indivíduo “filho” pode ser criado adicionando em um cromossomo inicialmente vazio, respeitando seu ordenamento, os “genes” “marcados” do repositório. A seguir este procedimento é melhor visualizado na *figura 6.8*, tomando por base o exemplo da *figura 6.6*.

$$\begin{aligned} \lambda_{0,0} = 0; \lambda_{0,1} = 1; \lambda_{1,0} = 0; \lambda_{1,1} = 1 & \quad \varphi_{0,0} = 250 \text{ Kg}; \varphi_{0,1} = 400 \text{ Kg} \\ \lambda_{2,0} = 1; \lambda_{2,1} = 0; \lambda_{3,0} = 0; \lambda_{3,1} = 1 & \quad \pi_0 = 50 \text{ Kg}; \pi_1 = 120 \text{ Kg} \\ \lambda_{4,0} = 1; \lambda_{4,1} = 0; \lambda_{5,0} = 0; \lambda_{5,1} = 1 & \quad \pi_2 = 90 \text{ Kg}; \pi_3 = 200 \text{ Kg} \\ \lambda_{6,0} = 1; \lambda_{6,1} = 0; \lambda_{7,0} = 0; \lambda_{7,1} = 1 & \quad \pi_4 = 300 \text{ Kg}; \pi_5 = 130 \text{ Kg} \\ \lambda_{8,0} = 0; \lambda_{8,1} = 1; & \quad \pi_6 = 200 \text{ Kg}; \pi_7 = 110 \text{ Kg} \\ & \quad \pi_8 = 300 \text{ Kg} \end{aligned}$$

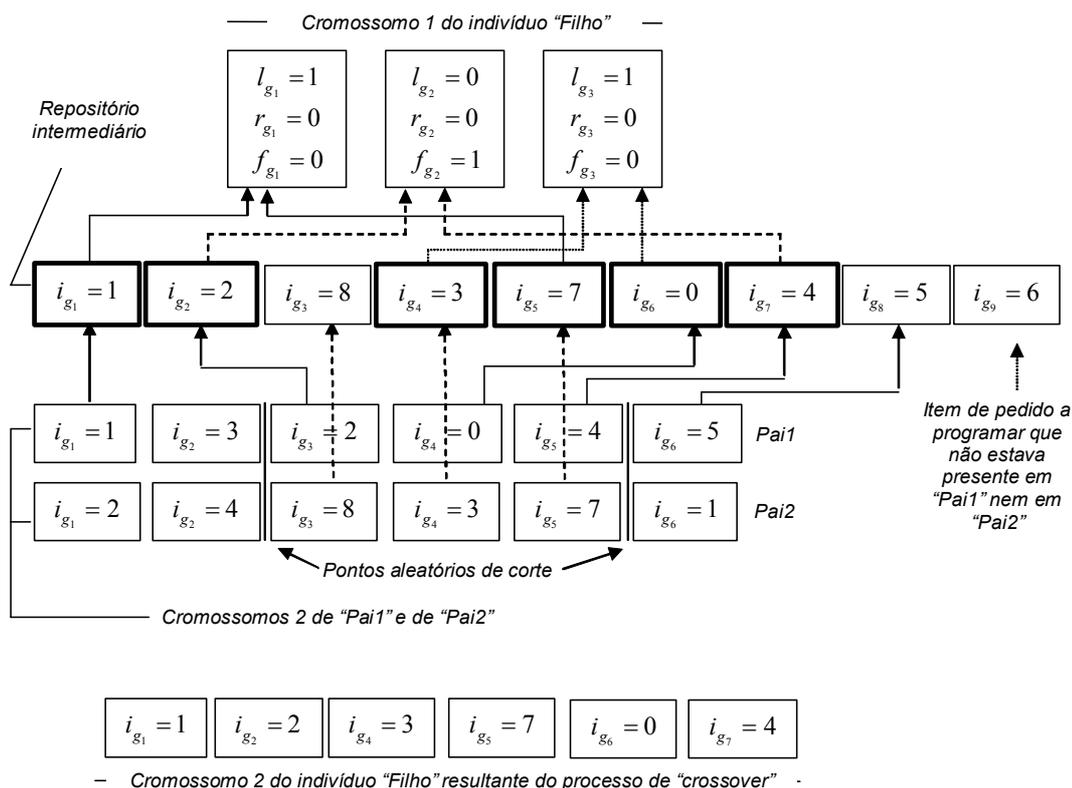


FIGURA 6.8: Esquema de funcionamento do operador genético de “crossover” para o “cromossomo 2”

Perceba que o cromossomo “Filho” resultante poderá ter seu tamanho diferente do tamanho do cromossomo de seus “Pais” originais. É importante notar que esta forma na qual foi construído o “cromossomo 2” já irá garantir que o novo indivíduo seja factível.

O operador genético de “mutação” é mais simples, atuando da mesma forma para os dois tipos de cromossomos. Para isto, dois genes são sorteados e suas posições são trocadas. A única restrição é que, para o “cromossomo 1”, esta troca satisfaça as restrições de ordenamento de fornos e também que a nova seqüência de “genes” resultem, nas posições alteradas, em corridas econômicas. Caso estas restrições não sejam obedecidas a “mutação” não acontece. É importante observar o fato de que a

mutação para o “cromossomo 1” deve ocorrer antes que se aplique o operador genético de “*crossover*” para o “cromossomo 2”, uma vez que este operador depende do “cromossomo 1” para ser realizado. Já para o “cromossomo 2”, o processo de “mutação” acontece no repositório intermediário, antes de “marcar” os “genes” que serão selecionados para o cromossomo “filho”. Desta forma, a posterior marcação dos “genes” que irão fazer parte do cromossomo “filho” já irá ser influenciada por esta “mutação”.

Por fim, é aplicado um procedimento de melhoria local nos cromossomos filhos resultantes dos operadores de “*crossover*” e de “mutação”. Este procedimento de melhoria procura avaliar se ainda é possível inserir novos “genes” no “cromossomo 1”, ou seja, se a nova programação gerada ainda possui recursos produtivos suficientes para novas corridas de forno e, se existem, para isto, itens de pedidos a programar disponíveis. Para isto, todas as possibilidades de corridas de fornos são avaliadas, considerando as restrições de fornos, reatores e de ordenamento de ligas e também os itens de pedidos disponíveis, de acordo com sua ordem, no repositório de “genes” montado para o “*crossover*” do “cromossomo 2”, selecionando os que ainda não tiverem sido marcados pelo operador de “*crossover*”. Este procedimento de melhoria tem por objetivo evoluir a solução apresentada pelo indivíduo “filho” resultante, antes mesmo de inseri-lo na nova população gerada. A seguir o algoritmo que implementa o *AG* híbrido proposto é apresentado.

Considere para este algoritmo os seguintes conjuntos de dados:

- S_I o conjunto de itens de pedidos em aberto;
- S_L o conjunto de ligas de metais que podem ser usadas para fundir os itens de pedidos;
- S_R o conjunto de reatores;
- $S_{R,F}$ o conjunto de fornos de cada reator $r \in S_R$;
- S_{OM} o conjunto de operações do processo produtivo do estágio de moldagem;
- S_{EA} o conjunto de estágios de acabamento;
- $S_{EA,OA}$ o conjunto de operações do processo produtivo de cada estágios de acabamento $ea \in S_{EA}$;
- SQ_{Ger} o conjunto de indivíduos de uma geração;

- $SG1_Q$ o conjunto de “genes” no “cromossomo 1” de um indivíduo;
- $SG2_Q$ o conjunto de “genes” no “cromossomo 2” de um indivíduo; e,
- S_{GR} o conjunto de “genes” no repositório.

Considere também os seguintes dados como segue:

- ω_r é o número máximo de corridas possíveis para o reator $r \in S_R$ no horizonte de tempo considerado;
- π_i é o peso do item de pedido $i \in S_I$;
- ρ_i é o valor do item de pedido $i \in S_I$;
- $\lambda_{i,l}$ será $\begin{cases} 1 \text{ se o item } i \in S_I \text{ usar a liga } l \in S_L ; \\ 0 \text{ caso contrário} \end{cases}$;
- $\omega_{r,f}$ é o número máximo de corridas no reator $r \in S_R$ que o forno $f \in S_{r,F}$ pode fazer em um ciclo;
- $\varphi_{r,f}$ é a capacidade, considerando o reator $r \in S_R$, que o forno $f \in S_{r,F}$ possui;
- $\kappa_{r,f}$ é o custo, considerando o reator $r \in S_R$, de uma corrida do forno $f \in S_{r,F}$;
- $\xi_{r,f}$ é o valor, considerando o reator $r \in S_R$, da economia conseguida caso o forno $f \in S_{r,F}$ realize duas corridas em seguida de ligas que agilizam o processo de fundição.
- $\eta_{m,n}$ será $\begin{cases} 1 \text{ se, em um forno, é possível fundir a liga } m \in S_L \text{ após ter fundido a liga } n \in S_L ; \\ 0 \text{ caso contrário} \end{cases}$;
- $\gamma_{m,n}$ será $\begin{cases} 1 \text{ se, em um forno, for econômico fundir a liga } m \in S_L \text{ após ter fundido a liga } n \in S_L ; \\ 0 \text{ caso contrário} \end{cases}$;
- $\varepsilon_{l,r,f}$ será $\begin{cases} 1 \text{ se a liga } l \in S_L \text{ foi a última usada pelo forno } f \in S_{r,F} \text{ do reator } r \in S_R \text{ no ciclo anterior ;} \\ 0 \text{ caso contrário} \end{cases}$;
- ψ_{om} é a capacidade máxima da operação $om \in S_{OM}$ do estágio de moldagem;
- $\tau_{ea,oa}$ é a capacidade máxima da operação $oa \in S_{OA}$ do estágio de acabamento $ea \in S_{EA}$;
- δ_{om} é a capacidade cambiável máxima da operação $om \in S_{OM}$ do estágio de moldagem;

- $\mu_{ea,oa}$ é a capacidade cambiável máxima da operação $oa \in S_{OA}$ do estágio de acabamento $ea \in S_{EA}$;
- Ω_{om} é a soma, em um ciclo, da capacidade máxima disponível e da capacidade cambiável disponível da operação $om \in S_{OM}$ do estágio de moldagem;
- $\Phi_{ea,oa}$ é a soma, em um ciclo, da capacidade máxima disponível e da capacidade cambiável disponível da operação $oa \in S_{OA}$ do estágio de acabamento $ea \in S_{EA}$;
- $\alpha_{i,om}$ é o consumo total pelo item $i \in S_I$ da operação de índice $om \in S_{OM}$ do estágio de moldagem;
- $\beta_{i,ea,oa}$ é o consumo total pelo item $i \in S_I$ da operação de índice $oa \in S_{OA}$ do estágio de acabamento $ea \in S_{EA}$;
- $NGer$ é o número de gerações de indivíduos q que serão criadas;
- NP é o número de indivíduos q de uma geração;
- $txcross$ é a taxa de crossover;
- $txmut$ é a taxa de mutação;
- $g1_y$ é um “gene” y do “cromossomo 1”;
- $g2_w$ é um “gene” w do “cromossomo 2”;
- $\rho g1_y$ é o valor de um “gene” y do “cromossomo 1”;
- ρq_{q_x} é o valor de um indivíduo;
- ρnq_{q_x} é o valor normalizado de um indivíduo¹⁶;
- $glant_{y,r,f}$ é o “gene” anterior ao “gene” y que usa o reator r e o forno f . Caso não exista um “gene” anterior ao “gene” y com estas características, então $glant_{y,r,f} = -1$; e,

¹⁶ O valor normalizado tem por objetivo diminuir as discrepâncias que podem vir a ocorrer quando o melhor indivíduo possuir um valor muito superior aos piores indivíduos, de forma que os piores indivíduos praticamente não seriam escolhidos para reprodução, diminuindo assim a diversidade. Uma descrição de formas para se calcular este valor normalizado poderá ser encontrada em GOLDBERG (1989). Este trabalho, baseado em GOLDBERG (1989), aplicou a seguinte fórmula para este cálculo:

$$\rho nq_{q_x} = \frac{(\text{Pressão} - 1) \cdot \rho q_{\text{médio}}}{\rho q_{\text{maior}} - \rho q_{\text{médio}}} \cdot \rho q_x + \frac{\rho q_{\text{médio}} \cdot (\rho q_{\text{maior}} - \text{Pressão} \cdot \rho q_{\text{médio}})}{\rho q_{\text{maior}} - \rho q_{\text{médio}}}$$

Onde a pressão se refere à “pressão” para que os melhores indivíduos sejam escolhidos. Para os testes realizados foi usado “pressão=5”

- $g1pos_{y,r,f}$ é o “gene” posterior ao “gene” y que usa o reator r e o forno f . Caso não exista um “gene” posterior ao “gene” y com estas características, então $g1pos_{y,r,f} = -1$.

Considere ainda \bar{i}_{g_i} o índice do item de pedido do “gene” g_i do conjunto de “genes” S_{GR} , \bar{i}_{g2_w} o índice do item de pedido do “gene” $g2_w$ do conjunto de “genes” $SG2_Q$, \bar{l}_{g1_y} a liga metálica, \bar{r}_{g1_y} o reator e \bar{f}_{g1_y} o forno do “gene” $g1_y$ do conjunto de “genes” $SG1_Q$. Considere, por fim, $\bar{\psi}_{om}, \bar{\tau}_{ea,oa}$ analogias, para fins de cálculos, aos dados $\psi_{om}, \tau_{ea,oa}$, respectivamente.

1. **Inicialize** $S_I; S_L; S_R; S_{R,F}; S_{OM}; S_{EA}; S_{EA,OA}; \omega_r \forall r \in S_R;$
 $\omega_{r,f} \forall r \in S_R, \forall f \in S_{R,F}; \pi_i, \nu_i \forall i \in S_I; \lambda_{i,l} \forall i \in S_I, \forall l \in S_L; \eta_{m,n} \forall m, n \in S_L;$
 $\gamma_{m,n} \forall m, n \in S_L; \varepsilon_{l,r,f} \forall l \in S_L, \forall r \in S_R, \forall f \in S_F; \kappa_{r,f} \forall r \in S_R, \forall f \in S_F;$
 $\xi_{r,f} \forall r \in S_R, \forall f \in S_F; \psi_{om}, \delta_{om} \forall om \in S_{OM}; \tau_{ea,oa}, \mu_{ea,oa} \forall ea \in S_{EA}, \forall oa \in S_{OA};$
 $\alpha_{i,om} \forall i \in S_I, \forall om \in S_{om}; \beta_{i,ea,oa} \forall i \in S_I, \forall ea \in S_{EA}, \forall oa \in S_{OA}; NGer; NP; txcross;$
 $txmut;$
2. **Faça:** $Ger = 1; SQ_{Ger} = \emptyset; x = 0;$
3. **Enquanto** $x < NP$ **faça:**
 - 2.1. $x = x + 1;$
 - 2.2. **CriarIndivíduo** $(x);$
 - 2.3. **Adicionar** q_x em $SQ_{Ger};$
4. **Faça:** $Ger = Ger + 1; SQ_{Ger} = \emptyset; x = 0;$
5. **Para Contador = 1 até NP/2 faça:**
 - 5.1. **Escolha** 2 indivíduos $Pai1$ e $Pai2 \in SQ_{Ger-1}$ (de forma randômica) tal que a probabilidade de escolha destes indivíduos seja proporcional ao valor normalizado destes indivíduos
 - 5.2. **Se** $rand(1)^{17} \leq txcross$

Então

¹⁷ Um número randômico entre 0 e 1

$x = x + 1;$

CrossoverCromossomo1 ($x, Pai1, Pai2$);

Se $rand(1) \leq txmut$

MutaçãoCromossomo1 (x);

CrossoverEMutaçãoCromossomo2 ($x, Pai1, Pai2$);

Inclua q_x em SQ_{Ger}

$x = x + 1;$

CrossoverCromossomo1 ($x, Pai2, Pai1$);

Se $rand(1) \leq txmut$

MutaçãoCromossomo1 (x);

CrossoverEMutaçãoCromossomo2 ($x, Pai2, Pai1$);

Inclua q_x em SQ_{Ger} ;

Senão

Inclua $Pai1$ e $Pai2$ em SQ_{Ger} ;

5.3. **Faça: InserirMaisGenes** (x);

6. **Se** o indivíduo q_j em SQ_{Ger} de maior valor ρq_{q_j} tenha o valor menor que o indivíduo q_z em SQ_{Ger-1} de maior valor ρq_{q_z} **então:**

Insira o indivíduo $q_z \in SQ_{Ger-1}$ no lugar do indivíduo $q_u \in SQ_{Ger}$ de menor valor

ρq_{q_u} ;

7. **Se** $Ger < NGer$

Então: Retorne ao passo 4;

Senão: Termine;

Procedimento CriarIndivíduo (x);

1. **Faça:** $y = 1$; Faça $\rho q_{q_x} = 0$; Faça $SG1_{q_x} = \emptyset$; $SG2_{q_x} = \emptyset$;
2. **Escolha** (de forma randômica) uma liga $l \in S_L$, um reator $r \in S_R$, um forno $f \in S_{r,F}$;
3. **Se CriarGeneCromossomo1** ($x; y; l; r; f$) = verdadeiro

Então

Faça: $y = y + 1$;

Retorne ao passo 2;

Senão

Se todos as possíveis combinações de ligas $l \in S_L$, reatores $r \in S_R$ e fornos $f \in S_{r,F}$ já tiverem sido testados

Então: *Vá para o passo 4;*

Senão: *Retorne ao passo 2;*

4. **Faça** $S_{GR} = \emptyset$; $u = 0$;

5. **Repita**

7.1. **Escolha** (de forma randômica) um item de pedido $i \in S_I \setminus i \neq \bar{i}_{g_{i_u}} \forall g_{i_u} \in S_{GR}$;

7.2. **Faça** $u = u + 1$; $\bar{i}_{g_{i_u}} = i$; e Inclua g_{i_u} em S_{GR}

Enquanto todos os itens de pedidos $i \in S_I$ não tiverem sido escolhidos;

6. **CriarCromossomo2** (x);

7. **Faça** $\rho n q_{d_x} = \text{valor normalizado de } \rho q_{q_x}$

Função CriarGeneCromossomo1 ($x; y; l; r; f$);

1. **Se** $\bar{i}_{g^{1ant}_{y,r,f}} = -1$

Então:

Se $\varepsilon_{l,r,f} = 1$

Então: *Vá para o passo 2;*

Senão: *Termine e retorne Falso;*

Senão:

Se ($\eta_{l, \bar{i}_{g^{1ant}_{y,r,f}}} = 1$ e $\eta_{\bar{i}_{g^{1pos}_{y,r,f}}, l} = 1$) **então:**

Então: *Vá para o passo 2;*

Senão: *Termine e retorne Falso;*

2. **Se** ($\gamma_{l, \bar{i}_{g^{1ant}_{y,r,f}}} = 1$ e $\gamma_{\bar{i}_{g^{1pos}_{y,r,f}}, l} = 1$)

Então:

Se $\sum_{g1_z \in SG1_{q_x}} (se \bar{r}_{g1_z} = r \text{ então } 1) < \omega r$ **e** $\sum_{g1_z \in SG1_{q_x}} (se (\bar{r}_{g1_z} = r \text{ e } \bar{f}_{g1_z} = f) \text{ então } 1) < \omega f_{r,f}$ **Então:**

Faça: $\bar{r}_{g1_y} = r$; $\bar{f}_{g1_y} = f$; $\bar{l}_{g1_y} = l$; e inclua $g1_y$ em $SG1_{q_x}$;

Termine e retorne Verdadeiro;

Senão:

Termine e retorne Falso;

Senão:

Termine e retorne Falso;

Procedimento CriarCromossomo2 (x);

1. **Faça:** $\Omega_{om} = \psi_{om} + \delta_{om} \quad \forall om \in S_{OM}$; $\Phi_{ea,oa} = \tau_{ea,oa} + \mu_{ea,oa} \quad \forall ea \in S_{EA}, \forall oa \in S_{OA}$;

$\bar{\psi}_{om} = \psi_{om} \quad \forall om \in S_{OM}$; $\bar{\tau}_{ea,oa} = \tau_{ea,oa} \quad \forall ea \in S_{EA}, \forall oa \in S_{OA}$;

2. **Faça:** $w = 0$;

3. **Para todo** $g1_y \in SG1_{q_x}$ **faça:**

3.1. $\rho g1_y = \left(Se \gamma_{\bar{l}_{g1_y}, \bar{j}_{g1_y}, r, f} = 1 \text{ então } \xi_{\bar{r}_{g1_y}, \bar{j}_{g1_y}} \right) - \kappa_{\bar{r}_{g1_y}, \bar{j}_{g1_y}}$;

3.2. **Faça** $\bar{\pi} = 0$;

3.3. **Para todo** $gi_u \in S_{GR}$ **faça:**

Se $t_{gi_u} \neq 1$ **então:**¹⁸

Se $\lambda_{\bar{i}_{gi_u}, l} = 1$ **então:**

Se $\pi_{\bar{i}_{gi_u}} + \bar{\pi} \leq \varphi_{\bar{f}_{g1_y}, \bar{r}_{g1_y}}$ **e** $\alpha_{\bar{i}_{gi_u}, om} \leq \Omega_{om} \quad \forall om \in S_{OM}$ **e**

$\beta_{\bar{i}_{gi_u}, ea, oa} \leq \Phi_{ea, oa} \quad \forall ea \in S_{EA}, \forall oa \in S_{OA}$ **e** $\alpha_{\bar{i}_{gi_u}, om} \leq \sum_{om=1}^{OM} Se \delta_{om} > 0 \text{ então } \bar{\psi}_{om} \quad \forall om \in S_{OM}$ **e**

$\beta_{\bar{i}_{gi_u}, ea, oa} \leq \sum_{oa=1}^{OA} Se \mu_{ea, oa} > 0 \text{ então } \bar{\tau}_{ea, oa} \quad \forall ea \in S_{EA}, \forall oa \in S_{OA}$ **Então:**

v. **Faça:** $w = w + 1$; $t_{gi_u} = 1$; $\bar{i}_{g2_w} = \bar{i}_{gi_u}$; e inclua $g2_w$ em $SG2_{q_x}$;

vi. **Faça:** $\rho g1_y = \rho g1_y + \rho_{\bar{i}_{gi_u}}$; $\bar{\pi} = \bar{\pi} + \pi_{\bar{i}_{gi_u}}$;

vii. **Faça:**

$\Omega_{om} = \Omega_{om} - \alpha_{\bar{i}_{gi_u}, om} \quad \forall om \in S_{OM}$; $\Phi_{ea, oa} = \Phi_{ea, oa} - \beta_{\bar{i}_{gi_u}, ea, oa} \quad \forall ea \in S_{EA}, \forall oa \in S_{OA}$;

¹⁸ Testa para saber se o “gene” está marcado

viii. **Para todo** $om \in S_{OM}$ **faça:**

Se $\Omega_{om} > \delta_{om}$

Então:

$$\bar{\psi}_{om} = \Omega_{om} - \delta_{om};$$

Senão:

$$\bar{\psi}_{om} = 0;$$

ix. **Para todo** $ea \in S_{EA}$ **faça:**

Para todo $oa \in S_{OA}$ **faça:**

Se $\Phi_{ea,oa} > \mu_{ea,oa}$

Então:

$$\bar{\tau}_{ea,oa} = \Phi_{ea,oa} - \mu_{ea,oa};$$

Senão:

$$\bar{\tau}_{ea,oa} = 0;$$

3.4. **Faça:** $\rho q_{q_x} = \rho q_{q_x} + \rho g_{1_y};$

Procedimento CrossoverCromossomo1 ($x, Pai1, Pai2$);

1. **Escolha** (de forma randômica) dois “genes” $gs1$ e $gs2$ em

$SG1_{Pai1} \setminus locus(gs1) < locus(gs2)$ e $locus(gs2) \leq tamanho\ cromossomo\ 1\ de\ Pai2$;

2. **Faça:** $SG1_{q_x} = SG1_{Pai1}; j = 0$;

3. **Retire** $g1_{locus(gs1)+j}$ de $SG1_{q_x}$;

4. **Se CriarGeneCromossomo1**

$(x; locus(gs1) + j; \bar{l}_{g1_{locus(gs1)+j} \in SG1_{Pai2}}; \bar{r}_{g1_{locus(gs1)+j} \in SG1_{Pai2}}; \bar{f}_{g1_{locus(gs1)+j} \in SG1_{Pai2}}) = verdadeiro$

Então:

Se $locus(gs1) + j < locus(gs2)$

Então:

Faça $j = j + 1$; **Retorne ao passo 3**;

Senão:

Termine;

Senão: Inclua $g^1_{locus(gs1)+j} \in SG1_{Pai1}$ em $SG1_{q_x}$; **Termine**;

Procedimento CrossoverEMutaçãoCromossomo2 ($x, Pai1, Pai2$);

1. **Escolha** (de forma randômica) dois “genes” $gs1$ e $gs2$ em
 $SG2_{Pai1} \setminus locus(gs1) < locus(gs2)$ e $locus(gs2) \leq tamanho\ cromossomo\ 2\ de\ Pai2$;
 2. **Faça** $S_{GR} = \emptyset$;
 3. **Inclua:** em S_{GR} (até no máximo $locus(gs1) - 1$ inclusões) os “genes” $g2_z \in SG2_{Pai1}$, de acordo com sua ordem, de forma que para cada $g2_z \in SG2_{Pai1}$ escolhido para inclusão, não exista um “gene”
 $g2_u \in SG1_{Pai2}$ (considerando $SG2_{Pai2}$ da posição $locus(gs1)$ até $locus(gs2)$) tal que $\bar{i}_{g2_z} = \bar{i}_{g2_u}$;
 4. **Inclua:** em S_{GR} os “genes” $\in SG2_{q_{Pai2}}$ da posição $locus(gs1)$ até $locus(gs2)$;
 5. **Inclua:** em S_{GR} os “genes” $\in SG2_{Pai1}$, de acordo com sua ordem, de forma que para cada $g2_z \in SG2_{Pai1}$ escolhido para inclusão, não exista um “gene” $gi_u \in S_{GR}$ tal que
 $\bar{i}_{g2_z} = \bar{i}_{gi_u}$;
 6. **Inclua:** em S_{GR} os “genes” $\in SG2_{Pai2}$, de acordo com sua ordem, de forma que para cada $g2_z \in SG2_{Pai2}$ escolhido para inclusão, não exista um “gene” $gi_u \in S_{GR}$ tal que
 $\bar{i}_{g2_z} = \bar{i}_{gi_u}$;
 7. **Repita**
 - 7.1. **Escolha** (de forma randômica) um item de pedido
 $i \in S_I \setminus i \neq \bar{i}_{gi_u} \forall gi_u \in S_{GR}$;
 - 7.2. **Faça** $\bar{i}_{g^i_{(ultima\ posição\ de\ S_{GR})+1}} = i$; e Inclua $g^i_{(ultima\ posição\ de\ S_{GR})+1}$ em S_{GR}
- Enquanto** todos os itens de pedidos $i \in S_I$ não tiverem um “gene correspondente” em S_{GR} ;
8. **Para cada** $gi_u \in S_{GR}$ **faça** $t_{gi_u} = 0$;
 9. **Se** $rand(1) \leq txmut$
MutaçãoCromossomo2 (x);
 10. **CriarCromossomo2** (x);

Procedimento MutaçãoCromossomo1 (x);

1. **Para** contador = 1 até rand(tamanho $SG1_{q_x}$) **Faça:**

1.1. **Escolha** (de forma randômica) dois “genes” $gs1$ e $gs2$ em

$$SG1_{q_x} \setminus locus(gs1) \neq locus(gs2);$$

1.2. **Faça** $gtemp = g1_{locus(gs1)} \setminus g1_{locus(gs1)} \in SG1_{q_x}$;

1.3. **Retire** $g1_{locus(gs1)}$ de $SG1_{q_x}$;

1.4. **Se CriarGeneCromossomo1** ($x; locus(gs1); \bar{l}_{g1_{locus(gs2)}}; \bar{r}_{g1_{locus(gs2)}}; \bar{f}_{g1_{locus(gs2)}})$) = verdadeiro

Então:

Retire $g1_{locus(gs2)}$ de $SG1_{q_x}$;

Se CriarGeneCromossomo1 ($x; locus(gs2); \bar{l}_{g1_{locus(gs1)}}; \bar{r}_{g1_{locus(gs1)}}; \bar{f}_{g1_{locus(gs1)}})$) = falso

Então:

Faça $g1_{locus(gs2)} = g1_{locus(gs1)}; g1_{locus(gs1)} = gtemp;$

Senão:

Faça $g1_{locus(gs1)} = gtemp;$

Procedimento MutaçãoCromossomo2 (x);

1. **Para** contador = 1 até rand(tamanho $SG2_{q_x}$) **Faça:**

1.1. **Escolha** (de forma randômica) dois “genes” $gs1$ e $gs2$ em

$$S_{GR} \setminus locus(gs1) \neq locus(gs2);$$

1.2. **Faça** $gtemp = gi_{locus(gs1)} \setminus gi_{locus(gs1)} \in S_{GR}$;

1.3. **Faça** $gi_{locus(gs1)} = gi_{locus(gs2)}; gi_{locus(gs2)} = gtemp;$

Procedimento InserirMaisGenes (x, y);

1. **Para cada** possibilidade de combinação de uma liga $l \in S_L$, um reator $r \in S_R$, e um forno $f \in S_{r,F}$ **faça:**

1.1. **Se CriarGeneCromossomo1** ($x; y+1; l; r; f$) = verdadeiro

Então

$$temp\rho g_{l,r,f} = \rho g_{y+1};$$

Retire o “gene” $g1_{y+1}$ de $SG1_{q_x}$; e retire todo $g2_z \in SG2_{q_x}$ que esteja relacionado com $g1_{y+1}$; e para cada $g_{i_u} \in S_{GR}$ que esteja relacionado com $g1_{y+1}$ faça $t_{g_{i_u}} = 0$;

Senão

$temp\rho g_{l,r,f} = 0$;

2. Se $temp\rho g_{l,r,f} \neq \emptyset$

Então

Escolha $temp\rho g_{l,r,f} \neq 0$ de maior valor e armazene a liga $l \in S_L$ correspondente, o reator $r \in S_R$ correspondente, e o forno $f \in S_{r,F}$ correspondente;

Faça: $y = y + 1$; **Faça:** **CriarGeneCromossomo1** ($x; y; l; r; f$)

Retorne ao Passo 1;

Senão

Termine;

6.4 O Sistema De Apoio À Decisão Para Programação Da Produção Em Fundições De Mercado Proposto

Considerando que o ambiente produtivo de uma fundição de mercado possa ser organizado de acordo com o sistema de controle da produção *PBC*, o sistema de apoio à decisão proposto tomará por base os modelos decisórios criados, aplicando convenientemente seus métodos de solução, para disponibilizar ao tomador de decisões, ao término do estágio de acúmulo de pedidos em cada ciclo, o apoio decisório necessário para a elaboração de uma programação da produção viável para o ciclo.

Para isto, os modelos decisórios propostos, assim como seus métodos de solução, foram implementados computacionalmente, transparecendo para o tomador de decisões as complexidades desta implementação e do próprio método de solução, de modo que o mesmo possa, de forma intuitiva, definir quais são os itens a programar no ciclo, definindo para estes itens, com base em sua experiência prévia, seus valores e também suas estimativas de consumo para cada operação produtiva. O tomador de

decisões deverá estimar, também, as capacidades agregadas de cada operação produtiva e o quanto destas capacidades poderá ser cambiado entre as mesmas.

Feito isto, o tomador de decisões deverá escolher entre a aplicação conjunta dos modelos *PLIA* e *PLIRT*, ou o modelo heurístico *HE*, ou o modelo meta-heurístico *AG*, de acordo com a situação decisória em questão, para que possa solucionar o problema decisório por meio da aplicação do método de solução do modelo ou modelos escolhidos.

Por fim, por meio de uma interface conveniente, o resultado da solução deverá ser avaliado para que mudanças nas estimativas iniciais possam ser realizadas e o ciclo de solução repetido, até que a solução gerada seja satisfatória para o tomador de decisões. Este processo pode ser melhor visualizado na *figura 6.9*.

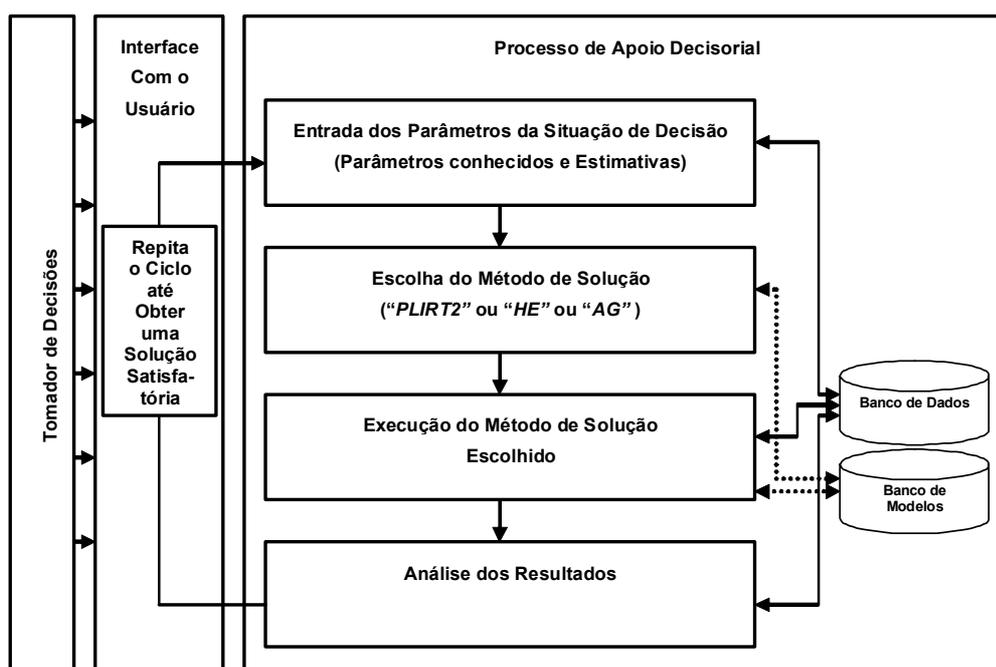


FIGURA 6.9: Sistema de apoio à decisão proposto

É importante ressaltar que a implementação computacional do sistema proposto tomou por base a garantia de um tempo confortável de execução dos métodos de solução para os modelos decisórios, assim como o projeto de interfaces com o usuário simples e intuitivas, visando garantir a devida interatividade com o tomador de decisões, possibilitando que os resultados apresentados possam ser rapidamente avaliados e as devidas análises concluídas e, caso necessário, um novo ciclo decisório

possa ser iniciado. A seguir os principais componentes do SAD implementado são expostos com maiores detalhes.

6.4.1 O componente “interface com o usuário”

A concepção do componente “interface com o usuário” buscou manter um processo “transparente” de interação com o usuário, ou seja, procurou transparecer para o tomador de decisões as complexidades envolvidas com o processo de elaboração de um programa de produção para um ciclo produtivo. Para isto, procurou-se criar poucas interfaces tornando-as mais funcionais e intuitivas.

Para o desenvolvimento das interfaces com o usuário empregou-se a ferramenta de desenvolvimento “Borland Delphi 7.0”, gerando um sistema executável no sistema operacional “Microsoft Windows”. Uma vez iniciado o sistema proposto, sua interface principal é mostrada na *figura 6.10*.

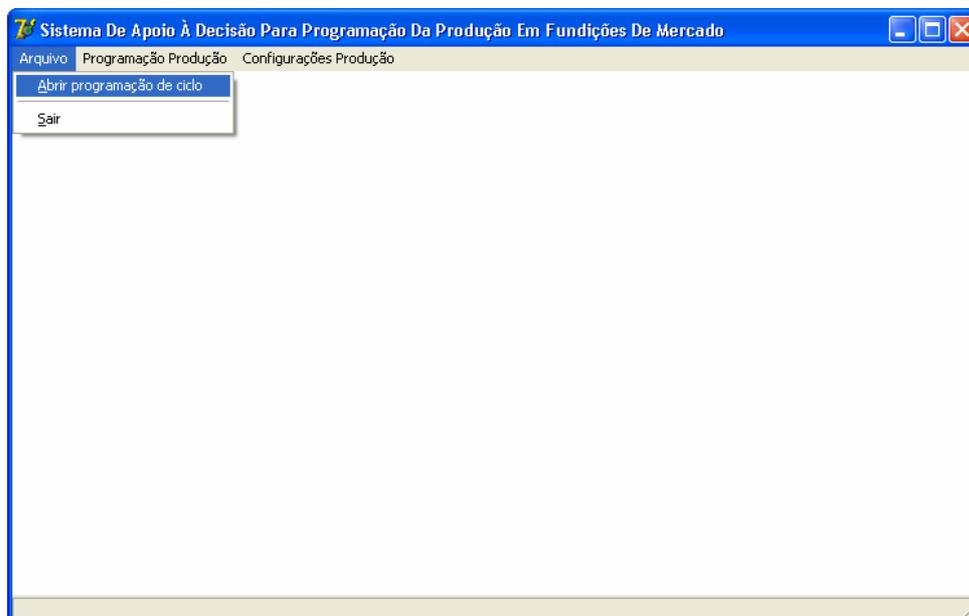


FIGURA 6.10: Interface principal do SAD proposto

Para se visualizar e/ou alterar os dados de configuração do ambiente de produção usa-se as interfaces de configurações de produção, disponíveis no “menu” “Configurações Produção”. Na *figura 6.11* é possível visualizar um exemplo com a interface para os dados dos fornos disponíveis em um ambiente de produção. Perceba que a interface permite “navegar” pelos registros referentes às configurações do

ambiente produtivo, permitindo, também, alterar convenientemente estas informações. Caso sejam realizadas alterações, as mesmas serão salvas no componente “banco de dados” imediatamente ao se “fechar” a interface de configuração.

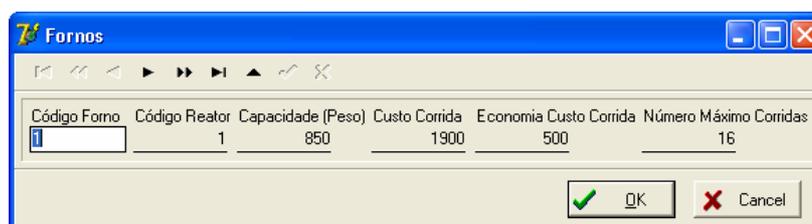


FIGURA A6.11: Exemplo de interface típica de configuração do ambiente produtivo

O processo de elaboração de uma programação da produção é realizado com base no “menu” “Programação Produção”. A estrutura deste “menu” pode ser visualizada na *figura 6.12*.

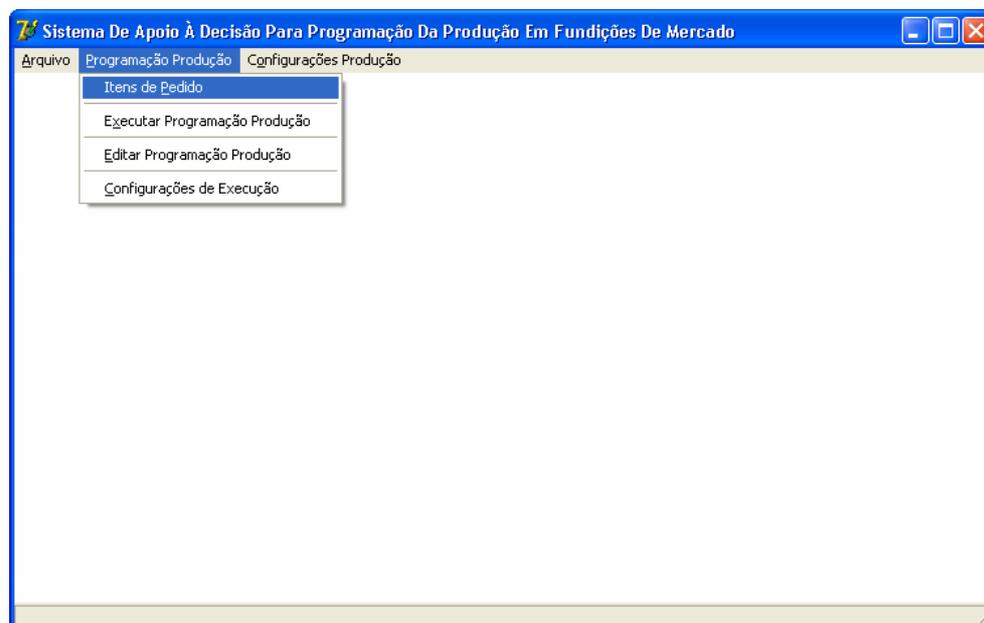


FIGURA 6.12: Estrutura do “menu” “Programação Produção”

A interface “Itens de Pedido” da opção “Itens de Pedido” do “*menu*” “Programação Produção” possui funcionalidades especiais para possibilitar a seleção dos itens de pedidos que irão ser considerados no processo de elaboração da programação da produção, como pode ser visto na *figura 6.13*. Por exemplo, os rótulos das colunas da tabela funcionam como “botões” que permitem ordenar os dados de

acordo com o campo da referida coluna. É possível encontrar também, sob algumas colunas, campos totalizadores visando auxiliar no processo de seleção dos itens de pedido a programar. Os itens de pedido selecionados aparecem “marcados” no rótulo de sua linha respectiva e também toda a linha da tabela fica escurecida. Para “marcar” ou “desmarcar” qualquer item individualmente, clica-se com o “mouse” sobre a linha correspondente ao item, pressionando ao mesmo tempo a tecla “CTRL”, ou, pode-se utilizar também a barra de espaços, também ao mesmo tempo em que se pressiona a tecla “CTRL”. Caso se deseja selecionar todos os itens de pedido pode-se utilizar o botão “Selecionar todos”. Para desmarcar todas as seleções realizadas pode-se utilizar o botão “Limpar seleção”. Por fim, o botão “Modo edição” permite que se realize alterações nas informações dos itens de pedidos.

Cliente	Código Item P...	Data Entrega	Valor	Peso Bruto	Liga Metálica	Corrida
XIVEERL	4966	14/2/2005	1476,22	295,24	CF3M	-1
XIVEERL	4967	27/2/2005	5135,07	641,88	MOLIBDÊNIO	-1
XIVEERL	4968	16/2/2005	4553,31	758,88	WCB	-1
XIVEERL	4969	16/2/2005	10927,23	1092,72	LIGA ANTI OXIDÁVEL	-1
XIVEERL	4970	25/2/2005	1792,04	298,67	WCB	-1
XIVEERL	4971	25/2/2005	7025,48	1756,37	CF8M	-1
XIVEERL	4972	25/2/2005	10175,83	1695,97	WCC	-1
XIVEERL	4973	21/2/2005	2121,55	530,39	CF8M	-1
XIVEERL	4975	19/2/2005	3754,8	536,4	VSGG25	-1
XIVEERL	4976	19/2/2005	2403,47	600,87	CF8	-1
XIVEERL	4977	19/2/2005	1786,1	446,53	CF8	-1
XIVEERL	4978	17/2/2005	969,94	242,48	CF8M	-1
XIVEERL	4979	17/2/2005	8350,45	1391,74	WCC	-1
XIVEERL	4980	20/2/2005	1978,25	329,71	WCB	-1
XIVEERL	4981	20/2/2005	758,51	94,81	COBRE	-1
XIVEERL	4982	20/2/2005	6183,48	1030,58	WCC	-1
XIVEERL	4983	20/2/2005	4903,54	817,26	WCC	-1
XIVEERL	4984	20/2/2005	1751,29	291,88	WCC	-1
XIVEERL	4985	21/2/2005	3637,85	727,57	CF3M	-1
XIVEERL	4986	21/2/2005	7508,39	1072,63	GG25	-1
XIVEERL	4987	22/2/2005	4454,47	890,89	CF3M	-1
XIVEERL	4988	22/2/2005	8346,41	1391,07	WCC	-1
XIVEERL	4989	13/2/2005	8695,37	1739,07	CF3	-1
XIVEERL	4990	13/2/2005	9709,4	1213,68	COBRE	-1
XIVEERL	4991	21/2/2005	13936,29	1990,9	VSGG25	-1
XIVEERL	4992	21/2/2005	6268,39	1567,1	CF8M	-1
XIVEERL	4993	18/2/2005	13835,76	1729,47	MOLIBDÊNIO	-1
			82927,89	12974,1		

FIGURA 6.13: Interface de seleção dos itens de pedidos a programar

A opção “Configurações de Execução” do “menu” “Programação Produção” permite realizar a escolha do modelo decisório a ser usado no processo de elaboração da programação da produção, assim como a definição de seus parâmetros de execução. Já a opção “Executar Programação Produção” ainda do “menu” “Programação Produção” executa o método de solução escolhido de acordo com a parametrização realizada e os itens de pedido selecionados para programar.

Outra importante interface para o processo de elaboração de programação da produção é a interface de “Programação das corridas de fornos”. Esta interface permite consultar e/ou alterar as programações de corridas de fornos geradas pela aplicação do método de solução, permitindo inserir ou excluir itens de pedido às corridas de fornos programadas, possibilitando a devida interatividade com o tomador de decisões. Esta interface está disponível na opção “Editar Programação Produção” do “menu” “Programação Produção”. A *figura 6.14* ilustra esta interface com detalhes.

Cliente	Código Item Pedido	Data Entrega	Valor	Peso Bruto	Liga Metálica	Corrida
XIVEERL	4992	21/2/2005		783,55	195,89 CF8M	16
XIVEERL	4971	25/2/2005		878,19	219,55 CF8M	16
DJKNOES	5094	26/2/2005		890,47	222,62 CF8M	16
HWSACMF	5082	15/2/2005		63,18	15,8 CF8M	16
AQMCLTT	5066	19/2/2005		758,68	189,67 CF8M	16

FIGURA A6.14: Interface de análise e alteração das corridas de fornos programadas

Nesta interface, o “botão” “Consumo operações” permite visualizar o consumo das operações produtivas pelos itens de pedidos programados em todas as corridas como pode ser visto na *figura 6.15*

Código	Descrição	Capacidade Total	Capacidade Cambiável	Capacidade Consumida	Capacidade Cambiável Consumida
1	Projeto Fundição	600	300	547,2	0
2	Moldagem	2200	1100	1960,85	0
3	Macharia	1200	600	655,52	0
4	Fechamento	1200	600	1200	50,07
5	Desmoldagem	350	175	350	124,87
6	Corte	1200	600	1200	127,9
7	Rebarba	1200	600	1200	131,71
8	Lixamento Grosso	1200	600	1057,45	0
9	Lixamento Fino	1200	600	1200	48,37
10	Tratamento Térmico	1200	0	1194,87	0
11	Tratamento Físico	600	0	553,49	0
12	Controle de Qualidade	350	175	141,71	0
13	Controle de Qualidade 2	350	175	297,54	0
14	Controle de Qualidade 3	350	175	350	0,39

13200 5700 11908,63 483,31

Ok Cancelar

FIGURA 6.15: Interface de consulta do consumo das capacidades das operações produtivas

As alterações nas corridas de fornos programadas, por meio da inserção e/ou exclusão de itens de pedidos não programados, podem ser realizadas usando o “mouse” em conjunto com a tecla “CTRL” pressionada, selecionando os itens de pedidos nas corridas de fornos que se deseja excluir, como na *figura 6.16*. Uma vez selecionados, os itens de pedido poderão ser excluídos da referida corrida usando o botão “Excluir itens”.

Programação das Corridas de Fornos

Corridas programadas

Corrida: Código do Forno:
 Liga da Corrida: Capacidade do Forno:

Itens de Pedidos Programados na Corrida

Cliente	Código Item Pedido	Data Entrega	Valor	Peso Bruto	Liga Metálica	Corrida
XIVEERL	4992	21/2/2005	783,55	196,89	CF8M	16
XIVEERL	4971	25/2/2005	878,19	219,55	CF8M	16
DJKNOES	5034	26/2/2005	890,47	222,62	CF8M	16
HWSACMF	5082	15/2/2005	63,18	15,8	CF8M	16
AQMCLTT	5066	19/2/2005	758,68	189,67	CF8M	16

3374,07 843,53

Consumo Operações Inserir Itens Excluir Itens Terminar

FIGURA 6.16: Excluindo itens de pedido de uma corrida de forno programada

Já para inserir outros itens de pedidos a uma corrida programada, usa-se o “botão” “Inserir itens”, abrindo-se a interface de “Itens de pedido”, permitindo-se escolher entre os itens de pedidos que ainda não foram programados da mesma liga metálica que a corrida de forno referida.

Estas são as principais interfaces do SAD proposto. No *Apêndice A6* é possível ter uma visão melhor destas interfaces tomando por base a simulação da aplicação do SAD proposto em um exemplo de um ambiente produtivo, permitindo entender a dinâmica de uso e interação do sistema implementado.

6.4.2 O componente “banco de dados”

O componente “banco de dados” do SAD proposto é alimentado principalmente pelo sistema de informação da empresa, quando a mesma possui um, ou manualmente pelo tomador de decisões, quando não se pode contar com um sistema de informação. Desta forma, visando maior amplitude e flexibilidade de aplicação, considerando as possibilidades tecnológicas das empresas usuárias, empregou-se uma tecnologia simples, mas flexível, para definir o componente “banco de dados”, na forma de um único arquivo texto. Desta forma, pode-se garantir um mínimo comum, em termos de tecnologia de banco de dados entre as futuras indústrias usuárias do sistema,

sem perder em termos de performance, uma vez que o volume de dados de uma aplicação característica não compromete o uso desta tecnologia. A seguir, na *figura 6.17*, o esquema do arquivo texto usado no componente “banco de dados” é detalhado.

```

*****Reatores*****
Código do reator;Descrição do reator;Número máximo de corridas possíveis no
período;
*****Fornos*****
Código do forno;Código do reator;Capacidade forno;Custo corrida;Economia no custo
corrida;Número máximo de corridas possíveis no período;
*****Ligas*****
Código da liga metálica;Descrição da liga metálica;
*****LigasEconomicas*****
Código da liga metálica;Código da liga metálica econômica para a corrida de forno
anterior;
*****LigasInviaveis*****
Código da liga metálica;Código da liga metálica inviável para a corrida de forno
anterior;
*****Operacoes*****
Código da operação;Descrição operação;Capacidade total no período;Capacidade
cambiável no período;Capacidade total programada;Capacidade total cambiável
programada;
*****ItensPedido*****
Código seqüencial único do item de pedido;Identificador de seleção para participar do
processo de programação da produção;Código da corrida de forno;Descrição do
cliente;Código do cliente;Código do pedido;Código do item de pedido;Código da liga
metálica;Descrição da liga metálica;Data de entrega;Peso bruto total;Valor
total;Consumo das operações produtivas na ordem em que as operações foram
definidas na seção Operações usando o operador “ | “ para separá-los;
*****CorridasProgramadas*****
Código da corrida;Código do forno;Capacidade do forno;Código da liga
metálica;Descrição da liga metálica;

```

FIGURA 6.17: Esquema do arquivo texto do componente “banco de dados”

Perceba que cada informação, em cada seção, é separada pelo delimitador “;”. Para separar cada seção do arquivo de dados, usa-se palavras-chaves que descrevem a referida seção, por exemplo, a seção de dados sobre os itens de pedido se inicia com a palavra-chave “*****ItensPedido*****” e termina imediatamente antes do delimitador da próxima seção, quando existe, caso contrário, termina no final do arquivo texto.

Por fim, os resultados do processo de elaboração da programação da produção são gravados no próprio arquivo texto ficando disponíveis para uso no sistema de informação da empresa ou no próprio SAD implementado. Para melhor

entendimento da forma de criação do componente “banco de dados” no *Apêndice A6* é possível visualizar este arquivo com base na simulação de um exemplo de um ambiente produtivo.

6.4.3 O componente “tomador de decisões”

O tomador de decisões para o SAD proposto dependerá da empresa usuária. Não é objetivo principal deste trabalho realizar um estudo e caracterização do possível tomador de decisões do sistema proposto, apesar disto, uma tentativa inicial de caracterização deste usuário é importante no sentido de buscar maior viabilidade de aplicação na implementação do sistema proposto. Desta forma, com base em uma pesquisa realizada em oito fundições de mercado representativas do interior de São Paulo, pôde-se realizar algumas conclusões iniciais sobre este usuário.

Primeiramente, quanto ao nível de escolaridade, pôde-se perceber que este tomador de decisões poderá possuir desde o nível básico de formação até mesmo o nível superior. Em sua maioria, a análise realizada apontou que estes tomadores de decisões são pessoas com grande experiência no ambiente produtivo das fundições que trabalham e capazes de informar os dados estimados e subjetivos necessários para lidar com o SAD proposto, entretanto, no geral, possuem menor familiaridade com a tecnologia da informação. Buscando atender a estes requisitos, procurou-se implementar uma interface com o usuário simples e intuitiva, de forma que não causasse grande impacto na forma de trabalho destes profissionais. Maiores detalhes sobre a pesquisa realizada nas fundições de mercado representativas do interior de São Paulo poderão ser encontrados no capítulo 8.

No próximo capítulo serão avaliados os resultados apresentados pelos métodos de solução dos modelos propostos, quanto à eficiência dos métodos e tempos de solução para vários casos característicos da prática de elaboração da programação da produção em fundições de mercado.

6.5 Conclusão

Tomando por base o ambiente produtivo encontrado nas fundições de mercado e o sistema de controle da produção *PBC*, foi possível propor modelos para apoio decisório para o processo de elaboração da programação da produção que fossem

abrangentes e aplicáveis à realidade deste setor industrial. A proposta de vários modelos decisórios teve por objetivo proporcionar alternativas para situações decisórias diferentes além de proporcionar comparações entre técnicas distintas e aumentar a possibilidade de se disponibilizar soluções viáveis.

Procurou-se, também, apresentar métodos de solução para os modelos propostos visando principalmente sua aplicabilidade operacional, mantendo em mente os requisitos, principalmente em termos de tempo de solução e eficiência, necessários para apoio às decisões operacionais na elaboração da programação da produção em fundições de mercado.

Quanto à implementação do sistema proposto, buscou-se usar uma tecnologia comum e acessível a estas indústrias, buscando aumentar a aplicabilidade na realidade deste setor industrial, permanecendo o mais simples possível e diminuindo o impacto causado com o início do uso do sistema.

Por fim, a proposta do sistema para programação da produção como um sistema de apoio à decisão, garantindo a interação com o usuário, o uso de modelos aplicáveis e interfaces intuitivas, e transparecendo para o tomador de decisões as complexidades envolvidas, poderá criar os aspectos chaves para a garantia da flexibilidade e aplicabilidade necessárias para se atingir o objetivo principal deste trabalho.

7 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

7.1 Introdução

A aplicação prática do sistema de apoio à decisão proposto para a elaboração da programação da produção em fundições de mercado deverá ser realizada à luz de testes e avaliações prévias. Este capítulo tem justamente este objetivo. Para isto, foram empregados vários casos experimentais que visam refletir com fidelidade situações produtivas reais deste setor industrial.

Os resultados obtidos permitem avaliar a aplicação dos modelos propostos sob a forma de um sistema de apoio à decisão, considerando o sistema de controle da produção *PBC* e o ambiente produtivo real das fundições de mercado, por meio da avaliação da performance obtida pelos métodos de solução destes modelos frente aos casos experimentais tratados.

7.2 Os Casos Experimentais Analisados

Os casos analisados foram gerados experimentalmente, tomando por base, principalmente, situações de produção da indústria utilizada como referência no estudo de caso deste trabalho e também situações de produção possíveis de se encontrar em outros ambientes produtivos deste setor industrial, cuidando, para isto, de se considerar as principais características que influenciam a elaboração da programação da produção de uma indústria deste tipo. Com isto, busca-se garantir a similaridade com a realidade das situações produtivas deste ambiente e a generalização para outros ambientes produtivos reais de fundições de mercado, além de garantir também a replicação dos resultados obtidos por este trabalho, uma vez que os casos foram gerados experimentalmente.

No “*Apêndice A2*” encontra-se em detalhes o ambiente produtivo hipotético tomado como referência para gerar os casos experimentais. Com base neste ambiente produtivo foram gerados 8 cenários diferentes possíveis de acontecer em uma fundição de mercado característica. Cada um destes 8 cenários procura avaliar situações específicas de um ambiente produtivo real como, por exemplo:

- Níveis diferentes de consumo das capacidades das corridas de fornos;
- Níveis diferentes de consumo das capacidades das operações produtivas;
- Níveis diferentes de complexidade dos itens de pedidos encomendados; e,
- Níveis diferentes de distribuição dos itens de pedidos pelas ligas metálicas disponíveis.

Para cada cenário experimental foram gerados quatro casos experimentais onde, a diferença entre cada caso, para cada cenário, reside principalmente no número de itens de pedidos diferentes a programar¹⁹, totalizando então 32 casos experimentais para análise. A descrição detalhada de cada um destes casos experimentais encontra-se também no “Apêndice A2”. Na *tabela 7.1* pode-se avaliar um resumo das características principais dos 8 cenários experimentais de análise.

TABELA 7.1: Resumo das características principais dos cenários experimentais

Cenário Experimental	Consumo Cap. Corrid. fornos	Consumo Cap. Operações	Complexidade itens Pedido	Concentração Ligas-Metálicas
BMMM	Baixo	Médio	Médio	Médio
MMMA	Médio	Médio	Médio	Alto
AAMA	Alto	Alto	Médio	Alto
AAMM	Alto	Alto	Médio	Médio
BBBB	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo
MBBA	Médio	Baixo	Baixo	Alto
MAAB	Médio	Alto	Alto	Baixo
BMAA	Baixo	Médio	Alto	Alto

Na *figura 7.1* é possível avaliar o número de itens de pedidos diferentes considerados em cada caso experimental para cada cenário de análise.

¹⁹ Para cada cenário experimental foram gerados quatro ciclos produtivos, onde a diferença entre cada ciclo é o período de acúmulo de pedidos, de forma que, para cada cenário, por exemplo, o caso 2 considerará um período de acúmulo de pedidos 2 vezes maior que o caso 1, enquanto o caso 3 terá um período de acúmulo de pedidos 3 vezes maior que o caso 1, usando o mesmo raciocínio também para o caso 4 e 1

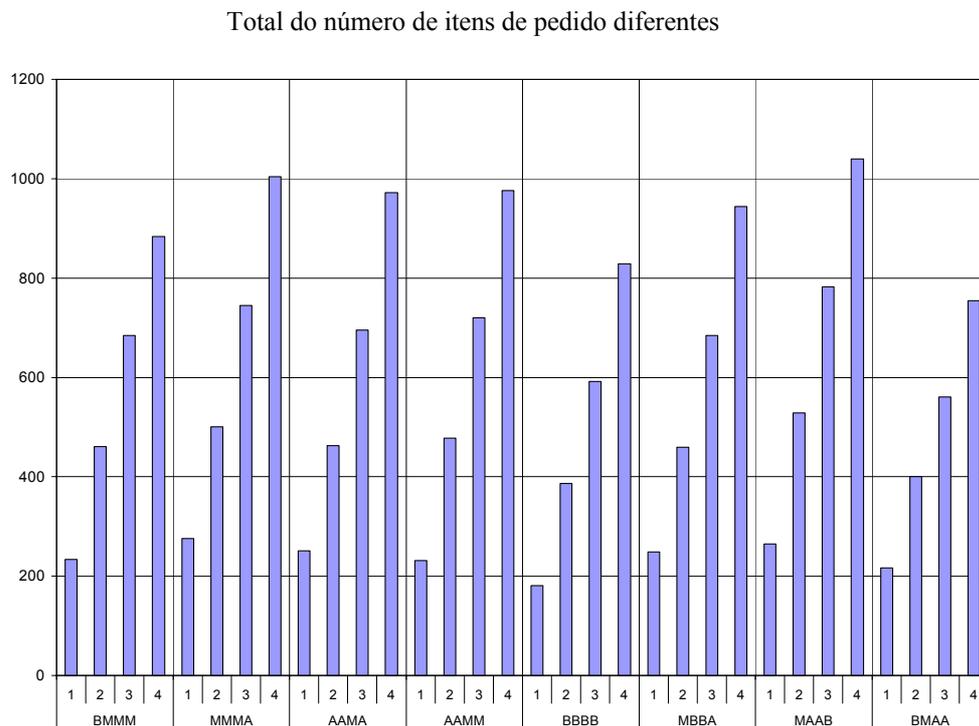


FIGURA 7.1: Número de itens de pedidos diferentes em cada caso experimental de cada cenário

O gráfico da *figura 7.2* permite visualizar a relação entre a capacidade necessária e a capacidade disponível das corridas de fornos²⁰ para fundir todos os itens de pedidos a programar em cada caso experimental.

²⁰ A capacidade disponível dos fornos leva em conta a capacidade média de todas as corridas possíveis de fornos. O cálculo desta capacidade média é tratado no “*Apêndice A2*”

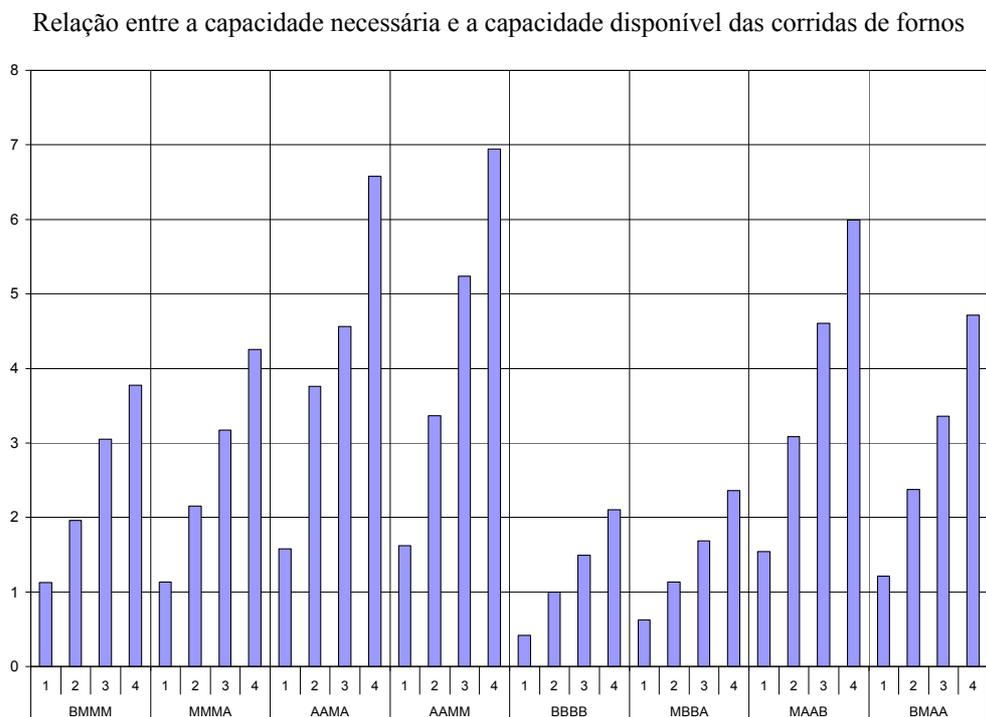


FIGURA 7.2: Relação entre a capacidade necessária e a capacidade disponível das corridas de fornos em cada caso experimental

Como é possível avaliar com base na *figura 7.2*, os casos experimentais dos cenários “AAMA” E “AAMM” são os que necessitam de maior capacidade de corridas de fornos, ou seja, nestes casos será mais concorrido para um item de pedido participar de uma corrida de forno. Por outro lado, os casos experimentais dos cenários “BMMM”, “BBBB” e “BMAA” são os que apresentam itens de pedidos com menor concorrência para participar de uma corrida de forno.

Já o gráfico da *figura 7.3* mostra a relação entre a capacidade necessária e a capacidade disponível de todas as operações produtivas cambiáveis²¹ para processar todos os itens de pedidos a programar em cada caso experimental.

²¹ As análises dos experimentos consideraram apenas as operações produtivas cambiáveis, pois são estas operações que permitem maior flexibilidade. Apesar das operações que não são cambiáveis também estarem sendo programadas convenientemente

Relação entre a capacidade necessária e a capacidade disponível das operações cambiáveis

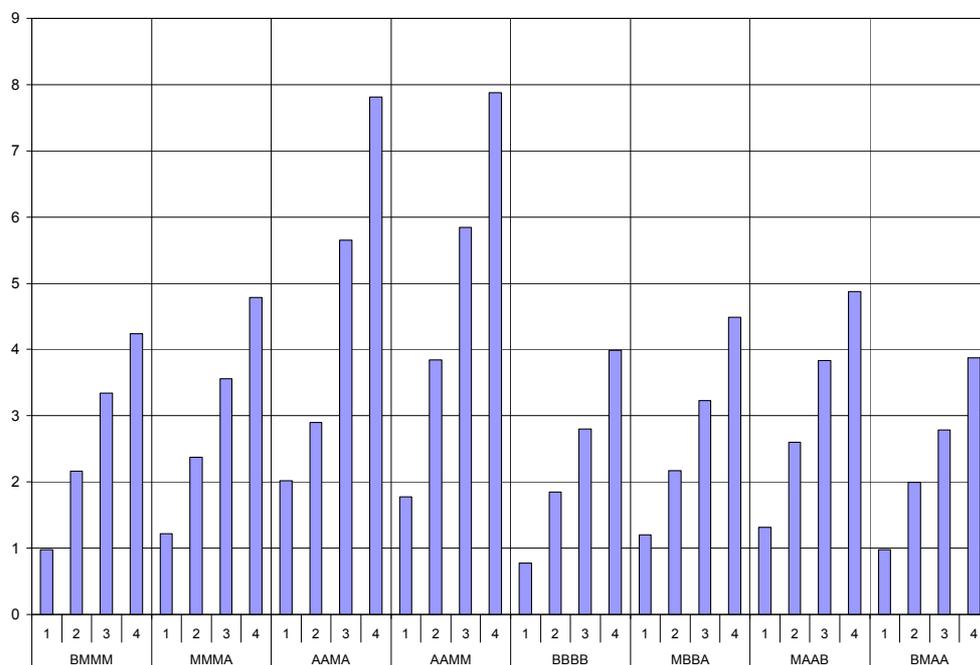


FIGURA 7.3: Relação entre a capacidade necessária e a capacidade disponível das operações produtivas cambiáveis em cada caso experimental

A análise da *figura 7.3* permite avaliar o elevado consumo das operações produtivas nos cenários “AAMA”, “AAMM” e “MAAB”, enquanto que, nos cenários “BBBB” e “MBBA” a competição, pelos itens de pedido a programar, por recursos produtivos é baixa.

A *figura 7.4* relaciona a necessidade de capacidade das operações com o peso bruto dos itens de pedidos a programar em cada caso experimental de cada cenário, ou seja, a complexidade produtiva dos itens de pedidos.

Relação entre a capacidade necessária das operações e o peso bruto dos itens de pedido (%)

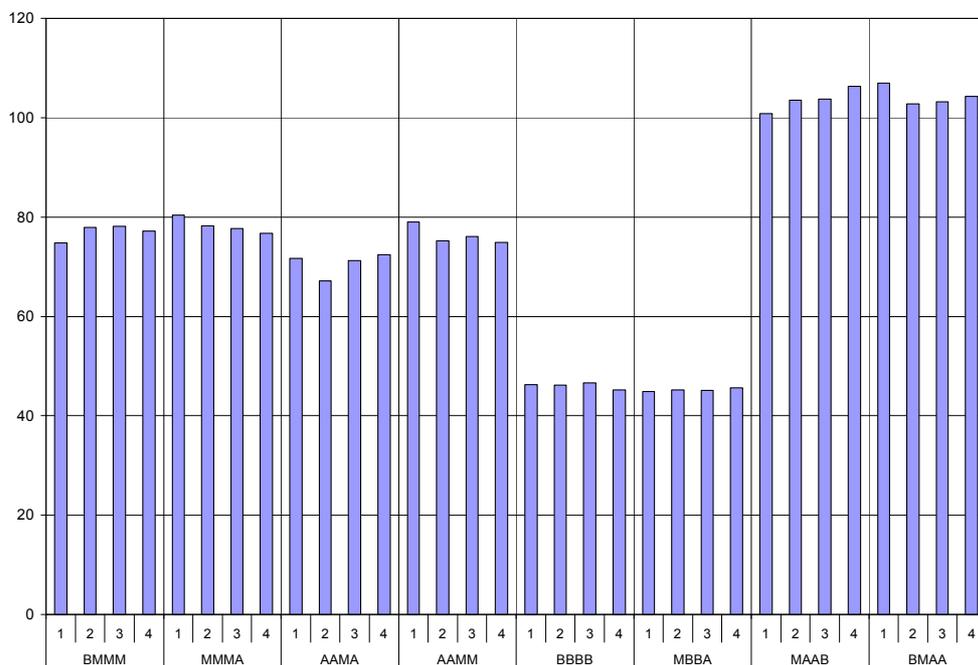


FIGURA 7.4: Relação entre a capacidade necessária das operações produtivas e o peso bruto dos itens de pedidos a programar

Pode-se perceber, com base na *figura 7.4*, que os casos experimentais que possuem itens de pedidos com maior complexidade produtiva são os casos dos cenários “MAAB” e “BMAA”, enquanto que os casos dos cenários “BBBB” e “MBBA” possuem itens de pedidos de complexidade produtiva baixa.

Já a *figura 7.5* permite ter uma visão das principais ligas metálicas utilizadas pelos itens de pedidos. O gráfico desta figura relaciona a concentração dos itens de pedidos nas ligas metálicas mais comuns, como pode ser visto na *figura 7.5*.

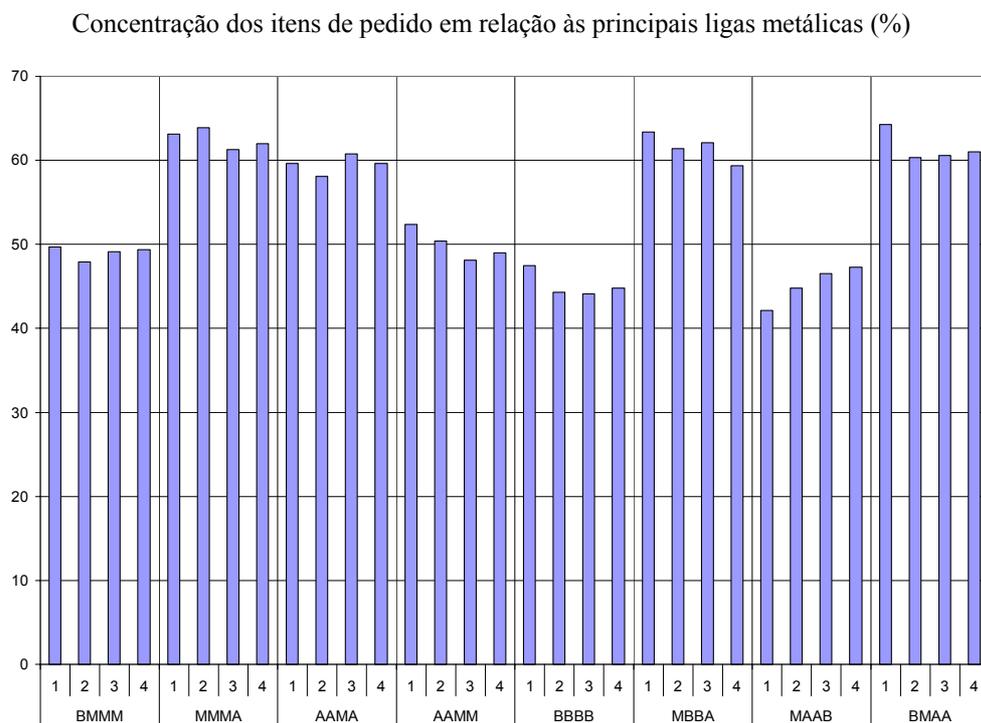


FIGURA 7.5: Concentração dos itens de pedidos em relação às principais ligas metálicas

A análise da *figura 7.5* mostra que os casos dos cenários “MMMA”, “AAMA”, “MBBA” e “BMAA” possuem uma grande concentração dos itens de pedidos nas quatro principais ligas consideradas. Complementando esta análise, a *figura 7.6* permite visualizar os quanto os itens de pedidos estão concentrados nas ligas menos comuns.

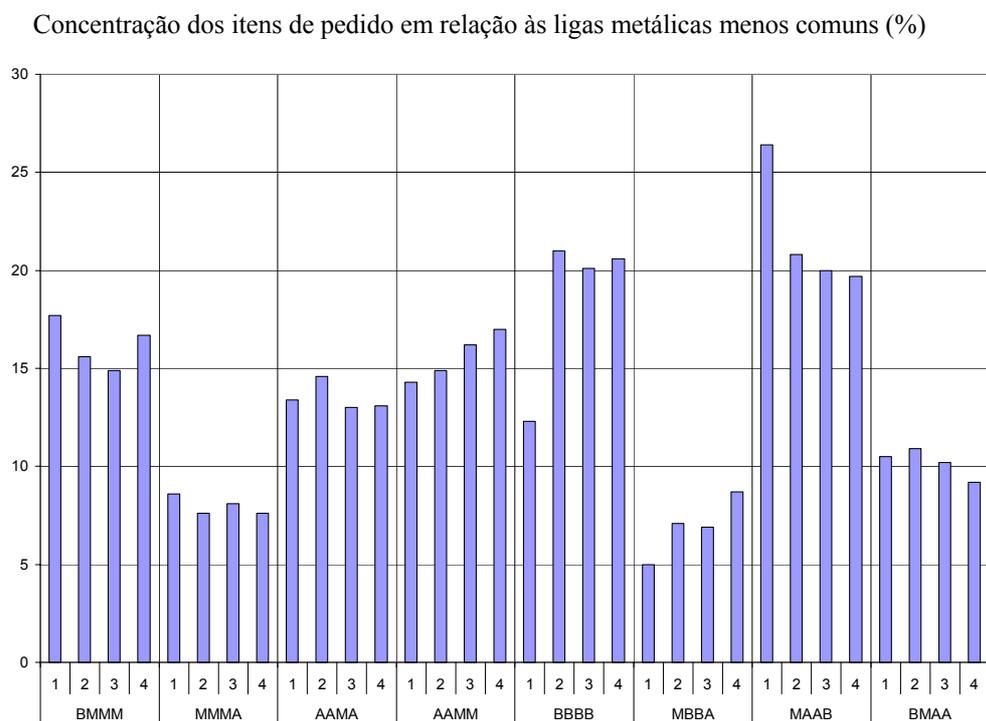


FIGURA 7.6: Concentração dos pedidos em relação às ligas metálicas menos comuns

A análise da *figura 7.6* mostra que os casos dos cenários “BBBB” e “MAAB” são os que possuem as maiores concentrações dos itens de pedidos nas quatro ligas metálicas menos comuns, ou seja, nos casos experimentais destes cenários os itens de pedidos estarão mais distribuídos por todas as ligas metálicas.

A análise conjunta das *figuras 7.2 a 7.6*, mostra que o cenário “BBBB” apresentará os casos com menores competições por recursos produtivos, tanto de corridas de fornos como de operações, com itens de pedidos de baixa complexidade e menos concentrados nas ligas metálicas mais comuns. No outro extremo, os casos do cenário “AAMA” apresentarão alta competição por recursos produtivos e itens de pedidos mais complexos e concentrados nas quatro ligas metálicas mais comuns. Por fim, os outros cenários representam variações entre estes dois extremos.

A seguir os resultados obtidos com a aplicação dos métodos de solução para os modelos propostos para a elaboração da programação da produção para estes casos experimentais são apresentados.

7.3 Análise Dos Resultados Apresentados Pelos Modelos Propostos

Para cada caso experimental foram analisadas as soluções apresentadas para cada modelo proposto, de acordo com seus respectivos métodos de solução²². Visando facilitar o entendimento, como já descrito no capítulo anterior, o modelo “*PLIRT*”, quando aplicado utilizando como entrada os dados do método de solução do modelo “*PLIRX*”, será tratado como “*PLIRT1*”. Já quando o modelo “*PLIRT*” utilizar como dados de entrada os resultados apresentados pelo método de solução do modelo “*PLIA*”, este será tratado como “*PLIRT2*”.

Com o objetivo de possibilitar um melhor entendimento de como o tempo de solução influencia a performance apresentada pelo método de solução do modelo “*PLIRT2*”, serão realizados, para cada caso experimental, 2 experimentos com o método de solução deste modelo. Primeiramente será considerado um tempo de solução total de 360 segundos, por se considerar um tempo aceitável para aplicação sob a forma de um SAD. Em seguida, será considerado também um tempo de solução de 3600 segundos, para os mesmos casos experimentais testados, permitindo avaliar a influência do tempo de execução nas performances de seu método de solução.

Já para o modelo *HE* serão realizados, visando entender a influência de diferentes diâmetros de busca na performance de seu método de solução, para cada caso experimental, 3 experimentos com diâmetros diferentes. Desta forma, serão testados os diâmetros 1, 3 e 10, para que as performances apresentadas por estes diâmetros, assim como seus respectivos tempos de solução, sejam convenientemente analisados. Quanto ao método de escolha da melhor corrida de forno em cada estágio decisório para compor o caminho guloso, será usada a corrida de maior valor²³.

A análise da performance dos métodos de solução dos modelos propostos toma por base, para cada caso experimental, o limite superior de solução, proveniente da solução do modelo *PLIRX*, e o limite inferior de solução, proveniente do modelo

²² Exceto para o modelo *PLI*, uma vez que as soluções deste modelo, para os casos experimentais considerados, apresentaram performance bem inferior aos outros modelos propostos. Os resultados apresentados pela solução do modelo *PLI* para os casos experimentais tratados estão disponíveis no “*Apêndice A3*”

²³ Poderia ser usado, também, a corrida de maior relação entre seu valor e sua capacidade, ou a corrida de maior relação entre seu valor e seu custo, entretanto, testes preliminares apontaram o uso das corridas de maior valor. No capítulo 6 pode-se encontrar maiores detalhes sobre esta decisão

PLIRT1. Desta forma, contando a solução do limite superior e do limite inferior, e dos modelos *PLI*, *PLIRT2*, com tempo de solução de 360 e 3600 segundos, *AG* e *HE* diâmetros 1, 2 e 3, serão realizados, para cada caso experimental, 9 experimentos, totalizando então 288 experimentos realizados. Os resultados detalhados apresentados por estes experimentos estão disponíveis no “*Apêndice A3*”. A seguir a análise destes resultados é apresentada com detalhes.

7.3.1 Análise dos tempos de solução para os modelos *PLIRX* e *PLIRT1*

A seguir serão avaliados os tempos de solução para os modelos de programação matemática *PLIRX* e *PLIRT1*, responsáveis por fornecer, respectivamente, os limites superiores e inferiores dos casos experimentais analisados. Para isto, foi empregado como método de solução a ferramenta comercial de solução de modelos de programação matemática *CPLEX 7.0*²⁴. A avaliação dos tempos de execução para estes modelos permite avaliar a possibilidade de aplicação dos modelos *PLIRX* e *PLIRT1* sob a forma de um sistema de apoio à decisão. Sendo assim, visando inicialmente realizar uma análise da convergência do método de solução para estes modelos, fixou-se um tempo de solução maior que o desejado para aplicação em um SAD²⁵, permitindo assim avaliar a viabilidade do método de solução de apresentar boas soluções em tempos de execução confortáveis ao tomador de decisão.

Na *figura 7.7* é possível analisar o tempo de execução em que a ferramenta *CPLEX 7.0* apresentou a primeira solução factível, para cada caso experimental, para os modelos *PLIRX* e *PLIRT1*.

²⁴ Os resultados com a ferramenta *CPLEX 7.0* foram obtidos considerando os tempos computacionais de execução em um computador portátil Toshiba® Satellite A25-S207, equipado com um processador Intel® Pentium® 4 de 2,66GHz e 512MB de memória RAM. Uma revisão detalhada sobre a ferramenta *CPLEX* pode ser encontrada em BIXBY *et al.* (sem data)

²⁵ Utilizou-se os seguintes tempos limites de solução para a ferramenta *CPLEX 7.0*: *PLIRX*=14.400(s); *PLIRT1*=3.600(s) + (14.400(s) do modelo *PLIRX*) = 18.000(s)

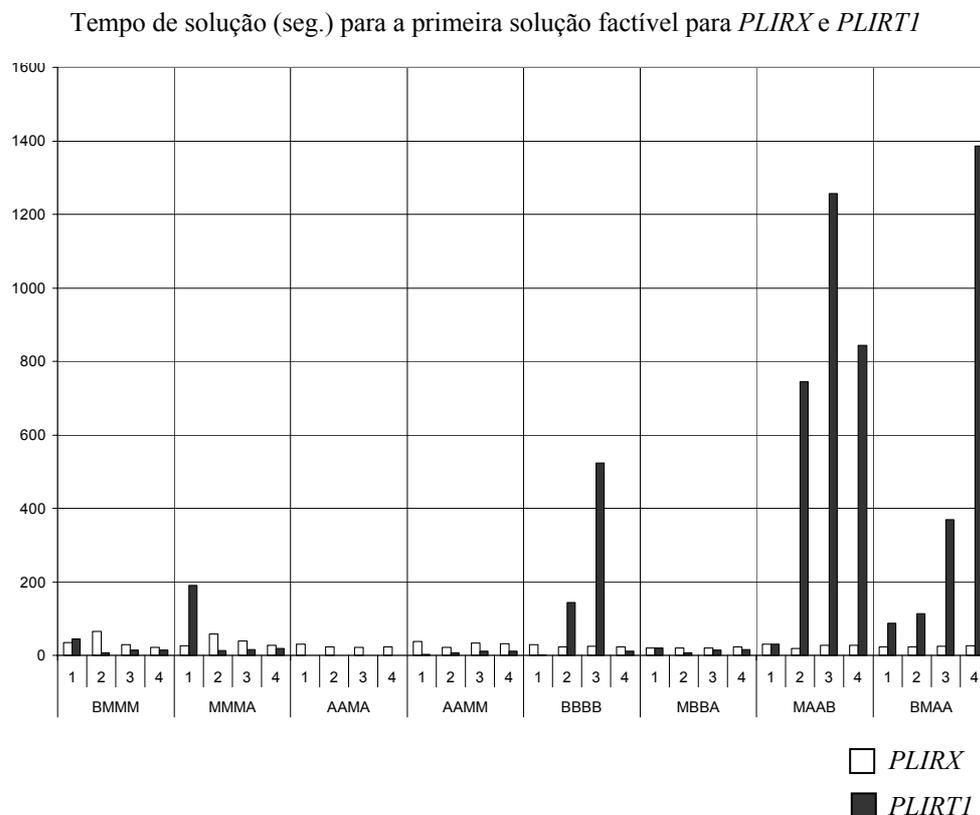


FIGURA 7.7: Tempo de execução do método de solução para a primeira solução factível para os modelos *PLIRX* e *PLIRTI*

A análise da *figura 7.7* permite avaliar que é mais provável de se obter, em tempos menores, uma solução factível inicial para o modelo *PLIRX* quando comparado ao modelo *PLIRTI*. Este último teve dificuldade em apresentar uma primeira solução factível para alguns casos experimentais, especialmente para os casos 3 do cenário “BBBB”, 2, 3 e 4 do cenário “MAAB” e caso 4 do cenário “BMAA”, onde a primeira solução só foi encontrada com um tempo acima de 400 segundos, o que já poderia, em uma primeira análise, inviabilizar a aplicação deste modelo como um SAD, apesar que, para a maioria dos outros casos experimentais, os tempos de execução dos métodos de solução para a primeira solução factível estar dentro dos limites confortáveis para o tomador de decisão.

A análise particular do tempo de execução do método de solução para a primeira solução factível apresentada não é suficiente para analisar sua viabilidade de aplicação sob a forma de um SAD, é necessário também avaliar a qualidade desta solução apresentada. Na *figura 7.8* é possível avaliar a diferença entre esta primeira

solução apresentada e a estimativa da solução ótima para os modelos *PLIRX* e *PLIRT1*, para cada caso experimental.

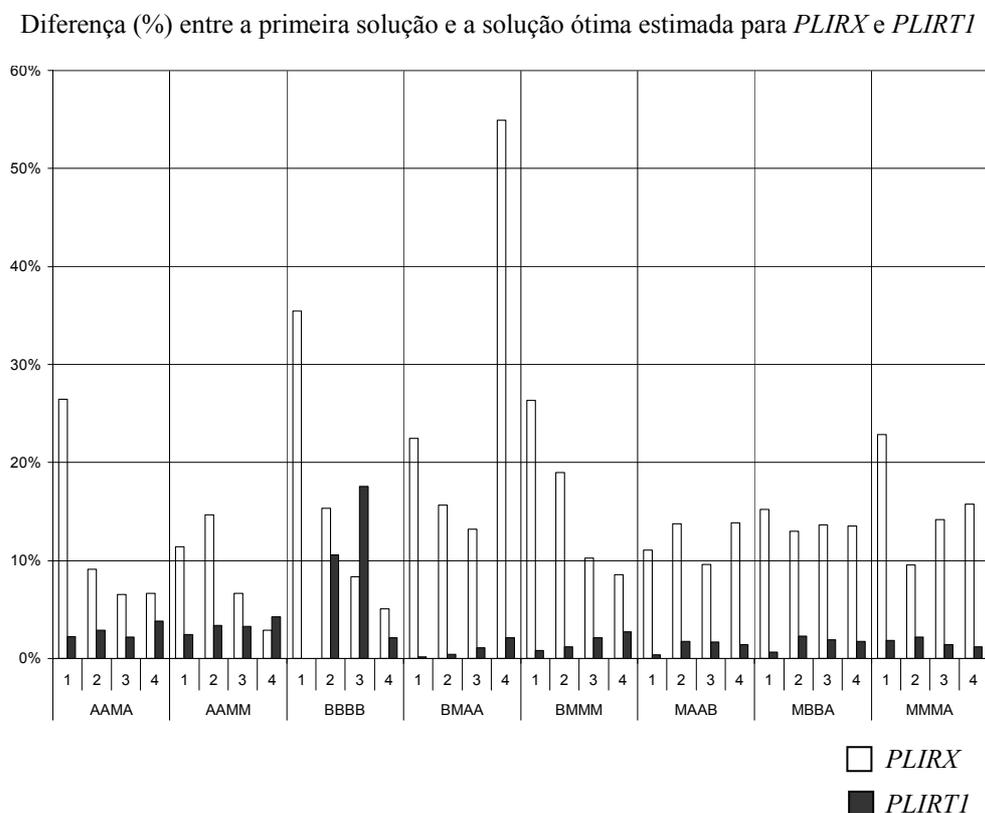


FIGURA 7.8: Diferença entre a primeira solução factível e a estimativa da solução ótima do método de solução para os modelos *PLIRX* e *PLIRT1*

A *figura 7.8* revela que a solução do modelo *PLIRX*, apesar de apresentar um tempo menor de execução, quando comparado à solução do modelo *PLIRT1*, apresenta, também, soluções de menor qualidade, ou seja, mais distantes da estimativa de uma possível solução ótima²⁶. A análise da *figura 7.8* mostra que, em média, as primeiras soluções apresentadas para o modelo *PLIRX* estão 15,2% distantes da estimativa da solução ótima, enquanto que, para o modelo *PLIRT1*, as primeiras soluções apresentadas estão, em média, 2,6% distantes da estimativa de uma possível solução ótima.

Uma vez que o método de solução para o modelo *PLIRT1* utiliza como entrada a solução do modelo *PLIRX*, é possível avaliar que o uso da primeira solução apresentada para *PLIRX* poderá comprometer sua performance. Desta forma, é

²⁶ A estimativa da solução ótima é também fornecida pela ferramenta *CPLEX 7.0*

necessário avaliar a convergência do método de solução de *PLIRX* visando avaliar o potencial de fornecer soluções melhores em tempos viáveis. Na *figura 7.9* é possível avaliar esta análise de convergência, tanto para o modelo *PLIRX*, como para o modelo *PLIRTI*, considerando apenas, para cada um destes modelos, os casos experimentais nos quais a solução inicial apresentou mais que 10% de diferença comparando com a estimativa da solução ótima.

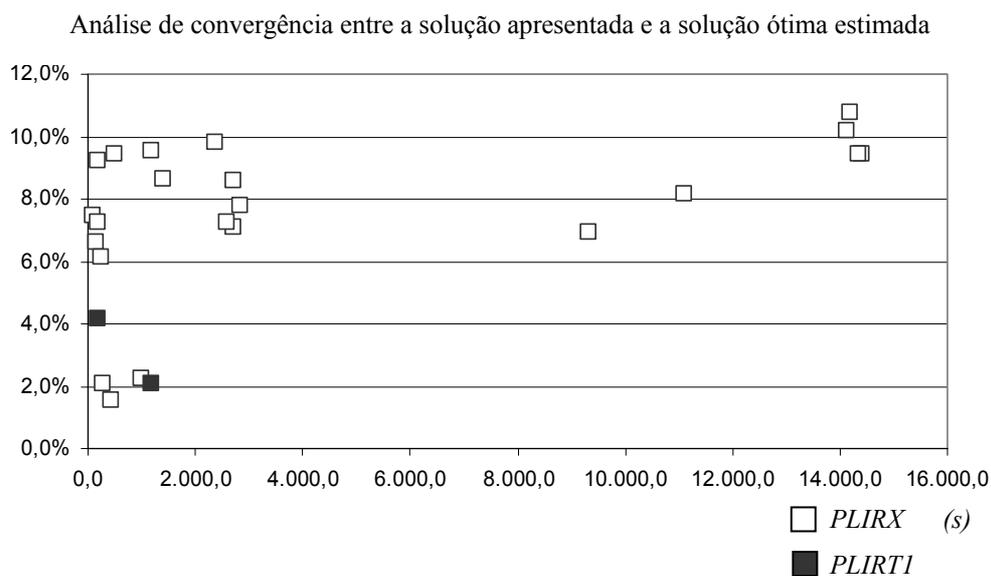


FIGURA 7.9: Análise de convergência do método de solução para os modelos *PLIRX* e *PLIRTI* para os casos experimentais nos quais as soluções iniciais apresentaram mais que 10% de diferença da solução ótima estimada

A análise da *figura 7.9* revela que, em média, o modelo *PLIRX* demorou 4.381 segundos para apresentar, para os casos experimentais nos quais as soluções iniciais estavam mais que 10% distantes da estimativa da solução ótima, uma solução em torno de 10% da estimativa da solução ótima. Já o modelo *PLIRTI*, para os dois únicos casos experimentais nos quais as soluções iniciais se apresentaram mais que 10% distantes da solução ótima, o método de solução demorou, em média, 684 segundos para apresentar uma solução em torno de 10% da estimativa da solução ótima.

Como é possível avaliar com esta análise, o modelo *PLIRX* possui uma dificuldade de conversão, em tempos menores, da solução apresentada, principalmente quando comparado com o modelo *PLIRTI*, uma vez que, dos 32 casos experimentais, para 22 casos, o método de solução não apresentou soluções iniciais com uma diferença

menor que 10% da estimativa da solução ótima, e destes, 12 casos experimentais necessitaram em torno de 1 hora para apresentar uma solução com uma proximidade de 10% da estimativa da solução ótima. Estas análises confirmam a inviabilidade de aplicação do modelo *PLIRX* sob a forma de um SAD e, por conseguinte, do modelo *PLIRT1*, uma vez que este último utiliza como dado de entrada os resultados fornecidos pelo método de solução de *PLIRX*. Desta forma, os modelos *PLIRX* e *PLIRT1* serão empregados apenas para fornecer os limites superiores e inferiores para os experimentos realizados.

7.3.2 Análise dos tempos de solução para os modelos *PLIA* e *PLIRT2*

Já para os modelos de programação matemática *PLIA* e *PLIRT2*, é possível analisar, na *figura 7.10*, os tempos de execução para a primeira solução factível apresentada pelo seu método de solução²⁷.

Diferença (%) entre a primeira solução e a solução ótima estimada para *PLIA* e *PLIRT2*

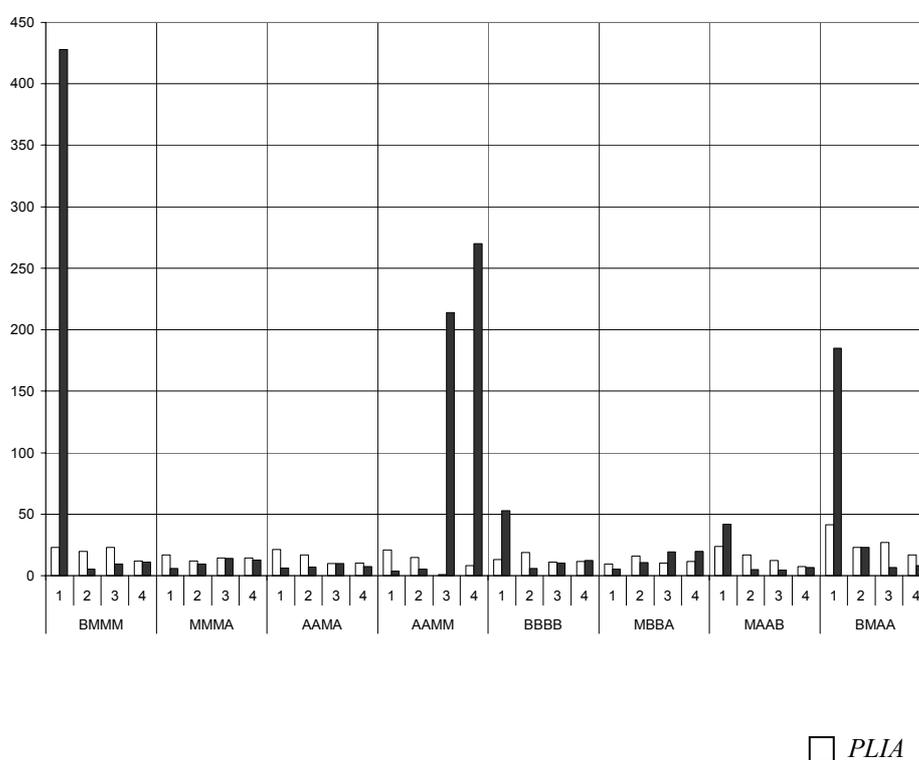


FIGURA 7.10: Tempo de execução do método de solução para a primeira

modelos *PLIA* e *PLIRT2*

□ *PLIA*

■ *PLIRT2*

os

²⁷ Os resultados foram obtidos com a ferramenta CPLEX 7.0 considerando os tempos computacionais de execução em um computador portátil Toshiba® Satellite A25-S207, equipado com um processador Intel® Pentium® 4 de 2,66GHz e 512MB de memória RAM

A análise da *figura 7.10* revela que o modelo *PLIA* apresentou menores variações nos tempos de execução que o modelo *PLIRT2*. Apesar do modelo *PLIRT2* ter apresentado, em tempos menores que 1 minuto, soluções factíveis para 28 dos 32 casos experimentais solucionados. De forma geral, o modelo *PLIA* apresentou um tempo médio de 16 segundos para a primeira solução, e o modelo *PLIRT2* apresentou, também para a primeira solução, um tempo médio de 45 segundos.

Novamente, não é suficiente realizar a análise isolada do tempo de execução para a primeira solução factível, é necessário também avaliar sua qualidade. Na *figura 7.11* é possível avaliar a diferença entre esta primeira solução apresentada e a estimativa da solução ótima para os modelos *PLIA* e *PLIRT2*, para cada caso experimental.

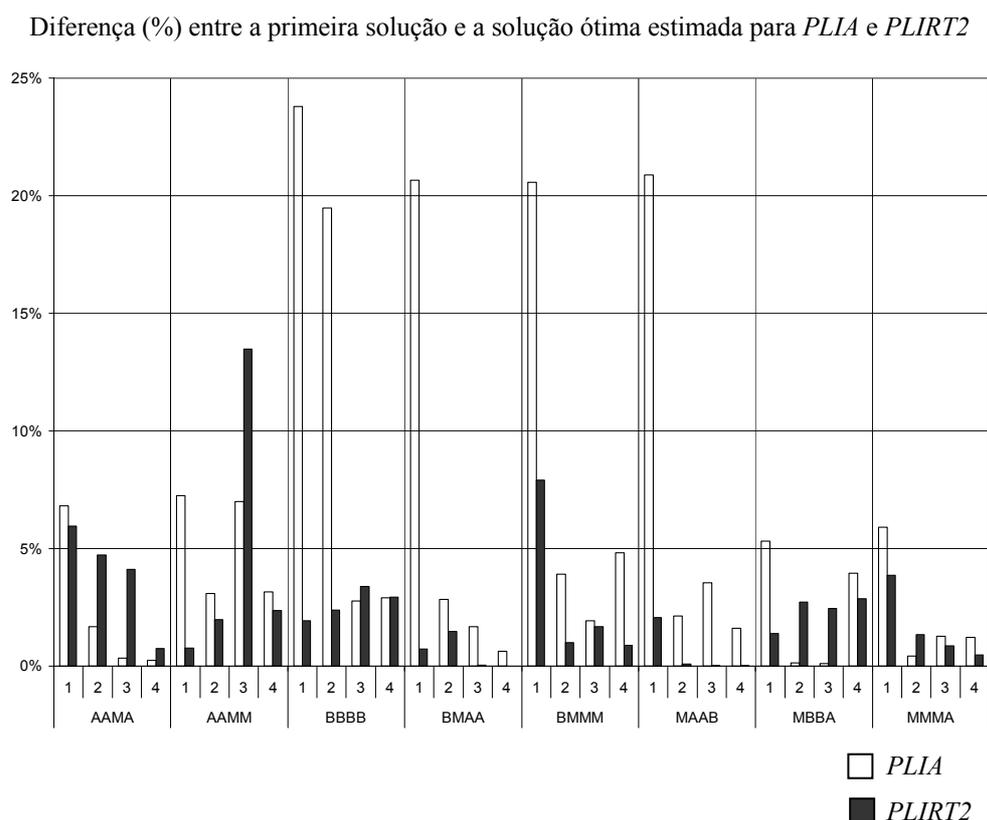


FIGURA 7.11: Diferença entre a primeira solução factível e a estimativa da solução ótima do método de solução para os modelos *PLIA* e *PLIRT2*

Com base na *figura 7.11* é possível avaliar que *PLIA* também é o modelo que apresenta as soluções iniciais de menor qualidade. Entretanto, as primeiras soluções apresentadas por *PLIA* estão, em média, apenas 5,7% distantes das estimativas de suas

soluções ótimas. Já para o modelo *PLIRT2*, as primeira soluções apresentadas estão, em média, 2,4% distantes das estimativas das possíveis soluções ótimas.

Visando avaliar a viabilidade de aplicação conjunta do modelo *PLIA* e do modelo *PLIRT2*, sob a forma de um SAD, é necessário avaliar o tempo de convergência das soluções apresentadas pelo modelo *PLIA*, uma vez que o modelo *PLIRT2* apresentou uma qualidade razoável de soluções iniciais para praticamente todos os casos experimentais solucionados. Na *figura 7.12* é possível avaliar a análise de convergência para o modelo *PLIA*, considerando apenas os casos experimentais nos quais a solução inicial apresentou mais que 10% de diferença comparando com a estimativa da solução ótima.

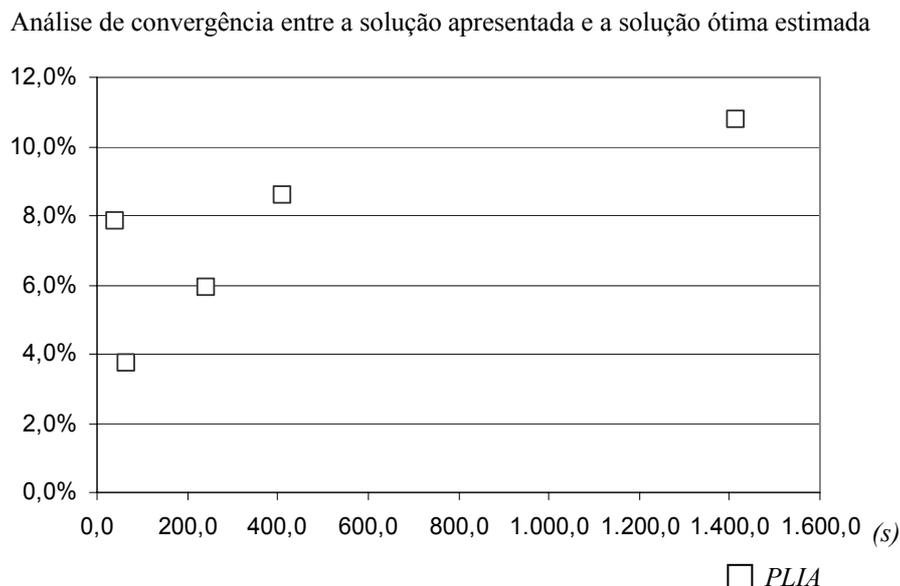


FIGURA 7.12: Análise de convergência do método de solução para o modelo *PLIA* para os casos experimentais nos quais as soluções iniciais apresentaram mais que 10% de diferença da solução ótima estimada

A *figura 7.12* mostra que, dos 5 casos experimentais nos quais as soluções iniciais apresentaram mais que 10% de diferença com a estimativa da solução ótima, 3 casos apresentaram uma melhoria da solução em tempos razoáveis, enquanto 1 caso experimental não obteve um tempo de convergência aplicável sob a ótica de um SAD. A análise dos métodos de solução para os modelos *PLIA* e *PLIRT2* permitem avaliar sua aplicabilidade conjunta, sob restrições, em um SAD. É importante manter em mente que estes modelos poderão não apresentar tempos de solução viáveis para

alguns problemas práticos, entretanto, como pôde ser avaliado com os casos experimentais, é menos provável que isto aconteça.

7.3.3 Análise dos tempos de solução para o modelo *HE*

Na *figura 7.13* estão dispostos os tempos de execução²⁸ do método de solução do modelo *HE* para os diâmetros de busca igual a 1, 3 e 10.

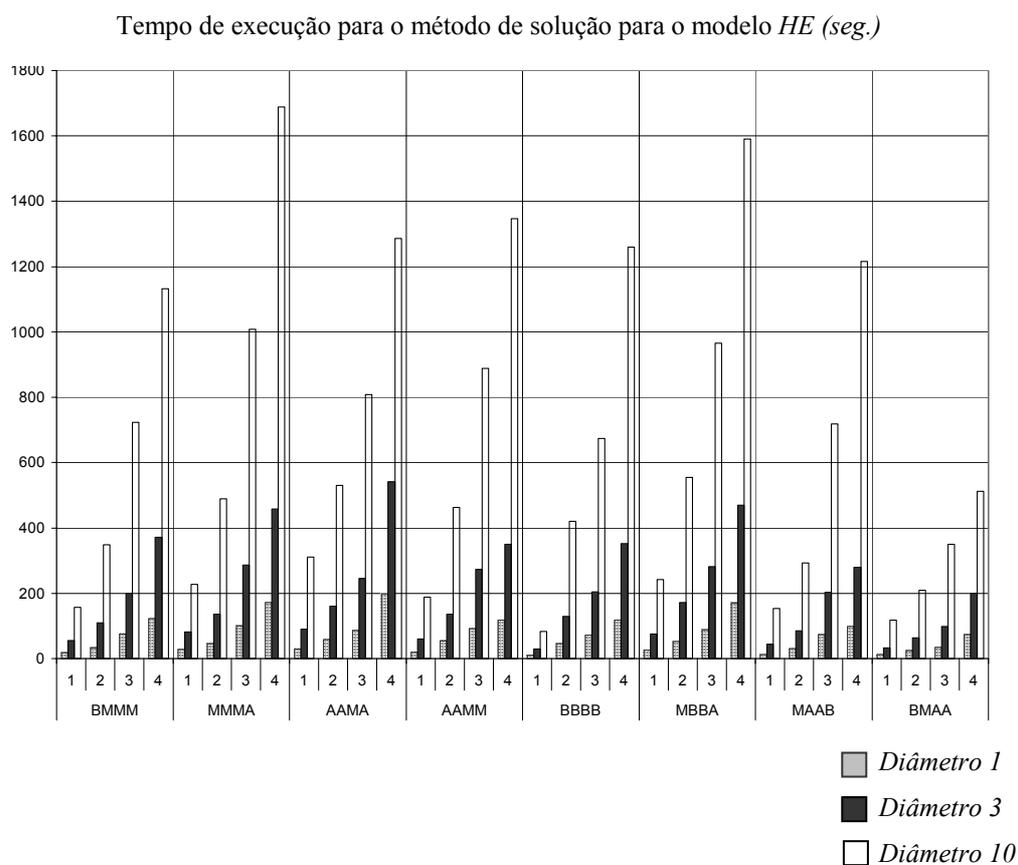


FIGURA 7.13: Tempo de execução (seg.) do método de solução para o modelo *HE* considerando os diâmetros de busca 1, 3 e 10

Com base na *figura 7.13* é possível analisar que o método de solução para o modelo *HE* apresenta um acréscimo aproximadamente linear do tempo de solução, de forma geral, para os casos considerados, tanto em relação ao aumento do

²⁸ Estes resultados foram obtidos considerando os tempos computacionais para a execução do algoritmo de solução do modelo *HE* implementado na linguagem Delphi 7.0 e sendo executado em um computador portátil Toshiba® Satellite A25-S207, equipado com um processador Intel® Pentium® 4 de 2,66GHz e 512MB de memória RAM

diâmetro de busca, como em relação ao aumento do número de itens de pedidos considerados.

A análise da *figura 7.13* mostra também que a consideração de diâmetros de busca maiores que três poderá comprometer o uso deste modelo no sistema de apoio à decisão proposto, pois os tempos de solução poderão ser desconfortáveis para promover um processo interativo com o tomador de decisões. A *figura 7.14* mostra uma média dos tempos de execução do método de solução para o modelo *HE* para os cenários considerados.

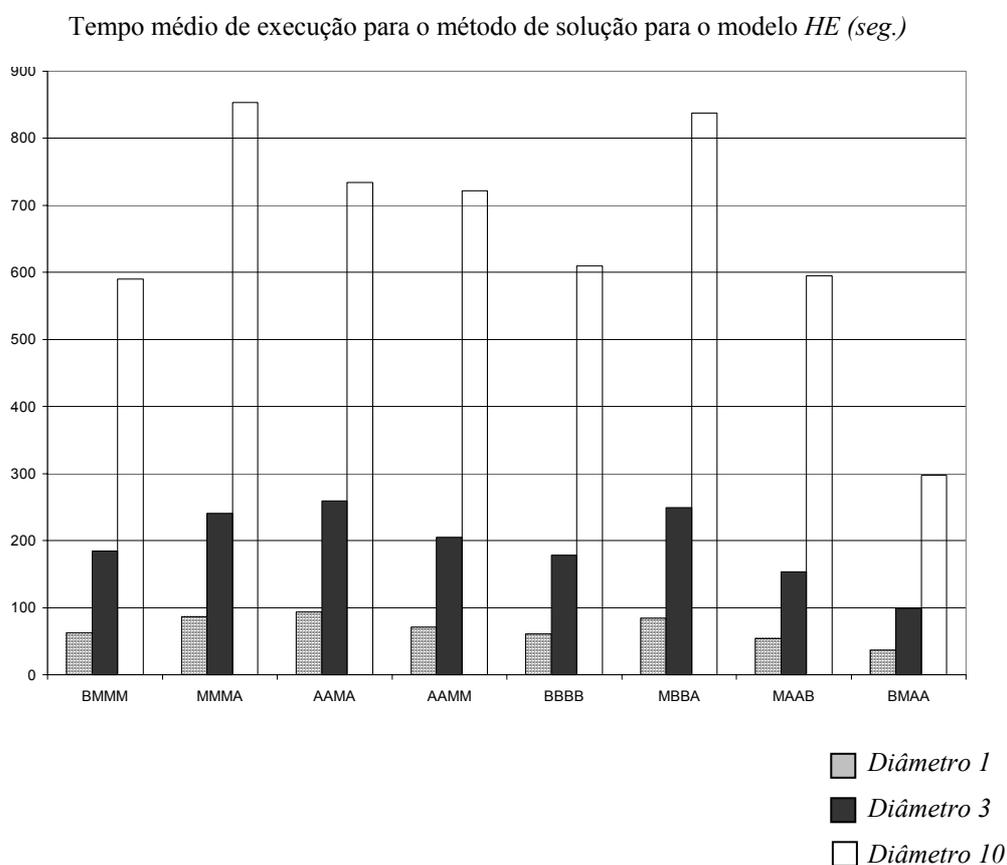


FIGURA 7.14: Tempo médio de execução (seg.) do método de solução para o modelo *HE* considerando os diâmetros de busca 1, 3 e 10

A *figura 7.8* mostra que, em média, o método de solução para o modelo *HE*, considerando o diâmetro igual a 1, não excedeu um minuto para os casos considerados. Proporcionalmente, estes tempos serão, em média, 3 e 10 minutos para os diâmetros iguais a 3 e 10, respectivamente.

A *figura 7.14* revelou também que os experimentos realizados nos cenários “MMMA” e “MBBA” são os que apresentaram, em média, os maiores tempos de solução. Uma análise destes cenários revela, como principal diferencial²⁹, a elevada concentração dos itens de pedidos nas principais ligas metálicas, podendo-se concluir que, quanto mais concentrados estiverem os itens de pedidos em poucas ligas metálicas, mais custoso será para o método de solução *HE*. Da mesma forma, a *figura 7.14* revela que, em média, o nível de concorrência existente nos cenários, dos itens de pedidos pelos recursos produtivos, exerce pouca influência no tempo de solução.

7.3.4 Análise dos tempos de solução para o modelo *AG*

A seguir serão apresentados os resultados obtidos com o método de solução para o modelo *AG*. Como foi tratado no capítulo 6, para um modelo baseado em algoritmos genéticos, é necessário realizar uma avaliação prévia, com base em testes experimentais, dos parâmetros envolvidos com seu método de solução, quais sejam, as taxas de “*crossover*” e “mutação”, número de indivíduos em cada geração populacional e o número de gerações que serão criadas, a consideração ou não de sobreposição populacional e também o uso ou não de uma estratégia de hibridização com métodos de melhoria. Para isto, foram realizados testes experimentais que permitiram definir uma melhor parametrização para aplicação deste modelo nos casos experimentais tratados³⁰, estes testes experimentais estão disponíveis no “*Apêndice A4*”.

Para o modelo *AG*, devido à natureza probabilística de seu método de solução, foram realizadas 30 replicações de seu método de solução. Com base nestas replicações, é possível, de acordo com a *figura 7.15*, analisar os tempos de execução obtidos para cada cenário experimental, pela melhor replicação apresentada pelo método de solução do modelo *AG*³¹.

²⁹ Apesar do cenário oito ter características similares (quanto à concentração dos itens de pedidos em poucas ligas metálicas), este cenário possui, em média, menos itens de pedidos que os cenários dois e seis

³⁰ Foram empregados os seguintes parâmetros de configuração do *AG* proposto: “Crossover = 0,9”, “Mutação = 0,1”, “População = 100”, “Num. Gerações = 100”, “Pressão de Seleção = 5”, “Aplicação da estratégia de Elitismo apenas para o melhor indivíduo da geração anterior”, “Aplicação da estratégia de hibridização com método heurístico de melhoria”

³¹ Estes resultados foram obtidos considerando os tempos computacionais para a execução do algoritmo de solução do modelo *AG* implementado na linguagem Delphi 7.0 e sendo executado em um computador portátil Toshiba® Satellite A25-S207, equipado com um processador Intel® Pentium® 4 de 2,66GHz e 512MB de memória RAM

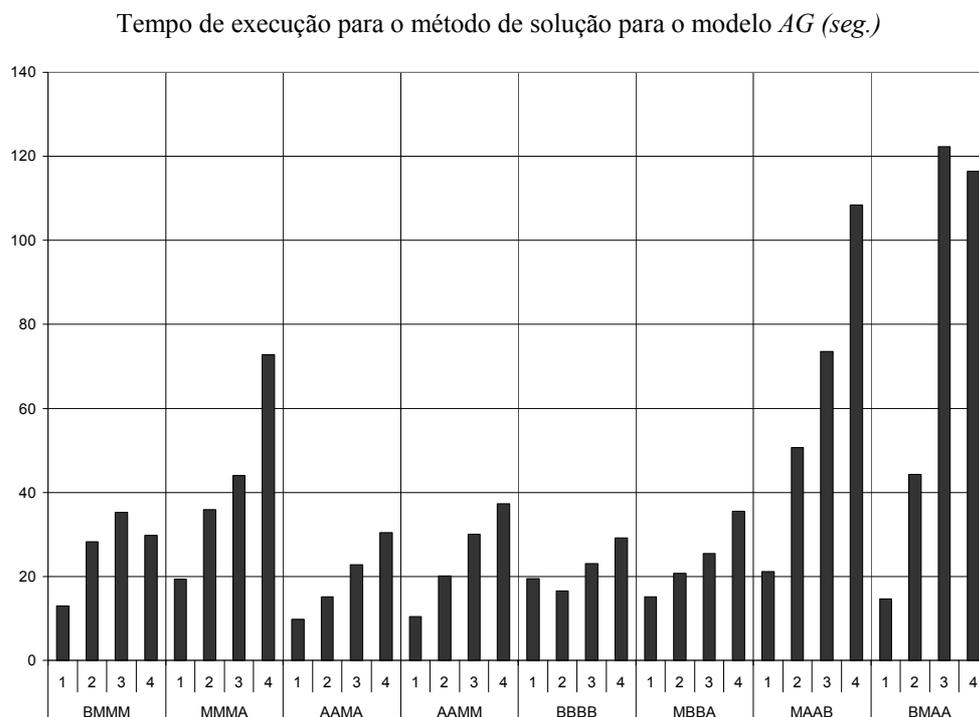


FIGURA 7.15: Tempo de execução (seg.) do método de solução para o modelo *AG*

A análise da *figura 7.15* mostra que, em média, o tempo de solução apresentado para o modelo *AG* foi baixo. É importante lembrar que em uma possível aplicação prática do modelo *AG*, devido ao seu caráter probabilístico, deve-se considerar a execução de mais de uma replicação de seu método de solução³². É possível avaliar também que o modelo *AG* sofre influência do número de itens de pedidos diferentes a programar, apresentando, em média, tempos de solução maiores em cenários com maior disponibilidade de itens de pedidos em aberto, mas, de forma geral, este acréscimo no tempo de solução foi pouco expressivo.

Pode-se avaliar também que o método de solução para o modelo *AG* apresentou tempos de soluções maiores nos cenários com itens produtivos mais complexos, quais sejam, os cenários “MAAB” e “BMAA”. Estas variações no tempo de solução nestes cenários podem ser decorrentes do procedimento de melhoria local existente no modelo *AG*, apesar de, como podem ser avaliadas, estas variações também

³² O número de replicações mais indicado deverá ser obtido via testes preliminares no ambiente de aplicação, este trabalho utilizou 30 replicações. Por outro lado, em uma aplicação prática deste modelo, as replicações necessárias poderão ser realizadas em paralelo, caso haja mais de um computador disponível

não serem expressivas. Por fim, para a maioria dos casos experimentais avaliados, o método de solução do modelo *AG* apresentou tempos de solução abaixo de um minuto.

A análise dos resultados obtidos com o método de solução do modelo *AG*, quando comparado aos resultados obtidos com o método de solução para o modelo *HE* de diâmetro 3, mostram que, para o modelo *AG*, a influência do número de itens de pedido em aberto é menor. Como pode ser avaliado na *figura 7.15*, na maioria dos casos experimentais com elevado nível de itens de pedido em aberto o método de solução para o modelo *AG* apresentou tempos de solução menores que um minuto.

7.3.5 Análise dos consumos das capacidades dos fornos

Quanto ao uso da capacidade disponível na etapa de vazamento. Na *figura 7.16* é possível analisar a proporção entre a capacidade em peso utilizada pelos itens de pedidos programados e a capacidade média³³ disponível das corridas de fornos.

Relação entre o peso programado e a capacidade média das corridas de fornos (%)

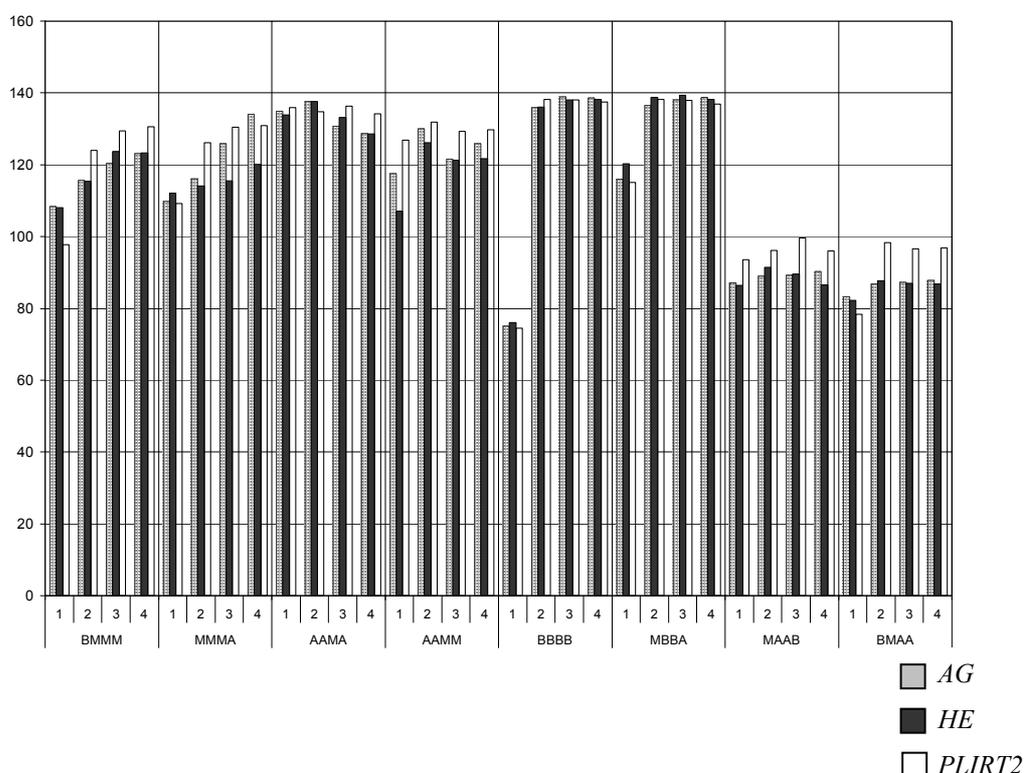


FIGURA 7.16: Proporção entre o peso programado e a capacidade média disponível das corridas de fornos

³³ A capacidade média leva em conta o número máximo de corridas de forno possível de acontecer em um ciclo e a capacidade média em peso dos fornos disponíveis, desta forma, o consumo poderá ser maior que 100% da capacidade média disponível, ou seja, poderá atingir os níveis superiores desta capacidade

Para se ter uma visão geral sobre a performance dos métodos de solução, quanto ao uso das capacidades de corridas de fornos, na *figura 7.17* pode-se avaliar uma média desta performance para os cenários experimentais analisados. É possível avaliar que o modelo *PLIRT2* apresenta um melhor aproveitamento das capacidades das corridas de fornos para quase todos os cenários avaliados. Já os modelos *HE* e *AG* apresentam performances bem próximas quanto ao uso das capacidades das corridas de fornos.

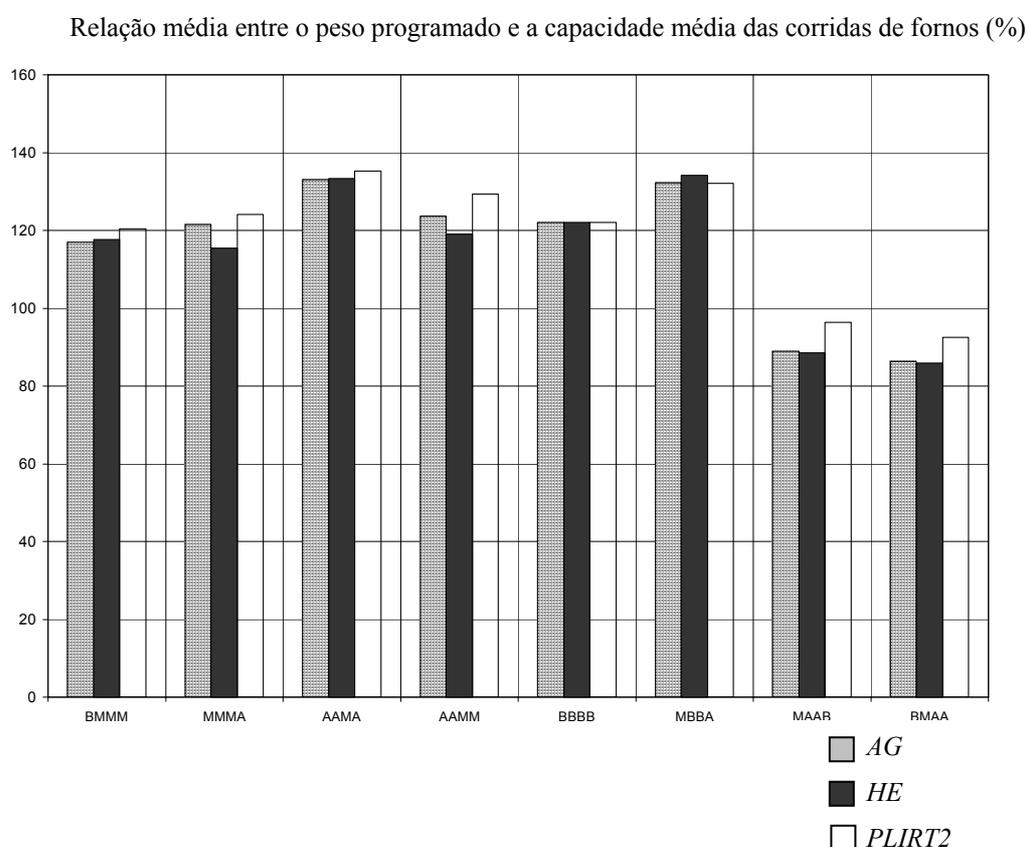


FIGURA 7.17: Relação média entre o peso programado e a capacidade média disponível das corridas de fornos

7.3.6 Análise do consumo das capacidades das operações produtivas

Quanto ao consumo das operações produtivas. Pode-se perceber, com base na *figura 7.18*, considerando a relação entre o consumo total das operações variáveis e a capacidade total disponível destas operações, que, no geral, todos os modelos propostos também alcançaram os níveis superiores de consumo, principalmente nos cenários que exigiam maior capacidade de operações produtivas.

Relação entre a capacidade programada e a capacidade disponível das operações cambiáveis (%)

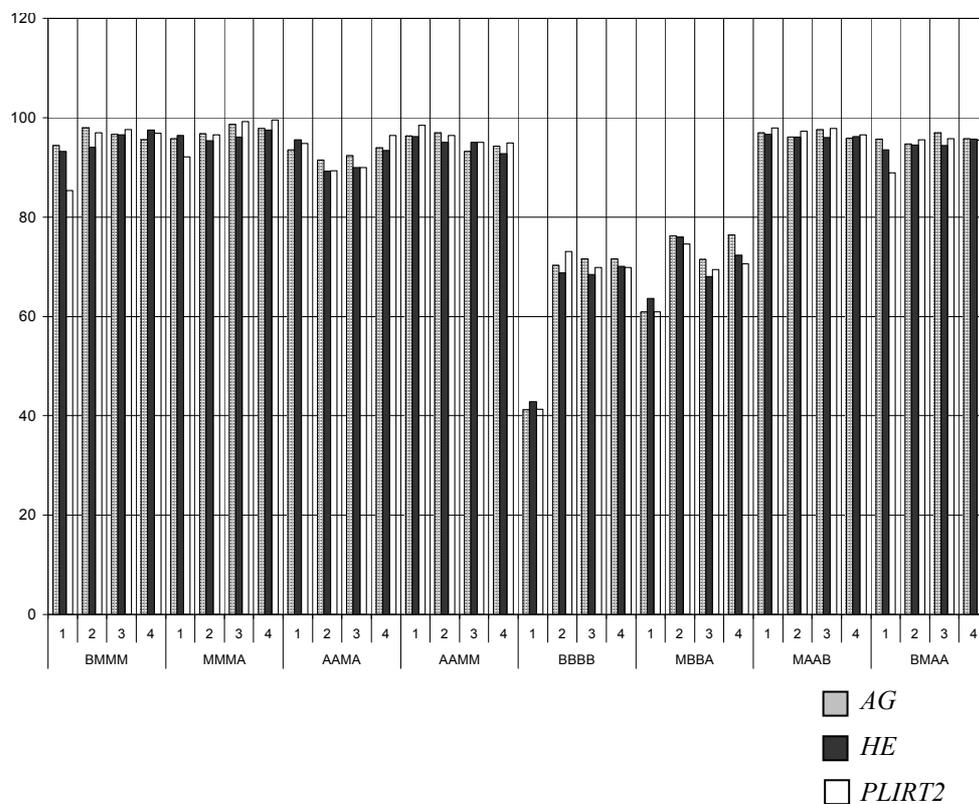


FIGURA 7.18: Relação entre a capacidade programada e a capacidade disponível das operações cambiáveis

Para se ter uma avaliação média das performances apresentadas pelos métodos de solução dos modelos analisados, na *figura 7.19* é possível avaliar estes resultados.

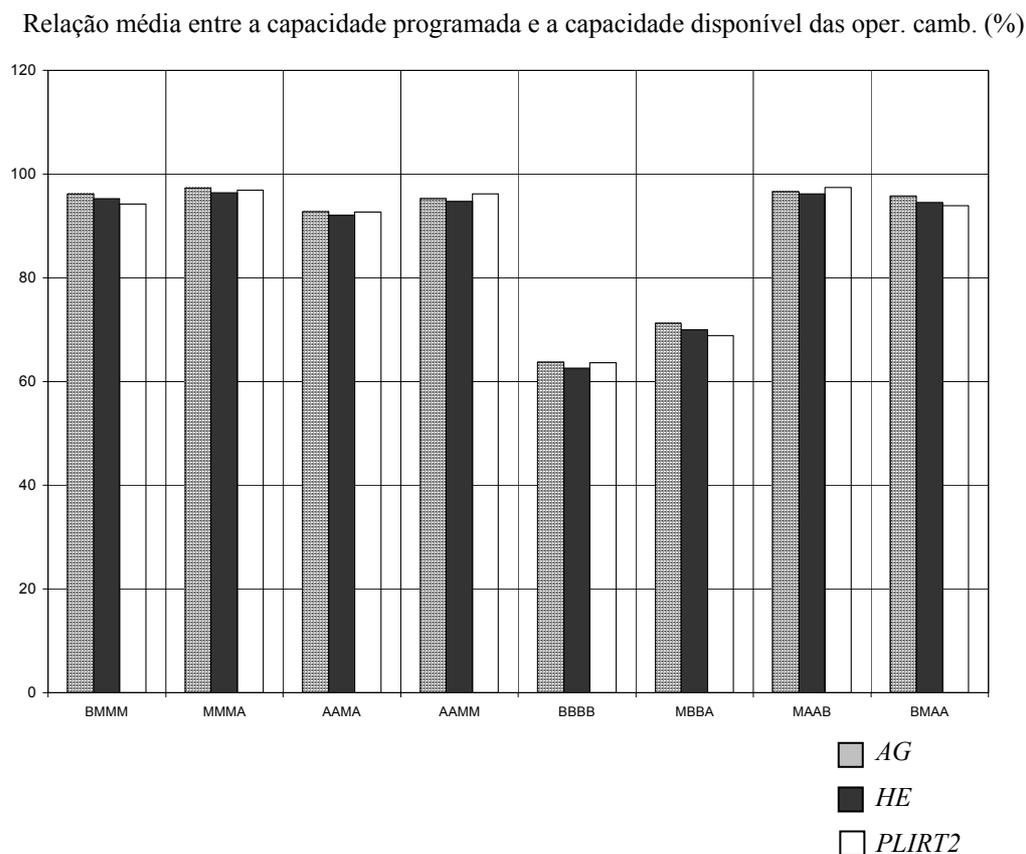


FIGURA 7.19: Relação média entre a capacidade programada e a capacidade disponível das operações cambiáveis

A análise da *figura 7.19* permite avaliar que não houve diferenças expressivas entre os métodos de solução quanto à performance média apresentada para o consumo da capacidade de produção.

7.3.7 Performance isolada dos métodos de solução para os casos analisados

A avaliação da performance obtida pelos métodos de solução, para os modelos propostos, tomou por base o limite superior de solução para cada caso experimental. Este limite superior foi fornecido pelo método de solução do modelo *PLIRX*, como já discutido no capítulo 6. Para isto, empregou-se a ferramenta *CPLEX 7.0* com um limite de tempo de solução de 14.400 segundos, utilizando como solução, findado o tempo de execução, a estimativa da solução ótima que foi apresentada pela ferramenta, uma vez que, para todos os casos experimentais, a ferramenta *CPLEX 7.0* não conseguiu encontrar a solução ótima para o modelo *PLIRX*. Por outro lado, a

solução apresentada no limite de tempo de 14.400 segundos, para a maioria dos casos experimentais, foi próxima da solução ótima estimada, como pode ser visualizado na *figura 7.20*.

Análise de convergência do método de solução para o modelo *PLIRX* após 14.400 seg. (%)

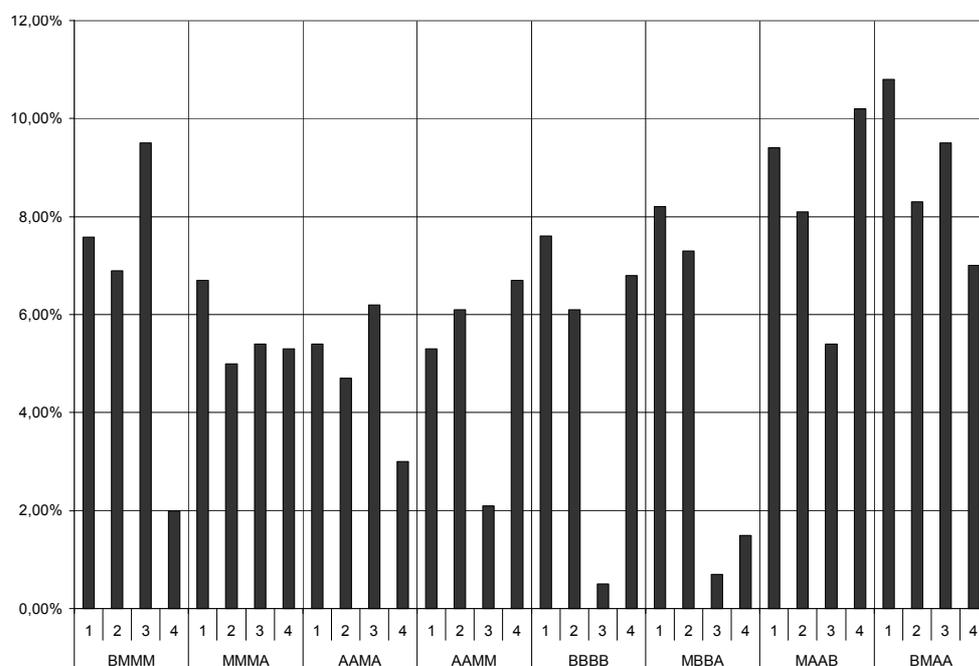


FIGURA 7.20: Diferença entre a solução apresentada pelo método de solução e a estimativa da solução ótima para o modelo *PLIRX* após 14.400 segundos de execução

Desta forma, é de se esperar, como discutido no capítulo 6, que a solução ótima para cada caso experimental, esteja entre o limite superior fornecido pela estimativa da solução ótima para a solução do modelo *PLIRX*, e o limite inferior, fornecido pela solução do modelo *PLIRT1*. Sendo assim, será apresentado também, para fins de comparação, a performance do método de solução do modelo *PLIRT1*. Por fim, os modelos nos quais as performances serão realmente avaliadas visando serem aplicados no SAD proposto serão os modelos *PLIRT2* com tempo de solução de 360 segundos, o modelo *AG* e, também o modelo *HE* com diâmetro 3, uma vez que, para o modelo *HE*, diâmetros maiores que 3 apresentam tempos de solução inviáveis para aplicação sob a ótica de um SAD.

Os valores da performance do método de solução para o modelo *PLIRT2* foram obtidos considerando o tempo de solução de 180 segundos para *PLIA* e 180 segundos para *PLIRT2*, totalizando 360 segundos. Como foi possível avaliar no estudo

de convergência dos métodos de solução para *PLIA* e *PLIRT2*, uma vez que, para *PLIA*, as primeiras soluções apresentadas estavam em média 5,7% distantes das estimativas de sua soluções ótimas e para o modelo *PLIRT2* as primeiras soluções apresentadas estavam em média, 2,4% distantes, pode-se considerar sua aplicação no SAD proposto, apesar que, a aplicação prática de *PLIA* e *PLIRT2* em fundições de mercado poderá, eventualmente, não apresentar soluções factíveis.

Nas *figuras 7.21 e 7.22* é possível avaliar a performance, expressa em porcentagem alcançada do limite superior, dos métodos de solução dos modelos propostos para todos os casos experimentais, além do limite inferior fornecido pelo método de solução do modelo *PLIRT1*.

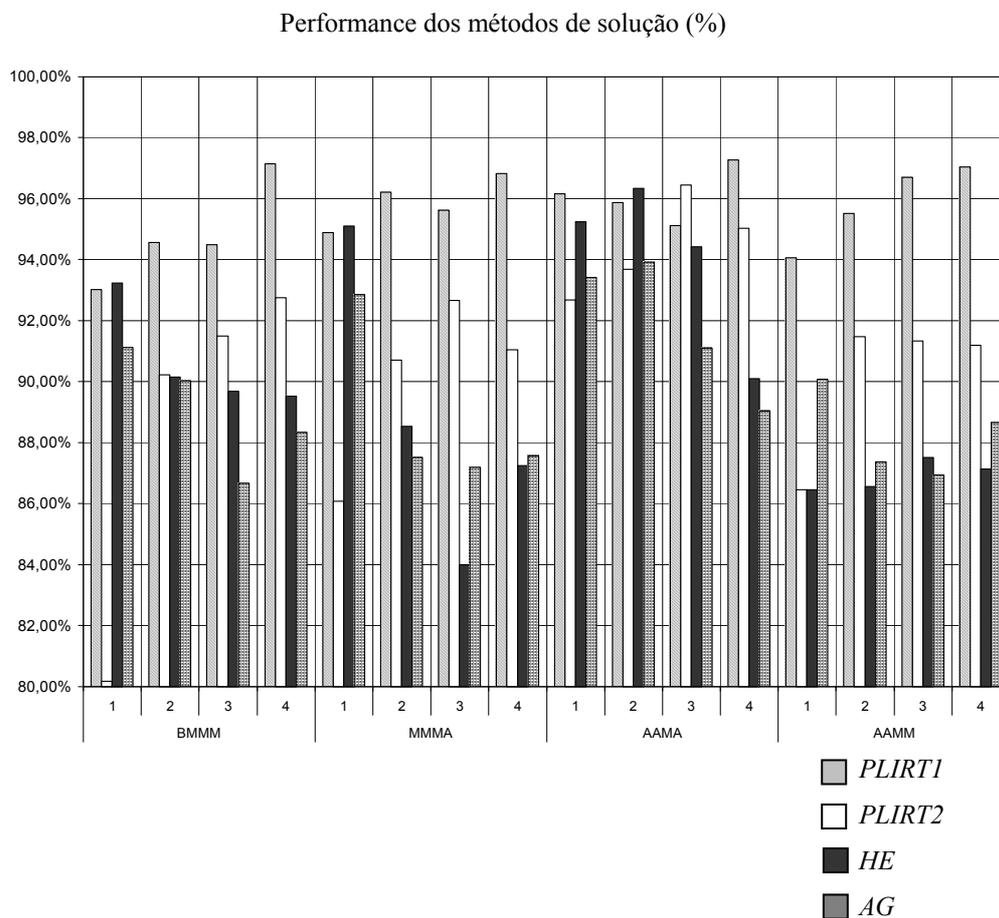


FIGURA 7.21: Performance dos métodos de solução para os casos dos cenários “BMMM”, “MMMA”, “AAMA” e “AAMM” em (%) do limite superior

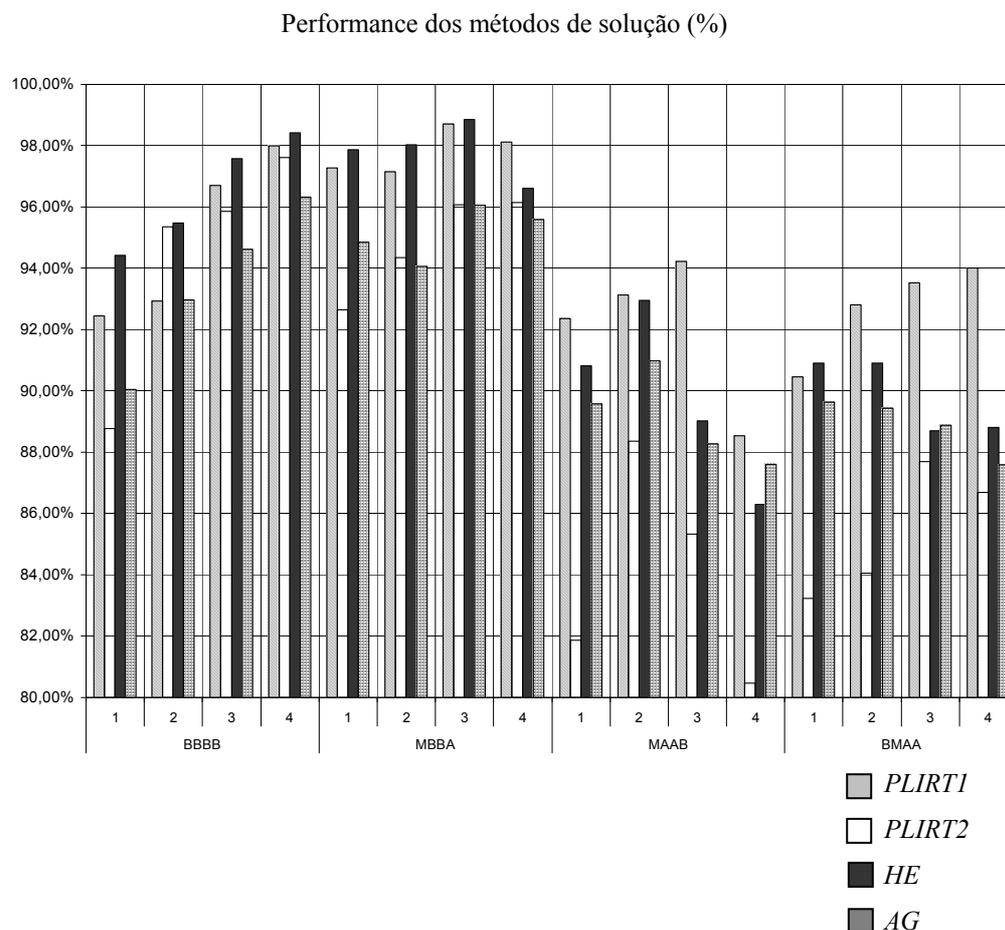


FIGURA 7.22: Performance dos métodos de solução para os casos dos cenários “BBBB”, “MBBA”, “MAAB” e “BMAA” em (%) do limite superior

Tomando por base as *figuras 7.21 e 7.22* é possível avaliar, sem considerar casos isolados, que o modelo de programação matemática *PLIRT2* apresenta uma melhora na performance em casos com maior número de itens de pedido em aberto, enquanto os modelos *AG* e *HE*, inversamente, apresentam uma melhora na performance em casos com menos itens de pedido em aberto. Pode-se analisar também que o modelo de programação matemática *PLIRT2* apresenta uma performance menor nos cenários com itens de pedidos mais complexos, ou seja, nos cenários “MAAB” e “BMAA”. Quanto ao modelo *HE*, pode-se analisar que sua performance será tão maior quanto menor for a concorrência por recursos produtivos, apresentando performance superior em todos os casos dos cenários “BBBB” e “MBBA”. O modelo *AG*, por sua vez, conseguiu performances superiores em alguns casos isolados, conseguindo obter, também, resultados satisfatórios para todos os casos considerados.

7.3.8 Avaliação do impacto do tempo de solução na performance apresentada pelo modelo *PLIRT2*

É importante lembrar que os valores da performance do método de solução para o modelo *PLIRT2* foram obtidos considerando o tempo de execução de 180 segundos para *PLIA* e 180 segundos para *PLIRT2*, totalizando 360 segundos, por se considerar um tempo confortável para sua aplicação sob a ótica de um SAD. Como foi possível avaliar no estudo de convergência destes métodos, considerando um tempo de solução maior, é provável que a performance obtida possa ser melhor. Para fins de avaliação, na *figura 7.23*, é possível comparar a performance do método de solução para *PLIA* e *PLIRT2* considerando 10 vezes o tempo usado para os testes de performance anteriores, ou seja, 1.800 segundos para *PLIA* e 1.800 segundos para *PLIRT2*.

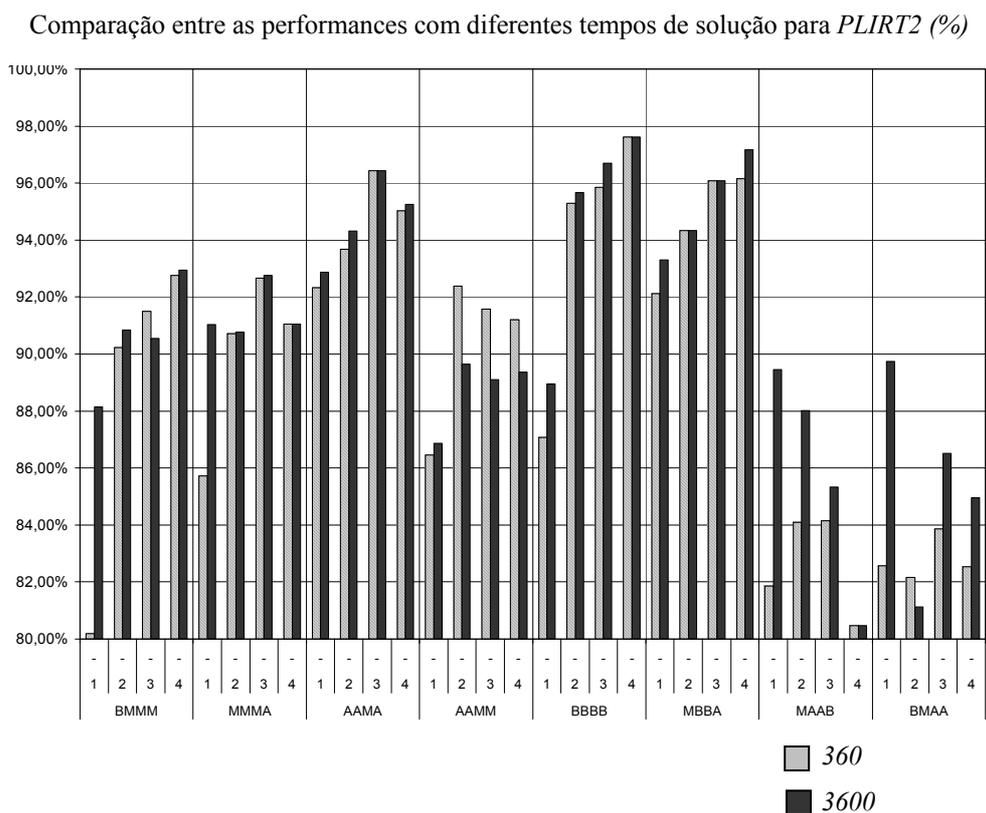


FIGURA 7.23: Comparação entre as performances, em porcentagem do limite superior, obtidas pelo método de solução para o modelo *PLIRT2* com tempos de execução de 360 e 3600 seg.

A análise da *figura 7.23* revela que, surpreendentemente, a consideração de tempos de solução maiores não necessariamente conduz a melhores soluções para alguns casos experimentais. Isto se deve ao fato do modelo *PLIRT2* utilizar como dados

de entrada as corridas de fornos definidas pelo método de solução do modelo *PLIA*, por outro lado, o modelo *PLIRT2* tem a flexibilidade de também definir corridas de fornos, podendo-se concluir que em alguns casos, a melhoria da solução gerada por *PLIA* restringe a flexibilidade do método de solução para o modelo *PLIRT2*. Por fim, esta análise possibilita justificar a viabilidade do método de solução *PLIRT2* sob a forma de aplicação em um SAD considerando o tempo de solução de 360 segundos.

7.3.9 Avaliação do impacto do diâmetro de solução na performance apresentada pelo modelo *HE*

O modelo *HE* terá maior amplitude de busca quando se consideram diâmetros maiores, por outro lado, como já foi visto anteriormente, o tempo de solução cresce linearmente com o aumento deste diâmetro. Visando avaliar a performance obtida com o método de solução para o modelo *HE* quando se considera diâmetros diferentes, foram testados, para todos os casos experimentais, os diâmetros 1, 3 e 10. Na *figura 7.24* é possível comparar a performance apresentada por estes diferentes diâmetros de busca.

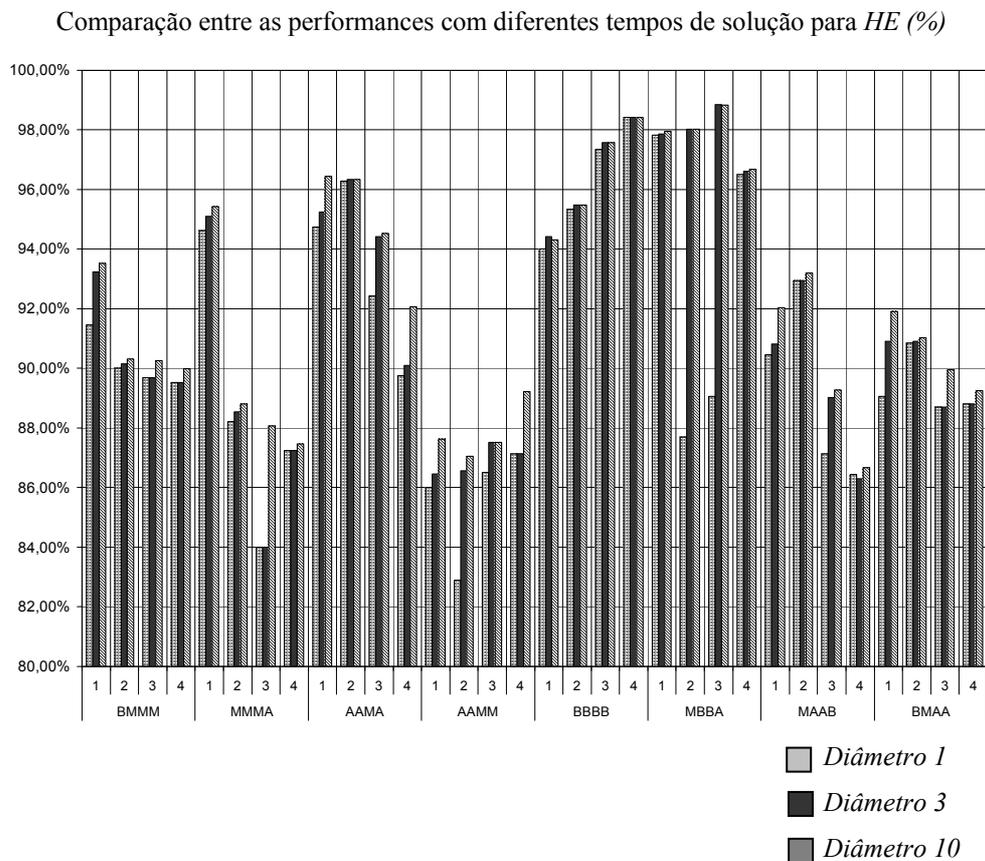


FIGURA 7.24: Comparação entre as performances, em porcentagem do limite superior, obtidas pelo método de solução para o modelo *HE* com diâmetros de solução de 1, 3 e 10

Como pode ser analisado na *figura 7.24*, diâmetros de solução maiores possibilitaram um aumento apenas sensível nas performances apresentadas pelo método de solução de *HE*. É possível avaliar também, apesar de não ser comum, que diâmetros maiores podem convergir a solução para regiões de ótimos locais inferiores, como aconteceu com o caso experimental 1 do cenário “BBBB”, onde o diâmetro 3 possibilitou uma performance ligeiramente superior ao diâmetro de solução igual a 10. Esta análise justifica o uso do diâmetro 3 em situações práticas, por possuir a melhor relação custo computacional por performance obtida.

7.3.10 Performance média dos métodos de solução para os casos analisados

Para visualizar melhor a forma na qual o número de itens de pedidos em aberto influencia na performance dos métodos de solução, na *figura 7.25* é possível

avaliar uma média desta performance somente para os casos experimentais com baixo nível de itens de pedidos diferentes a programar³⁴.

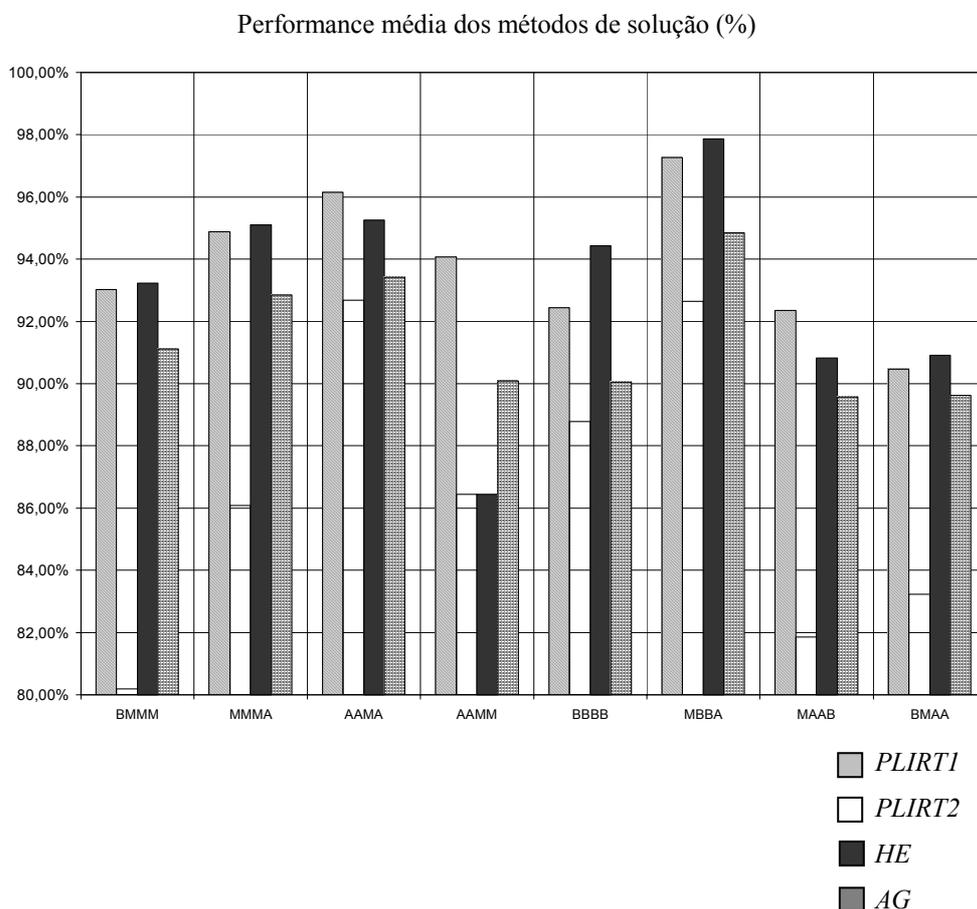


FIGURA 7.25: Performance média dos métodos de solução, em porcentagem do limite superior, para os casos com baixos níveis de itens de pedidos diferentes a programar

Como foi possível avaliar nos casos experimentais isolados, realmente o modelo *PLIRT2* apresentou uma média de performance inferior que os outros modelos para estes casos experimentais. É importante observar a performance superior apresentada pelo modelo *HE*, principalmente nos casos experimentais dos cenários com baixa concorrência por recursos produtivos, onde apresentou performance superior até mesmo ao limite inferior, se aproximando sensivelmente do limite superior. Deve-se ressaltar também a boa performance apresentada pelo modelo *AG* ficando, na maior parte dos cenários, apenas ligeiramente inferior ao modelo *HE*.

³⁴ Em torno de 200 itens de pedidos diferentes

Já na *figura 7.26* é possível analisar esta média de performance para os casos experimentais com um nível médio de itens de pedido em aberto³⁵.

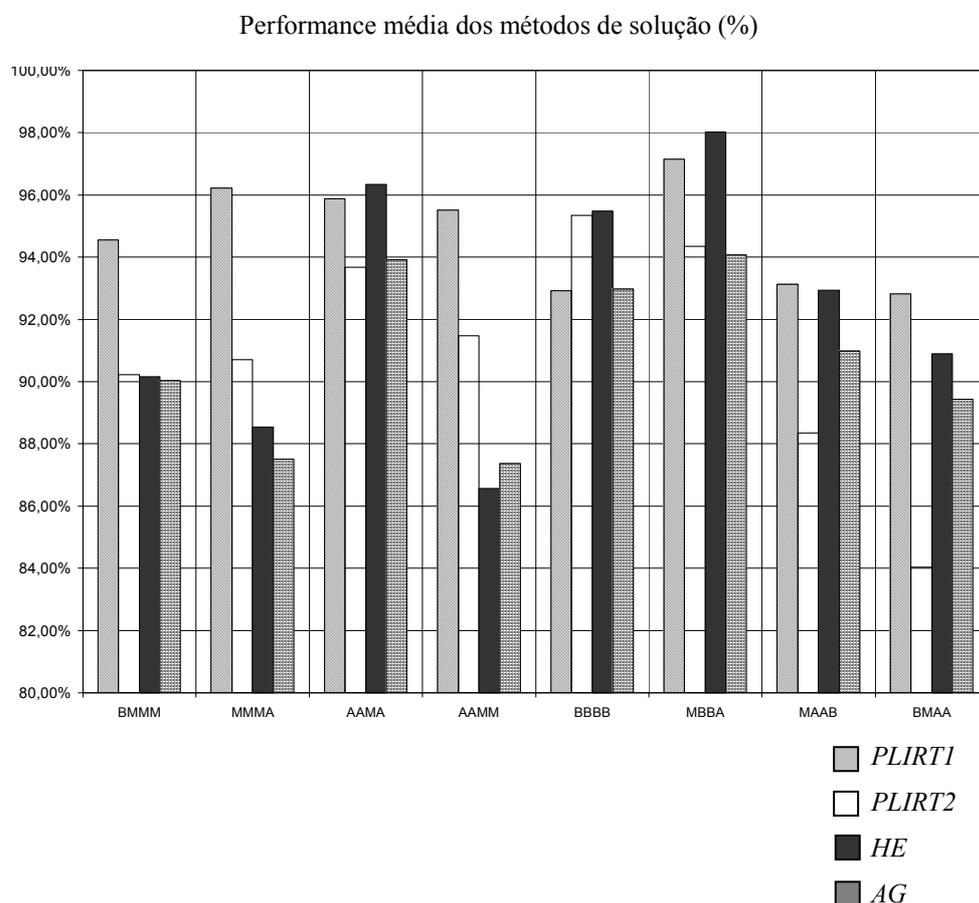


FIGURA 7.26: Performance média dos métodos de solução, em porcentagem do limite superior, para os casos com níveis médios de itens de pedidos diferentes a programar

A *figura 7.26* permite realizar uma importante avaliação quanto aos métodos de solução, como será visto no próximo capítulo, pois a maioria das fundições de mercado analisadas trabalham com carteiras de pedidos em aberto com um número de itens diferentes em torno de 450, o que mostra a importância dos resultados apresentados pelos métodos de solução para estes casos experimentais. Vale ressaltar, novamente, as excelentes performances apresentadas pelo modelo *HE* com diâmetro 3, apesar do modelo *PLIRT2* também ter apresentado performance superior em vários cenários experimentais, principalmente os cenários com concorrência média pelos recursos produtivos com peças de complexidade média ou baixa. Enquanto que nos

³⁵ Em torno de 500 itens de pedidos diferentes

cenários com extremos de baixa ou alta concorrência por recursos produtivos o modelo *HE* se sobressai, por fim, o modelo *AG* apresentou performance razoável indistintamente em todos os cenários.

Na *figura 7.27* é possível analisar a performance média apresentada pelos métodos de solução para os casos experimentais com um alto nível de pedidos diferentes em aberto³⁶.

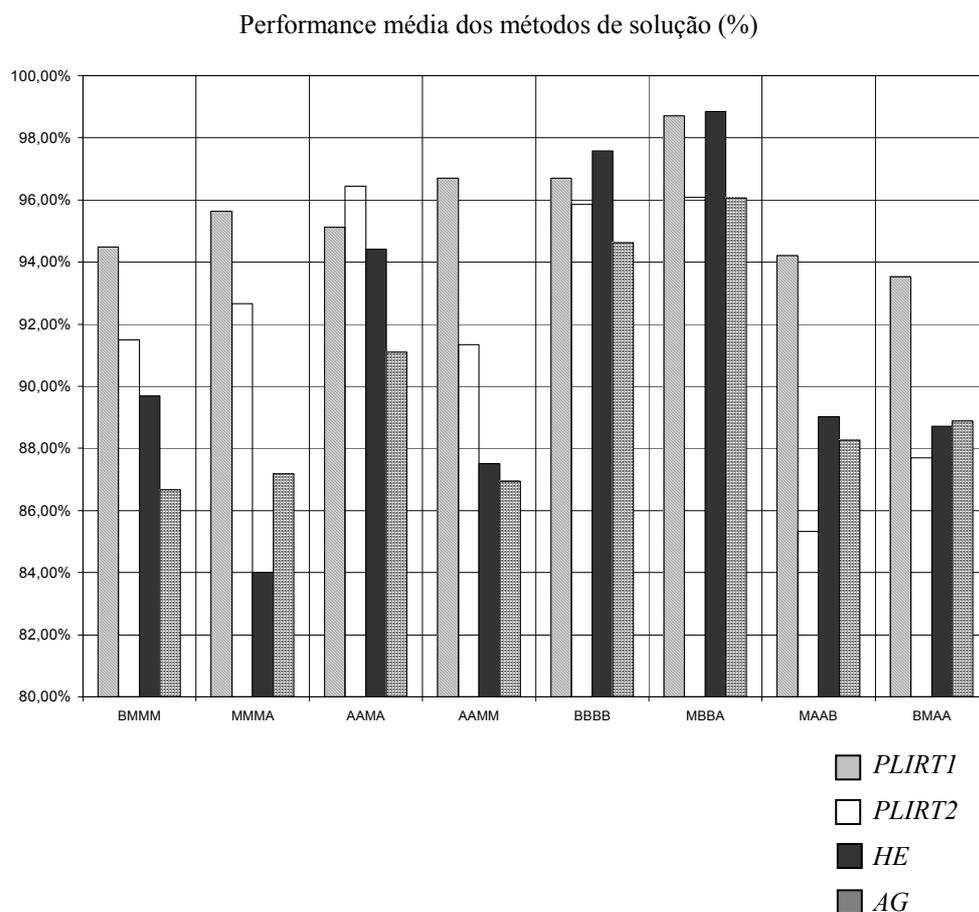


FIGURA 7.27: Performance média dos métodos de solução, em porcentagem do limite superior, para os casos com níveis altos de itens de pedidos diferentes a programar

Com base na *figura 7.27* pode-se concluir que, em situações envolvendo em torno de 700 itens de pedidos diferentes o método de solução *HE* com diâmetro 3 continua fornecendo boas soluções. Por outro lado, o modelo *PLIRT2* apresenta uma performance superior principalmente nos cenários com concorrência média e alta por recursos produtivos, por outro lado, o modelo *PLIRT2* continua com muita dificuldade

³⁶ Em torno de 700 itens de pedidos diferentes

nos cenários com itens produtivos complexos. Já o modelo *AG*, surpreendentemente, apresenta excelentes resultados para os cenários com itens de pedidos complexos, superando, pela primeira vez, todos os modelos analisados no cenário “BMAA”.

Por fim, a *figura 7.28* traz a performance média dos métodos de solução para os casos experimentais com um nível muito alto de itens de pedido em aberto³⁷.

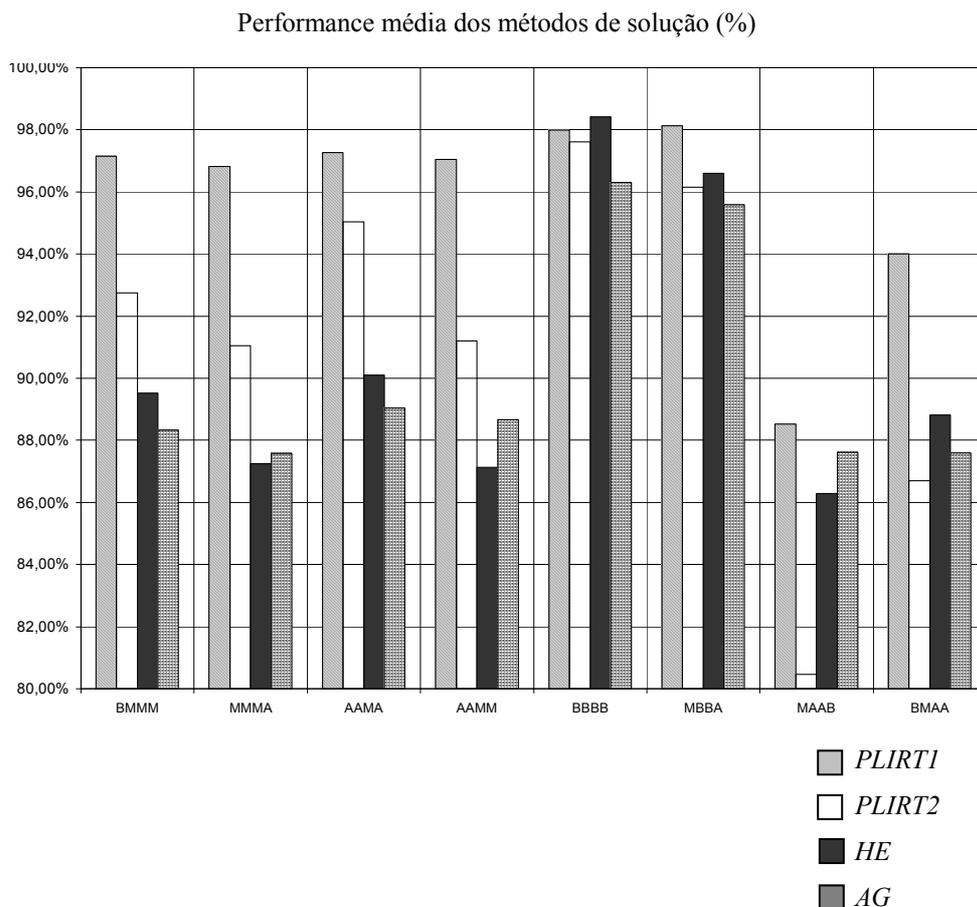


FIGURA 7.28: Performance média dos métodos de solução, em porcentagem do limite superior, para os casos com níveis altos de itens de pedidos diferentes a programar

A *figura 7.28* mostra o maior potencial de performance do modelo *PLIRT2* em situações de produção envolvendo em torno de 1000 itens de pedidos diferentes em aberto. Enquanto que o modelo *HE* apresenta um desempenho inferior nestas situações. Por outro lado, em cenários com itens de pedido complexos o modelo *PLIRT2* continua com performance inferior, enquanto o modelo *AG* alcança resultados satisfatórios junto com o modelo *HE*.

³⁷ Em torno de 1000 itens de pedidos diferentes

7.3.11 Performance média geral dos métodos de solução para cada cenário analisado

A figura 7.29 permite analisar a performance média apresentada em cada método de solução para cada cenário experimental.

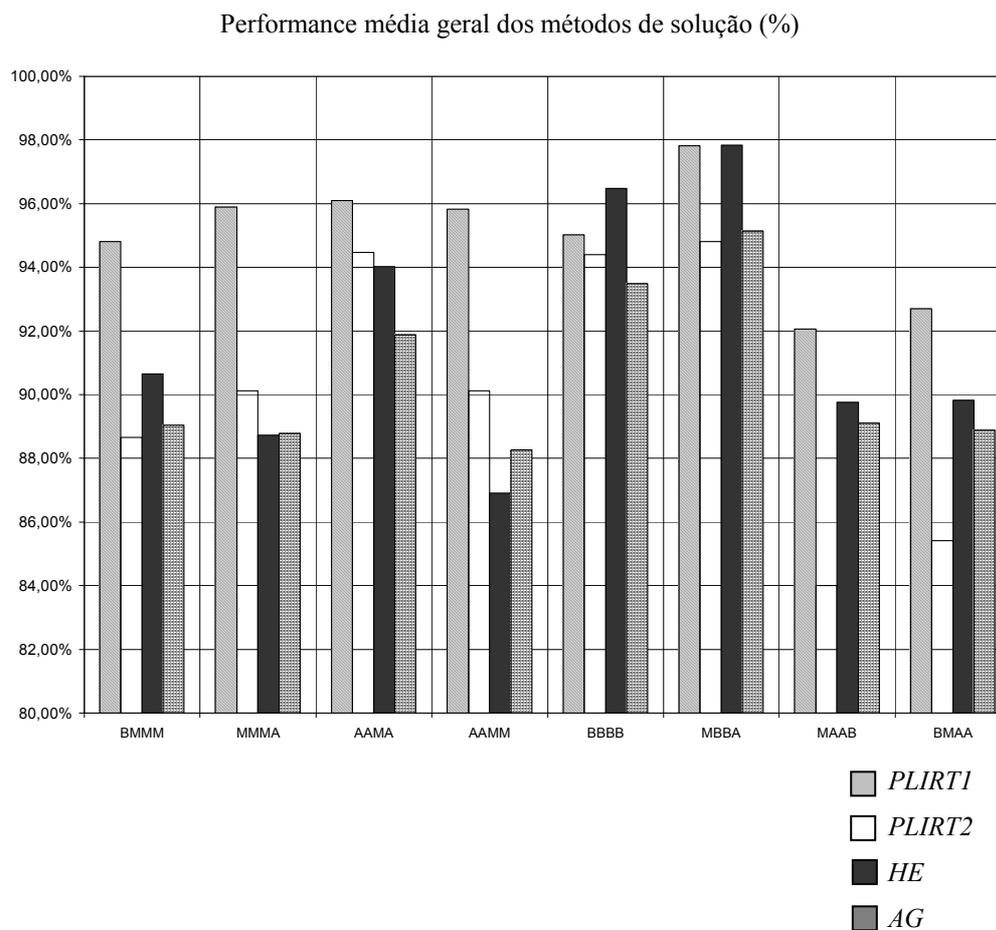


FIGURA 7.29: Performance média geral dos métodos de solução, em porcentagem do limite superior

Como é possível analisar na *Figura 7.29*, o método de solução para o modelo de programação matemática *PLIRT2* apresentou, em média, uma performance melhor nos cenários “MMMA”, “AAMA” e “AAMM”. Estes cenários são característicos por possuírem um nível médio a alto de consumo dos recursos produtivos, mas com itens de pedido menos complexos, sendo que, estes itens de pedidos estão mais concentrados em poucas ligas metálicas.

Já o modelo *HE*, como pode ser analisado na *Figura 7.28*, apresentou performances médias superiores nos cenários “BMMM”, “BBBB”, “MBBA”, “MAAB”

e “BMAA”. Estes cenários são caracterizados principalmente por apresentarem índices baixos a médios de consumo dos recursos produtivos. Pode-se analisar, também, que em situações com baixo consumo de recursos o modelo *HE* terá potencial de apresentar melhores soluções. Já em cenários com consumos médios ou altos destes recursos, as performances apresentadas pelo modelo *HE* só serão superiores ao modelo *PLIRT2* caso os itens de pedidos sejam mais complexos e/ou caso estes itens de pedidos estejam menos concentrados em poucas ligas metálicas.

Quanto ao modelo *AG*, como pode ser visto na *Figura 7.28*, apesar de não ter apresentado performance média superior em nenhum cenário analisado, poderá superar o modelo *HE* em cenários com alta competição por recursos produtivos, com itens complexos e concentrados em poucas ligas metálicas. Por fim, apesar das diferenças de performance observadas, os três métodos de solução dos modelos propostos apresentaram resultados satisfatórios para a maioria dos cenários analisados.

Outra importante análise sobre os experimentos realizados é a variabilidade apresentada pelos métodos de solução, pois permite avaliar o quanto estes métodos estão sujeitos a variações quando aplicados em situações diversas. Para isto, na *figura 7.30* está exposto o desvio-padrão apresentado pelos diferentes métodos de solução em cada cenário experimental.

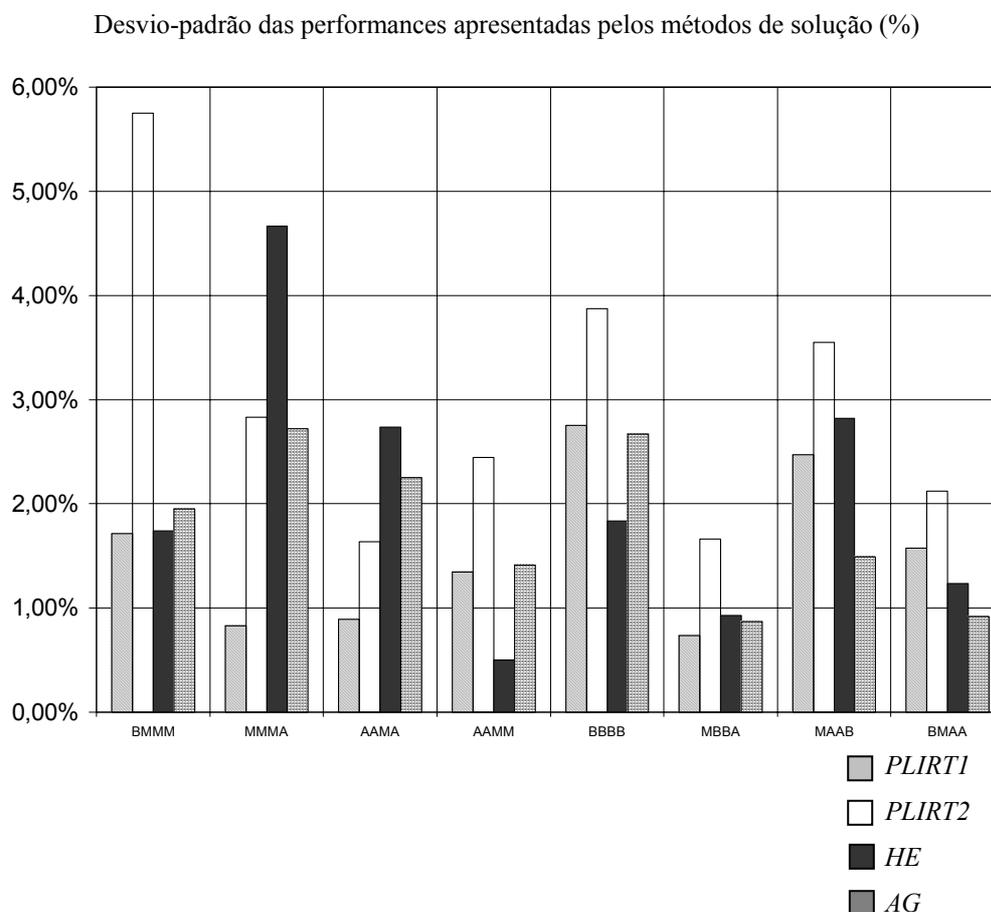


FIGURA 7.30: Desvio-padrão dos métodos de solução para cada cenário experimental

A análise da *figura 7.30* mostra que o método de solução para o modelo de programação matemática *PLIRT2* apresentou, no geral, a maior variabilidade. Este fato pode ser parcialmente explicado devido a dificuldade apresentada pelo método nos casos experimentais com baixos níveis de itens de pedido. O método *HE*, por sua vez, apresentou maior variabilidade em cenários com maior competitividade por recursos produtivos e alta concentração dos itens em poucas ligas metálicas. Por fim, o método *AG* foi o que apresentou menor variabilidade geral, confirmando a robustez do método.

7.4 – Conclusão

Procurou-se, com base no ambiente experimental simulado, manter uma proximidade com a realidade do ambiente produtivo das fundições de mercado. Para isto, foi realizado o teste exaustivo de situações práticas possíveis de se acontecer na realidade de uma indústria deste tipo.

Desta forma, os resultados experimentais puderam confirmar a aplicabilidade dos modelos *PLIRT2*, *HE* e *AG*, em situações reais do processo de elaboração da programação da produção em fundições de mercado, sob a forma de um SAD, disponibilizando opções de modelos adequados às diferentes situações possíveis de acontecer em um ambiente produtivo real deste setor industrial.

No geral, os experimentos revelaram uma ligeira vantagem do modelo *HE* com diâmetro 3, apesar que, em situações específicas, os modelos *PLIRT2* e *AG* também apresentaram resultados superiores. No geral, os métodos de solução, principalmente, para o modelo *HE* com diâmetro 3 e o modelo *AG*, apresentaram tempos viáveis de solução e passíveis de promover interatividade com o tomador de decisões, sem sacrificar a eficiência do método. Já o modelo *PLIRT2*, apesar de pouco provável, poderá apresentar tempos de solução desconfortáveis.

Considerando as incertezas existentes no ambiente produtivo das fundições de mercado, principalmente quanto às estimativas de consumo das operações produtivas, é de se esperar que pequenas diferenças de performance obtidas pelos métodos de solução possam ser desconsideradas quando aplicados à realidade deste setor industrial.

Uma característica importante do modelo *HE* para a aplicação sob a forma de um sistema de apoio à decisão é a previsibilidade apresentada em seus tempos de solução, de forma que, em uma aplicação real, dependendo das características da situação de decisão, é possível estimar com boa precisão qual será o tempo de solução do método. Este tipo de estimativa proporciona conforto ao tomador de decisões. Já os modelos *PLIRT2* e *AG* possuem a vantagem de sofrer menos a influência do número de itens de pedido diferentes em aberto, por outro lado, principalmente o método de solução para o modelo *PLIRT2*, poderá necessitar de tempos de solução maiores.

É importante frisar também o potencial de aplicabilidade do modelo *AG*, uma vez que a performance do método de solução para este modelo depende da adequada configuração de seus parâmetros de solução, como, por exemplo, as configurações das taxas de “*crossover*” e “*mutação*” e do número de gerações. Desta forma, a aplicação do modelo *AG* em situações específicas poderá contar com um estudo refinado da configuração dos parâmetros de seu método de solução, visando explorar melhor as características de uma situação produtiva particular, podendo, desta

forma, vir a apresentar resultados superiores, quando comparados com os outros modelos de solução, enquanto que, por exemplo, o modelo *HE* é mais limitado quanto às possibilidades de parametrização de seu método de solução.

Por fim, os testes exaustivos puderam confirmar a robustez e viabilidade de aplicação em situações reais dos modelos *HE* diâmetro 3, *AG* e *PLIRT2* com tempo de solução de 360 segundos, sob a forma de um sistema de apoio à decisão.

8 – ANÁLISE DA ADEQUAÇÃO E VIABILIDADE DO SISTEMA PROPOSTO NAS FUNDIÇÕES DE MERCADO DO INTERIOR DO ESTADO DE SÃO PAULO

8.1 – Introdução

Este capítulo tem por objetivo avaliar a adequação do sistema proposto de apoio à decisão para elaboração da programação da produção ao ambiente produtivo das fundições de mercado do interior do estado de São Paulo, assim como realizar uma avaliação inicial de sua viabilidade de aplicação prática, considerando a realidade deste setor industrial. Para isto, tomando por base as fundições de mercado que participaram do “*survey*” inicial realizado por FERNANDES & LEITE (2002), que originou este trabalho, foram selecionadas as indústrias mais representativas deste setor para realizar uma avaliação “*in loco*”.

8.2 – Amostragem E Métodos

O “*survey*” inicial realizado por FERNANDES & LEITE (2002) contou com uma amostra de 30 indústrias de uma população conhecida, na época da realização da referida pesquisa, de 61 fundições de mercado atuando no interior de São Paulo. Tomando por base a mesma amostra utilizada por FERNANDES & LEITE (2002), buscou-se selecionar uma amostra representativa dos principais pólos deste setor industrial no interior do estado de São Paulo, quais sejam, os pólos das cidades de São Carlos, Indaiatuba, Itú e Piracicaba. Desta forma, foram selecionadas 2 fundições de mercado mais representativas em cada um destes pólos, totalizando uma amostra de 8 indústrias.

Quanto à metodologia empregada, aplicou-se um questionário estruturado versando sobre as características principais de seu sistema produtivo, envolvendo: forma de produção, variabilidade da produção, forma de elaboração da programação da produção, envolvendo, por sua vez, restrições e objetivos considerados, e também, principais prioridades de melhorias do ambiente produtivo que estas empresas desejam, decorrente de um método mais sofisticado de elaboração da

programação da produção. O questionário foi elaborado de tal forma que fosse possível avaliar a adequação do sistema proposto na indústria pesquisada, assim como realizar uma avaliação inicial da viabilidade de sua aplicação prática. Esta pesquisa foi realizada “*In loco*”, pelo autor desta tese, em cada indústria selecionada. A seguir a amostra de indústrias selecionada e os resultados obtidos são apresentados.

8.3 – Análise Da Amostra Selecionada

Com base na *tabela 8.1*³⁸ é possível realizar uma avaliação geral das características da produção das indústrias pesquisadas.

TABELA 8.1: Visão geral das características produtivas das indústrias pesquisadas

Ind.	Número Funcionários		Forma de produção	Ordem de grandeza dos lotes de itens iguais (em %)					Variad. itens dist. em uma cart. aberta	Núm. Ligamet. em uma cart. aberta	Etapas consideradas atualmente para a elab. Programação Produção	Horiz. (dias) consid. Atualm Prog. Prod.	Produção. Inédit. em uma cart. Aberta (%)
	Prod	Adm		1	2 a 10	11 a 100	101 a 500	>500					
A	80	13	C.P. ³⁹	60	40	-	-	-	200 a 500	20	Vaz.	1	25
B	160	20	C.P.	5	10	80	5	-	300 a 800	6	Vaz.	1	15
C	110	80	C.P. e Est. ⁴⁰	-	2	10	60	28	250 a 300	2	Mold. e Vaz.	30 ⁴¹	3
D	35	4	C.P. e Est. ⁴²	10	30	60	10	-	50 – 300	2	Mold., Vaz. e Acab. ⁴³	15 ⁴⁴	5
E	41	9	C.P.	5	54	20	10	1	100 – 300	10	Vaz.	1	15
F	70	20	C.P.	1	5	70	20	4	400 – 600	30	Vaz.	1	10
G	24	8	C.P.	10	80	10	-	-	200 – 300	40	Vaz.	1	30
H	70	10	C.P.	1	5	20	24	50	100 – 500	24	Vaz.	1	5

³⁸ Visando preservar as informações fornecidas pelas indústrias pesquisadas, não será realizada a identificação destas indústrias

³⁹ C.P. (Toda a produção é realizada contra pedido)

⁴⁰ C.P. e Est. (A maior parte da produção é realizada contra pedido e uma parte, em torno de 40% da produção, é realizada para estoques)

⁴¹ Com revisão diária

⁴² C.P. e Est. (A maior parte da produção é realizada contra pedido e uma parte, em torno de 20% da produção, é realizada para estoques)

⁴³ É realizado uma consideração qualitativa das etapas de moldagem e acabamento, avaliando os gargalos existentes nestas etapas e selecionando, para programar, itens de pedidos que utilizem menos as operações gargalos

⁴⁴ Com revisão diária

Como é possível analisar com base na *tabela 8.1*, de acordo com o número de funcionários, as indústrias deste setor são compostas, basicamente, por pequenas e médias indústrias⁴⁵.

Quanto ao modo de produção, em quase sua totalidade, nas indústrias pesquisadas, a produção é realizada contra-pedido, envolvendo produtos diversificados. De acordo com a análise da *tabela 8.1*, 11,5% da produção nas indústrias pesquisadas envolvem lotes de produção unitários, enquanto 28,3% envolve lotes de 2 a 10 peças iguais e 33,8% da produção envolve lotes de 11 a 100 peças iguais, já 16,1% da produção envolve lotes entre 101 e 500 peças iguais, enquanto lotes de produção envolvendo mais que 500 peças representam 10,4% da produção nas indústrias pesquisadas.

Quanto à diversidade de itens em uma carteira de pedidos em aberto, em média, as indústrias analisadas apresentaram uma variação entre 200 a 450 produtos diferentes em uma mesma carteira de pedidos em aberto. Já o grau de ineditismo dos produtos fabricados, ou seja, produtos que estão sendo fabricados pela primeira vez, também é relativamente alto, ficando em média, para as empresas pesquisadas, em torno de 13,5% de toda a sua produção. Por fim, quanto ao número de ligas metálicas diferentes, em média, estas indústrias trabalham com 18 ligas metálicas diferentes.

Desta forma, é possível, para as indústrias pesquisadas, avaliar resumidamente as características de sua produção, ou seja, 73,5% da produção envolvem lotes com até 100 peças iguais provenientes de uma carteira de pedidos com uma faixa, em média, de 200 a 450 produtos diferentes, sendo que, em média, 13,5% destes pedidos são produtos que nunca foram fabricados antes por estas indústrias, pedidos estes que podem envolver mais de 18 ligas metálicas diferentes.

As análises realizadas quanto à forma e diversidade da produção permitem traçar um panorama geral para a produção deste setor industrial e justificar sua complexidade produtiva, assim como as dificuldades enfrentadas para gerir sua produção, principalmente quanto ao processo de elaboração da programação da produção, o que pôde ser comprovado, nas indústrias pesquisadas, nas etapas

⁴⁵ Apesar da amostra selecionada não permitir generalização estatística, esta afirmação pode ser feita com base no “*survey*” realizado por FERNANDES & LEITE (2000)

consideradas atualmente na programação da produção e também, no horizonte de tempo atual para este programa.

Apenas duas indústrias pesquisadas, “C” e “D”, realizam algum tipo de consideração das etapas de moldagem e acabamento para compor o programa de produção. Nestas indústrias, toma-se por base uma análise qualitativa dos gargalos nas operações produtivas da etapa de moldagem e, no caso da indústria “D”, também de acabamento, escolhendo itens de pedidos, na carteira de pedidos em aberto, que poderão minimizar estes gargalos⁴⁶.

Já a grande maioria das indústrias pesquisadas, “A”, “B”, “E”, “F”, “G” e “H”, utilizam o mesmo procedimento para elaborar a programação de produção, que pode ser descrito resumidamente da seguinte forma: são emitidas continuamente ordens de produção para a etapa de moldagem, estas ordens de produção tomam por base a carteira de pedidos em aberto selecionando os itens de pedidos prioritariamente de acordo com as respectivas datas de entrega, tipos de cliente e retorno financeiro. É importante frisar que as características técnicas do item de pedido como, por exemplo, tipo de liga metálica, consumo das operações produtivas e peso, na maioria das empresas pesquisadas, praticamente não influenciam, ou influenciam muito pouco, esta primeira emissão de ordens de fabricação. Em um segundo momento, com base nos moldes disponíveis prontos para vazarem, é realizada a elaboração da programação da produção, considerando apenas a etapa de vazamento, principalmente com o intuito de obedecer as restrições produtivas envolvidas com esta etapa. Este procedimento de elaboração da programação da produção reflete no horizonte de tempo considerado, que, na maioria das indústrias pesquisadas, é de um dia, sendo realizado, no geral, imediatamente antes de se iniciar o dia de produção.

As duas únicas indústrias que apresentaram pequenas variações neste procedimento de elaboração da programação da produção, “C” e “D”, são justamente as indústrias com menores diversidades em ligas metálicas empregadas na produção. A justificativa para este fato pôde ser obtida “*In loco*” nestas indústrias. Uma vez que é pequena a variação de ligas metálicas, as restrições de ordenamento de ligas metálicas

⁴⁶ Este procedimento é realizado baseado principalmente na experiência do gerente de produção, não sendo empregado informações formais sobre os consumos das operações produtivas pelos itens de pedidos e não sendo empregado também um sistema formal para cálculo e projeções de gargalos produtivos, ou seja, utiliza-se apenas o conhecimento “implícito” do gerente de produção sobre o processo produtivo

nos fornos e do número de corridas de fornos disponíveis não necessitam ser consideradas. Nestas indústrias os fornos trabalham de forma praticamente contínua, sendo retirada apenas uma parcela do metal líquido fundido dos fornos e completando imediatamente o forno com metal sólido, diminuindo assim o tempo de fundição e permitindo trabalhar com um fluxo praticamente contínuo de metal líquido. Nestas indústrias a preocupação maior é com a etapa de moldagem, visando manter um nível mínimo de itens prontos para vazarem de modo a utilizar o máximo da capacidade de fundição na etapa de vazamento. Desta forma, as indústrias “C” e “D” elaboram uma programação da produção envolvendo não só a etapa de vazamento, mas também a etapa de moldagem e, para a indústria “D”, envolve também a etapa de acabamento⁴⁷, permitindo praticar um horizonte de tempo maior para compor este programa, apesar de que, é realizada uma revisão diária do programa da produção destas indústrias.

A *tabela 8.2* permite ter uma visão geral das principais restrições atualmente consideradas durante o processo de elaboração da programação da produção nas indústrias pesquisadas. É importante frisar que nenhuma indústria considera atualmente as restrições de capacidade das operações produtivas de moldagem e acabamento na elaboração do programa de produção⁴⁸.

TABELA 8.2: Restrições atualmente consideradas para a elaboração da programação da produção

Indústria	Restrições atualmente consideradas para a elaboração da programação da produção		
	Número Máximo Corridas por Forno	Número Máximo Corridas por Reator	Ordenamento Ligas metálicas nos fornos
A	Sim	Sim	Sim
B	Sim	Sim	Sim
C	Não	Não	Não
D	Não	Não	Não
E	Sim	Sim	Sim
F	Sim	Sim	Sim
G	Sim	Sim	Sim
H	Sim	Sim	Sim

É possível perceber, com base na *tabela 8.2*, a importância de se considerar as restrições de corridas para os fornos e para os reatores, assim como as restrições de ordenamento das ligas metálicas em cada forno. Já a *tabela 8.3* permite

⁴⁷ A indústria “C” possui a etapa de acabamento terceirizada

⁴⁸ Como já foi discutido, as empresas “C” e “D” realizam apenas uma consideração qualitativa dos gargalos produtivos nas etapas de moldagem e acabamento

analisar os objetivos atualmente considerados pelos gerentes de produção no processo de elaboração da programação da produção.

TABELA 8.3: Objetivos atualmente considerados para a elaboração da programação da produção

Indústria	Objetivos atualmente consideradas para a elaboração da programação da produção					
	Max. Cap. Fundição	Buscar fundir em seq. ligas que agilizem o proc. Fund.	Minim. Estoques em processo na moldagem	Minim. Estoques em processo no acabamento	Buscar atender clientes preferenciais	Minim. Dos atrasos nos prazos de entrega
A	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim
B	Sim	Não	Não	Não	Sim	Sim
C	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Sim
D	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
E	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim
F	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim
G	Sim	Não	Não	Não	Sim	Sim
H	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim

Com base na *tabela 8.3* é possível avaliar que a totalidade das indústrias pesquisadas objetiva, atualmente, maximizar a capacidade de fundição, ou seja, a capacidade, em peso, de produção de produtos fundidos. Já 50% das indústrias pesquisadas procuram, atualmente, fundir em seqüência, em um mesmo forno, ligas metálicas que agilizem o processo de fundição. Considerando que 25% das indústrias pesquisadas não necessitam se preocupar com este objetivo, ou seja, as indústrias “C” e “D” que fundem apenas duas ligas metálicas diferentes, pode-se perceber a importância, já atualmente, de se considerar este objetivo na elaboração de um programa de produção, uma vez que as empresas “B” e “G”, informaram que gostariam de estar considerando este objetivo no processo de elaboração da programação da produção.

Quanto à minimização dos estoques nas etapas de moldagem e acabamento, somente as empresas “C” e “D”, como já discutido anteriormente, procuram, ainda que informalmente, manter reduzido estes níveis. Todas as outras indústrias pesquisadas não realizam atualmente qualquer tipo de consideração dos estoques em processo, nas etapas de moldagem e acabamento, para compor um programa de produção.

Por fim, a *tabela 8.3* permite avaliar os principais direcionadores para o processo atual de elaboração de um programa da produção nas indústrias pesquisadas, quais sejam, atender a clientes preferenciais e minimizar os atrasos nos prazos de entrega.

Foi colocada uma situação, para as indústrias pesquisadas, em que as mesmas poderiam contar com um processo mais sofisticado de elaboração da programação da produção. Desta forma, considerando esta situação hipotética, questionou-se, para as indústrias pesquisadas, quais eram as melhorias, para o processo de produção, mais desejadas, provenientes deste procedimento sofisticado de elaboração da programação da produção. Foi solicitado também que fosse atribuído um grau de 1 a 5 de acordo com a prioridade para cada indústria, desta melhoria desejada. Estas informações estão disponíveis na *tabela 8.4*.

TABELA 8.4: Grau de prioridade para cada melhoria desejada decorrente de um processo mais elaborado de programação da produção

Indústria	Grau de prioridade para cada melhoria desejada com um processo mais sofisticado de prog. da produção					
	Estimar prazos entrega realísticos	Diminuir o tempo de produção	Diminuir os estoques em processo	Otimizar o uso dos recursos na etapa de Vaz.	Otimizar o uso dos recursos nas etapas de mold. e acab.	Aumentar a flex. De produção nas etapas de Vaz. E Acab.
A	5	3	3	5	5	3
B	5	3	2	5	4	2
C	5	3	0	5	5	4
D	5	3	3	4	4	2
E	5	5	5	5	5	3
F	5	3	4	4	4	5
G	5	5	5	5	5	3
H	5	5	5	5	5	2

Com base na *tabela 8.4* é possível avaliar a importância de se estimar prazos de entrega mais realísticos, de forma que, todas as indústrias pesquisadas, apontaram este desejo de melhoria como de prioridade máxima.

Percebe-se também, nas indústrias pesquisadas, o desejo de se utilizar mais racionalmente o uso dos recursos produtivos. De forma que, otimizar o uso dos recursos na etapa de vazamento apresentou um grau médio de prioridade igual a 4,8, enquanto otimizar o uso dos recursos produtivos nas etapas de moldagem e acabamento obteve um grau médio de prioridade de 4,6.

O tempo de produção também foi apontado como um importante desejo de melhoria decorrente de um processo mais sofisticado de elaboração da programação da produção, obtendo, para as indústrias pesquisadas, um grau médio de prioridade de 3,8. Já para a redução dos estoques em processo obteve-se um grau médio de prioridade de 3,4. Por fim, aumentar a flexibilidade de produção nas etapas de moldagem e acabamento apresentou um grau médio de prioridade de 3,0.

Algumas indústrias expressaram, ainda que informalmente, durante a aplicação do questionário, algumas expectativas decorrentes de um processo mais sofisticado de elaboração da programação da produção, dentre estas expectativas é possível citar: a possibilidade de aplicação de uma melhor logística de obtenção de matéria-prima e também da possibilidade de aplicação de um levantamento mais acurado dos custos de produção.

Por fim, foram realizados, para as indústrias pesquisadas, mais dois questionamentos. Primeiramente, questionou-se sobre a disponibilidade atual, por estas indústrias, de algum sistema ou ferramenta computacional para realizar ou auxiliar na tarefa de elaboração do programa de produção. Todas as indústrias pesquisadas não possuíam um sistema ou ferramenta computacional para este fim. As indústrias que possuíam um sistema computacional administrativo, utilizavam uma listagem dos pedidos em aberto, geralmente organizada por tipo de liga metálica e prioridade de entrega, para compor o programa diário de produção. Já as indústrias que não dispunham de um sistema computacional administrativo utilizavam as próprias fichas em papel, dos pedidos em aberto, para compor este programa de produção.

A segunda questão versava, no caso hipotético de se disponibilizar um sistema computacional para elaboração da programação da produção, sobre a viabilidade de um sistema que pudesse automatizar este processo com base apenas em informações técnicas sobre os itens de pedidos. A totalidade das indústrias pesquisadas expressou o receio de que um sistema deste tipo viesse a enrijecer o processo de elaboração da programação da produção, dificultando o atendimento a pedidos urgentes e clientes especiais, além de que, se mostraram receosas quanto à disponibilidade de informações técnicas precisas sobre os itens de pedidos e também sobre o ambiente produtivo que seriam necessárias para operacionalizar um sistema deste tipo.

Por outro lado, quando estas indústrias foram questionadas sobre a possibilidade de um sistema hipotético para elaboração da programação da produção, que permitisse a elaboração desta programação por meio de uma interação continua com o gerente de produção, alterando e influenciando os resultados apresentados, permitindo inserir informações estimadas, baseadas principalmente na experiência do gerente de produção, para substituir informações desconhecidas ou de difícil obtenção, obteve-se

então uma aceitação generalizada, por parte das indústrias pesquisadas, para um sistema deste tipo.

8.4 – Análise Da Adequação E Viabilidade Do Sistema Proposto

Os resultados apresentados permitem avaliar a adequação do sistema proposto a uma amostra representativa das fundições de mercado do interior do estado de São Paulo. Primeiramente, todas as restrições atualmente consideradas, pelas indústrias pesquisadas, para elaboração da programação da produção para a etapa de vazamento são atendidas pelo sistema proposto, assim como todos os possíveis objetivos que atualmente norteiam este processo de programação da produção nestas indústrias.

Quanto aos testes laboratoriais realizados, os mesmos tomaram por base situações produtivas coerentes com as encontradas nas indústrias pesquisadas. Foram realizados testes laboratoriais com carteiras de pedidos em aberto envolvendo de uma centena a até mais de mil itens de pedido diferentes, envolvendo, por sua vez, doze ligas metálicas diferentes.

A diversidade atual de objetivos considerados simultaneamente durante a elaboração de um programa de produção, como foi verificado nas indústrias pesquisadas, assim como o grau de subjetivismo envolvido por estes objetivos, poderá ser convenientemente atendido pelo procedimento de valoração proposto por este trabalho, para os itens de pedido em aberto.

Quanto ao atendimento das prioridades em melhorias desejadas, decorrentes do uso de um sistema de elaboração da programação da produção, a principal prioridade de melhoria, qual seja, a estimativa de prazos de entrega mais realísticos, poderá ser devidamente atendida pelo sistema de controle da produção *PBC* proposto, por meio da aplicação de ciclos únicos de produção. O sistema *PBC* permitirá, também, ampliar consideravelmente o horizonte de programação da produção praticado pela indústria e avaliar com boa precisão o possível ciclo produtivo futuro no qual um item de pedido será programado, permitindo conhecer, por conseguinte, sua possível data de término.

Já a consideração das capacidades dos fornos de fundição, assim como, do número máximo de corridas disponível para cada forno e para cada reator e, também,

as restrições de ordenamento de ligas e das seqüências de ligas que agilizam o processo de fundição, permitem atender à melhoria desejada de utilização da capacidade da etapa de vazamento. Enquanto que, a consideração das estimativas de consumo das operações produtivas pelos itens de pedido em aberto, assim como a consideração das estimativas das capacidades das operações nas etapas de moldagem e acabamento, permitem atender as melhorias desejadas quanto à utilização das capacidades das operações das etapas de moldagem e acabamento.

Por sua vez, o uso de ciclos curtos de produção possibilita uma redução do prazo de entrega dos itens de pedido. Assim como, com o uso de um sistema de produção de ciclo único, é esperado, também, uma redução dos níveis de estoques em processo nas operações produtivas, melhorando, entre outros, o processo de qualidade, por meio de uma menor movimentação e estocagem dos moldes.

É esperada também, em um sistema de controle da produção de ciclo único, a necessidade de maior flexibilidade produtiva, por meio de um intercâmbio entre operações similares ou de uma mesma etapa, sendo sugerido, pelas empresas pesquisadas, este aumento de flexibilidade. Esta necessidade de flexibilidade foi tratada no sistema proposto, de forma que, é possível considerar, no processo de elaboração da programação da produção, o intercâmbio entre operações.

Por fim, a forma de modelagem do processo de elaboração da programação da produção, sob a ótica de um sistema de apoio à decisão, permite a devida interação do sistema com o gerente de produção, permitindo, por sua vez, uma maior flexibilidade de uso e também, a consideração de fatores subjetivos e experiência do tomador de decisões, como sugerido pelas indústrias pesquisadas.

8.5 – Conclusões

A amostra selecionada por este trabalho, de fundições de mercado, permitiu confirmar os direcionadores iniciais, sobre este setor industrial, definido no trabalho de FERNANDES & LEITE (2002), principalmente sobre a complexidade produtiva de seu ambiente produtivo e a falta de sistemas e ferramentas formais para operacionalizar o controle da produção, principalmente para o processo de elaboração da programação da produção.

É possível avaliar, primeiramente por meio da receptividade e abertura para este trabalho, apresentada por estas indústrias, e também pelos resultados obtidos nas indústrias pesquisadas, o interesse das mesmas por um procedimento mais sofisticado de elaboração da programação da produção. Assim como, foi possível avaliar, a falta de soluções em planejamento e controle da produção e, particularmente, para elaboração da programação da produção, disponível atualmente para este setor industrial.

Como pôde ser avaliado nas indústrias pesquisadas, espera-se, por meio de um processo mais sofisticado de elaboração da programação da produção, principalmente, poder trabalhar com prazos de entrega mais realísticos, otimizando o uso dos recursos produtivos, produzindo com prazos de entrega menores por meio de um ambiente produtivo com menos estoque em processo e mais flexível.

Por fim, foi possível verificar “*In loco*” a adequação e viabilidade do sistema proposto, atendendo as principais expectativas destas indústrias, tomando por base uma amostra representativa das fundições de mercado do interior de São Paulo, permitindo, por fim, corroborar a questão de pesquisa principal desta tese, apresentando uma solução efetiva e aplicável para o processo de elaboração da programação da produção em fundições de mercado por meio de um sistema de apoio à decisão.

9 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

9.1 Originalidade E Contribuição

Esta tese tratou da aplicação de sistemas de apoio à decisão à área operacional de ambientes de produção complexos, especificamente, para o processo de elaboração da programação da produção em fundições de mercado.

Em uma análise macro, quanto à originalidade desta tese, não se teve conhecimento de trabalhos similares a este, tratando da aplicação conjunta do sistema de controle da produção *PBC* e sistemas de apoio à decisão para simplificar e viabilizar o processo de elaboração da programação da produção em fundições de mercado.

Em uma análise micro, esta tese é original principalmente pelas seguintes contribuições:

- Proposta de direcionadores para a aplicação de sistemas de apoio à decisão à área operacional da produção em ambientes produtivos complexos.
- Proposta de uma modelagem original de programação matemática, qual seja, o modelo *PLI*, capaz de abranger as principais características de um ambiente produtivo real de uma fundição de mercado quanto à elaboração de uma programação da produção. Foram propostos, também, outros modelos de programação matemática, baseados no modelo *PLI*, que, em detrimento de se alcançar a solução exata para o modelo *PLI*, mas inviável, permite encontrar soluções aproximadas em tempos viáveis sob a ótica de aplicação em um SAD. Dentre estes modelos, foram propostos os modelos *PLIRX* e *PLIRT* que permitem, respectivamente, encontrar os limites superiores e inferiores dos problemas tratados, característica fundamental para se proceder com os experimentos e entender melhor estes problemas e, também, o modelo *PLIA*, que, em conjunto com o modelo *PLIRT*, permitem obter soluções factíveis para a programação da produção em ambientes reais de fundições de mercado, em tempos viáveis, considerando sua aplicação em um sistema de apoio à decisão.
- Proposta de uma modelagem heurística de busca baseada em métodos aproximativos clássicos, especificamente um método conhecido como “*beam search*”, para o processo de elaboração da programação da produção em

funções de mercado, que considera, da mesma forma que *PLI*, as principais características de um ambiente produtivo real de uma função de mercado. Sendo proposto um modelo original de estruturação do processo de elaboração da programação da produção em funções de mercado segundo uma árvore de decisão e um procedimento efetivo para escolha dos vértices mais promissores em cada estágio decisório, além de um algoritmo de solução viável de aplicação no SAD proposto, considerando situações práticas;

- Proposta de uma modelagem original para o processo de elaboração da programação da produção em funções de mercado sob a forma de um algoritmo genético híbrido, assim como a proposta de implementação computacional viável de aplicação no SAD proposto, considerando também situações práticas. Nesta proposta foi apresentada uma estruturação original de uma solução para o problema de programação da produção em funções de mercado na forma de um “indivíduo” composto por dois cromossomos; e,
- Análise comparativa, considerando a solução dos mesmos problemas, de três métodos para otimização com fundamentações distintas, quais sejam: programação matemática, métodos aproximativos clássicos e métodos aproximativos modernos.

Especificamente sobre sistemas de apoio à decisão, este trabalho se esforçou no sentido de caracterizar os requisitos para a aplicação deste tipo de sistema à área operacional de ambientes produtivos, especificamente para apoiar a elaboração da programação da produção, principalmente em ambientes produtivos complexos. Para isto, além da proposta de direcionadores para a racionalização e sistematização do processo decisório, foi proposto, também, uma forma de classificação dos tipos de modelagens decisórias para este fim, além de um esforço no sentido de definir as características importantes a serem consideradas quando da criação destes modelos para serem aplicados sob a ótica de um SAD. Espera-se, com isto, contribuir com a aplicação de sistemas de apoio à decisão à área operacional de outros ambientes produtivos complexos.

É importante citar, também, o esforço realizado no sentido de contribuir com o aumento do rigor científico dos trabalhos no campo da engenharia de produção,

por meio da análise das tendências, alternativas e direcionadores para estruturar um projeto de pesquisa nesta área.

Por fim, este trabalho tornou viável o processo de elaboração da programação da produção, de forma efetiva, em fundições de mercado. Tornando possível, por meio da disponibilização de vários modelos e de seus respectivos métodos de solução, a aplicação prática dos resultados desta tese em um setor industrial ávido por soluções direcionadas ao seu ambiente produtivo.

Desta forma, o objetivo principal desta tese, qual seja, propor um suporte efetivo à área operacional de um ambiente produtivo complexo, especificamente para a programação da produção em fundições de mercado, por meio da aplicação de sistemas de apoio à decisão, pôde ser alcançado e sua questão de pesquisa principal corroborada. Justificando, assim, seu caráter científico, uma vez que este trabalho mostrou sua relevância contemporânea, principalmente quanto à atualização, novidade e originalidade.

9.2 Principais Conclusões Sobre Os Testes Computacionais

Os testes computacionais realizados visaram avaliar a aplicabilidade prática dos modelos decisórios propostos para a elaboração da programação da produção em fundições de mercado sob a ótica de um SAD. Para isto, foram criados experimentalmente 32 casos experimentais, divididos em 8 cenários produtivos distintos visando retratar com fidelidade situações características do ambiente produtivo das fundições de mercado.

A avaliação das performances apresentadas pelos modelos decisórios propostos tomou por base os limites superiores e inferiores de solução para cada caso experimental, fornecidos, respectivamente, pelos modelos *PLIRX* e *PLIRT1*.

Dentre os resultados apresentados por estes testes pode-se citar resumidamente: quanto menor for a competição por recursos produtivos maior será a performance apresentada pelo modelo heurístico *HE*, apresentando, quando se tem baixos níveis de competição por recursos, performance superiores que os modelos *PLIRT2* e *AG*. Quando se consideram níveis médios a altos de competição por recursos o modelo heurístico *HE* apresentará performance superior ao modelo de programação matemática *PLIRT2* somente em situações de elevada complexidade dos itens de

pedidos e/ou de maior distribuição dos itens de pedido pelas ligas metálicas que a indústria trabalha. O modelo *AG*, por outro lado, não apresentou grandes variações de performance nos diferentes cenários, não sentindo, como os outros modelos, impacto considerável das mudanças das características do ambiente produtivo, o que confirma a robustez de seu método de solução e sua vantagem em encontrar soluções, em problemas complexos, próximas ao ótimo. Desta forma, o modelo *AG* conseguiu performances superiores nos cenários produtivos onde os modelos *HE* e *PLIRT2* tiveram mais dificuldade, quais sejam, os ambientes de média ou alta competição por recursos, com itens de produção de complexidade maior. Por fim, os três modelos se completam quando aplicados em um SAD, apresentando respostas distintas para as várias situações decisórias possíveis de acontecer na realidade de um ambiente de produção de uma fundição de mercado.

A *figura 9.1* permite avaliar a performance média geral apresentada pelos métodos de solução para os modelos propostos em todos os casos experimentais avaliados.

Performance média geral apresentada pelos métodos de solução para os modelos propostos (%)

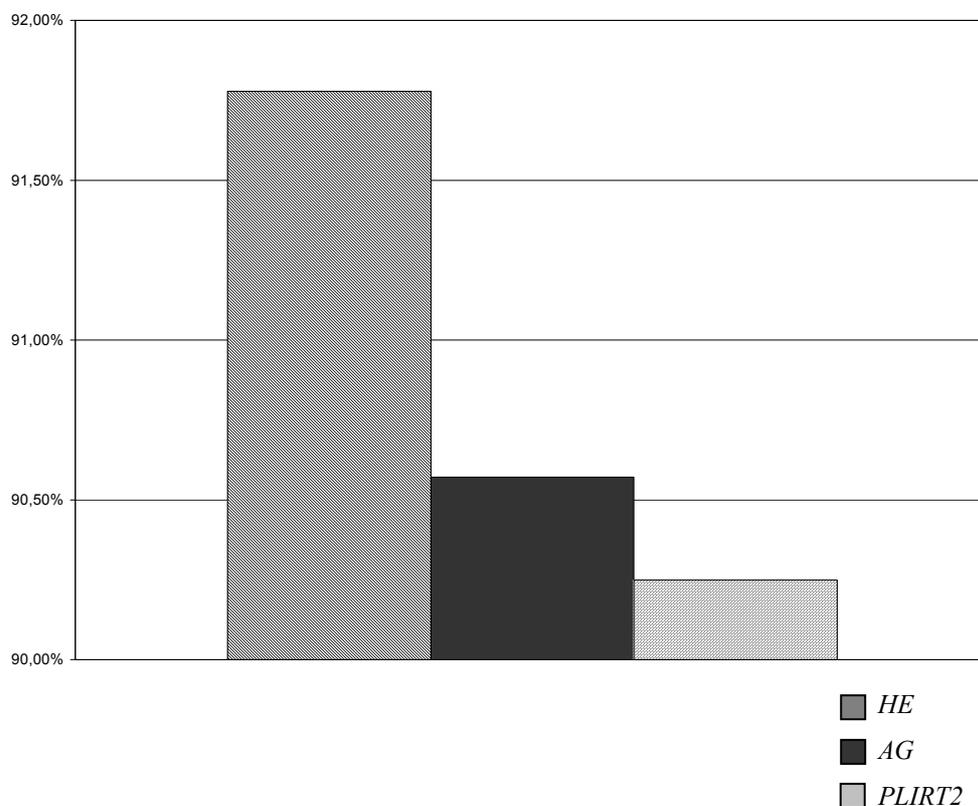


FIGURA 9.1: Performance média geral dos métodos de solução para os modelos propostos expressa em porcentagem alcançada do limite superior

Como pode ser avaliado na *figura 9.1*, o método de solução para o modelo *HE* apresentou a melhor performance media geral, dentre os modelos considerados. É importante ressaltar, com base nestes resultados, que o procedimento para escolha dos vértices em cada estágio decisório empregado na implementação proposta por este trabalho do método “*beam search*” poderá apresentar, também, excelentes resultados, quando aplicado em outros tipos de problemas onde a distância entre a origem e o extremo da árvore decisória seja relativamente curta, como é o caso da programação da produção em fundições de mercado.

Quanto aos outros modelos decisórios, a *figura 9.1* revela que as performances apresentadas pelos modelos *PLIRT2* e *AG* foram, em média, apenas ligeiramente inferior, sendo que, a análise detalhada de cada caso experimental mostra que, em algumas situações, estes modelos poderão também apresentar performances superiores.

Já a a *figura 9.2* mostra a variabilidade geral dos métodos de solução em todos os cenários e casos experimentais, onde pode-se perceber que o método de solução para o modelo *AG* foi o que apresentou menor variabilidade geral, confirmando a robustez de seu método de solução, apesar que, principalmente para o método de solução para o modelo *HE* a variabilidade apresentada não ser significativamente maior. Enquanto o método de solução para o modelo *PLIRT2* é o que apresentou maior variabilidade, o que sugere que a situação de decisão deverá ser convenientemente analisada para sua aplicação.

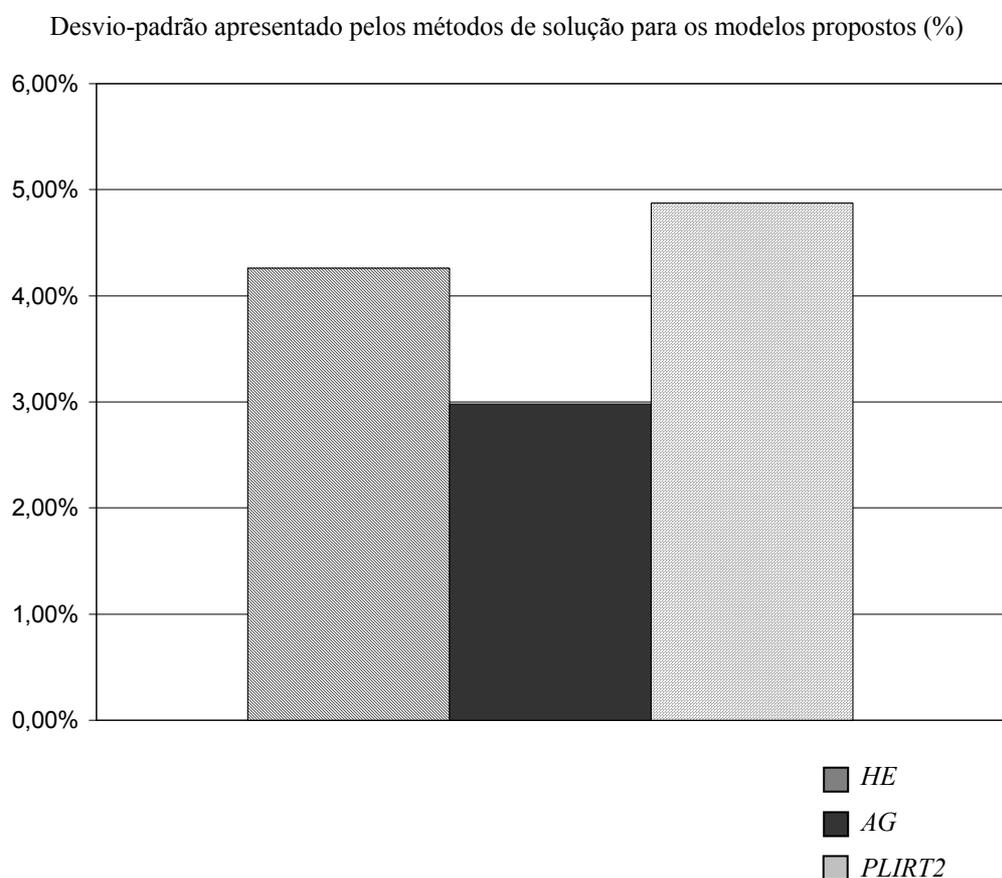


FIGURA 9.2: Desvio-padrão dos métodos de solução para os modelos propostos

Por fim, os três modelos propostos atingiram níveis significativos de performance quando comparados ao limite superior de solução. Uma vez que este limite superior de solução é uma estimativa igual ou superior ao limite máximo de uma possível solução exata, pode-se avaliar o quão próximo estas soluções obtidas se encontram das possíveis soluções exatas para os casos experimentais tratados. Com isto, é possível confirmar a viabilidade e efetividade dos modelos propostos.

9.3 Principais Conclusões Sobre A Adequação Do Sistema Proposto Às Fundições de Mercado

Visando avaliar a adequação do sistema proposto à realidade do ambiente produtivo das fundições de mercado, foi realizado, por este trabalho, uma pesquisa envolvendo uma amostra das indústrias mais representativas deste setor no interior do estado de São Paulo. Esta pesquisa permitiu confirmar os direcionadores iniciais, sobre este setor industrial, principalmente sobre a complexidade produtiva de seu ambiente de produção e a falta de sistemas e ferramentas formais para elaborar de forma efetiva a sua programação da produção. A análise “*In loco*” destas indústrias permitiu, também, confirmar a adequação do sistema proposto à realidade deste setor industrial, satisfazendo as restrições produtivas consideradas atualmente pelas indústrias pesquisadas para a elaboração da programação da produção, satisfazendo, também, os objetivos que atualmente norteiam este processo.

A flexibilidade do sistema proposto permitiu atender ao elevado grau de subjetivismo envolvido pelos objetivos produtivos destas empresas, como verificado no ambiente de produção das indústrias pesquisadas. A proposta da aplicação do sistema de controle da produção *PBC* veio ao encontro das necessidades apontadas por estas indústrias, principalmente quanto à melhoria nas estimativas de prazos de entrega e diminuição dos ciclos de produção, permitindo diminuir os estoques em processo e os problemas de qualidade provenientes da alta movimentação dos itens em produção. Já os modelos decisórios buscam satisfazer às prioridades de otimização dos recursos produtivos nas etapas de moldagem e vazamento e também nas etapas de acabamento, como desejado por estas indústrias. Verificou-se, também, a necessidade de se considerar maior flexibilidade produtiva, sendo atendido por meio da consideração de intercâmbio de capacidade entre as operações de produção similares.

Por fim, foi possível avaliar o interesse das indústrias pesquisadas por procedimentos mais sofisticados de elaboração da programação da produção e a confirmação, por meio dos resultados obtidos no “*survey*” realizado, da forma de modelagem do processo de elaboração da programação da produção sob a ótica de um sistema de apoio à decisão, permitindo a devida interação do sistema com o gerente de

produção, possibilitando uma maior flexibilidade de uso e também, a consideração de fatores subjetivos e experiência do tomador de decisões.

9.4 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Este trabalho poderá ser estendido nas seguintes direções:

- Aplicação e análise dos direcionadores gerais apresentados de racionalização e sistematização do processo decisório operacional em outros ambientes produtivos complexos, buscando ampliar e proporcionar maior generalismo na proposta original; e,
- Aplicação do SAD proposto para programação da produção em outros ambientes produtivos, realizando as devidas alterações nos modelos decisórios.

Por fim, o sistema de apoio à decisão proposto deverá ser aplicado em ambientes reais de fundições de mercado, analisando e relacionando os resultados obtidos com os principais interesses deste setor industrial.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDALLAH M. H. A knowledge-based simulation model for job shop scheduling. *International Journal of Operations & Production Management*, VOL. 15, NO. 10, PP. 89-102, 1995.
- ADAM F.; FAHY M.; MURPHY C. A framework for the classification of DSS usage across organizations. *Decision Support Systems* NO. 22, PP. 1-13, 1998.
- AL-AYYOUB A.; MASOUD F. A. Heuristic search revisited. *The journal of systems and Software*, NO. 55, PP. 103-113, 2000.
- AL-HAKIM L. An analogue genetic algorithm for solving job shop scheduling problems. *International Journal of Production Research - TAYLOR & FRANCIS*, VOL. 39, NO. 7, PP. 1537-1548, 2001.
- AL-SHEMMERI T.; AL-KLOUB B.; PEARMAN A. Model choice in multicriteria decision aid. *European Journal of Operational Research*, NO. 97, PP. 550-560, 1997.
- ALVES, R. *Filosofia da ciência*. 21ª Ed., São Paulo, Brasiliense, 1995.
- ALVES-MAZZOTTI, A. J.; GEWANDSZNAJDER, F. *O método nas ciências naturais e sociais*. 1ª Ed., Ed. Pioneira, 1998.
- ARAÚJO S. A.; ARENALES M. N. Dimensionamento de lotes e programação do forno numa fundição automatizada de porte médio. *Dep. De Ciências de Computação e Estatísticas – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo – Campus São Carlos*, 2003.
- BALAS E. Some thoughts on the development of integer programming during my research career – lecture delivered upon receiving the EURO Gold Medal July 9, 2001, Rotterdam. *European Journal of Operational Research*, NO. 141, PP. 1-7, 2002.
- BAYKASOGLU A. MOAPPS 1.0: aggregate production planning using the multiple-objective tabu search. *International Journal of Production Research*, VOL. 39, NO. 16, PP. 3685-3702, 2001.
- BANERJEE S.; BASU A. Model type selection in an integrated DSS environment. *Decision Support Systems*, VOL. 9, NO. 1, PP. 75-89, 1993.
- BELZ R.; MERTENS P. Combining knowledge-based systems and simulation to solve rescheduling problems. *Decision Support Systems*, NO. 17, PP. 141-157, 1996.
- BENBASAT I.; TODD P. The effects of decision support and task contingencies on model formulation: A cognitive perspective, NO. 17, PP. 241-252, 1996.
- BERTO, R. M. V. S.; NAKANO, D. N. Metodologia da pesquisa e a engenharia de produção. In: XVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP) e IV

International Congress of Industrial Engineering (ICIE), Niterói, RJ, Outubro 1998. Anais ..., UFF/ABEPRO, 1998. (CD-ROM).

BERTO, R. M. V. S.; NAKANO, D. N. A produção científica nos anais do encontro nacional de engenharia de produção: um levantamento de métodos e tipos de pesquisa. In: XIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP) e V International Congress of Industrial Engineering (ICIE), Rio de Janeiro, RJ, Novembro 1999. Anais ..., UFRJ/ABEPRO, 1999. (CD-ROM).

BINBASIOGLU M. Key features for model building decision support systems. European Journal of Operation Research, NO. 82, PP. 422-437, 1995.

BINDER F. V. Sistemas de Apoio à Decisão. Ed. Érica 1994.

BISTLINE W. G.; BANERJEE S.; BANERJEE A. RTSS: An interactive decision support system for solving real time scheduling problems considering customer and job priorities with schedules interruptions. Computers and Operations Research, VOL. 25, NO. 11, PP. 981-995, 1998.

BIXBY R. E.; FENELON M.; GU Z.; ROTHBERG E.; WUBDERLING R. MIP: Theory and practice – Closing the gap. sem data.

BLAZEWICZ; J. et. Al. The Job-Shop scheduling Problem: Conventional and new solution technique. EJOR NO. 93, PP. 1-33, 1996.

BOLLOJU N. Decision model formulation of subjective classification problem-solving knowledge using neuro-fuzzy classifier and its effectiveness. International Journal of Approximate Reasoning, NO. 21, PP. 197-213, 1999.

BLUM C. Beam-ACO – hybridizing ant colony optimization with beam search: an application to open shop scheduling. Computers & Operations Research, NO. 32, PP. 1565-1591, 2005.

BONNEY M. Reflections on production planning and control (PPC). Gestão & Produção, volume 7, número 3, 2000.

BNDS. Indústria de Fundição - Segmento de peças para o setor automotivo. Banco Nacional de Desenvolvimento, Brasil, Junho 1996.

BRADLEY S. P.; HAX A. L.; MAGNANTI T. L. Applied mathematical programming. Addison-Wesley, 1977.

BRUCKER P.; HURINK J.; WERNER F. Improving local search heuristics for some scheduling problems-I. Discrete Applied Mathematics, NO. 65, PP. 97-122, 1996.

BRUCKER P.; HURINK J.; WERNER F. Improving local search heuristics for some scheduling problems-II. Discrete Applied Mathematics, NO. 72, PP. 47-69, 1997.

BRYMAN, A. Research methods and organization studies. London, Uniwin Hyman, 1989.

BUFFA E. S.; SARIN R. K. Modern production/operations management. John Wiley & Sons Inc., 8^o Ed., 1987.

BURBIDGE J. L. Planejamento e controle da produção. Ed. Atlas, 1981.

BURBIDGE J. L. Period Batch Control. 1996.

BUTLER J.; JIA J. DYER J. Simulation techniques for the sensitivity analysis of multi-criteria decision models. European Journal of Operational Research, NO. 103, PP. 531-546, 1997.

BYRNE M. D.; BAKIR M. A. Production planning using a hybrid simulation - analytical approach. International Journal of Production Economics, NO. 59, PP. 305-311, 1999.

CALIUSCO M. L.; VILLAREAL P.; TOFFOLO A.; TAVERNA M. L.; CHIOTTI O. Decision support systems generator for industrial companies – Module IV: Forecasting Support System. Computers ind. engng, vol. 35, n^o 1-2, pp. 315-318, 1998.

CÂNDIDO M. A. B. A Hybrid Genetic Approach to Solve Real Make-To-Order Job Shop Scheduling Problems. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

CASTRO G.; GREGORET L.; DELFABRO L.; CHIOTTI O. Decision support systems generator for industrial companies – Module II: System to support the material management. Computers ind. engng, vol. 35, n^o 1-2, pp. 307-310, 1998.

CHAN W.; HU H. An application of genetic algorithms to precast production scheduling. Computers and Structures, NO. 79, PP. 1605-1616, 2001.

CHENG R.; GEN M.; TSUJIMURA Y. A tutorial *survey* of job-shop-scheduling problems using genetic algorithms: Part I. Representation. Computers & Industrial Engineering, VOL. 30, NO. 4, PP. 983-997, 1996.

CHENG R.; GEN M.; TSUJIMURA Y. A tutorial *survey* of job-shop-scheduling problems using genetic algorithms: Part II. Hybrid Genetic Search Strategies. Computers & Industrial Engineering, NO.37, PP. 51-55, 1999.

CHIADAMROMG N.; O'BRIEN C. O. Decision support tool for justifying alternative manufacturing and production control systems. International Journal of Production Economics, NOS. 60-61, PP. 177-186, 1999.

CHRYSSOLOURIS G.; PAPAKOSTAS N.; MOURTZIS D. A decision-making approach for nesting scheduling: a textile case. International Journal of Production Research, NO. 17, PP. 4555-4564 – 2000.

CHUANG T.; YADAV S. B. The development of an adaptive decision support system. Decision Support Systems, NO. 24, PP. 73-87, 1998.

CLEMEN, R. T. Making hard decisions: an introduction to decision analysis. 2^o ed. Estados Unidos: Duxbury, 1995.

CMC Cast Metal Coalition. Metalcasting Industry Technology Roadmap. American Foundrymen's Society - North American Die Casting Association - Steel Founder's Society of America, January 1998.

COLIN E. C. Beam search filtrado com inserção de ociosidade na programação de uma máquina em ambiente do tipo JIT. *Gestão & Produção*, VOL. 5, NO. 2, PP. 117-132, 1998.

CONWAY R. W.; MAXWELL W. L.; MILLER L. W. Theory of scheduling. Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1967.

CORRÊA H. L.; GIANESI I. G. N. Just in time, MRP II e OPT: Um enfoque estratégico. Ed. Atlas, São Paulo, 1993.

CORRÊA H. L.; GIANESI I. G. N.; CAON M. Planejamento, programação e controle da produção: MRP II/ERP: conceitos, uso e implantação. Ed. Atlas, 2^o Edição, 1998.

CRESWELL, J. W. Research design – qualitative & quantitative approaches. London, Sage, 1994.

CROCE F. D.; GHIRARDI M.; TADEI R. Recovering beam search: Enhancing the beam search approach for combinatorial optimization problems. *Journal of Heuristics*, NO. 10, PP. 89-104, 2004.

DAHAL K. P.; ALDRIDGE C. J.; MCDONALD J. R. Generator maintenance scheduling using a genetic algorithm with a fuzzy evaluation function. *Fuzzy Sets and Systems*, NO. 102, PP. 21-29, 1999.

DAWOOD N. N. A strategy of knowledge elicitation for developing an integrated bidding/production management expert system for the precast industry. *Advances in Engineering Software*, NO. 25, PP. 225-234 – 1996.

DENG P. Using genetic algorithms for batch selection decisions. *Expert systems with applications – PERGAMON*, NO. 17, PP. 183-194, 1999.

DENG P.; TSACLE E. G. Coupling genetic algorithms and rule-based systems for complex decisions. *Expert systems with applications*, NO. 19, PP. 209-218, 2000.

DENTCHEVA D.; PRÉKOPA A.; RUSZCZYNSKI A. Bounds for probabilistic integer programming problems. *Discrete Applied Mathematics – ELSEVIER*, NO. 124, PP. 55-65, 2002.

DIMKOU T. I.; PAPALEXANDRI K. P. A parametric optimization approach for multiobjective engineering problems involving discrete decisions. *Computers & chemical engineering*, VOL. 22, Suppl., PP. S951-S954, 1998.

DUCOTE G.; MALSTROM E. M. A design of personnel scheduling software for manufacturing. *Computers & Industrial Engineering*, NO. 37, PP. 473-476 – 1999.

DUTTA A. Integrating AI an optimization for decision support: A *survey*. *Decision Support Systems*, NO. 18, PP. 217-226, 1996.

EASTON F.; MOODIE D. R. Pricing and lead time decisions for make-to-order firms with contingent orders. *European Journal of Operational Reserch*, NO. 116, PP. 305-318, 1999.

ECKER K.; GUPTA J. N. D.; SCHMIDT G. A framework for decision support systems for scheduling problems. *European Journal of Operational Research*, Vol. 101, pp. 252-462, 1997.

EOM S. B. Mapping the intellectual structure of research in decision support systems through author cocitation analysis (1971-1993). *Decision Support Systems*, NO. 16, PP. 315-338, 1996.

EVAN J. R., OLSON D. L., EVANS J. R. *Introduction to simulation and risk Analysis*. 1º Ed. - 1998.

FERNANDES F. C. F. *Concepção de um sistema de controle da produção para manufatura celular*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 1991.

FERNANDES F. C. F.; LEITE R. B. Automação industrial e sistemas informatizados de gestão da produção em fundições de mercado. *Gestão & Produção*, VOL. 9, NO. 3, PP. 235-266, 2002.

FERNANDES F. C. F. A pesquisa em gestão da produção: evolução e tendências. In: XIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP) e V International Congress of Industrial Engineering (ICIE), Rio de Janeiro, RJ, Novembro 1999. *Anais ...*, UFRJ/ABEPRO, 1999a.

FERNANDES F. C. F.; MACCARTHY B. L. Production planning and control: the gap between theory and practice in the light of modern manufacturing concepts. *Proceedings of the 15th International Conference on CAD/CAM, Robotics & Factories of the Future (CARS&FOF'99)*, Águas de Lindóia-Brazil, Volume 1, Pages. From MF2-1 to MF2-6, August 1999b.

FERNANDES F. C. F. *Sistemas de coordenação de ordens de compras e de produção*. Apostila do Departamento de Engenharia de Produção, UFSCar, 2002.

FILIPPINI R. Operations management research: some reflections on evolution, models and empirical studies in OM. *International Journal of Operations and Production Management*, v.17, n. 7, pp. 655-670, 1997.

FOX T. L.; SPENCE W. An examination of the decision styles of project managers: Evidence of significant diversity. *Information and Management*, NO. 36, PP. 313-320, 1996.

FUNG R. Y. K.; REN S.; BODE J.; LUO S. A framework of decision-support systems in advanced manufacturing enterprises - a system view. *Integrated Manufacturing Systems*, VOL. 8, NO. 6, PP. 365-373 – 1997.

GAITHER N.; FRAZIER G. *Administração da produção e operações*. Ed. Pioneira – 8^o Edição – São Paulo, 2001.

GARETTI M.; TAISCH M. Advanced computing techniques in Production Planning and Control. *Production Planning & Control*, VOL. 10, NO. 4, PP. 301-304, 1999.

GHIRARDI M.; POTTS C. N. Makespan minimization for scheduling unrelated parallel machines: A recovering beam search approach. *European Journal of Operational Research*, 2003.

GILKINSON J. C.; RABELO L. C.; BUSH B. O. A real-world scheduling problem using genetic algorithms. *Computers & Industrial Engineering*, VOL. 29, NO. 1-4, pp. 177-181, 1995.

GODOY, A. S. Introdução à pesquisa qualitativa e suas possibilidades. *Revista de Administração de Empresas*, São Paulo, v. 35, n. 2, pp. 57-63, 1995.

GOODWIN P.; WRIGHT G. *Decision analysis for management judgment*. John Wiley & Sons; 2^o ed. Ed., 1999.

GOLDBARG M. C.; LUNA H. P. *Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos*. Ed. Campus, Rio de Janeiro, 2000.

GOLDBERG D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*. Addison Wesley Longman Inc., 1989.

GRABOT B.; BLANC J.; BINDA C. A decision support system for production activity control. *Decision Support Systems*, NO. 16, PP. 87-101, 1996.

GRAVEL M.; KISS L.; MARTEL J.; PRICE W. A DSS for production planning. *International Transactions in Operation Reserach*, NO. 3, PP. 363-373 – 1994.

GUARISO G.; HITZ M.; WERTHNER H. A integrated simulation and optimization modelling enviroment for decision support. *Decision Support Systems*, NO. 16, PP. 103-117, 1996.

GUPTA J. N. D. An excursion in scheduling theory: an overview of scheduling research in the twentieth century. *Production Planning & Control*, VOL. 13, NO. 2, PP. 105-116, 2002.

HENSHELL R. O. IT in foudries - Engineering Data Management and Layout Optimization. *Foundryman*, February 1996.

HILLIER F. S.; LIEBERMAN G. L. *Introduction to operations research*. Holden-Day, 1967.

HO J. K. K.; SCULLI D. The scientific approach to problem solving and decision support systems. *International Journal of Production Economics*, NO. 48, PP. 249-257, 1997.

HOFFMAN K. Combinatorial optimization: Current successes and directions for the future. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, NO. 124, PP. 341-360, 2000.

JAIN; A. S. Meeran, J., "Deterministic Job-Sop Scheduling: Past, Present and Future. *EJOR*, NO. 113, PP. 390-434, 1999.

JARDIM; E. G. M. Some Aspects of Modelling of Batch Production in a Grey Iron Foundry. Doctoral Thesis, Department of Industrial Metallurgy, Faculty of Science and Engineering the University of Birmingham, February 1982.

JASZKIEWICZ A. Genetic local search for multi-objective combinatorial optimization. *European Journal of Operational Research – ELSEVIER*, NO. 137, PP. 50-71, 2002.

JEUSFELD M. A.; BUI T. X. Distributed decision support and organizational connectivity: A case study. *Decision Support Systems*, NO. 19, PP. 215-225, 1997.

JOHNSON L. A.; MONTGOMERY D. C. Operations research in production planning, scheduling and inventory control. John Wiley & Sons Inc., 1974.

JÓZEFOWSKA J.; MIKA M.; RÓZYCKI R.; WALIGÓRA G.; WEGLARZ J. Local search metaheuristics for discrete-continuous scheduling problems. *European Journal of Operational Research*, NO. 107, PP. 354-370, 1998.

KARAIVANOVA J.; KOHONEN P.; NARULA S.; WALLENIUS J.; VASSILEV V. A reference direction approach to multiple objective integer linear programming. *European Journal of Operational Research*, NO. 81, PP. 176-187, 1995.

KELTON D. W.; LAW A. M. Simulation modeling and Analysis. McGraw Hill, 2^o Ed., 1991.

KIM C.; LEE J. K. Automatic structural identification and relaxation for integer programming. *Decision Support Systems – ELSEVIER*, NO. 18; PP. 253-271, 1996.

KIM H. An XML-based modeling language for the open interchange of decision models. *Decision Support Systems*, NO. 31, PP. 429-441, 2001.

KIM H. K.; KIM K. Y. Routing straddle carriers for the loading operation of containers using beam search algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, NO. 36, PP. 109-136, 1999.

KIM G. J.; ROHAE M.; EMDAD A. F. A simulation study on coordination strategies: decision cycle-time perspective. *The journal of systems and software*, NO. 57, PP. 61-72, 2001.

KIM S.; LEE K. An optimization-based decision support system for ship scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, VOL. 33, NOS. 3-4, PP. 689-692, 1997.

KIMBALL R. The data warehouse toolkit: practical techniques for building dimensional data warehouses. New York, Estados Unidos : John Wiley & Sons, 1996.

KINGSMAN B. G.; SOUZA A. A. A knowledge-based decision support system for cost estimation and pricing decisions in versatile manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, NO. 53, PP. 119-139, 1997.

KIMMS A. A genetic algorithm for multi-level, multi-machine lot sizing and scheduling. *Computers and Operations Research – PERGAMON*, NO. 26, PP. 829-848, 1999.

KIVIJÄRVI H. A substance-theory-oriented approach to the implementation of organizational DSS. *Decision Support Systems*, NO. 20, PP. 215-241, 1997.

KORBAA O.; CAMUS H.; GENTINA J. A new cyclic scheduling algorithm for flexible manufacturing systems. *The international journal of flexible manufacturing systems*, NO. 14, PP. 173-187, 2002.

KOUTSOUKIS N.; MITRA G.; LUCAS C. Adapting on-line analytical processing for decision modelling: the interaction of information and decision technologies. *Decision Support Systems*, NO. 26, PP. 1-30, 1999.

KNOSALA R.; WAL T. A production scheduling problem using genetic algorithm. *Journal of Materials Processing Technology*, NO. 109, PP. 90-95, 2001.

KRAJEWSKI L. J.; RITZMAN B. *Operations management: Strategy and Analysis*. Addison-Wesley Publishing Company, 4^o Ed, 1996.

KUIK R.; TIELEMANS P. F. J. Analysis of expected queueing delays for decision making in production planning. *European Journal of Operational Reserch*, NO. 110, PP. 658-681, 1998.

KUO W.; HWANG S. A prototype of a real-time support system in the scheduling o production systems. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 21, pp. 133-143, 1998.

LAKATUS, E. M.; MARCONI, M. A. *Fundamentos de metodologia científica*. 3^o Ed., São Paulo, Atlas, 1995.

LAUDON K. C., LAUDON J. P. *Management Information Systems: Organization and Technology*. Prentice-Hall Inc, - 5th ed.,1998.

LEE H. F.; CHO H. J.; KLEPPER R. W. A HESS for resource planning in service manufacturing industries. *Expert Systems With Applications*, Vol. 10, N^o 1, pp. 147-156, 1996.

- LEU Y. Using beam search techniques for sequencing mixed-model assembly lines. *Annals of operations research*. NO. 70, PP. 379-397, 1997.
- LI H.; LI Z.; LI L. X.; HU B. A production rescheduling expert simulation system. *European Journal of Operational Research* , NO. 124, PP. 283-293, 2000a.
- LI Y.; MAN K.; TANG K. S.; KWONG S.; IP W. H. Genetic algorithm to production planning and scheduling problems for manufacturing systems. VOL. 11, NO. 5, PP. 443-458, 2000b.
- LIAW C. A hybrid genetic algorithm for the open shop scheduling problem. *European Journal of Operational Reserch – ELSEVIER*, NO. 124, PP. 28-42, 2000.
- LIEBOWITZ J.; RODENS I.; ZEIDE J. SUEN C. Developing a neural network approach for intelligent scheduling in GUESS. *Expert Systems*, VOL. 17, NO. 4, PP.185-190, 2000.
- LIU B. Minimax chance constrained programming models for fuzzy decision systems. *Information Sciences*, NO. 112, PP. 25-38, 1998.
- LIU B.; IWAMURA K. Fuzzy programming with fuzzy decisions and fuzzy simulation-based genetic algorithm. *Fuzzy Sets and Systems*, NO. 122, PP. 253-262, 2001.
- LIU J.; TANG L. A modified genetic algorithm for single machine scheduling. *Computers & Industrial Engineering – ELSEVIER*, NO. 37, PP. 43-46, 1999.
- LOKKETANGEN A.; GLOVER F. Solving zero-one mixed integer programming problems using tabu search. *European Journal of Operational Reserch – ELSEVIER*, NO. 106; PP. 624-658, 1998.
- LUCAS P.; GAAG L. V. D. Principles of expert systems. Addison Wesley Publishing Company, 1991.
- MACCARTHY B. L.; FERNANDES F. C. F. A multi-dimensional classification of production systems for the design and selection of production planning and control systems. *Production Planning and Control*, VOL. 11, NO. 5, PP. 481-496, 2000
- MACCARTHY B. L.; LIU J. Addressing the gap in scheduling research: a review of optimization and heuristic methods in production scheduling. *International Journal of Production Research*, VOL. 31, NO. 1, PP. 59-79, 1993.
- MALHOTRA M. K.; SHARMA S.; NAIR S. Decision making using multiple models. *European Journal of Operational Reserch*, NO. 114, PP. 1-14, 1999.
- MALLACH, E. A. Decision support and data warehouse systems. McGraw-Hill: Boston, Estados Unidos, 2000.
- MARAKAS G. M. Decision Support Systems in The Twenty-First Century. Prentice Hall, 1999.

MATANACHAI S.; YANO C. A. Balancing mixed-model assembly lines to reduce work overload. IIE Transactions, NO. 33, PP. 29-42, 2001.

MCAR. Metal Casting Annual Report", Metal Casting Industry of the Future. Office of Industrial Technologies - U.S. Department of Energy, May 2000.

MCHANEY R. W.; DOUGLAS D. E. Multivariate regression metamodel: A DSS application in industry. Decision Support Systems, NO. 19, PP. 43-52, 1997.

MCMULLEN P. R.; TARASEWICH P. A beam search heuristic method for mixed-model scheduling with setups. International journal of production economics, 2003.

MESGHOUNI K.; PESIN P.; TRENTESAUX D.; HAMMADI S.; TAHON C.; BORNE P. Hybrid approach to decision-making for job-shop scheduling. Production Planning & Control, vol. 10, n° 7, 690-706, 1999.

MIM L.; CHENG W. A genetic algorithm for minimizing the makespan in the case of scheduling identical parallel machines. Artificial Intelligence in Engineering, NO. 13, PP. 399-403, 1999.

MIRCHANDANI D.; PAKATH R. Four models for a decision support system. Information & Management, NO. 35, PP. 31-42, 1999.

MME. Anuário da Indústria de Fundição. Ministério de Minas e Energia do Brasil, Brasil, <http://www.mme.gov.br/smm/anuario/fund.htm>, Setembro 2000.

MOCKLER R. J.; DOLOGITE D.G. Knowledge-based systems: an introduction to expert systems. New York: Macmillan Publishing Company, 1992.

MOHSEN E. An operational decision model for lead-time and price quotation in congested manufacturing systems. European Journal of Operational Research, NO. 126, PP. 355-370, 2000.

NAHMIAS S. Production and operation analysis. Ed. McGraw-Hill, 2001.

NORBIS M.; SMITH J. M. A interactive decision support systems for the resource constrained scheduling problem. European Journal of Operational Research, NO. 94, PP. 54-65, 1996.

OAKSHOTT L. A. Business Modeling and Simulation. Financial Times Management, 1997.

O'BRIEN J. A. Management information systems: managing information technology in the networked enterprise. 3th ed, McGraw-Hill Inc, 1996.

OGRYCZAK W. A note on modeling multiple choice requirements for simple mixed integer programming solvers. Computers & Operations Research, NO. 2, PP. 199-205, 1996.

O'KEEFE R.; PREECE A. D. The development, validation and implementation of knowledge-based systems. *European Journal of Operational Research*, NO. 92, PP. 458-473, 1996.

ÖZDAMAR L.; YAZGAÇ T. Capacity Driven due date settings in make-to-order production systems. *International Journal of Production Economics*, NO. 49, PP. 29-44, 1997.

PACCIARELLI D.; PRANZO M. Production scheduling in a steelmaking-continuous casting plant. *Computers and Chemical Engineering*, 2004.

PARK C.; SONG J.; KIM J.; KIM I. Delivery date decision support system for the large scale make-to-order manufacturing companies: a Korean electric motor case. *Production Planning & Control*, Vol. 10, N° 6, pp. 585-597, 1999.

PARKAN C.; WU M. Comparison of three modern multicriteria decision-making tools. *International Journal of Systems Science*, VOL. 31, NO. 4, PP. 497-517, 2000.

PFLUGHOEFT K. A.; HUTCHINSON G. K.; NAZARETH D. L. Intelligent decision support for flexible manufacturing: Design and implementation of a knowledge-based simulator. *International journal of management science*, VOL. 24, NO. 3, PP. 347-360, 1996.

PHILLIPS D. T.; RAVIDRAN A.; SOLBERG J. J. *Operations research: principles and practice*. John Wiley & Sons, 1976.

PILLUTLA S. N.; NAG B. N. Object-oriented model construction in production scheduling decisions. *Decision Support Systems*, NO. 18, PP. 357-375, 1996.

PONNAMBALAM S. G.; RAMKUMAR V.; JAWAHAR N. A multiobjective genetic algorithm for job shop scheduling. *Production Planning & Control*, VOL. 12, NO. 8, PP. 764-774, 2001.

PRIORE P. FUENTE D.; PINO R.; PUENTE J. Learning-based scheduling of flexible manufacturing systems using case-based reasoning. *Applied Artificial Intelligence*, NO. 15, PP. 949-963, 2001.

PYY P. An Approach for assessing human decision reliability. *Reliability Engineering and System Safety*, NO. 68, PP. 17-28, 2000.

RACHAMADUGU R.; TU Q. Period Batch Control for group technology – An improved procedure. *Computers and Industrial Engineering*, VOL. 32, NO. 1, PP. 1-7, 1997.

RAZMI J.; RAHNEJAT H.; KHAN M. K. Use of analytic hierarchy process approach in classification of push, pull and hybrid push-pull systems for production planning. *International Journal of Operations & Production Management*, VOL. 18, NO. 11, PP. 1134-1151, 1998.

RICO M.; YUSCHAK O.; TAVERNA M. L.; RAMOS J. C.; GALLI M. R.; CHIOTTI O. Decision support systems generator for industrial companies. *Computers ind. engng*, VOL. 33, NO. 1-2, PP. 337-360, 1997.

RIZZOLI A. E.; DAVIS J. R.; ABEL D. J. Model and data integration and re-use in environmental decision support systems. *Decision Support Systems*, NO. 24, PP. 127-144, 1998.

ROSSI P; DIAZ C.; FRUTTERO P.; VITTORI C.; RICO M.; CHIOTTI O. Decision support systems generator for industrial companies Module II: Scheduling support system. *Computers & Industrial Engineering*, VOL. 35, NOS. 1-2, PP. 311-314, 1998.

SABUNCUOGLU I.; BAYIZ M. Job shop scheduling with beam search. *European Journal of Operational research*. NO. 118, PP. 390-412, 1999.

SABUNCUOGLU I.; BAYIZ M. Analysis of reactive scheduling problems in a job shop environment. *European Journal of Operational research*. NO. 126, PP. 567-586, 2000.

SABUNCUOGLU I.; KARABUK S. A beam search-based algorithm and evaluation of scheduling approaches for flexible manufacturing systems. *IIE Transactions*, NO. 30, PP. 179-191, 1998.

SAKAWA M.; MORI T. An efficient genetic algorithm for job-shop scheduling problems with fuzzy processing time and fuzzy due date. *Computers & Industrial Engineering*, NO. 36, PP. 325-341, 1999.

SALOMON, D. V. Como fazer uma monografia. Ed. Martins Fontes, 1991.

SCHLEIFER A.; BELL D. E. Data analysis, regression and forecasting. Duxbury Press, 1994.

SCHMIDT G. A decision support system for production scheduling. *Journal of Decision Systems*, Vol 2-2, pp. 243-260, 1992.

SCHMIDT G., "Case-based reasoning for production scheduling", *Int. Journal of Production Economics*, Vol 56-57, pp. 537-546, 1998.

SCHNIEDERJANS M. J.; CARPENTER D. A. A heuristic job scheduling decision support system - A case study. *Decision Support Systems*, NO. 18, PP. 159-166 – 1996.

SÉNÉCHAL O.; TAHON C. A methodology for integrating economic criteria in design and production management decisions. *International Journal of Production Economics*, VOL. 56, NO. 57, PP. 557-574, 1998.

SHAYAN E.; AL-HAKIM L. Beam search sequencing point operations in flat plate manufacturing. *Computers & Industrial Engineering*, NO. 42, PP. 309-315, 2002.

SHERALI H. D.; DRISCOLL P. J. Evolution and State-of-the-art in integer programming. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, NO. 124, PP. 319-340, 2000.

SHIM J. P.; WARKENTIN M.; COURTNEY J. F.; POWER D. J.; SHARDA R.; CARLSSON C. Past, present, and future of decision technology. *Decision Support Systems – ELSEVIER*, NO. 33, PP. 111-126, 2002.

SHIVAPPA D. N.; BABU S. Evolving requirements for a reengineering model for ferrous foundries in India - An experience. *International Journal of Production Economics*, nº 50, pp. 225-243, 1997.

SILVA R. J. Programação de cargas de forno em uma fundição de mercado. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia de Produção, 2001.

SIKORA R. A genetic algorithm for integrating lot-sizing and sequencing in scheduling a capacited flow line. *Computers & Industrial Engineering*, VOL. 30, NO. 4, PP. 969-981, 1996.

SIPPER D.; BULFIN R. L. JR. *Production Planning, Control and Integration*. McGraw-Hill, 1997.

SLACK N.; CHAMBERS S.; HARLAND C.; HARRISON A.; JOHNSTON R. *Administração da produção*. Ed. Atlas – São Paulo, 1999.

SPRAG R. H.; WATSON H. J. *Sistemas de Apoio à Decisão – Colocando a Teoria em Prática*. Ed. Campus 1991.

SRIVASTAVA V. K.; FAHIM A. A two-phase optimization procedure for integer programming problems. *Computers and Mathematics with Applications – PERGAMON*, NO. 42, PP. 1585-1595, 2001.

STAIR, RALPH M. *Princípios de sistemas de informação – Uma abordagem gerencial*. Rio de Janeiro – LTC Livros Técnicos e Científicos S.A., 1998.

SUNDARARAJAN S.; SRINIVASAN G.; STAEHLE W. O.; ZIMMERS E. W. Application of decision support system for operational decisions. *Computers Ind. Eng.*, Vol. 35, pp. 141-144, 1998.

SZELKE E.; KERR R. M. Knowledge-based reactive scheduling. *Production Planning & Control*, vol. 5, nº 2, 124-145, 1994.

TAGAWA S. A new concept of job shop scheduling system - hierarquical decision model. *International Journal of Production Economics*, NO. 44, PP. 17-26, 1996.

TAHA H. A. *Integer programming: theory, applications and computations*. Academic Press, 1975.

TAHA H. A. *Operations research an introduction*. Macmillan Publishing, 1976.

TEGHEM J.; PIRLOT M.; ANTONIADIS C. Embedding of linear programming in a simulated annealing algorithm for solving a mixed integer production planning problem. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, NO. 64, PP. 91-102, 1995.

THIOLLENT, M. Pesquisa-ação nas organizações. Ed. Atlas, 1º Ed., 1997.

TOTH P. Optimization engineering techniques for the exact solution of NP-hard combinatorial optimization problems. *European Journal of Operational Research*, NO. 125, PP. 222-238, 2000.

TRIOLA, M. F. Introdução à estatística. LTC – Livros Técnicos e Científicos S.A. 7º Ed., 1999.

TUBINO, D. F. Manual de planejamento e controle da produção. Ed. Atlas, São Paulo 1997.

T'KINDT V.; BILLAUT J. Multicriteria scheduling problems: A *survey*. *RAIRO Operational Research*, NO. 35, PP. 143-163, 2001.

VAN MAANEN, J. Reclaiming Qualitative Methods for Organizational Research: A Preface. *Administrative Science Quartely*, v. 24, n. 4., pp. 520-537, Dec.1979.

VIANA A.; SOUSA J. P. Using metaheuristics in multiobjective resource constrained project scheduling. *European Journal of Operation Research*, NO. 120, PP. 359-374, 2000.

VIANNA A. C. G.; ARENALES M. Um problema de programação da produção em uma fundição automatizada. *Gestão & Produção*, Universidade Federal de São Carlos, VOL. 2, NO. 3, 1995.

VOORHIS T. V.; PETERS F.; JOHNSON D. Developing software for generating pouring schedules for steel foundries. *Computers & Industrial Engineering*, NO. 39, PP. 219-234, 2001.

ZACCARELLI S. B. Programação e controle da produção. Editora Pioneira, São Paulo, 1987.

WANG X. Z.; CHEN B. H.; YANG S. H.; MCGREAVY C. Fuzzy rule generation from data for process operational decision support. *Computers & chemical engineering*, VOL 21, SUPPL, PP. S661-S666, 1997.

WANG D.; FANG S. C. A semi-infinite programming model for earliness/tardiness production planning with a genetic algorithm. *Computers Math. Applic.*, VOL. 31, NO. 8, PP. 95-106, 1996.

WEATHERFORD G. D. *et al.* Introductory management science: decision modeling with spreadsheets. 5^o ed. Prentice-Hall: New Jersey, Estados Unidos, 1998.

WESTBROOK, R. Action research: a new paradigm for research in production and operations management. *International Journal of Operations & Production Management*, v. 15, n. 12, pp. 6-20, 1995.

WIERS V. C. S.; SCHAAF T. W. V. D. A framework for decision support in production scheduling tasks. *Production Planning & Control*, Vol. 8, N° 6, pp. 533-544, 1997.

WONG B. K.; BODNOVICH T. A.; SELVI Y. Neural networks application in bussiness: A review and analysis of the literature (1988-95). *Decision Support Systems*, NO. 19, PP. 301-320, 1997.

YEOM K.; LEE J. K. Logical representation of integer programming models. *Decision Support Systems*, NO. 18, PP. 227-251, 1996.

YIN, R. K. *Case study research – design and methods*. London, Sage, 1989.

APÊNDICE A1 TABELA SOLUÇÃO APRESENTADA PELO MÉTODO HEURÍSTICO GERAL DE SOLUÇÃO

Tomando por base o exemplo da *figura 6.4*, segue a tabela solução apresentada pelo método heurístico míope de solução proposto, considerando $\Theta = 3$. Nesta tabela, na primeira coluna está o passo da solução⁴⁹ enquanto que, na segunda coluna, encontra-se o passo referente ao algoritmo. As demais colunas são usadas para mostrar os valores das principais variáveis do algoritmo.

Segue então a tabela solução como apresentada pelo método heurístico geral de solução proposto.

TABELA A1.1: Tabela solução do método heurístico geral de solução proposto

Pas. Sol.	Passo Algorit.	VSE	VSE'	v_k	vgg	Vgl	pv	pa	pg	x	y	V	A	SU	SA
1	1	{}	{}	-	{}	{}	-	-	-	0	0	{}	{}	-	-
2	2	{ v_1 }	-	-	-	-	-	-	-	-	1	{ v_1 }	-	SUV ₁ ={}	SAV ₁ ={}
3	3	-	-	v_1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	3.1	-	-	-	v_1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	3.2.1	-	-	-	-	v_1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	3.2.2.1	-	-	-	-	-	pv _{v2} =250	pa _{a1} =250	-	1	2	{ v_1, v_2 }	{ a_1 }	SUV ₁ ={ a_1 }, SUV ₂ ={}	SAV ₂ ={ a_1 }
		-	-	-	-	-	pv _{v3} =500	pa _{a2} =500	-	2	3	{ v_1, v_2, v_3 }	{ a_1, a_2 }	SUV ₁ ={ a_1, a_2 }, SUV ₃ ={}	SAV ₃ ={ a_2 }
		-	-	-	-	-	pv _{v4} =650	pa _{a3} =650	-	3	4	{ v_1, v_2, v_3, v_4 }	{ a_1, a_2, a_3 }	SUV ₁ ={ a_1, a_2, a_3 }, SUV ₄ ={}	SAV ₄ ={ a_3 }
7	3.2.2.2	-	{ v_2, v_3, v_4 }	-	-	{}	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	3.2.3	-	-	-	v_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	3.2.1	-	-	-	-	v_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	3.2.2.1	-	-	-	-	-	pv _{v5} =850	pa _{a4} =600	-	4	5	{ v_1, v_2, v_3, v_4, v_5 }	{ a_1, a_2, a_3, a_4 }	SUV ₂ ={ a_4 }, SUV ₅ ={}	SAV ₅ ={ a_1, a_4 }
		-	-	-	-	-	pv _{v6} =750	pa _{a5} =500	-	5	6	{ $v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6$ }	{ a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 }	SUV ₂ ={ a_4, a_5 }, SUV ₆ ={}	SAV ₆ ={ a_1, a_5 }
11	3.2.2.2	-	-	-	-	v_5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	3.2.2.1	-	-	-	-	-	pv _{v7} =1300	pa _{a6} =450	-	6	7	{ $v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7$ }	{ $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ }	SUV ₅ ={ a_6 }, SUV ₇ ={}	SAV ₇ ={ a_1, a_4, a_6 }
		-	-	-	-	-	pv _{v8} =1350	pa _{a7} =500	-	7	8	{ $v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8$ }	{ $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$ }	SUV ₅ ={ a_6, a_7 }, SUV ₈ ={}	SAV ₈ ={ a_1, a_4, a_7 }
13	3.2.2.2	-	-	-	-	v_8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	3.2.2.1	-	-	-	-	-	pv _{v9} =1800	pa _{a8} =450	-	8	9	{ $v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8, v_9$ }	{ $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8$ }	SUV ₈ ={ a_8 }, SUV ₉ ={}	SAV ₉ ={ a_1, a_4, a_7, a_8 }
15	3.2.2.2	-	-	-	-	v_9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	3.2.2.1	-	-	-	-	-	pv _{v10} =2050	pa _{a9} =250	-	9	10	{ $v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8, v_9, v_{10}$ }	{ $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9$ }	SUV ₉ ={ a_9 }, SUV ₁₀ ={}	SAV ₁₀ ={ a_1, a_4, a_7, a_8, a_9 }
17	3.2.2.2	-	-	-	-	v_{10}	-	-	-	-	-	-	-	-	-

⁴⁹ Devido à extensão da tabela solução optou-se por apresentar somente os passos da solução que realizam alterações em alguma variável do algoritmo

Pas. Sol.	Passo Algorit.	VSE	VSE'	v _k	vgg	Vgl	pv	pa	pg	x	y	V	A	SU	SA
81	3.2.1	-	-	-	-	V ₁₁	-	-	-	-	-	-	-	-	-
82	3.2.2.2	-	{V ₇ , V ₈ , V ₁₂ , V ₁₃ }	-	-	{}	-	-	-	-	-	-	-	-	-
83	3	-	-	V ₁₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
84	3.1	-	-	-	V ₁₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
85	3.2.1	-	-	-	-	V ₁₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-
86	3.2.2.2	-	{V ₇ , V ₈ , V ₁₂ , V ₁₃ , V ₁₉ , V ₂₀ }	-	-	{}	-	-	-	-	-	-	-	-	-
87	3.2.3	-	-	-	V ₇	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
88	3.2.1	-	-	-	-	V ₇	-	-	-	-	-	-	-	-	-
89	3.2.2.1	-	-	-	-	-	pv _{v21} = 1850	pa _{a20} = 550	-	20	21	{V ₁ , V ₂ , V ₃ , V ₄ , V ₅ , V ₇ , V ₈ , V ₉ , V ₁₀ , V ₁₁ , V ₁₂ , V ₁₃ , V ₁₄ , V ₁₆ , V ₁₉ , V ₂₀ , V ₂₁ }	{a ₁ , a ₂ , a ₃ , a ₄ , a ₅ , a ₆ , a ₇ , a ₈ , a ₉ , a ₁₀ , a ₁₁ , a ₁₂ , a ₁₃ , a ₁₄ , a ₁₅ , a ₁₈ , a ₁₉ , a ₂₀ }	SUV ₇ = {a ₂₀ } SUV _{v21} = {}	SAV _{v21} = {a ₁ , a ₄ , a ₆ , a ₂₀ }
90	3.2.2.2	-	-	-	-	V ₂₁	-	-	-	-	-	-	-	-	-
91	3.2.2.2	-	-	-	-	{}	-	-	pg _{v7} = 1850	-	-	-	-	-	-
92	3.2.3	-	-	-	V ₈	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
93	3.2.2.2	-	-	-	-	V ₉	-	-	-	-	-	-	-	-	-
94	3.2.2.2	-	-	-	-	V ₁₀	-	-	-	-	-	-	-	-	-
95	3.2.2.2	-	-	-	-	{}	-	-	pg _{v8} = 2050	-	-	-	-	-	-
96	3.2.3	-	-	-	V ₁₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
97	3.2.1	-	-	-	-	V ₁₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
98	3.2.2.1	-	-	-	-	-	pv _{v22} = 1650	pa _{a21} = 650	-	21	22	{V ₁ , V ₂ , V ₃ , V ₄ , V ₅ , V ₇ , V ₈ , V ₉ , V ₁₀ , V ₁₁ , V ₁₂ , V ₁₃ , V ₁₄ , V ₁₆ , V ₁₉ , V ₂₀ , V ₂₁ , V ₂₂ }	{a ₁ , a ₂ , a ₃ , a ₄ , a ₅ , a ₆ , a ₇ , a ₈ , a ₉ , a ₁₀ , a ₁₁ , a ₁₂ , a ₁₃ , a ₁₄ , a ₁₅ , a ₁₈ , a ₁₉ , a ₂₀ , a ₂₁ , a ₂₂ }	SUV ₁₂ = {a ₂₁ } SUV _{v22} = {}	SAV _{v22} = {a ₂ , a ₁₀ , a ₁₁ , a ₂₁ }
99	3.2.2.2	-	-	-	-	V ₂₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
100	3.2.2.1	-	-	-	-	-	pv _{v23} = 1900	pa _{a22} = 250	-	22	23	{V ₁ , V ₂ , V ₃ , V ₄ , V ₅ , V ₇ , V ₈ , V ₉ , V ₁₀ , V ₁₁ , V ₁₂ , V ₁₃ , V ₁₄ , V ₁₆ , V ₁₉ , V ₂₀ , V ₂₁ , V ₂₂ , V ₂₃ }	{a ₁ , a ₂ , a ₃ , a ₄ , a ₅ , a ₆ , a ₇ , a ₈ , a ₉ , a ₁₀ , a ₁₁ , a ₁₂ , a ₁₃ , a ₁₄ , a ₁₅ , a ₁₈ , a ₁₉ , a ₂₀ , a ₂₁ , a ₂₂ }	SUV ₂₂ = {a ₂₂ } SUV _{v23} = {}	SAV _{v23} = {a ₂ , a ₁₀ , a ₁₁ , a ₂₁ , a ₂₂ }
100	3.2.2.1	-	-	-	-	-	pv _{v24} = 2150	pa _{a23} = 500	-	23	24	{V ₁ , V ₂ , V ₃ , V ₄ , V ₅ , V ₇ , V ₈ , V ₉ , V ₁₀ , V ₁₁ , V ₁₂ , V ₁₃ , V ₁₄ , V ₁₆ , V ₁₉ , V ₂₀ , V ₂₁ , V ₂₂ , V ₂₃ , V ₂₄ }	{a ₁ , a ₂ , a ₃ , a ₄ , a ₅ , a ₆ , a ₇ , a ₈ , a ₉ , a ₁₀ , a ₁₁ , a ₁₂ , a ₁₃ , a ₁₄ , a ₁₅ , a ₁₈ , a ₁₉ , a ₂₀ , a ₂₁ , a ₂₂ , a ₂₃ }	SUV ₂₂ = {a ₂₂ , a ₂₃ } SUV _{v24} = {}	SAV _{v23} = {a ₂ , a ₁₀ , a ₁₁ , a ₂₁ , a ₂₃ }
101	3.2.2.2	-	-	-	-	V ₂₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-
102	3.2.2.2	-	-	-	-	{}	-	-	pg _{v12} = 2150	-	-	-	-	-	-
103	3.2.3	-	-	-	V ₁₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
104	3.2.1	-	-	-	-	V ₁₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-
105	3.2.2.2	-	-	-	-	V ₁₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-
106	3.2.2.2	-	-	-	-	{}	-	-	pg _{v13} = 2000	-	-	-	-	-	-
107	3.2.3	-	-	-	V ₁₉	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
108	3.2.1	-	-	-	-	V ₁₉	-	-	-	-	-	-	-	-	-
109	3.2.2.1	-	-	-	-	-	pv _{v25} =	pa _{a24} =	-	24	25	{V ₁ , V ₂ , V ₃ , V ₄ , V ₅ , V ₇ ,	{a ₁ , a ₂ , a ₃ , a ₄ , a ₅ , a ₆ ,	SUV ₁₉ = {a ₂₄ }	SAV _{v25} = {a ₃ , a ₁₅ , a ₁₈ ,

Pas. Sol.	Passo Algorit.	VSE	VSE'	v_k	vgg	Vgl	pv	pa	pg	x	y	V	A	SU	SA
			V_{24}												
146	3	-	-	V_9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
147	3.1	-	-	-	V_9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
148	3.2.1	-	-	-	-	V_9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
149	3.2.2.2	-	$\{V_{23}, V_{24}, V_{10}\}$	-	-	$\{\}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
150	3	-	-	V_{14}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
151	3.1	-	-	-	V_{14}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
152	3.2.1	-	-	-	-	V_{14}	-	-	-	-	-	-	-	-	-
153	3.2.2.2	-	-	-	-	$\{\}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
154	3.2.3	-	-	-	V_{23}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
155	3.2.1	-	-	-	-	V_{23}	-	-	-	-	-	-	-	-	-
156	3.2.2.1	-	-	-	-	-	$pv_{v27} = 2200$	$pa_{a26} = 300$	-	26	27	$\{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_7, V_8, V_9, V_{10}, V_{11}, V_{12}, V_{13}, V_{14}, V_{16}, V_{19}, V_{20}, V_{21}, V_{22}, V_{23}, V_{24}, V_{25}, V_{26}, V_{27}\}$	$\{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}, a_{15}, a_{18}, a_{19}, a_{20}, a_{21}, a_{22}, a_{23}, a_{24}, a_{25}, a_{26}\}$	$SUV_{23} = \{a_{27}\}$ $SUV_{27} = \{\}$	$SAV_{27} = \{a_2, a_{10}, a_{11}, a_{21}, a_{22}, a_{26}\}$
157	3.2.2.2	-	-	-	-	V_{27}	-	-	-	-	-	-	-	-	-
158	3.2.2.2	-	-	-	-	$\{\}$	-	-	$pg_{v23} = 2200$	-	-	-	-	-	-
159	3.2.3	-	-	-	V_{24}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
160	3.2.1	-	-	-	-	V_{24}	-	-	-	-	-	-	-	-	-
161	3.2.2.2	-	-	-	-	$\{\}$	-	-	$pg_{v24} = 2150$	-	-	-	-	-	-
162	3.2.3	-	-	-	V_{10}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
163	3.2.1	-	-	-	-	V_{10}	-	-	-	-	-	-	-	-	-
164	3.2.2.2	-	-	-	-	$\{\}$	-	-	$pg_{v10} = 2050$	-	-	-	-	-	-
165	3.2.3	-	-	-	$\{\}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
166	4	$\{V_{23}, V_{24}, V_{10}\}$	$\{\}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
167	3	-	-	V_{23}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
168	3.1	-	-	-	V_{23}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
169	3.2.1	-	-	-	-	V_{23}	-	-	-	-	-	-	-	-	-
170	3.2.2.2	-	$\{V_{27}\}$	-	-	$\{\}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
171	3	-	-	V_{24}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
172	3.1	-	-	-	V_{24}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
173	3.2.1	-	-	-	-	V_{24}	-	-	-	-	-	-	-	-	-
174	3.2.2.2	-	-	-	-	$\{\}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
175	3	-	-	V_{10}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
176	3.1	-	-	-	V_{10}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
177	3.2.1	-	-	-	-	V_{10}	-	-	-	-	-	-	-	-	-
178	3.2.2.2	-	-	-	-	$\{\}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
179	3.2.3	-	-	-	V_{27}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
180	3.2.1	-	-	-	-	V_{27}	-	-	-	-	-	-	-	-	-
181	3.2.2.2	-	-	-	-	$\{\}$	-	-	$pg_{v27} = 2200$	-	-	-	-	-	-
182	3.2.3	-	-	-	$\{\}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
183	4	$\{V_{27}\}$	$\{V_{27}\}$	-	-	-	-	-	-	-	-	$\{V_1, V_3, V_{11}, V_{12}, V_{22}, V_{23}, V_{27}\}$	$\{a_2, a_{10}, a_{11}, a_{21}, a_{22}, a_{26}\}$	-	-
FIM		$AS = \{a_2, a_{10}, a_{11}, a_{21}, a_{22}, a_{26}\}, VS = \{V_1, V_3, V_{11}, V_{12}, V_{22}, V_{23}, V_{27}\}$													

APÊNDICE A2 O AMBIENTE PRODUTIVO EXPERIMENTAL

Todos os casos gerados tomam por base o mesmo ambiente de produção fictício de uma fundição de mercado. A seguir este ambiente produtivo será descrito de acordo com suas principais características.

O ambiente de produção tomado por base é estruturado de acordo com o sistema de controle da produção *PBC* esquematizado na *figura 6.2*. Foi considerado para cada período, em cada estágio de produção, uma duração de 2 dias, desta forma, o ciclo produtivo terá uma duração de 8 dias de trabalho.

Este ambiente de produção é formado pelo estágio de acúmulo de pedidos, de moldagem, de vazamento e apenas 1 estágio de acabamento. Para este ambiente de produção existem 14 operações produtivas que devem ser programadas no estágio de moldagem e no estágio de acabamento. Estas operações estão descritas resumidamente na *tabela A2.1*.

TABELA A2.1: Descrição das operações de produção consideradas nos casos experimentais

Ident.	Operação	Estágio	Permite intercâmbio de capacidade
1	Projeto de Fundido	Moldagem	Sim
2	Moldagem	Moldagem	Sim
3	Maxaria	Moldagem	Sim
4	Fechamento	Moldagem	Sim
5	Desmoldagem	Acabamento	Sim
6	Corte	Acabamento	Sim
7	Rebarba	Acabamento	Sim
8	Lixamento Grosso	Acabamento	Sim
9	Lixamento Fino	Acabamento	Sim
10	Tratamento Térmico	Acabamento	Não
11	Tratamento Físico	Acabamento	Não
12	Controle de Qualidade 1	Acabamento	Sim
13	Controle de Qualidade 2	Acabamento	Sim
14	Controle de Qualidade 3	Acabamento	Sim

Serão consideradas 12 ligas metálicas diferentes possíveis para os itens de pedidos, de forma que cada item de pedido será composto de uma destas ligas metálicas. Será considerado, a título de experimentação, que o tipo de liga metálica e o peso bruto de cada item de pedido serão diretamente proporcional ao retorno financeiro do referido item.

Na *tabela A2.2* estão listados o retorno financeiro obtido por peso de cada tipo de liga metálica.

TABELA A2.2: Retorno bruto por peso de liga metálica

Tipo de Liga Metálica	Retorno Obtido Por Kg de Peso Bruto do Item de Pedido (R\$)
1	6,00
2	6,00
3	4,00
4	4,00
5	5,00
6	5,00
7	7,00
8	7,00
9	8,00
10	8,00
11	10,00
12	10,00

Na *tabela A2.3* são apresentados as restrições existentes para o ordenamento destas ligas metálicas nas corridas de fornos.

TABELA A2.3: Restrições para ordenamento das ligas metálicas nas corridas de fornos⁵⁰

Liga	Liga anterior Inviável
1	9
1	10
1	11
1	12
2	9
2	10
2	11
2	12
3	9
3	10
3	11
3	12
4	9
4	10
4	11
4	12
5	1
5	2
5	9
5	10
5	11
5	12

Liga	Liga anterior Inviável
6	1
6	2
6	9
6	10
6	11
6	12
7	1
7	2
7	3
7	4
7	9
7	10
7	11
7	12
8	1
8	2
8	3
8	4
8	9
8	10
8	11
8	12

Já a *tabela A2.4* apresenta as possíveis economias nas corridas de fornos que poderão ser alcançadas com o ordenamento das ligas metálicas nestas corridas.

⁵⁰ Por exemplo, não se pode realizar uma corrida para a liga metálica 1 em um forno que tenha acabado de realizar uma corrida para a liga metálica 9

TABELA A2.4: Economia possível com o ordenamento das ligas metálicas nas corridas de fornos⁵¹

Liga	Liga anterior econômica	Liga	Liga anterior econômica
1	1	3	7
1	2	3	8
1	3	4	3
1	4	4	4
1	5	4	5
1	6	4	6
1	7	4	7
1	8	4	8
2	1	5	5
2	2	5	6
2	3	5	7
2	4	5	8
2	5	6	5
2	6	6	6
2	7	6	7
2	8	6	8
3	3	7	7
3	4	7	8
3	5	8	7
3	6	8	8

O ambiente considerado terá 2 reatores para fornos, a *tabela A2.5* apresenta as características dos fornos para estes reatores.

TABELA A2.5: Características dos fornos dos reatores um e dois

Reator 1					
Número máximo de corridas no ciclo do reator 1			16		
Identificador	Descrição	Capacidade (em Kg)	Custo Corrida (R\$)	Economia Custo Corrida (R\$)	Numero Máximo Corridas no Ciclo
1	Forno 1	850	1900	500	8
2	Forno 2	850	1900	500	8
3	Forno 3	1500	3200	1000	8
Reator 2					
Número máximo de corridas no ciclo do reator 2			16		
Identificador	Descrição	Capacidade (em Kg)	Custo Corrida (R\$)	Economia Custo Corrida (R\$)	Numero Máximo Corridas no Ciclo
5	Forno 5	1200	2600	800	8
6	Forno 6	1000	2200	700	8
7	Forno 7	200	600	100	8
8	Forno 8	100	400	100	8

⁵¹ Por exemplo, será econômico, em uma corrida de forno, fundir a liga 7 após ter fundido a liga 7 ou a liga 8 neste mesmo forno

Perceba que a soma das corridas de todos os fornos de qualquer um dos reatores é maior que o número máximo de corridas do mesmo reator, ou seja, o número máximo de corridas de fornos em um ciclo será limitado pelos reatores, totalizando para este ambiente produtivo um máximo de 32 corridas de fornos. Uma vez que será o processo de elaboração da programação da produção quem definirá quais fornos serão empregados em cada corrida de forno programada, a capacidade máxima, em peso, disponível em um ciclo dependerá de quais fornos serão usados. Por exemplo, caso seja utilizado oito corridas em cada um dos fornos 2, 3, 5 e 6, a capacidade máxima disponível em peso, para todas as corridas, será de 36.400 Kg no ciclo de produção. Por outro lado, caso seja programado 8 corridas em cada um dos fornos 1, 2, 7 e 8 a capacidade máxima disponível em peso, para todos os fornos, será de 16.000 Kg no ciclo de produção, existindo, também, várias outras combinações intermediárias dependendo da programação gerada. Visando criar um índice de uso de capacidade, em peso, dos fornos, será empregado a média da capacidade de todos os fornos, multiplicado pelo número máximo de corridas disponível no ciclo, totalizando 26.057 Kg.

Com base neste ambiente produtivo foram gerados 8 cenários experimentais de chegada de pedidos e de capacidades agregadas das operações. Estes cenários foram simulados com base em distribuições estatísticas que visam reproduzir um ambiente característico de uma fundição de mercado. Nas tabelas a seguir a forma na qual estes cenários foram gerados serão descritos com maiores detalhes.

Primeiramente, quanto às operações produtivas, para todos os cenários foram tomadas por base as mesmas distribuições de capacidades, sendo que, para cada operação produtiva, estas capacidades estão agregadas em minutos por dia. Estas distribuições estatísticas podem ser visualizadas na *tabela A2.6*.

TABELA A2.6: Distribuições estatísticas das capacidades agregadas das operações produtivas para todos os cenários

Cenários	Operação	Tipo de Distribuição	Média da Capacidade Máx. Dispon. (min/dia)
“Todos”	Projeto de Fundido	Poisson	600
“Todos”	Moldagem	Poisson	2160
“Todos”	Maxaria	Poisson	1200
“Todos”	Fechamento	Poisson	1200
“Todos”	Desmoldagem	Poisson	320
“Todos”	Corte	Poisson	1200
“Todos”	Rebarba	Poisson	1200
“Todos”	Lixamento Grosso	Poisson	1200
“Todos”	Lixamento Fino	Poisson	1200
“Todos”	Tratamento Térmico	Poisson	1200
“Todos”	Tratamento Físico	Poisson	600
“Todos”	Controle de Qualidade 1	Poisson	320
“Todos”	Controle de Qualidade 2	Poisson	320
“Todos”	Controle de Qualidade 3	Poisson	320

Para estes cenários considerados, a distribuição estatística de chegada de pedidos por dia, pode-ser visualizada na *tabela A2.7*.

TABELA A2.7: Distribuição estatística de chegadas de pedidos por dia

Cenários	Tipo Distribuição	Média do número de chegadas de pedidos por dia (un.)	Desvio Padrão (un.)
“Todos”	Normal	50	8

Na *tabela A2.8* encontra-se a distribuição estatística do número de itens de pedidos⁵² diferentes em cada pedido recebido. Estas distribuições estatísticas também serão as mesmas para cada cenário considerado.

⁵² Tomando por base o processo de operacionalização da programação da produção nas fundições de mercado analisadas, será considerado como item de pedido o conjunto de peças encomendadas em um mesmo pedido que possuam o mesmo modelo e a mesma liga metálica. Ou seja, um item de pedido poderá conter mais de uma peça, desta forma, serão consideradas pelo sistema de apoio à decisão as informações agregadas de consumo de operações e de peso bruto das peças que compõe um item de pedido

TABELA A2.8: Distribuição estatística do número de itens de pedidos diferentes para cada pedido

Cenários	Tipo de Distribuição	Média do Número de itens de pedidos diferentes para cada pedido (un.)	Desvio Padrão (un.)
“Todos”	Normal	3	1

O prazo de entrega fixado com o cliente para cada item de pedido foi obtido para todos os cenários de acordo com a distribuição estatística da *tabela A2.9*. Perceba que o prazo de entrega para cada item de pedido será o prazo mínimo mais o resultado gerado pela distribuição estatística da *tabela A2.9*.

TABELA A2.9: Distribuição estatística do prazo de entrega para cada item de pedido

Cenários	Prazo Mínimo (Dias)	Tipo de Distribuição	Prazo Médio complementar (Dias)	Desvio Padrão (Dias)
“Todos”	8	Normal	7	3

Para definir as características dos itens de pedido encomendados foi criado um modelo fictício para realizar estatisticamente estas definições. Para isto foram definidas três características principais que caracterizarão cada item de pedido, quais sejam: peso, complexidade e tipo de liga metálica. Na *tabela A2.10* encontram-se os detalhes sobre as distribuições estatísticas, para cada uma destas características definidas, que foram usadas em cada um dos cenários diferentes.

TABELA A2.10: Distribuições estatísticas dos detalhes de cada modelo para cada item de pedido

Cen.	Peso			Complexidade			Tipo de Liga		
	Tipo de Distrib.	Mín. (Kg)	Máx. (Kg)	Tipo de Distrib.	Mín. (un.)	Máx. (un.)	Tipo de Distrib.	Média	Desvio Padrão
BMMM	Uniforme	1	250	Uniforme	1	10	Normal	1	7
MMMA	Uniforme	1	250	Uniforme	1	10	Normal	1	5
AAMA	Uniforme	10	400	Uniforme	1	10	Normal	1	5
AAMM	Uniforme	10	400	Uniforme	1	10	Normal	1	7
BBBB	Uniforme	1	250	Uniforme	1	5	Normal	1	7
MBBA	Uniforme	1	250	Uniforme	1	5	Normal	1	5
MAAB	Uniforme	1	250	Uniforme	5	10	Normal	1	7
BMAA	Uniforme	1	250	Uniforme	5	10	Normal	1	5

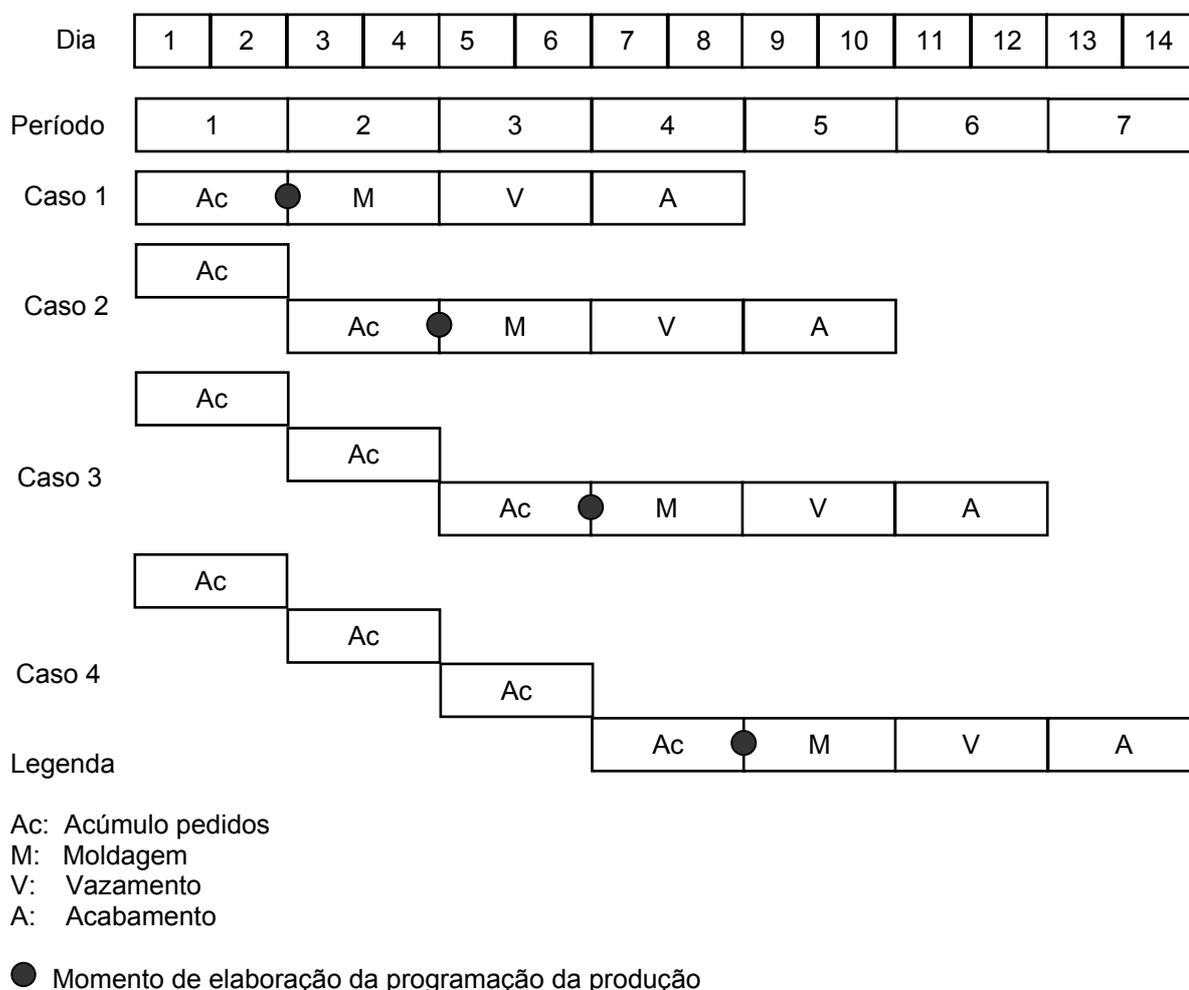
Para cada item de pedido encomendado, de acordo com suas características, deve-se conhecer o consumo em cada operação produtiva para cada estágio de produção, para que o mesmo possa ser programado de forma a obedecer as restrições de capacidade

destas operações. As distribuições estatísticas e a forma de cálculo destas distribuições de consumo pode ser visualizado na *tabela A2.11*.

TABELA A2.11: Distribuições estatísticas do consumo das capacidades produtivas para cada item de pedido

Cenários	Operação	Probabilidade de Uso (%)	Consumo Operação		
			Tipo Distribuição	Média (min)	Desvio Padrão (min)
“Todos”	Projeto de Fundido	20	Normal	0,08* Complexidade* Peso	0,05* (1+Complexidade/ 10)*Peso
“Todos”	Moldagem	100	Normal	0,025* Complexidade* Peso	0,02* (1+Complexidade/ 10)*Peso
“Todos”	Maxaria	20	Normal	0,1* Complexidade* Peso	0,08* (1+Complexidade/ 10)*Peso
“Todos”	Fechamento	100	Normal	0,015* Complexidade* Peso	0,008* (1+Complexidade/ 10)*Peso
“Todos”	Desmoldagem	100	Normal	0,004* Complexidade* Peso	0,001* (1+Complexidade/ 10)*Peso
“Todos”	Corte	100	Normal	0,015* Complexidade* Peso	0,01* (1+Complexidade/ 10)*Peso
“Todos”	Rebarba	100	Normal	0,015* Complexidade* Peso	0,02* (1+Complexidade/ 10)*Peso
“Todos”	Lixamento Grosso	100	Normal	0,012* Complexidade* Peso	0,01* (1+Complexidade/ 10)*Peso
“Todos”	Lixamento Fino	100	Normal	0,015* Complexidade* Peso	0,01* (1+Complexidade/ 10)*Peso
“Todos”	Tratamento Térmico	25	Normal	60	40
“Todos”	Tratamento Físico	12,5	Normal	60	40
“Todos”	Controle de Qualidade 1	10	Normal	0,05* Complexidade* Peso	0,05* (1+Complexidade/ 10)*Peso
“Todos”	Controle de Qualidade 2	10	Normal	0,02* Complexidade* Peso	0,05* (1+Complexidade/ 10)*Peso
“Todos”	Controle de Qualidade 3	80	Normal	0,003* Complexidade* Peso	0,005* (1+Complexidade/ 10)*Peso

De posse destas distribuições estatísticas os 8 cenários experimentais diferentes foram simulados, considerando, para cada, 14 dias de trabalho. Tomando por base a duração do ciclo de produção, como definido anteriormente, de 8 dias e a duração de cada período, de 2 dias, será possível executar 4 ciclos produtivos em cada cenário. Desta forma, para cada cenário, ficarão disponíveis para testes 4 casos experimentais, sendo que, para cada caso experimental, a principal diferença será o período de início do ciclo e o número de itens de pedidos disponíveis à programar. Este esquema é melhor visualizado na *figura A2.1*.



FIGURA

A2.1: Esquema de geração dos casos experimentais para cada cenário

Perceba que o caso experimental 1 envolverá somente os itens de pedidos que foram recebidos no período 1, ou seja, durante os dias de trabalho 1 e 2. Já o caso 2

considera como se o caso um não houvesse programado nenhum item de pedido, de forma que, todos os itens de pedidos do ciclo do caso 1 serão acumulados para o ciclo do caso 2. Este mesmo raciocínio se aplica aos casos 3 e 4, de forma que, por último, o caso 4 envolva os itens de pedidos que chegaram do dia de trabalho 1 ao dia de trabalho 8. O principal objetivo deste procedimento é testar a performance dos métodos de solução frente à diferentes níveis de quantidade de itens de pedidos à programar e, conseqüentemente, diferentes níveis de necessidade de consumo de capacidade das operações e das corridas de fornos, e também, frente a datas de chegada e entrega de pedidos mais heterogêneas.

Quanto ao valor de cada item de pedido, considerando os itens que não sofreram nenhum atraso na data de entrega, este valor será o próprio retorno financeiro bruto do item. Deve-se considerar também o custo envolvido com os itens de pedidos que estão com atraso na data de entrega prometida. Na prática do ambiente produtivo de uma fundição de mercado, como relatado no capítulo 3, estes atrasos representam desgastes no relacionamento com os clientes e até multas provenientes de contratos pré-estabelecidos, ou seja, estes custos muitas vezes não são quantificáveis diretamente, entretanto, não devem ser desconsiderados, como revelou o “*survey*” aplicado nas fundições de mercado do interior do estado de São Paulo (FERNANDES & LEITE, 2002). Uma forma de quantificar estes custos seria buscar transformá-los em valores financeiros, sendo assim, estes custos serão somados ao valor do item, ou seja, quanto mais atrasado o item de pedido, maior será o valor deste item do ponto de vista do processo de elaboração da programação da produção⁵³. Desta forma, foi definido, a título de experimentação, para todos os experimentos um aumento de 2% do valor do item de pedido para cada dia de atraso deste item.

Por fim, considerando cada cenário simulado e cada caso de análise em cada um destes cenários, estarão disponíveis para análise 32 casos diferentes. A seguir, na *tabela A2.12*, as informações para cada um destes casos, de acordo com os valores obtidos nas simulações dos cenários correspondentes, são expostas resumidamente.

⁵³ É importante relatar que o ponto de vista do processo de elaboração da programação da produção é diferente do ponto de vista da contabilidade de custos, ou seja, para a contabilidade de custos, o custo de atraso irá subtrair o retorno financeiro do item, já para a programação da produção, quanto maior o custo de atraso de um item maior o interesse de programar este item, ou seja, maior será o valor deste item para quem está elaborando a programação da produção

TABELA A2.12: Informações resumidas sobre os casos experimentais

Cenário	Caso	Num. Itens Pedid.	Peso Bruto Total (Kg)	Valor Total ⁵⁴ (R\$)	Neces. Total Capacidade Operaç. (min)	Rel. Cap. Disp./Cap. Nec. Fornos (%)	Rel. Cap. Disp./Cap. Nec. Oper. (%)
BMMM	1	234	29.332,1	173.722,35	21.945,5	102,2	88,8
BMMM	2	461	30.371,4	333.979,91	43.941,5	46,2	51,0
BMMM	3	685	87.149,3	509.903,33	68.074,1	29,9	32,8
BMMM	4	884	110.498,7	658.951,21	85.300,6	23,6	26,5
MMMA	1	275	31.814,6	173.265,24	25.560,2	81,9	88,3
MMMA	2	500	61.736,5	334.157,46	48.307,4	42,2	46,4
MMMA	3	745	92.840,6	508.635,25	72.190,2	28,1	31,5
MMMA	4	1004	124.692,4	685.159,41	95640,0	20,9	23,5
AAMA	1	251	52.615,0	296.229,80	37.715,0	49,5	63,3
AAMA	2	463	98.133,8	561.724,95	65.868,9	34,5	26,6
AAMA	3	695	146.906,0	832.241,23	104.659,7	17,7	21,9
AAMA	4	972	203.269,3	1.153.800,99	147.179,9	12,8	15,2
AAMM	1	231	46.375,1	271.460,02	36.652,9	56,2	61,7
AAMM	2	478	100.390,9	589.428,20	75.521,1	26,0	29,7
AAMM	3	720	152.186,1	904.941,48	115.798,6	17,1	19,1
AAMM	4	976	205.396,6	1.217.832,10	153.766,2	12,7	14,4
BBBB	1	181	20.268,5	116.237,02	9.385,0	128,6	241,0
BBBB	2	386	48.247,3	299.172,09	22.287,4	54,0	100,0
BBBB	3	592	73.040,9	448.295,12	34.054,1	35,7	66,9
BBBB	4	829	104.002,4	642.502,31	47.004,3	25,1	47,5
MBBA	1	249	31.384,9	168.736,17	14.092,6	83,0	160,2
MBBA	2	460	56.631,1	310.981,39	25.569,0	46,0	88,2
MBBA	3	684	83.983,3	464.465,17	37.840,6	31,0	59,4
MBBA	4	944	116.839,1	656.047,10	22.550,0	22,3	42,3
MAAB	1	265	34.228,0	213.355,43	34.534,9	76,1	64,9
MAAB	2	528	67.673,9	410.262,15	70.076,8	38,5	32,4
MAAB	3	782	99.946,0	602.231,22	103.642,0	26,1	21,7
MAAB	4	1040	126.890,4	764.587,81	134.925,2	20,5	16,7
BMAA	1	216	25.512,6	141.090,64	27.292,8	102,1	82,4
BMAA	2	400	51.876,2	295.734,81	53.317,8	50,2	42,1
BMAA	3	561	72.653,2	413.037,28	74.984,4	35,9	29,8
BMAA	4	754	101.182,8	568.954,25	105.555,2	25,8	21,2

Por fim, a *tabela A2.13* procura mostrar resumidamente o quanto os itens de pedidos encontram-se distribuídos nos tipo de ligas possíveis.

⁵⁴ O valor total de um item é o retorno bruto de acordo com o peso do item e o tipo de liga do item e também um aumento de 2% deste valor para cada dia de atraso do pedido

TABELA A2.13: Distribuição dos itens de pedidos através dos tipos de ligas disponíveis

Cenário	Caso	Liga 1 (%)	Liga 2 (%)	Liga 3 (%)	Liga 4 (%)	Liga 5 (%)	Liga 6 (%)	Liga 7 (%)	Liga 8 (%)	Liga 9 (%)	Liga 10 (%)	Liga 11 (%)	Liga 12 (%)
BMMM	1	11,2	10,3	13,2	15,0	9,3	9,5	7,7	5,9	5,9	2,7	6,0	3,1
BMMM	2	11,9	9,7	13,8	12,5	7,9	10,4	10,3	7,8	5,5	3,0	4,5	2,6
BMMM	3	10,8	10,2	13,1	15,0	9,9	9,5	10,6	6,1	5,9	2,4	3,7	2,9
BMMM	4	10,3	12,3	12,5	14,3	9,1	8,4	10,1	6,4	6,5	3,0	3,9	3,3
MMMA	1	19,8	11,5	21,4	10,4	8,5	12,6	4,6	2,4	4,4	1,7	0,8	1,7
MMMA	2	15,7	15,8	16,3	16,1	11,1	10,2	5,0	2,2	3,2	1,8	1,7	0,9
MMMA	3	16,0	14,4	16,6	14,3	12,0	9,9	6,8	2,0	2,4	2,8	1,3	1,6
MMMA	4	16,1	14,5	17,5	13,9	11,4	8,7	6,5	3,8	2,3	2,9	1,2	1,2
AAMA	1	17,0	14,3	16,3	12,0	10,4	9,1	4,1	3,3	7,2	3,6	1,6	1,0
AAMA	2	18,6	12,0	15,3	12,2	10,1	8,8	3,8	4,7	6,0	4,4	3,3	0,9
AAMA	3	18,5	14,1	15,2	13,0	9,7	8,5	3,6	4,4	5,3	4,7	2,3	0,7
AAMA	4	16,2	15,2	15,7	12,5	11,8	8,0	4,3	3,3	5,4	4,0	2,7	1,0
AAMM	1	16,0	12,7	11,0	12,7	6,3	11,8	5,5	9,7	3,1	7,8	1,8	1,6
AAMM	2	12,6	15,4	9,3	13,1	9,7	11,1	7,5	6,6	4,2	6,2	2,3	2,2
AAMM	3	11,9	13,0	11,2	12,0	9,0	10,8	9,7	6,2	3,4	7,0	2,4	3,4
AAMM	4	11,2	13,3	12,5	12,0	8,5	11,8	8,2	5,6	4,8	6,1	2,9	3,2
BBBB	1	7,5	12,8	14,9	12,3	11,4	9,4	14,5	4,8	4,5	5,4	1,1	1,3
BBBB	2	12,2	10,5	13,4	8,2	8,5	6,7	12,3	7,0	5,6	6,9	4,0	4,5
BBBB	3	14,1	9,3	11,6	9,1	8,4	9,3	13,0	5,1	6,3	6,7	2,9	4,2
BBBB	4	12,8	11,2	11,4	9,4	7,9	9,1	11,2	6,5	6,6	6,1	3,9	4,0
MBBA	1	14,2	18,5	20,3	10,4	13,5	8,7	4,4	5,2	2,6	1,5	0,9	0,0
MBBA	2	14,9	15,3	14,9	16,3	11,9	8,0	6,6	4,9	2,4	2,0	1,3	1,4
MBBA	3	16,6	15,6	15,6	14,3	12,1	6,8	6,4	5,8	2,6	1,5	1,8	1,0
MBBA	4	16,8	14,8	15,7	12,1	11,5	8,1	5,7	6,6	3,8	2,4	1,7	0,8
MAAB	1	12,5	5,6	11,9	12,1	10,0	3,6	8,4	9,5	10,4	8,9	0,5	6,6
MAAB	2	12,8	8,0	10,8	13,2	8,7	8,5	8,9	8,2	7,9	6,6	2,7	3,6
MAAB	3	12,5	11,0	11,3	11,7	9,4	9,3	7,2	7,8	7,7	6,3	3,0	3,0
MAAB	4	12,4	12,0	10,9	12,0	10,0	8,9	6,1	7,9	7,6	6,1	3,1	2,9
BMAA	1	10,3	20,7	15,8	17,5	7,9	7,0	3,6	6,8	3,7	5,3	0,7	0,8
BMAA	2	16,8	17,6	12,5	13,4	9,6	8,0	5,1	6,1	4,8	2,9	1,5	1,7
BMAA	3	18,0	17,2	12,3	13,1	10,3	8,1	5,0	6,0	3,9	3,5	1,5	1,3
BMAA	4	17,9	16,1	13,6	13,4	10,2	9,7	5,3	4,6	3,5	3,2	1,3	1,2

APÊNDICE A3 DESCRIÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Com base nos casos experimentais gerados para o ambiente produtivo experimental descrito no “Apêndice A2”, foram realizados os experimentos para os modelos propostos no capítulo 6, sendo realizado, para cada caso experimental, um experimento para o modelo que fornece o limite superior, qual seja, *PLIRX* e outro para o limite inferior *PLIRTI*, e também o modelo *PLI*, o modelo *PLIRT2*, este último sendo executado com os tempos de 360 e 3600 segundos, além do modelo heurístico *HE*, considerando os diâmetros 1, 3 e 10 e, por fim, o modelo *AG*. Desta forma, foram realizados 9 experimentos para cada caso experimental, totalizando, considerando todos os casos experimentais, 288 experimentos. É importante lembrar que o limite superior obtido pela estimativa da solução ótima do método de solução do modelo *PLIRX*, considerando um tempo de solução de 14.400 segundos, não fornece os detalhes da solução, como, por exemplo, o peso total programado e o consumo total das operações, para isto, é necessário usar os resultados fornecidos por *PLIRX* como entrada do método de solução do modelo *PLIRTI*, fornecendo desta forma o limite inferior. Estes resultados podem ser vistos resumidamente na *tabela A3.1*.

TABELA A3.1: Resumo dos resultados apresentados pelos métodos de solução para os casos experimentais tratados

Cenário	Cas.	Exp.	Método de Solução	Tempo Solução	Peso Total Program. (Kg)	Consumo Total Ope. (min)	Valor Função Obj. (R\$)	Rel. Peso Pr. / Cap. Forno (%)	Rel. Cons / Cap. Disp. Op. (%)	Rel. Val. F. Obj. / Lim. Sup. (%)
BMMM	1	1	LIM. SUP.	14.400,0			124.958,30			1,00
BMMM	1	2	PLI	21.600,0	18.609,44	22.707,03	61.683,10	71,42	62,65	0,49
BMMM	1	3	PLIRT1	18.000,0	28.783,83	34.694,89	116.243,10	110,46	95,72	0,93
BMMM	1	4	PLIRT2-360	360,0	25.477,38	30.950,88	100.192,37	97,78	85,39	0,80
BMMM	1	5	PLIRT2-3600	3.600,0	26.938,23	32.403,74	110.152,13	103,38	89,40	0,88
BMMM	1	6	AG	13,0	28.247,17	34.221,37	113.868,77	108,40	94,42	0,91
BMMM	1	7	HE (1)	18,4	27.893,09	33.343,26	114.296,37	107,05	91,99	0,91
BMMM	1	8	HE (3)	56,2	28.147,67	33.771,81	116.501,72	108,02	93,18	0,93
BMMM	1	9	HE (10)	156,3	28.155,27	33.206,10	116.869,38	108,05	91,62	0,94
BMMM	2	10	LIM. SUP.	14.400,0			177.097,92			1,00
BMMM	2	11	PLI	21.600,0	2.992,40	3.490,70	12.554,39	11,48	9,61	0,07
BMMM	2	12	PLIRT1	18.000,0	34.718,22	35.559,60	167.464,15	133,24	97,92	0,95
BMMM	2	13	PLIRT2-360	360,0	32.307,70	35.224,40	159.785,65	123,99	97,00	0,90
BMMM	2	14	PLIRT2-3600	3.600,0	32.510,08	35.269,43	160.897,56	124,76	97,12	0,91
BMMM	2	15	AG	28,3	30.152,28	35.575,46	159.437,53	115,72	97,97	0,90
BMMM	2	16	HE (1)	32,9	29.842,20	34.126,79	159.408,73	114,53	93,98	0,90
BMMM	2	17	HE (3)	108,9	30.047,73	34.143,01	159.648,28	115,31	94,02	0,90
BMMM	2	18	HE (10)	348,6	29.936,41	34.202,54	159.934,52	114,89	94,19	0,90
BMMM	3	19	LIM. SUP.	14.400,0			203.781,09			1,00
BMMM	3	20	PLI	21.600,0	6.690,79	4.622,54	28.523,74	25,68	12,82	0,14
BMMM	3	21	PLIRT1	18.000,0	36.106,20	34.997,87	192.550,53	138,57	97,09	0,94
BMMM	3	22	PLIRT2-360	360,0	33.713,07	35.191,05	186.461,36	129,38	97,63	0,92
BMMM	3	23	PLIRT2-3600	3.600,0	33.180,12	35.239,90	184.520,30	127,34	97,76	0,91
BMMM	3	24	AG	35,3	31.358,18	34.837,72	176.625,77	120,34	96,65	0,87
BMMM	3	25	HE (1)	75,3	32.241,44	34.857,01	182.761,95	123,73	96,70	0,90
BMMM	3	26	HE (3)	199,5	32.242,98	34.792,62	182.779,47	123,74	96,52	0,90

Cenário	Cas.	Exp.	Método de Solução	Tempo Solução	Peso Total Program. (Kg)	Consumo Total Ope. (min)	Valor Função Obj. (R\$)	Rel. Peso Pr. / Cap. Forno (%)	Rel. Cons / Cap. Disp. Op. (%)	Rel. Val. F. Obj. / Lim. Sup. (%)
BMMM	3	27	HE (10)	722,5	32.348,78	34.854,31	183.920,22	124,15	96,69	0,90
BMMM	4	28	LIM. SUP.	14.400,0			218.695,53			1,00
BMMM	4	29	PLI	21.600,0	823,63	471,78	6.520,64	3,16	1,29	0,03
BMMM	4	30	PLIRT1	18.000,0	35.931,84	36.354,18	212.463,03	137,90	99,34	0,97
BMMM	4	31	PLIRT2-360	360,0	34.025,98	35.452,26	202.833,49	130,58	96,88	0,93
BMMM	4	32	PLIRT2-3600	3.600,0	34.074,58	35.845,66	203.250,69	130,77	97,96	0,93
BMMM	4	33	AG	29,8	32.099,01	34.969,11	193.196,09	123,19	95,56	0,88
BMMM	4	34	HE (1)	123,3	32.130,68	35.664,79	195.779,13	123,31	97,46	0,90
BMMM	4	35	HE (3)	372,1	32.130,68	35.664,79	195.779,13	123,31	97,46	0,90
BMMM	4	36	HE (10)	1.132,3	32.587,97	35.733,02	196.797,35	125,06	97,65	0,90
MMMA	1	37	LIM. SUP.	14.400,0			114.748,75			1,00
MMMA	1	38	PLI	21.600,0	1.680,34	1.989,62	8.036,78	6,45	5,45	0,07
MMMA	1	39	PLIRT1	18.000,0	29.550,28	35.040,65	108.875,27	113,41	96,07	0,95
MMMA	1	40	PLIRT2-360	360,0	28.468,07	33.607,89	98.771,18	109,25	92,14	0,86
MMMA	1	41	PLIRT2-3600	3.600,0	28.963,09	34.348,70	104.451,93	111,15	94,17	0,91
MMMA	1	42	AG	19,4	28.607,36	34.941,54	106.553,02	109,79	95,80	0,93
MMMA	1	43	HE (1)	28,1	28.979,96	35.345,37	108.578,42	111,22	96,91	0,95
MMMA	1	44	HE (3)	81,9	29.195,59	35.185,10	109.132,23	112,04	96,47	0,95
MMMA	1	45	HE (10)	227,8	29.136,64	35.188,63	109.505,15	111,82	96,48	0,95
MMMA	2	46	LIM. SUP.	14.400,0			156.902,46			1,00
MMMA	2	47	PLI	21.600,0	10.422,89	9.885,92	50.136,12	40,00	26,85	0,32
MMMA	2	48	PLIRT1	18.000,0	35.353,82	35.288,01	150.968,69	135,68	97,14	0,96
MMMA	2	49	PLIRT2-360	360,0	32.867,28	35.073,00	142.325,36	126,14	96,55	0,91
MMMA	2	50	PLIRT2-3600	3.600,0	32.780,92	34.895,03	142.412,37	125,80	96,06	0,91
MMMA	2	51	AG	35,9	30.260,35	35.154,05	137.300,86	116,13	96,77	0,88
MMMA	2	52	HE (1)	45,7	29.834,51	34.903,38	138.411,65	114,50	96,08	0,88
MMMA	2	53	HE (3)	136,0	29.713,00	34.637,92	138.919,78	114,03	95,35	0,89
MMMA	2	54	HE (10)	489,7	30.213,67	35.026,24	139.354,27	115,95	96,42	0,89
MMMA	3	55	LIM. SUP.	14.400,0			180.734,37			1,00
MMMA	3	56	PLI	21.600,0	1.616,85	2.226,14	10.827,50	6,21	6,07	0,06
MMMA	3	57	PLIRT1	18.000,0	35.128,79	36.588,85	172.840,26	134,81	99,77	0,96
MMMA	3	58	PLIRT2-360	360,0	34.006,91	36.390,84	167.476,88	130,51	99,23	0,93
MMMA	3	59	PLIRT2-3600	3.600,0	33.893,43	36.273,92	167.651,12	130,07	98,91	0,93
MMMA	3	60	AG	44,0	32.804,46	36.177,31	157.573,07	125,89	98,65	0,87
MMMA	3	61	HE (1)	99,9	30.082,69	35.254,68	151.817,59	115,45	96,14	0,84
MMMA	3	62	HE (3)	286,8	30.082,69	35.254,68	151.817,59	115,45	96,14	0,84
MMMA	3	63	HE (10)	1.008,8	31.396,90	36.473,42	159.178,65	120,49	99,46	0,88
MMMA	4	64	LIM. SUP.	14.400,0			192.616,82			1,00
MMMA	4	65	PLI	21.600,0	4.071,86	4.778,72	21.132,89	15,63	13,21	0,11
MMMA	4	66	PLIRT1	18.000,0	35.872,46	35.353,30	186.500,82	137,67	96,64	0,97
MMMA	4	67	PLIRT2-360	360,0	34.087,45	36.407,13	175.368,08	130,82	99,52	0,91
MMMA	4	68	PLIRT2-3600	3.600,0	34.087,45	36.407,13	175.368,08	130,82	99,52	0,91
MMMA	4	69	AG	72,8	34.938,95	35.800,50	168.679,57	134,09	97,87	0,88
MMMA	4	70	HE (1)	171,7	31.312,47	35.657,00	168.056,59	120,17	97,47	0,87
MMMA	4	71	HE (3)	458,6	31.312,47	35.657,00	168.056,59	120,17	97,47	0,87
MMMA	4	72	HE (10)	1.688,4	31.660,60	35.677,80	168.463,97	121,50	97,53	0,87
AAMA	1	73	LIM. SUP.	14.400,0			166.292,00			1,00
AAMA	1	74	PLI	21.600,0	24.536,04	23.565,80	100.216,79	94,16	64,59	0,60
AAMA	1	75	PLIRT1	18.000,0	35.352,46	35.020,55	159.894,84	135,67	95,98	0,96
AAMA	1	76	PLIRT2-360	360,0	35.410,63	34.601,67	154.114,66	135,90	94,83	0,93
AAMA	1	77	PLIRT2-3600	3.600,0	35.509,06	34.590,57	154.432,38	136,27	94,80	0,93
AAMA	1	78	AG	9,8	35.143,62	34.121,08	155.350,55	134,87	93,51	0,93
AAMA	1	79	HE (1)	30,2	35.599,97	35.138,67	157.537,50	136,62	96,30	0,95
AAMA	1	80	HE (3)	89,3	34.881,61	34.883,98	158.395,38	133,87	95,60	0,95
AAMA	1	81	HE (10)	311,0	35.617,88	35.145,02	160.379,32	136,69	96,32	0,96
AAMA	2	82	LIM. SUP.	14.400,0			198.399,00			1,00
AAMA	2	83	PLI	21.600,0	10.422,89	9.885,92	50.136,12	40,00	26,85	0,25
AAMA	2	84	PLIRT1	18.000,0	35.742,06	32.993,83	190.222,84	137,17	89,61	0,96
AAMA	2	85	PLIRT2-360	360,0	35.125,73	32.896,71	185.861,40	134,80	89,34	0,94
AAMA	2	86	PLIRT2-3600	3.600,0	35.590,18	32.936,50	187.115,47	136,59	89,45	0,94
AAMA	2	87	AG	15,2	35.861,53	33.670,39	186.319,13	137,63	91,45	0,94
AAMA	2	88	HE (1)	59,1	35.796,76	32.685,28	191.019,27	137,38	88,77	0,96
AAMA	2	89	HE (3)	160,4	35.860,59	32.833,40	191.132,84	137,62	89,17	0,96
AAMA	2	90	HE (10)	529,6	35.860,59	32.833,40	191.132,84	137,62	89,17	0,96

Cenário	Cas.	Exp.	Método de Solução	Tempo Solução	Peso Total Program. (Kg)	Consumo Total Ope. (min)	Valor Função Obj. (R\$)	Rel. Peso Pr. / Cap. Forno (%)	Rel. Cons / Cap. Disp. Op. (%)	Rel. Val. F. Obj. / Lim. Sup. (%)
AAMA	3	91	LIM. SUP.	14.400,0			208.756,00			1,00
AAMA	3	92	PLI	21.600,0	4.486,43	5.021,03	28.986,39	17,22	13,57	0,14
AAMA	3	93	PLIRT1	18.000,0	35.209,24	32.835,48	198.570,86	135,12	88,75	0,95
AAMA	3	94	PLIRT2-360	360,0	35.509,08	33.288,06	201.328,67	136,27	89,98	0,96
AAMA	3	95	PLIRT2-3600	3.600,0	35.509,08	33.288,06	201.328,67	136,27	89,98	0,96
AAMA	3	96	AG	22,8	34.079,13	34.146,99	190.176,39	130,79	92,30	0,91
AAMA	3	97	HE (1)	87,5	34.023,07	33.026,66	192.964,85	130,57	89,27	0,92
AAMA	3	98	HE (3)	245,4	34.700,83	33.304,11	197.098,56	133,17	90,02	0,94
AAMA	3	99	HE (10)	808,9	34.780,70	33.029,86	197.320,64	133,48	89,28	0,95
AAMA	4	100	LIM. SUP.	14.400,0			223.244,00			1,00
AAMA	4	101	PLI	21.600,0	4.071,86	4.778,72	21.132,89	15,63	13,21	0,09
AAMA	4	102	PLIRT1	18.000,0	35.803,50	34.757,28	217.141,99	137,40	96,09	0,97
AAMA	4	103	PLIRT2-360	360,0	34.945,54	34.889,52	212.170,63	134,11	96,45	0,95
AAMA	4	104	PLIRT2-3600	3.600,0	34.988,52	34.895,62	212.642,97	134,28	96,47	0,95
AAMA	4	105	AG	30,4	33.545,38	34.001,32	198.772,35	128,74	94,00	0,89
AAMA	4	106	HE (1)	197,5	33.020,11	34.490,94	200.391,96	126,72	95,35	0,90
AAMA	4	107	HE (3)	542,0	33.488,63	33.793,37	201.138,21	128,52	93,42	0,90
AAMA	4	108	HE (10)	1.286,0	34.238,54	33.850,02	205.555,84	131,40	93,58	0,92
AAMM	1	109	LIM. SUP.	14.400,0			156.596,00			1,00
AAMM	1	110	PLI	21.600,0	29.855,3	33.097,1	115.299,53	114,6	90,2	0,74
AAMM	1	111	PLIRT1	18.000,0	34.542,17	36.394,19	147.300,35	132,56	99,20	0,94
AAMM	1	112	PLIRT2-360	360,0	33.043,29	36.133,65	135.376,78	126,81	98,49	0,86
AAMM	1	113	PLIRT2-3600	3.600,0	32.821,12	36.098,92	136.026,12	125,96	98,40	0,87
AAMM	1	114	AG	10,4	30.620,75	35.345,06	141.072,91	117,51	96,34	0,90
AAMM	1	115	HE (1)	20,1	27.363,32	35.013,73	134.695,12	105,01	95,44	0,86
AAMM	1	116	HE (3)	59,7	27.877,60	35.289,99	135.377,21	106,99	96,19	0,86
AAMM	1	117	HE (10)	188,5	28.624,66	35.543,94	137.206,91	109,85	96,88	0,88
AAMM	2	118	LIM. SUP.	14.400,0			201.895,00			1,00
AAMM	2	119	PLI	21.600,0	21.466,51	17.325,29	92.790,87	82,38	47,72	0,46
AAMM	2	120	PLIRT1	18.000,0	35.674,62	34.664,62	192.858,28	136,91	95,47	0,96
AAMM	2	121	PLIRT2-360	360,0	34.363,60	35.018,74	184.696,56	131,88	96,45	0,91
AAMM	2	122	PLIRT2-3600	3.600,0	33.328,25	35.056,82	180.992,65	127,90	96,55	0,90
AAMM	2	123	AG	20,1	33.874,35	35.225,71	176.412,15	130,00	97,02	0,87
AAMM	2	124	HE (1)	53,7	30.414,71	34.276,09	167.333,38	116,72	94,40	0,83
AAMM	2	125	HE (3)	135,9	32.868,05	34.508,73	174.754,96	126,14	95,04	0,87
AAMM	2	126	HE (10)	463,0	33.309,95	34.658,19	175.760,96	127,83	95,45	0,87
AAMM	3	127	LIM. SUP.	14.400,0			221.963,00			1,00
AAMM	3	128	PLI	21.600,0	7.407,08	6.898,08	28.110,15	28,43	19,14	0,13
AAMM	3	129	PLIRT1	18.000,0	35.542,72	34.669,41	214.633,74	136,40	96,21	0,97
AAMM	3	130	PLIRT2-360	360,0	33.673,09	34.235,47	202.727,30	129,23	95,01	0,91
AAMM	3	131	PLIRT2-3600	3.600,0	32.817,69	34.132,44	197.776,66	125,95	94,72	0,89
AAMM	3	132	AG	30,1	31.678,68	33.601,86	192.993,04	121,57	93,25	0,87
AAMM	3	133	HE (1)	91,2	31.362,89	34.562,73	192.041,22	120,36	95,92	0,87
AAMM	3	134	HE (3)	273,6	31.600,18	34.255,41	194.236,27	121,27	95,06	0,88
AAMM	3	135	HE (10)	888,5	31.600,18	34.255,41	194.236,27	121,27	95,06	0,88
AAMM	4	136	LIM. SUP.	14.400,0			236.578,00			1,00
AAMM	4	137	PLI	21.600,0	2.371,15	3.421,77	10.421,19	9,10	9,52	0,04
AAMM	4	138	PLIRT1	18.000,0	35.665,09	34.295,23	229.587,17	136,87	95,39	0,97
AAMM	4	139	PLIRT2-360	360,0	33.803,12	34.124,48	215.753,29	129,73	94,92	0,91
AAMM	4	140	PLIRT2-3600	3.600,0	33.329,43	33.992,38	211.398,39	127,91	94,55	0,89
AAMM	4	141	AG	37,3	32.787,25	33.899,69	209.748,18	125,83	94,29	0,89
AAMM	4	142	HE (1)	117,3	31.725,66	33.343,22	206.151,30	121,75	92,74	0,87
AAMM	4	143	HE (3)	350,7	31.725,66	33.343,22	206.151,30	121,75	92,74	0,87
AAMM	4	144	HE (10)	1.346,7	33.017,71	34.511,71	211.063,18	126,71	95,99	0,89
BBBB	1	145	LIM. SUP.	14.400,0			81.537,00			1,00
BBBB	1	146	PLI	21.600,0	12.763,62	10.059,24	41.608,21	48,98	27,54	0,51
BBBB	1	147	PLIRT1	18.000,0	20.027,37	15.758,43	75.372,43	76,86	43,14	0,92
BBBB	1	148	PLIRT2-360	360,0	19.420,42	15.112,61	72.386,54	74,53	41,37	0,89
BBBB	1	149	PLIRT2-3600	3.600,0	19.456,58	15.135,92	72.531,20	74,67	41,44	0,89
BBBB	1	150	AG	19,5	19.542,25	15.042,63	73.418,55	75,00	41,18	0,90
BBBB	1	151	HE (1)	9,3	19.711,88	15.293,82	76.655,08	75,65	41,87	0,94
BBBB	1	152	HE (3)	28,7	19.821,61	15.652,27	76.994,00	76,07	42,85	0,94
BBBB	1	153	HE (10)	82,9	19.952,79	15.541,10	76.907,13	76,57	42,54	0,94
BBBB	2	154	LIM. SUP.	14.400,0			186.561,00			1,00

Cenário	Cas.	Exp.	Método de Solução	Tempo Solução	Peso Total Program. (Kg)	Consumo Total Ope. (min)	Valor Função Obj. (R\$)	Rel. Peso Pr. / Cap. Forno (%)	Rel. Cons / Cap. Disp. Op. (%)	Rel. Val. F. Obj. / Lim. Sup. (%)
BBBB	2	155	PLI	21.600,0	1.286,23	655,27	9.062,35	4,94	1,81	0,05
BBBB	2	156	PLIRT1	18.000,0	34.048,78	25.357,31	173.366,61	130,67	69,86	0,93
BBBB	2	157	PLIRT2-360	360,0	36.022,79	26.541,72	177.889,16	138,25	73,13	0,95
BBBB	2	158	PLIRT2-3600	3.600,0	36.127,23	26.065,73	178.487,81	138,65	71,81	0,96
BBBB	2	159	AG	16,5	35.393,02	25.517,41	173.449,59	135,83	70,30	0,93
BBBB	2	160	HE (1)	45,1	35.447,83	25.037,02	177.874,81	136,04	68,98	0,95
BBBB	2	161	HE (3)	128,7	35.454,79	24.966,92	178.138,00	136,07	68,79	0,95
BBBB	2	162	HE (10)	421,1	35.454,79	24.966,92	178.138,00	136,07	68,79	0,95
BBBB	3	163	LIM. SUP.	14.400,0			205.888,00			1,00
BBBB	3	164	PLI	21.600,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BBBB	3	165	PLIRT1	18.000,0	35.796,59	25.294,53	199.108,67	137,38	68,87	0,97
BBBB	3	166	PLIRT2-360	360,0	35.961,44	25.672,23	197.361,42	138,01	69,90	0,96
BBBB	3	167	PLIRT2-3600	3.600,0	35.929,79	25.588,16	199.070,40	137,89	69,67	0,97
BBBB	3	168	AG	23,1	36.180,42	26.286,24	194.805,56	138,85	71,57	0,95
BBBB	3	169	HE (1)	71,4	35.898,81	25.030,05	200.419,47	137,77	68,15	0,97
BBBB	3	170	HE (3)	203,9	35.951,87	25.142,23	200.887,01	137,97	68,45	0,98
BBBB	3	171	HE (10)	674,7	35.951,87	25.142,23	200.887,01	137,97	68,45	0,98
BBBB	4	172	LIM. SUP.	14.400,0			223.441,00			1,00
BBBB	4	173	PLI	21.600,0	2.668,44	2.435,36	15.774,83	10,24	6,71	0,07
BBBB	4	174	PLIRT1	18.000,0	35.968,78	25.583,16	218.942,37	138,04	70,54	0,98
BBBB	4	175	PLIRT2-360	360,0	35.809,52	25.332,36	218.110,54	137,43	69,85	0,98
BBBB	4	176	PLIRT2-3600	3.600,0	35.809,52	25.332,36	218.110,54	137,43	69,85	0,98
BBBB	4	177	AG	29,2	36.126,67	25.975,34	215.205,80	138,64	71,62	0,96
BBBB	4	178	HE (1)	118,1	36.019,48	25.415,41	219.896,04	138,23	70,08	0,98
BBBB	4	179	HE (3)	352,5	36.019,48	25.415,41	219.896,04	138,23	70,08	0,98
BBBB	4	180	HE (10)	1.260,1	36.019,48	25.415,41	219.896,04	138,23	70,08	0,98
MBBA	1	181	LIM. SUP.	14.400,0			116.360,00			1,00
MBBA	1	182	PLI	21.600,0	15.537,40	11.362,95	48.164,84	59,63	31,12	0,41
MBBA	1	183	PLIRT1	18.000,0	31.295,85	23.150,15	113.190,92	120,10	63,41	0,97
MBBA	1	184	PLIRT2-360	360,0	29.994,94	22.224,94	107.801,87	115,11	60,88	0,93
MBBA	1	185	PLIRT2-3600	3.600,0	30.140,68	22.216,66	108.569,93	115,67	60,85	0,93
MBBA	1	186	AG	15,2	30.204,66	22.253,77	110.370,01	115,92	60,96	0,95
MBBA	1	187	HE (1)	26,4	31.384,90	23.243,81	113.836,17	120,45	63,67	0,98
MBBA	1	188	HE (3)	74,9	31.334,82	23.209,87	113.885,76	120,25	63,57	0,98
MBBA	1	189	HE (10)	241,6	31.334,82	23.209,87	113.985,76	120,25	63,57	0,98
MBBA	2	190	LIM. SUP.	14.400,0			165.687,00			1,00
MBBA	2	191	PLI	21.600,0	839,02	747,31	4.812,20	3,22	2,04	0,03
MBBA	2	192	PLIRT1	18.000,0	35.773,23	27.165,31	160.951,51	137,29	74,31	0,97
MBBA	2	193	PLIRT2-360	360,0	36.010,79	27.266,27	156.312,65	138,20	74,59	0,94
MBBA	2	194	PLIRT2-3600	3.600,0	36.010,79	27.266,27	156.312,65	138,20	74,59	0,94
MBBA	2	195	AG	20,7	35.562,23	27.843,66	155.855,79	136,48	76,17	0,94
MBBA	2	196	HE (1)	51,8	31.265,12	22.548,57	145.313,35	119,99	61,68	0,88
MBBA	2	197	HE (3)	171,0	36.144,66	27.775,77	162.411,46	138,71	75,98	0,98
MBBA	2	198	HE (10)	555,0	36.144,66	27.775,77	162.411,46	138,71	75,98	0,98
MBBA	3	199	LIM. SUP.	14.400,0			182.858,00			1,00
MBBA	3	200	PLI	21.600,0	586,12	655,90	3.961,20	2,25	1,80	0,02
MBBA	3	201	PLIRT1	18.000,0	36.053,73	24.854,60	180.493,19	138,36	68,33	0,99
MBBA	3	202	PLIRT2-360	360,0	35.951,22	25.254,70	175.681,24	137,97	69,43	0,96
MBBA	3	203	PLIRT2-3600	3.600,0	35.951,22	25.254,70	175.681,24	137,97	69,43	0,96
MBBA	3	204	AG	25,4	35.981,38	26.013,28	175.647,70	138,09	71,51	0,96
MBBA	3	205	HE (1)	87,6	32.745,16	21.916,20	162.860,02	125,67	60,25	0,89
MBBA	3	206	HE (3)	282,2	36.292,07	24.741,96	180.762,77	139,28	68,02	0,99
MBBA	3	207	HE (10)	965,7	36.291,08	24.929,46	180.741,42	139,27	68,53	0,99
MBBA	4	208	LIM. SUP.	14.400,0			197.382,00			1,00
MBBA	4	209	PLI	21.600,0	1.134,58	1.123,88	5.901,45	4,35	3,08	0,03
MBBA	4	210	PLIRT1	18.000,0	36.011,11	26.868,08	193.670,65	138,20	73,62	0,98
MBBA	4	211	PLIRT2-360	360,0	35.678,45	25.781,71	189.779,90	136,92	70,64	0,96
MBBA	4	212	PLIRT2-3600	3.600,0	35.915,26	26.262,95	191.774,95	137,83	71,96	0,97
MBBA	4	213	AG	35,5	36.141,38	27.897,76	188.664,29	138,70	76,44	0,96
MBBA	4	214	HE (1)	169,5	36.025,90	26.331,35	190.489,52	138,26	72,14	0,97
MBBA	4	215	HE (3)	469,6	36.025,79	26.395,07	190.680,27	138,26	72,32	0,97
MBBA	4	216	HE (10)	1.590,1	36.042,84	27.199,85	190.814,69	138,32	74,52	0,97
MAAB	1	217	LIM. SUP.	14.400,0			126.993,00			1,00
MAAB	1	218	PLI	21.600,0	15.938,66	15.088,72	69.550,49	61,17	67,36	0,55

Cenário	Cas.	Exp.	Método de Solução	Tempo Solução	Peso Total Program. (Kg)	Consumo Total Ope. (min)	Valor Função Obj. (R\$)	Rel. Peso Pr. / Cap. Forno (%)	Rel. Cons / Cap. Disp. Op. (%)	Rel. Val. F. Obj. / Lim. Sup. (%)
MAAB	1	219	PLIRT1	18.000,0	23.937,31	35.188,52	117.277,78	91,86	97,38	0,92
MAAB	1	220	PLIRT2-360	360,0	24.394,31	35.409,94	103.957,63	93,62	97,99	0,82
MAAB	1	221	PLIRT2-3600	3.600,0	24.278,05	35.456,09	113.593,27	93,17	98,12	0,89
MAAB	1	222	AG	21,1	22.685,55	35.026,61	113.749,12	87,06	96,93	0,90
MAAB	1	223	HE (1)	12,8	21.834,26	34.762,51	114.885,24	83,79	96,20	0,90
MAAB	1	224	HE (3)	44,4	22.511,39	34.906,29	115.332,47	86,39	96,59	0,91
MAAB	1	225	HE (10)	153,9	22.689,38	35.180,82	116.875,20	87,08	97,35	0,92
MAAB	2	226	LIM. SUP.	14.400,0			151.259,00			1,00
MAAB	2	227	PLI	21.600,0	11.616,48	11.384,15	61.042,23	44,58	50,21	0,40
MAAB	2	228	PLIRT1	18.000,0	25.131,17	35.549,06	140.856,83	96,45	96,74	0,93
MAAB	2	229	PLIRT2-360	360,0	25.038,21	35.762,36	133.650,59	96,09	97,32	0,88
MAAB	2	230	PLIRT2-3600	3.600,0	25.203,75	36.040,41	133.129,35	96,72	98,08	0,88
MAAB	2	231	AG	50,6	23.197,35	35.321,56	137.609,74	89,02	96,12	0,91
MAAB	2	232	HE (1)	30,6	23.810,37	35.301,85	140.583,70	91,38	96,07	0,93
MAAB	2	233	HE (3)	85,0	23.810,37	35.301,85	140.583,70	91,38	96,07	0,93
MAAB	2	234	HE (10)	292,3	24.082,63	35.028,53	140.964,49	92,42	95,32	0,93
MAAB	3	235	LIM. SUP.	14.400,0			161.114,00			1,00
MAAB	3	236	PLI	21.600,0	10.846,57	10.061,89	50.616,45	41,63	44,65	0,31
MAAB	3	237	PLIRT1	18.000,0	25.503,58	35.460,54	151.794,59	97,88	97,08	0,94
MAAB	3	238	PLIRT2-360	360,0	25.937,00	35.750,89	137.467,92	99,54	97,88	0,85
MAAB	3	239	PLIRT2-3600	3.600,0	25.937,00	35.750,89	137.467,92	99,54	97,88	0,85
MAAB	3	240	AG	73,6	23.258,65	35.642,45	142.219,03	89,26	97,58	0,88
MAAB	3	241	HE (1)	74,2	23.008,45	35.072,67	140.389,68	88,30	96,02	0,87
MAAB	3	242	HE (3)	202,2	23.346,32	35.081,63	143.421,43	89,60	96,05	0,89
MAAB	3	243	HE (10)	718,6	23.459,41	35.267,53	143.837,15	90,03	96,55	0,89
MAAB	4	244	LIM. SUP.	14.400,0			171.460,00			1,00
MAAB	4	245	PLI	21.600,0	6.263,84	4.178,42	23.444,76	24,04	18,59	0,14
MAAB	4	246	PLIRT1	18.000,0	25.503,6	35.460,5	151.794,59	97,9	97,1	0,89
MAAB	4	247	PLIRT2-360	360,0	24.999,73	35.274,58	137.977,02	95,94	96,52	0,80
MAAB	4	248	PLIRT2-3600	3.600,0	24.999,73	35.274,58	137.977,02	95,94	96,52	0,80
MAAB	4	249	AG	108,4	23.526,77	35.030,39	150.216,67	90,29	95,86	0,88
MAAB	4	250	HE (1)	98,2	22.988,07	34.709,21	148.218,59	88,22	94,98	0,86
MAAB	4	251	HE (3)	280,5	22.563,35	35.144,90	147.953,75	86,59	96,17	0,86
MAAB	4	252	HE (10)	1.215,6	22.774,85	35.111,55	148.598,83	87,40	96,08	0,87
BMAA	1	253	LIM. SUP.	14.400,0			91.463,00			1,00
BMAA	1	254	PLI	21.600,0	16.188,25	17.630,62	58.152,40	62,13	78,42	0,64
BMAA	1	255	PLIRT1	18.000,0	22.659,47	34.822,19	82.733,42	86,96	95,71	0,90
BMAA	1	256	PLIRT2-360	360,0	20.417,15	32.341,69	76.119,51	78,36	88,89	0,83
BMAA	1	257	PLIRT2-3600	3.600,0	22.671,14	34.777,57	82.077,65	87,01	95,59	0,90
BMAA	1	258	AG	14,6	21.682,96	34.821,36	81.976,46	83,21	95,71	0,90
BMAA	1	259	HE (1)	12,3	20.836,41	33.466,75	81.447,95	79,96	91,98	0,89
BMAA	1	260	HE (3)	33,3	21.427,12	34.016,98	83.146,29	82,23	93,50	0,91
BMAA	1	261	HE (10)	117,1	21.553,02	34.298,09	84.072,02	82,71	94,27	0,92
BMAA	2	262	LIM. SUP.	14.400,0			126.800,00			1,00
BMAA	2	263	PLI	21.600,0	3.466,26	3.520,98	18.063,79	13,30	15,69	0,14
BMAA	2	264	PLIRT1	18.000,0	25.969,78	34.647,34	117.687,93	99,66	95,25	0,93
BMAA	2	265	PLIRT2-360	360,0	25.618,41	34.781,24	106.569,94	98,32	95,62	0,84
BMAA	2	266	PLIRT2-3600	3.600,0	25.526,49	34.504,92	102.860,07	97,96	94,86	0,81
BMAA	2	267	AG	44,3	22.636,90	34.448,85	113.393,42	86,87	94,70	0,89
BMAA	2	268	HE (1)	25,1	22.928,20	34.277,54	115.192,34	87,99	94,23	0,91
BMAA	2	269	HE (3)	63,3	22.849,81	34.368,27	115.259,36	87,69	94,48	0,91
BMAA	2	270	HE (10)	209,7	22.985,48	34.616,11	115.427,04	88,21	95,16	0,91
BMAA	3	271	LIM. SUP.	14.400,0			133.387,00			1,00
BMAA	3	272	PLI	21.600,0	15.376,38	13.813,95	71.145,42	59,01	61,81	0,53
BMAA	3	273	PLIRT1	18.000,0	25.420,34	34.808,01	124.749,42	97,56	96,22	0,94
BMAA	3	274	PLIRT2-360	360,0	25.155,75	34.668,78	116.976,30	96,54	95,83	0,88
BMAA	3	275	PLIRT2-3600	3.600,0	25.122,43	34.570,24	115.390,65	96,41	95,56	0,87
BMAA	3	276	AG	122,3	22.739,05	35.094,57	118.553,98	87,27	97,01	0,89
BMAA	3	277	HE (1)	34,3	22.666,01	34.136,32	118.324,98	86,99	94,36	0,89
BMAA	3	278	HE (3)	98,0	22.666,01	34.136,32	118.324,98	86,99	94,36	0,89
BMAA	3	279	HE (10)	350,4	22.946,25	34.332,13	119.991,48	88,06	94,90	0,90
BMAA	4	280	LIM. SUP.	14.400,0			141.797,00			1,00
BMAA	4	281	PLI	21.600,0	6.880,05	6.130,26	31.036,12	26,40	27,41	0,22
BMAA	4	282	PLIRT1	18.000,0	26.107,63	34.492,75	133.293,05	100,19	95,42	0,94

Cenário	Cas.	Exp.	Método de Solução	Tempo Solução	Peso Total Program. (Kg)	Consumo Total Ope. (min)	Valor Função Obj. (R\$)	Rel. Peso Pr. / Cap. Forno (%)	Rel. Cons / Cap. Disp. Op. (%)	Rel. Val. F. Obj. / Lim. Sup. (%)
BMAA	4	283	PLIRT2-360	360,0	25.251,48	34.497,42	122.930,02	96,91	95,43	0,87
BMAA	4	284	PLIRT2-3600	3.600,0	24.690,50	34.407,59	120.453,45	94,76	95,18	0,85
BMAA	4	285	AG	116,5	22.869,04	34.618,15	124.198,01	87,76	95,77	0,88
BMAA	4	286	HE (1)	73,8	22.622,27	34.572,99	125.933,06	86,82	95,64	0,89
BMAA	4	287	HE (3)	199,9	22.622,27	34.572,99	125.933,06	86,82	95,64	0,89
BMAA	4	288	HE (10)	511,8	22.669,34	34.912,37	126.568,23	87,00	96,58	0,89

APÊNDICE A4 PARAMETRIZAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO

PROPOSTO

A especificação da melhor forma de parametrização de um algoritmo genético para uma aplicação específica é uma árdua tarefa (GOLDBERG, 1989) (DENG & TSACLE, 2000) (DENG, 1999). Um importante ponto de partida neste sentido são as referências existentes sobre o tema. Em GOLDBERG (1989) é possível encontrar vários direcionadores sobre parametrizações usadas em vários tipos de aplicações de um *AG*. Já DENG (1999) descreve um detalhado estudo sobre parametrização de *AG*. De posse destes direcionadores iniciais, este trabalho, à luz do *AG* proposto, irá investigar os efeitos dos seguintes parâmetros de configuração de um *AG*, visando obter melhores performances de aplicação nos cenários experimentais tratados:

- Taxa de “*crossover*” e taxa de “mutação”;
- Número de indivíduos em uma população;
- Número de gerações populacionais;
- Pressão de seleção para reprodução;
- Uso ou não de sobreposição populacional; e,
- Uso ou não de uma estratégia de hibridização com um método heurístico de melhoria.

Uma vez que um *AG* é um método de busca probabilística, as comparações entre diferentes configurações de parametrização deverão ser conduzidas por meio de análise estatística conveniente. Desta forma, será usado o método de análise de variância ANOVA de fator único e também de fator duplo⁵⁵, dependendo do parâmetro analisado. Para isto, será tomada por base, para cada tipo de análise, uma amostra de 30 replicações do *AG*.

Quanto aos casos experimentais analisados, buscou-se escolher os que melhor representassem todo o conjunto de experimentos realizados. Com estes objetivos

⁵⁵ Maiores detalhes sobre o método de análise de variância ANOVA poderá ser encontrado em TRIOLA (1999)

em mente, definiu-se os cenários “AAMA” e “BBBB” para fornecer estes casos experimentais, justamente por representarem os dois extremos dos cenários produtivos experimentais testados, quanto ao consumo dos recursos, complexidade dos itens de pedidos e concentração destes itens nas principais ligas metálicas. Nestes dois cenários, foram escolhidos, em cada um, o caso experimental 2, justamente por envolver um número de itens de pedidos comum de se encontrar nas fundições de mercado do interior do estado de São Paulo. A seguir são expostas as análises dos parâmetros de configuração do *AG* proposto para os casos experimentais avaliados.

A4.1 Taxa De “Crossover” E “Mutação”

A taxa de “crossover” e “mutação” determinará a ocorrência de seus respectivos operadores genéticos. Quanto ao “crossover”, a maioria dos trabalhos na área sugerem o uso de taxas médias ou altas enquanto que para a “mutação” é sugerido que ocorra apenas incidências ocasionais (GOLDBERG, 1989) (DENG, 1999). Como cita DENG (1999) o operador genético de mutação introduz diversidade populacional e previne uma rápida conversão, entretanto, muitos trabalhos têm subestimado o uso deste operador.

Desta forma, visando um melhor entendimento desta parametrização, será realizado uma análise conjunta destes operadores, para que se possa, inicialmente, verificar se existe interação entre ambos, ou seja, se o efeito de um parâmetro se modifica com a alteração do outro parâmetro. Para isto será testada a hipótese nula de interação, qual seja: “ $H_{0_{interação}}$: não há interação entre os dois parâmetros”. Caso $H_{0_{interação}}$ não seja rejeitado, serão realizados, em seguida, outros dois testes de hipótese nula, quais sejam “ $H_{0_{crossover}}$: as médias das performances obtidas com os parâmetros de “crossover” testados são iguais” e “ $H_{0_{mutação}}$: as médias das performances obtidas com os parâmetros de “mutação” testados são iguais”. Estas análises serão realizadas com um nível de significância de 5%.

Para estas análises serão testados os seguintes parâmetros para “crossover”: “Taxa de Crossover = 0,9” e “Taxa de Crossover = 0,6”. Já para a taxa de incidência do operador de “mutação” serão testados os seguintes parâmetros “Taxa de Mutação = 0,01” e “Taxa de Mutação = 0,1”.

A seguir é possível visualizar, na *tabela A4.1*, a análise de variância apresentada, para os parâmetros de “*crossover*” e “*mutação*” analisados, pelo *AG*⁵⁶ em 30 replicações do caso experimental 2 para o cenário experimental “AAMA”.

TABELA A4.1: Análise de variância ANOVA de fator duplo, para os parâmetros de “*crossover*” e “*mutação*”, para 30 replicações do AG proposto para o caso experimental 2 do cenário “AAMA”

RESUMO	<i>Tx. Mut.: 0,01</i>	<i>Tx. Mut.: 0,1</i>	Total				
<i>Tx. Cros.: 0,9</i>							
Contagem	30	30	60				
Soma	5242263,317	5319471,526	10561734,84				
Média	174742,1106	177315,7175	176028,9141				
Variância	30871705,23	27825781,54	30535235,75				
<i>Tx. Cros.: 0,6</i>							
Contagem	30	30	60				
Soma	5183236,925	5250146,457	10433383,38				
Média	172774,5642	175004,8819	173889,723				
Variância	38765549,34	25180525,81	32695778,59				
<i>Total</i>							
Contagem	60	60					
Soma	10425500,24	10569617,98					
Média	173758,3374	176160,2997					
Variância	35212694,32	27411564,97					
ANOVA							
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	
<i>Tx. Cros.</i>	137284146	1	137284146	4,4775003	0,036482413	3,922878022	
<i>Tx. Mut.</i>	173082694,2	1	173082694,2	5,6450642	0,019143119	3,922878022	
Interação	883856,2915	1	883856,2915	0,0288268	0,865475239	3,922878022	
Dentro	3556663296	116	30660890,48				
Total	3867913992	119					

Já na *tabela A4.2* pode-se visualizar a análise de variância apresentada pelo *AG*⁵⁷ em 30 replicações do caso experimental 2 para o cenário experimental “BBBB”.

⁵⁶ Estes resultados foram obtidos utilizando os seguintes parâmetros de configuração do *AG* proposto: “População = 100”, “Num. Gerações = 100”, “Pressão de Seleção = 5”, “Aplicação da estratégia de Elitismo apenas para o melhor indivíduo da geração anterior” e “Aplicação da estratégia de hibridização”

⁵⁷ Idem a nota anterior

TABELA A4.2: Análise de variância ANOVA de fator duplo, para os parâmetros de “crossover” e “mutação”, para 30 replicações do AG proposto para o caso experimental 2 do cenário “BBBB”

RESUMO	<i>Tx. Mut.: 0,01</i>	<i>Tx. Mut.: 0,1</i>	Total			
<i>Tx. Cros.: 0,9</i>						
Contagem	30	30	60			
Soma	4892421,403	4935419,066	9827840,469			
Média	163080,7134	164513,9689	163797,3411			
Variância	59168209,67	31908372,82	45288715,4			
<i>Tx. Cros.: 0,6</i>						
Contagem	30	30	60			
Soma	4835017,997	4841581,664	9676599,661			
Média	161167,2666	161386,0555	161276,661			
Variância	33202494,72	41670873,19	36814333,86			
<i>Total</i>						
Contagem	60	60				
Soma	9727439,4	9777000,73				
Média	162123,99	162950,0122				
Variância	46333383,24	38653487,56				
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
<i>Tx. Cros.</i>	190614849,6	1	190614849,6	4,5945142	0,034162729	3,922878022
<i>Tx. Mut.</i>	20469378,5	1	20469378,5	0,4933868	0,483827544	3,922878022
<i>Interação</i>	11061966,76	1	11061966,76	0,2666338	0,606581803	3,922878022
<i>Dentro</i>	4812548561	116	41487487,6			
Total	5034694756	119				

A análise das *tabelas A4.1 e A4.2* confirmam, com um nível de significância de 5%, a hipótese nula $H_{0_{interação}}$, tanto para o cenário “AAMA” como para o cenário “BBBB”, ou seja, nos experimentos analisados não houve interação entre os parâmetros de “crossover” e de “mutação”.

Uma vez garantida a hipótese nula $H_{0_{interação}}$ é possível avaliar isoladamente o efeito dos parâmetros testados. Para a taxa de “crossover”, pode-se rejeitar a hipótese nula $H_{0_{crossover}}$ para os testes realizados em ambos os cenários, ou seja, as médias de performance observadas nas replicações testadas não são as mesmas, tomando por base um nível de significância de 5%. A análise conjunta de ambos os cenários mostrou que o uso de uma taxa alta de “crossover” apresentou, em média, performance mais satisfatória.

Quanto à taxa de “mutação” a hipótese nula $H_{0_{mutação}}$, considerando também um nível de significância de 5%, foi rejeitada no cenário “AAMA” mas foi corroborada no cenário “BBBB”. Sendo assim, para o cenário “BBBB” não há evidências, com base nos experimentos realizados, que as performances médias obtidas pertençam a populações distintas, ou seja, para este cenário, é indiferente a escolha dos parâmetros de “mutação” testados. Por outro lado, com base no cenário “AAMA”, é possível verificar que taxas de mutação elevadas possibilitaram a obtenção de melhores resultados.

Desta forma, com base nestas análises, será empregado o seguinte parâmetro para a taxa de “crossover”: “Taxa de Crossover = 0,9”. Já para a taxa de mutação será empregado o seguinte parâmetro: “Taxa de Mutação = 0,1”.

A4.2 Número De Indivíduos Em Uma População

Quanto maior o tamanho populacional maior a diversidade e o paralelismo intrínseco do método de busca do AG , entretanto, não existem muitas pesquisas consistentes sobre tamanhos populacionais mais indicados para aplicação em um AG (DENG, 1999). Desta forma, será analisado, para o AG proposto, o efeito na performance do AG empregando vários tamanhos populacionais diferentes. Para isto, será testada a hipótese nula do número de indivíduos em uma população, qual seja, “ $H_{0_{população}}$: as médias das performances obtidas com os parâmetros populacionais testados são iguais”. Sendo assim, para o número de indivíduos em uma população, serão testados os seguintes parâmetros “População = 50”, “População = 100”, “População = 200” e “População = 400”.

A seguir é possível visualizar, na *tabela A4.3*, a análise de variância apresentada, para os parâmetros populacionais analisados, pelo AG ⁵⁸ em 30 replicações do caso experimental 2 para o cenário experimental “AAMA”.

⁵⁸ Estes resultados foram obtidos utilizando os seguintes parâmetros de configuração do AG proposto: “Crossover = 0,9”, “Mutação = 0,1”, “Num. Gerações = 100”, “Pressão de Seleção = 5”, “Aplicação da estratégia de Elitismo apenas para o melhor indivíduo da geração anterior” e “Aplicação da estratégia de hibridização”

TABELA A4.3: Análise de variância ANOVA de fator único, para os parâmetros populacionais analisados, para 30 replicações do AG proposto para o caso experimental 2 do cenário “AAMA”

RESUMO						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Pop.: 50	30	5147592,2	171586,41	54693287		
Pop.: 100	30	5319471,5	177315,72	27825782		
Pop.: 200	30	5384837,5	179494,58	32085832		
Pop.: 400	30	5438702,2	181290,07	24687400		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,6E+09	3	533230190	15,312553	1,857E-08	2,6828104
Dentro dos grupos	4,039E+09	116	34823075			
Total	5,639E+09	119				

Já a análise de variância apresentada, para os parâmetros populacionais analisados, pelo AG^{59} em 30 replicações do caso experimental 2 para o cenário experimental “BBBB”, é mostrado na *tabela A4.4*.

TABELA A4.4: Análise de variância ANOVA de fator único, para os parâmetros populacionais analisados, para 30 replicações do AG proposto para o caso experimental 2 do cenário “BBBB”

RESUMO						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Pop.: 50	30	4866248,7	162208,29	35568744		
Pop.: 100	30	4935419,1	164513,97	31908373		
Pop.: 200	30	5015931,6	167197,72	19844637		
Pop.: 400	30	5071105,2	169036,84	16958833		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	809107432	3	269702477	10,345261	4,369E-06	2,6828104
Dentro dos grupos	3,024E+09	116	26070146			
Total	3,833E+09	119				

A análise conjunta das *tabela A4.3* e *A4.4* mostra que, considerando um nível de significância de 5%, a hipótese $H0_{população}$ deve ser rejeitada para ambos os cenários experimentais testados. É possível analisar também que a performance média apresentada será tão maior quanto maior for o número de indivíduos na população.

⁵⁹ Idem a nota anterior

Desta forma, a decisão sobre o tamanho populacional a ser usado, deverá se basear em uma análise de custo/benefício, uma vez que o uso de populações maiores acarretará em tempos maiores de solução.

Na *tabela A4.5* é possível avaliar as médias de tempos de solução apresentados pelo *AG* para as diferentes populações consideradas para o cenário experimental “AAMA”. É possível avaliar também que a hipótese nula, considerando um nível de significância de 5%, de que estas médias de tempos são iguais, poderá ser rejeitada.

TABELA A4.5: Análise de variância ANOVA de fator único dos tempos de solução, para os parâmetros populacionais analisados, para 30 replicações do AG proposto para o caso experimental 2 do cenário “AAMA”

RESUMO						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
<i>Pop.: 50</i>	30	208,053	6,9351	0,1281457		
<i>Pop.: 100</i>	30	439,289	14,642967	0,9701603		
<i>Pop.: 200</i>	30	930,738	31,0246	1,5286746		
<i>Pop.: 400</i>	30	2071,399	69,046633	14,644522		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	68785,123	3	22928,374	5310,1054	5,78E-124	2,6828104
Dentro dos grupos	500,87357	116	4,3178756			
Total	69285,996	119				

Já na *tabela 4.6* é possível realizar esta mesma avaliação para o cenário experimental “BBBB”, podendo-se também rejeitar a hipótese nula de igualdade entre as médias de tempos de solução testadas para as diferentes populações.

TABELA A4.6: Análise de variância ANOVA de fator único dos tempos de solução, para os parâmetros populacionais analisados, para 30 replicações do AG proposto para o caso experimental 2 do cenário “BBBB”

RESUMO						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Pop.: 50	30	232,045	7,7348333	0,1138575		
Pop.: 100	30	482,355	16,0785	0,5075029		
Pop.: 200	30	1087,888	36,262933	2,1740282		
Pop.: 400	30	2320,527	77,3509	10,653889		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	86848,54	3	28949,513	8609,9832	4,56E-136	2,6828104
Dentro dos grupos	390,02905	116	3,3623194			
Total	87238,569	119				

Com base na análise conjunta das *tabela A4.5* e *A4.6* é possível perceber que, para ambos os cenários experimentais, a duplicação do tamanho populacional possibilitou uma melhoria média em torno de 2% ao custo de um aumento no tempo de solução em torno de 110%. Desta forma, a escolha do tamanho populacional deverá tomar por base, além da performance desejada, o tempo de solução esperado e o número de replicações efetuadas. Sendo assim, para o sistema proposto, será tomado por base o seguinte parâmetro populacional: “População = 100” por apresentar uma performance razoável a um tempo de solução relativamente baixo.

A4.3 Número De Gerações Populacionais

Por meio do processo de adaptação e seleção natural em um *AG* os indivíduos tendem a evoluir através das gerações. O número de gerações consideradas irá influenciar na performance apresentada pelo *AG*, entretanto, o processo de evolução, através das gerações, tende a uma conversão para uma região promissora de solução. Desta forma, o número ideal de gerações populacionais deverá possibilitar que o *AG* consiga chegar próximo o suficiente desta região de conversão a um esforço computacional razoável. Para investigar este número ideal de gerações, serão realizadas, para cada cenário experimental considerado, uma análise da convergência do processo

de solução, para que o número de gerações populacionais que forneça a melhor relação custo/benefício possa ser identificado.

Na *figura A4.1* é possível analisar o processo de convergência do AG^{60} proposto para o caso 2 do cenário experimental “AAMA”.

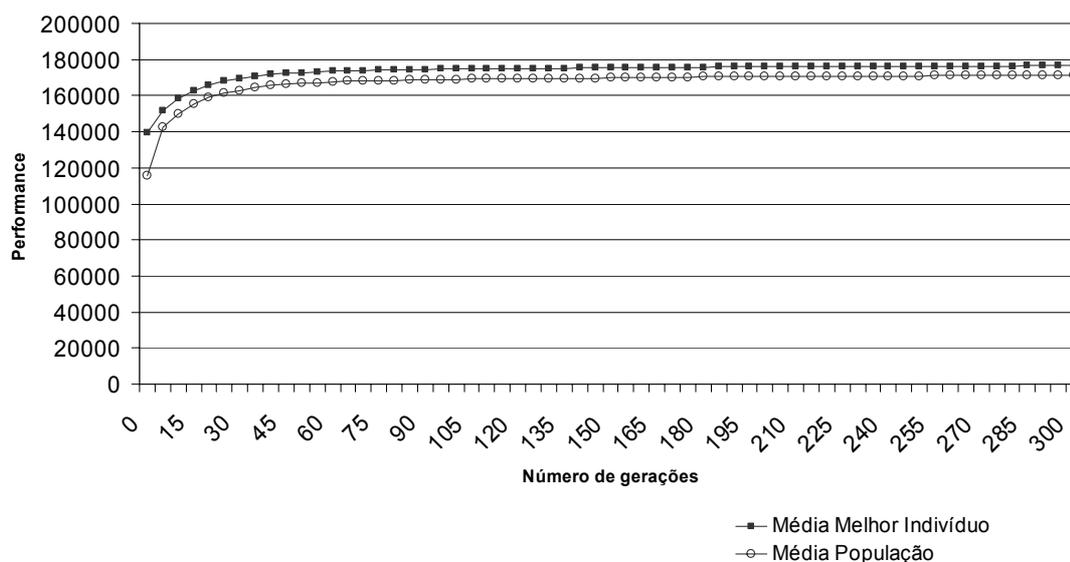


FIGURA A4.1: Processo de convergência do AG através das gerações populacionais para o caso 2 do cenário experimental “AAMA”

Da mesma forma, na *figura A4.2* é possível analisar o processo de convergência do AG^{61} proposto para o caso 2 agora para o cenário experimental “BBBB”.

⁶⁰ Estes resultados foram obtidos utilizando os seguintes parâmetros de configuração do AG proposto: “Crossover = 0,9”, “Mutação = 0,1”, “População = 100”, “Pressão de Seleção = 5”, “Aplicação da estratégia de Elitismo apenas para o melhor indivíduo da geração anterior” e “Aplicação da estratégia de hibridização”

⁶¹ Idem a nota anterior

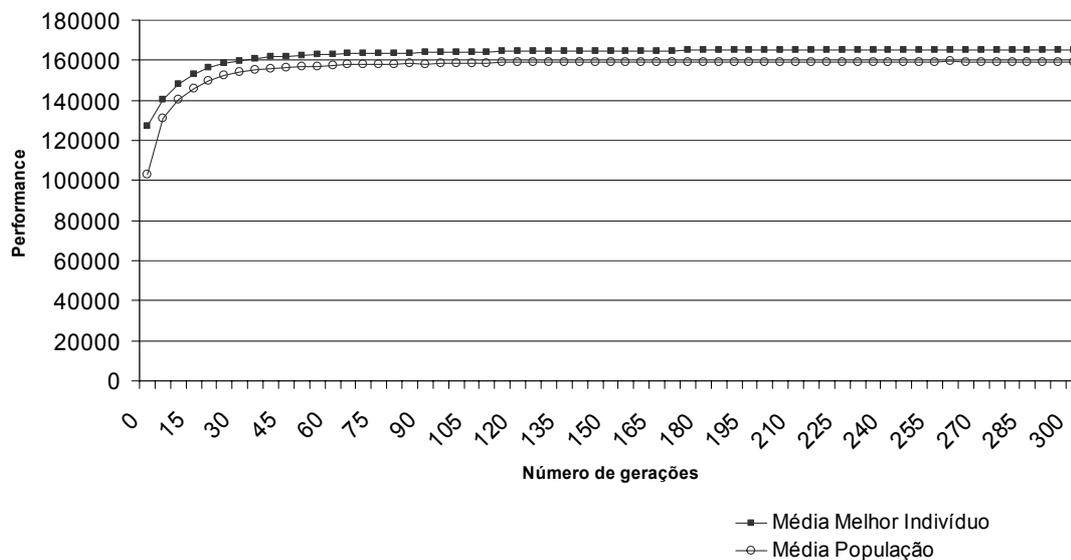


FIGURA A4.2: Processo de convergência do AG através das gerações populacionais para o caso 2 do cenário experimental “BBBB”

Com base nas *figuras A4.1 e A4.2* é possível verificar que, tanto para o cenário experimental “AAMA” como para o cenário “BBBB”, o processo mais acentuado de convergência acontece da geração inicial até em torno da sexagésima geração. Após isto, nas gerações seguintes, ocorre apenas mudanças sensíveis na melhoria da performance apresentada. Desta forma, tomando por base uma relação de custo/benefício será usado para o AG proposto o seguinte parâmetro “Num. Gerações = 100”, por assegurar a conversão da solução a um custo de tempo de solução razoável.

A4.4 Pressão De Seleção Para Reprodução

A pressão de seleção determina a probabilidade na qual os indivíduos são escolhidos para reprodução. Quanto maior a pressão de seleção, maior será o número esperado de vezes na qual os melhores indivíduos serão escolhidos para reprodução, ou seja, maior será a probabilidade de seleção dos melhores indivíduos. Uma alta pressão de seleção privilegia para reprodução os melhores indivíduos, entretanto, poderá causar uma convergência preliminar, limitando o espaço de solução.

Visando definir quais parâmetros de pressão de seleção apresentam melhores performances, será avaliada a hipótese nula, considerando um nível de significância de 5%, que segue: “ $H0_{pressão}$: as performances médias apresentadas pelas

pressões de seleção analisadas são iguais". Para isto, serão avaliados os seguintes valores⁶² para este parâmetro: "Pressão de seleção = 2", "Pressão de seleção = 5" e "Pressão de seleção = 8".

Na *tabela A4.1* é possível analisar a análise de variância da média de performance apresentada para os parâmetros analisados de pressão de seleção, considerando 30 replicações do *AG*⁶³ proposto, para o caso 2 do cenário experimental "AAMA".

TABELA A4.7: Análise de variância ANOVA de fator único para os parâmetros de pressão de seleção analisados, para 30 replicações do *AG* proposto para o caso experimental 2 do cenário "AAMA"

RESUMO						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
<i>Pres.: 2</i>	30	5162099,5	172069,98	28437792		
<i>Pres.: 5</i>	30	5319471,5	177315,72	27825782		
<i>Pres.: 8</i>	30	5242587,4	174752,91	38791454		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	412838111	2	206419055	6,5147229	0,0023095	3,1012917
Dentro dos grupos	2,757E+09	87	31685009			
Total	3,169E+09	89				

A *tabela A4.8*, por sua vez, mostra, da mesma forma, a avariância apresentada pelas diferentes pressões de seleção analisadas, considerando 30 replicações do *AG*⁶⁴ proposto, para o caso 2 do cenário experimental "BBBB".

⁶² Para entender melhor a forma na qual se calcula a probabilidade de seleção, de um indivíduo, para reprodução com base nos valores da pressão de seleção, veja o tópico 6.3.3

⁶³ Estes resultados foram obtidos utilizando os seguintes parâmetros de configuração do *AG* proposto: "Crossover = 0,9", "Mutação = 0,1", "População = 100", "Num. Gerações = 100", "Aplicação da estratégia de Elitismo apenas para o melhor indivíduo da geração anterior" e "Aplicação da estratégia de hibridização"

⁶⁴ Idem a nota anterior

TABELA A4.8: Análise de variância ANOVA de fator único para os parâmetros de pressão de seleção analisados, para 30 replicações do AG proposto para o caso experimental 2 do cenário “BBBB”

RESUMO						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
<i>Pres.: 2</i>	30	4874694,7	162489,82	32182373		
<i>Pres.: 5</i>	30	4935419,1	164513,97	31908373		
<i>Pres.: 8</i>	30	4976478,4	165882,61	33180920		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	174813880	2	87406940	2,6957575	0,0731293	3,1012917
Dentro dos grupos	2,821E+09	87	32423889			
Total	2,996E+09	89				

A análise das *tabelas A4.7 e A4.8* mostram que, considerando um nível de significância de 5%, a hipótese $H_{0_{pressão}}$ poderá ser rejeitada para o cenário “AAMA” mas não para o cenário experimental “BBBB”, ou seja, os valores de pressão de seleção empregados nos testes realizados com este ultimo cenário não afetaram, a um nível de 5% de significância, a performance média apresentada. Desta forma, tomando por base uma análise conjunta dos dois cenários testados, será tomado como base o parâmetro: “Pressão de seleção = 5”.

A4.5 Sobreposição Populacional

A sobreposição populacional substitui os indivíduos menos adaptados de uma nova geração pelos indivíduos mais adaptados da geração anterior, caso estes não estejam nesta nova geração. Esta estratégia, também conhecida como “Elitismo”, permite a manutenção nas gerações seguintes de indivíduos extraordinários que, por ventura, tenham surgido em gerações anteriores. Por outro lado, esta estratégia poderá causar uma convergência prematura do AG, principalmente quando se consideram porcentagens altas de sobreposição populacional. Desta forma, este trabalho irá testar a seguinte estratégia de “Elitismo”: Caso o melhor indivíduo da geração anterior não esteja na geração seguinte, este indivíduo será repostado no lugar do pior indivíduo desta nova geração. Para isto será testada, com um nível de significância de 5%, a seguinte

hipótese nula “ $H0_{elitismo}$: As performances médias apresentadas com ou sem o uso da estratégia de elitismo são iguais”.

Na *tabela A4.9* é possível analisar a análise de variância da média de performance apresentada com ou sem a consideração da estratégia de elitismo, considerando 30 replicações do AG^{65} proposto, para o caso 2 do cenário experimental “AAMA”.

TABELA A4.9: Análise de variância ANOVA de fator único para análise da estratégia de elitismo, para 30 replicações do AG proposto para o caso experimental 2 do cenário “AAMA”

RESUMO							
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância			
Com Elitismo	30	5319472	177315,7	27825782			
Sem Elitismo	30	5234923	174497,4	25516480			
ANOVA							
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	
Entre grupos	1,19E+08	1	1,19E+08	4,467064	0,038867	4,006864	
Dentro dos grupos	1,55E+09	58	26671131				
Total	1,67E+09	59					

Na *tabela A4.10*, é possível avaliar a análise do uso da estratégia de elitismo, para o AG^{66} proposto, para o caso 2 do cenário experimental “BBBB”.

TABELA A4.10: Análise de variância ANOVA de fator único para análise da estratégia de elitismo, para 30 replicações do AG proposto para o caso experimental 2 do cenário “BBBB”

RESUMO							
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância			
Com Elitismo	30	4935419	164514	31908373			
Sem Elitismo	30	4931657	164388,6	24146718			
ANOVA							
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	
Entre grupos	235852,2	1	235852,2	0,008415	0,927226	4,006864	
Dentro dos grupos	1,63E+09	58	28027546				
Total	1,63E+09	59					

⁶⁵ Estes resultados foram obtidos utilizando os seguintes parâmetros de configuração do AG proposto: “Crossover = 0,9”, “Mutação = 0,1”, “População = 100”, “Num. Gerações = 100”, “Pressão de Seleção = 5” e “Aplicação da estratégia de hibridização”

⁶⁶ Idem a nota anterior

A análise das *tabelas 4.9 e 4.10* mostram que, considerando um nível de significância de 5%, a hipótese nula $H0_{elitismo}$ é rejeitada para o cenário “AAMA” mas é corroborada para o cenário “BBBB”. Ou seja, para o cenário “BBBB” o uso ou não da estratégia de elitismo é indiferente. Já a análise conjunta das duas tabelas permite avaliar que o uso da estratégia de elitismo poderá fornecer uma performance melhor para o *AG* proposto.

A4.6 Estratégia De Hibridização

O uso de uma estratégia de hibridização de um *AG* com algum tipo de método de busca local ou outro tipo de método específico de melhoria é um importante meio de diminuir a dificuldade na qual os *AG* enfrentam para buscar soluções próximas ao ótimo (CHENG, GEN & TSUJIMURA, 1999). Desta forma, este trabalho irá testar uma estratégia de hibridização para o *AG* proposto que consiste em um método heurístico de melhoria de uma solução gerada pelo *AG* antes mesmo de introduzir esta solução na nova geração de indivíduos. Visando avaliar a efetividade do método heurístico proposto para esta hibridização será testada, considerando um nível de 5% de significância, a seguinte hipótese nula: “ $H0_{hibridização}$: *As performances médias apresentadas pelo AG com ou sem o uso da estratégia de hibridização são iguais*”.

Na *tabela A4.11* é apresentada a análise de variância da média de performance com ou sem a consideração da estratégia de hibridização, considerando 30 replicações do *AG*⁶⁷ proposto, para o caso 2 do cenário experimental “AAMA”.

⁶⁷ Estes resultados foram obtidos utilizando os seguintes parâmetros de configuração do *AG* proposto: “Crossover = 0,9”, “Mutação = 0,1”, “População = 100”, “Num. Gerações = 100”, “Pressão de Seleção = 5” e “Aplicação da estratégia de Elitismo apenas para o melhor indivíduo da geração anterior”

TABELA A4.11: Análise de variância ANOVA de fator único para análise da estratégia de hibridização, para 30 replicações do AG proposto para o caso experimental 2 do cenário “AAMA”

RESUMO						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Com Hibrid.	30	5319472	177315,72	27825782		
Sem Hibrid.	30	5147570	171585,65	50533676		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	492505095	1	492505095	12,57041	0,000783	4,00686417
Dentro dos grupos	2272424255	58	39179729			
Total	2764929351	59				

Da mesma forma, na *tabela A4.12*, é possível avaliar a análise do uso da estratégia de hibridização, para o AG⁶⁸ proposto, para o caso 2 do cenário experimental “BBBB”.

TABELA A4.12: Análise de variância ANOVA de fator único para análise da estratégia de hibridização, para 30 replicações do AG proposto para o caso experimental 2 do cenário “BBBB”

RESUMO						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Com Hibrid.	30	4935419	164513,97	31908373		
Sem Hibrid.	30	4823203	160773,44	30621635		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	209873739	1	209873739	6,712737	0,012088	4,00686417
Dentro dos grupos	1813370227	58	31265004			
Total	2023243966	59				

A análise conjunta das *tabelas A4.11 e A4.12* permitem, considerando um nível de 5% de significância, rejeitar a hipótese nula $H0_{hibridização}$ para ambos os cenários testados, permitindo, também, avaliar que o uso da estratégia de hibridização possibilitou, para os 2 cenários, a obtenção de uma melhor performance média do AG proposto.

A aceitação do método heurístico proposto para hibridização não deve ser realizada apenas à luz dos resultados de performance obtidos, e sim, tomando por

⁶⁸ Idem a nota anterior

base uma análise de custo/benefício em relação aos tempos de solução. Para se ter uma visão do custo computacional do método heurístico proposto para esta hibridização, será realizado o teste de hipótese nula na qual o tempo de solução médio com ou sem a estratégia de hibridização é o mesmo. Na *tabela A4.13* os resultados deste teste de hipótese são apresentados, para o AG⁶⁹ proposto, para o caso 2 do cenário “AAMA”.

TABELA A4.13: Análise de variância ANOVA de fator único para análise dos tempos de solução da estratégia de hibridização, para 30 replicações do AG proposto para o caso experimental 2 do cenário “AAMA”

RESUMO						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
<i>Com Hibrid.</i>	30	439,289	14,64297	0,97016		
<i>Sem Hibrid.</i>	30	379,724	12,65747	0,08481		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	59,13315	1	59,13315	112,1039	3,58E-15	4,006864
Dentro dos grupos	30,59415	58	0,527485			
Total	89,72731	59				

Já na *tabela A4.14* os resultados do teste de hipótese nula para os tempos de solução com ou sem hibridização são apresentados, para o AG⁷⁰ proposto, para o caso 2 do cenário “BBBB”.

⁶⁹ Idem a nota anterior

⁷⁰ Idem a nota anterior

TABELA A4.14: Análise de variância ANOVA de fator único para análise dos tempos de solução da estratégia de hibridização, para 30 replicações do AG proposto para o caso experimental 2 do cenário “BBBB”

RESUMO						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
Com Hibrid.	30	482,355	16,0785	0,507503		
Sem Hibrid.	30	429,669	14,3223	0,41296		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	46,26358	1	46,26358	100,5224	2,82E-14	4,006864
Dentro dos grupos	26,69343	58	0,460231			
Total	72,957	59				

Como é possível analisar nas *tabelas A4.13 e A4.14* as hipóteses nulas de tempos médios de solução iguais podem ser rejeitadas, considerando um nível de 5% de significância, para ambos os cenários. Quanto ao acréscimo no tempo de solução, considerando ambos os cenários analisados, foi, em média, em torno de 14%. Um acréscimo de tempo aceitável, uma vez que a estratégia de hibridização possibilitou uma melhoria média na performance da solução apresentada em torno de 3%. Desta forma, é possível concluir que é interessante para este trabalho empregar a estratégia de hibridização proposta.

**APÊNDICE A5 QUESTIONÁRIO APLICADO NO “SURVEY” REALIZADO
PARA ANÁLISE DE ADEQUAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO NAS
FUNDIÇÕES DE MERCADO DO INTERIOR DO ESTADO DE SÃO PAULO**

A seguir é apresentado o questionário aplicado em “*Loco*” pelo autor desta tese durante a pesquisa realizada nas fundições de mercado mais representativas do interior do estado de São Paulo. Esta pesquisa teve por objetivo avaliar a adequação do sistema proposto à realidade deste setor industrial.

Nome da Empresa:

Endereço:

Nome do responsável pelo preenchimento do questionário:

Cargo que ocupa na empresa:

Telefone:

E-mail:

1. Número total de trabalhadores e o número de trabalhadores na produção atualmente.
2. Quanto à forma de produção atual:
 - a. Produz somente contra pedido;
 - b. A maior parte da produção é contra pedido, entretanto alguns produtos são produzidos para estoque;
 - c. Existe um equilíbrio entre a produção contra pedido e produção para estoques;
 - d. Toda a produção é produzida para estoques;
3. Qual a porcentagem (ordem de grandeza) dos lotes (cada lote é formado por itens iguais) distribuídos pelo seu tamanho?
_____% dos lotes são unitários;
_____% dos lotes têm de 1 a 10 peças;
_____% dos lotes têm de 11 a 100 peças;
_____% dos lotes têm de 101 a 500 peças;
_____% dos lotes têm mais de 501 peças;
4. Quanto à forma atual de elaboração da programação da produção:

4.1 Qual a porcentagem de itens inéditos numa carteira de pedidos em aberto?

4.2 *Qual a faixa da variedade de itens distintos numa carteira de pedidos em aberto? (por exemplo de 10 a 600 itens distintos)*

4.2. *Quanto à existência do apoio de uma ferramenta computacional específica para elaboração da programação da produção:*

- a. Existe; Qual?
- b. Não existe; Foi desenvolvida uma aplicação em planilha de cálculo para a tarefa;
- c. Não existe; Foi desenvolvido outro tipo de suporte computacional; Qual?
- d. Não existe; Não existe nenhum suporte computacional para a tarefa;

4.3. *Quanto ao processo de elaboração da programação da produção:*

- a. São consideradas concomitantemente as etapas de moldagem, vazamento e acabamento tomando por base a carteira de pedidos em aberto;
- b. São consideradas concomitantemente as etapas de moldagem e vazamento tomando por base a carteira de pedidos em aberto;
- c. É considerada apenas a etapa de vazamento tomando por base os moldes disponíveis prontos ou semi-prontos para vazarem, sendo aplicado nas operações das etapas de moldagem e acabamento algum tipo de regra de liberação para realizar a programação da produção; Qual regra?

4.4. *Qual o horizonte (número de dias) considerado na programação da produção?*

4.5. *Em média qual o número de ligas metálicas diferentes presentes em uma programação da produção?*

4.6. *Quais as restrições atualmente consideradas para a elaboração da programação da produção na etapa de vazamento;*

- a. Restrições do número máximo de corridas para cada forno, considerando o horizonte considerado na programação;
- b. Restrições do número máximo de corridas dos reatores dos fornos, considerando o horizonte considerado na programação;
- c. Restrições de ordenamento das ligas metálicas fundidas nas corridas de fornos, visando evitar fundir em seqüência, em um mesmo forno, ligas metálicas que podem se contaminar;
- d. Outras. Quais?

4.7. *Quais os objetivos atualmente considerados no processo de elaboração da programação da produção;*

- a. Maximização da capacidade de fundição;
- b. Buscar fundir em seqüência ligas metálicas que agilizem e/ou diminuam os custos do processo de fundição;
- c. Minimização dos estoques em processo das operações da etapa de moldagem;

- d. Minimização dos estoques em processo das operações da etapa de acabamento;
- e. Buscar atender a clientes preferenciais;
- f. Minimização dos atrasos nos prazos de entrega;
- g. Outros. Quais?

4.8. Quanto à consideração de aspectos subjetivos e valores do responsável pela elaboração da programação da produção;

- a. É importante a consideração de informações subjetivas, experiência e valores do responsável pela elaboração da programação da produção para complementar informações desconhecidas ou incompletas sobre os itens de pedidos a programar e do próprio ambiente de produção, assim como decidir sobre a prioridade de produção de cada item de pedido.
 - b. Os dados técnicos conhecidos sobre os itens de pedidos a programar assim como do ambiente de produção são suficientes para elaborar automaticamente a programação da produção;
5. *Atribua um grau de prioridade de 1 a 5 para cada tipo de melhoria desejada no ambiente produtivo resultante do processo de elaboração da programação da produção (Atribua o grau zero caso o tipo de melhoria sugerida não seja necessária):*
- a. Estimar prazos de entrega mais realísticos;
 - b. Diminuir o tempo de produção dos pedidos;
 - c. Diminuir os estoques em processo;
 - d. Otimizar o uso dos recursos produtivos da etapa de vazamento;
 - e. Otimizar o uso dos recursos produtivos das etapas de moldagem e acabamento;
 - f. Aumentar a flexibilidade de produção nas etapas de moldagem e acabamento;
 - g. Outros; Quais?

APÊNDICE A6 SIMULAÇÃO DE UMA APLICAÇÃO DO SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PROPOSTO

A seguir é apresentada uma simulação de aplicação do sistema de apoio à decisão proposto. Além do objetivo de elucidar o modo de uso do sistema em situações práticas pretende-se também abordar em detalhes seus componentes “banco de dados” e “interface com o usuário”.

O exemplo utilizado nesta simulação toma por base o ambiente produtivo experimental definido no *Apêndice A2* e foi gerado tomando por base uma simulação de 200 itens de pedido do cenário experimental “*BBBB*”. Desta forma, para a empresa simulada, o arquivo texto gerado para o componente “banco de dados” é exposto a seguir.

```
*****Reatores*****
1;Reator 1;32;
2;Reator 2;32;
*****Fornos*****
1;1;850;1900;500;16;
2;1;850;1900;500;16;
3;1;1500;3200;1000;16;
4;2;1200;2600;800;16;
5;2;1000;2200;700;16;
6;2;200;600;100;16;
7;2;100;400;100;16;
*****Ligas*****
1;WCB;6;
2;WCC;6;
3;CF8;4;
4;CF8M;4;
5;CF3;5;
6;CF3M;5;
7;GG25;7;
8;VSGG25;7;
9;COBRE;8;
10;MOLIBDÊNIO;8;
11;LIGA ESPECIAL;10;
12;LIGA ANTI OXIDÁVEL;10;
*****LigasEconomicas*****
1;1;
2;1;
1;2;
2;2;
1;3;
2;3;
3;3;
4;3;
1;4;
2;4;
3;4;
4;4;
1;5;
2;5;
3;5;
4;5;
5;5;
6;5;
1;6;
2;6;
3;6;
4;6;
5;6;
6;6;
```

1;7;
2;7;
3;7;
4;7;
5;7;
6;7;
7;7;
8;7;
1;8;
2;8;
3;8;
4;8;
5;8;
6;8;
7;8;
8;8;

*****LigasInviaveis*****

5;1;
6;1;
7;1;
8;1;
5;2;
6;2;
7;2;
8;2;
7;3;
8;3;
7;4;
8;4;
1;9;
2;9;
3;9;
4;9;
5;9;
6;9;
7;9;
8;9;
1;10;
2;10;
3;10;
4;10;
5;10;
6;10;
7;10;
8;10;
1;11;
2;11;
3;11;
4;11;
5;11;
6;11;
7;11;
8;11;
1;12;
2;12;
3;12;
4;12;
5;12;
6;12;
7;12;
8;12;

*****Operacoes*****

1;Projeto Fundição;600;300;;
2;Moldagem;2200;1100;;
3;Macharia;1200;600;;
4;Fechamento;1200;600;;
5;Desmoldagem;350;175;;
6;Corte;1200;600;;
7;Rebarba;1200;600;;
8;Lixamento Grosso;1200;600;;
9;Lixamento Fino;1200;600;;
10;Tratamento Térmico;1200;0;;
11;Tratamento Físico;600;0;;
12;Controle de Qualidade;350;175;;
13;Controle de Qualidade 2;350;175;;
14;Controle de Qualidade 3;350;175;;

*****ItensPedido*****

1;N;-1;XIVEERL;533;3310;4966;6;CF3M;14/2/2005;36,91;184,53;5,37|16,45|3,86|1,73|2,28|4,03|2,91|2,78|||||1,22|;
2;N;-1;XIVEERL;533;3311;4967;10;MOLIBDÊNIO;27/2/2005;80,24;641,88;|3,44|24,53|3,39|1,9|4,12|5,09|2,96|3,78|||||2,03|;
3;N;-1;XIVEERL;533;3312;4968;1;WCB;16/2/2005;94,86;569,16;|4,37|22,72|4,04|2,14|5,7|2,48|4,07|8,51|||||1,95|;
4;N;-1;XIVEERL;533;3312;4969;12;LIGA ANTI OXIDÁVEL;16/2/2005;136,59;1365,9;|8,24|7,7|2,85|8,24|9,51|6,08|4,48|||||1,47|;
5;N;-1;XIVEERL;533;3314;4970;1;WCB;25/2/2005;37,33;224,2|2,99|2,63|1,49|2,26|3,42|1,6|2,76|||||5,71|;
6;N;-1;XIVEERL;533;3314;4971;4;CF8M;25/2/2005;219,55;878,19;|30,61|74,28|19,9|5,13|17,97|21,68|14,97|16,6|||||5|;

7;N;-1:XIVEERL;533;3314;4972;2;WCC;25/2/2005;212;1271,98;|19,14||14,59|4,65|20,13|24,45|12,97|13,63|||5,14|;
8;N;-1:XIVEERL;533;3315;4973;4;CF8M;21/2/2005;66,3;265,19;|3,12||2,38|1,29|2,06|3,11|2,19|1,81|||6,63|;
9;N;-1:XIVEERL;533;3316;4975;8;VSGG25;19/2/2005;67,05;469,35;|2,4||3,64|1,98|3,28|4,414,57|3,67|||1,67|;
10;N;-1:XIVEERL;533;3317;4976;3;CF8;19/2/2005;75,11;300,43;|7,46|29,78|5,39|1,85|3,88|4,23|3,64|3,97|||1,85|;
11;N;-1:XIVEERL;533;3317;4977;3;CF8;19/2/2005;55,82;223,26;21,07|6,04||5,1|2,2|3,9|6,42|4,67|4,91|||1,53|;
12;N;-1:XIVEERL;533;3318;4978;4;CF8M;17/2/2005;30,31;|121,24;|1,91||1,6|1,14|2,01|1,03|1,27|1,67|76,51|112,89||3,07||;
13;N;-1:XIVEERL;533;3318;4979;2;WCC;17/2/2005;173,97;1043,81;|10,48|7,01||2,3|1,67|2,38|2,94|1,23|3,91|||8,29||;
14;N;-1:XIVEERL;533;3319;4980;1;WCB;20/2/2005;41,21;247,28;|3,83||4,72|1,7|3,41|2,14|3,14|3,6|||1,77|;
15;N;-1:XIVEERL;533;3319;4981;9;COBRE;20/2/2005;11,85;94,81;|2,76||1,64|1,19|1,74|1,19|1,85|1,7|||1,04|;
16;N;-1:XIVEERL;533;3319;4982;2;WCC;20/2/2005;128,82;772,93;|6||3,79|1,37|2,12|2,19|1,4|2,79|||1,22|;
17;N;-1:XIVEERL;533;3320;4983;2;WCC;20/2/2005;102,16;612,94;|10,98||5,94|2,08|4,91|4,48|5,99|4,48|||1,63|;
18;N;-1:XIVEERL;533;3320;4984;2;WCC;20/2/2005;36,49;218,91;5,63|3,16||2,01|1,23|2,56|1,97|1,86|2,29|||1,01|;
19;N;-1:XIVEERL;533;3321;4985;6;CF3M;21/2/2005;90,95;454,73;|5,42||4,25|1,41|2|6,11|1,81|4,73||63,45|9,71||;
20;N;-1:XIVEERL;533;3321;4986;7;GG25;21/2/2005;134,08;938,55;|17,54||10,56|3,73|11,71|7,87|12,95|11,71||87,68||3,92|;
21;N;-1:XIVEERL;533;3322;4987;6;CF3M;22/2/2005;111,36;556,81;|2,89||4,97|1,73|2,76|4,02|4,3|2,94|117,08||18,09||;
22;N;-1:XIVEERL;533;3323;4988;2;WCC;22/2/2005;173,88;1043,3;|10,88||10,78|3,24|7,87|4,71|8,62|10,08|||3,49|;
23;N;-1:XIVEERL;533;3324;4989;5;CF3;13/2/2005;217,38;1086,92;|13,03||9,11|3|10,1|6,36|4,3|2,61|||1,46||;
24;N;-1:XIVEERL;533;3324;4990;9;COBRE;13/2/2005;151,71;|1213,68;|13,9||10,76|2,82|7,57|4,03|7,31|6,41|||3,09||;
25;N;-1:XIVEERL;533;3325;4991;8;VSGG25;21/2/2005;248,86;1742,04;|13,31||7,61|2,96|14,52|7,31|2,09|10,6|||2,56|;
26;N;-1:XIVEERL;533;3325;4992;4;CF8M;21/2/2005;195,89;783,55;|6,19||6,43|2,93|7,16|10,07|1,21|5,71|||17,06||;
27;N;-1:XIVEERL;533;3326;4993;10;MOLIBDÊNIO;18/2/2005;216,18;|1729,47;|2,51||1,26|1,91|4,34|2,75|2,87|3,26|||13,03||;
28;N;-1:XIVEERL;533;3327;4994;5;CF3;18/2/2005;95,86;479,3;|8,75||4,87|2,29|5,56|4,92|3,54|4,98|||2,1|;
29;N;-1:XIVEERL;533;3327;4995;4;CF8M;18/2/2005;73,54;294,15;|6,58||5,82|2,12|4,06|6,74|5,31|3,81|124,52|89,63||2,46|;
30;N;-1:XIVEERL;533;3328;4996;5;CF3;18/2/2005;227,54;|1137,68;|14,14||13,16|3,44|15,32|17,92|9,34|11,03|||16,21||;
31;N;-1:XIVEERL;533;3328;4997;3;CF8;18/2/2005;90,23;360,93;21,04|6,25||5,86|2,11|2,65|7,51|4,99|6,02|||1,62|;
32;N;-1:XIVEERL;533;3329;4998;10;MOLIBDÊNIO;16/2/2005;234,01;|1872,06;|17,38||9,67|2,77|6,5|8|4,35|5,23|||1|;
33;N;-1:XIVEERL;533;3330;4999;2;WCC;22/2/2005;179,99;1079,95;|16,17||8,36|4,12|17,01|12,14|7,02|11,03|156,5|||4,73|;
34;N;-1:XIVEERL;533;3330;5000;7;GG25;22/2/2005;165,34;|1157,41;|2,46||7,42|2,43|5,3|6,56|5,02|3,72|||3,3|;
35;N;-1:XIVEERL;533;3331;5001;3;CF8;16/2/2005;151,2;604,81;|8,46||5,56|2,02|7,84|3,82|4,68|1,18|||2,27|;
36;N;-1:XIVEERL;533;3332;5002;4;CF8M;15/2/2005;119,92;479,67;|8,04||7,62|3,24|10,99|6,06|7,66|8,03|21,13|||3,36|;
37;N;-1:XIVEERL;533;3332;5003;3;CF8;15/2/2005;156,21;624,82;|27,03|8,71|86,88|8,96|2,99|10,45|8,63|8,45|10,15||55,23||2,6|;
38;N;-1:XIVEERL;533;3333;5004;8;VSGG25;20/2/2005;60,89;426,22;|7,48||3,91|1,93|4,78|4,8|2,64|5,02|||1,95|;
39;N;-1:XIVEERL;533;3333;5005;3;CF8;20/2/2005;57,79;231,17;|4,96||3,34|1,91|4,32|4,48|2,51|3,44||83,22||1,8|;
40;N;-1:XIVEERL;533;3334;5006;3;CF8;18/2/2005;5,54;22,15;|1,57||1,31|1,07|1,28|1,37|1,21|1,22|||1,05|;
41;N;-1:XIVEERL;533;3335;5007;8;VSGG25;16/2/2005;19,24;|134,68;|2,42||2,06|1,23|1,56|1,61|9,6|2,13|||1,25|;
42;N;-1:XIVEERL;533;3335;5008;3;CF8;16/2/2005;249,76;999,04;|15,95|9,19|2,57|10,36|7,96|6,03|7,43|||16,22||;
43;N;-1:XIVEERL;533;3336;5009;10;MOLIBDÊNIO;16/2/2005;53,21;297,68;|3,25||1,96|1,48|3,26|1,98|2,22|3,28|4,3,84||1,15|;
44;N;-1:XIVEERL;533;3336;5010;9;COBRE;16/2/2005;92,3;738,39;|16,29||7,88|2,71|6,78|4,8|7,78,91|||1,89|;
45;N;-1:XIVEERL;533;3337;5011;3;CF8;19/2/2005;42,31;169,23;|4,96||3,69|1,75|3,29|1,87|3,91|4,18|||1,67|;
46;N;-1:XIVEERL;533;3338;5012;6;CF3M;17/2/2005;237,45;|1187,23;|30,37||16,26|5,59|19,32|19,8|20,19|17,7|14,58||4,85|;
47;N;-1:XIVEERL;533;3339;5013;4;CF8M;20/2/2005;188,48;753,93;|16,39||14,76|3,96|12,85|19,15|10,27|9,03|||3,45|;
48;N;-1:XIVEERL;533;3340;5014;6;CF3M;18/2/2005;93,24;466,18;|8,45||4,98|2,25|9,5|12,4,06|6,5||14,92||;
49;N;-1:XIVEERL;533;3341;5015;5;CF3;21/2/2005;248,07;|1240,33;|22,82||14,14|5,3|6,31|11,97|10,51|15,52|||4,81|;
50;N;-1:XIVEERL;533;3342;5016;2;WCC;16/2/2005;81,81;490,86;|6,45||2,05|1,38|1,93|4,59|1,63|2,38|||6,61||;
51;N;-1:XIVEERL;533;3343;5017;6;CF3M;19/2/2005;40,68;203,42;|3,77||2,49|1,24|2,56|2,4|2,01|2,21|||1,01|;
52;N;-1:XIVEERL;533;3344;5018;3;CF8;17/2/2005;97,62;390,49;|10|42,84|4,48|2,1|6,09|4,55|5,55|2,6|||1,81|;
53;N;-1:XIVEERL;533;3344;5019;6;CF3M;17/2/2005;28,89;144,45;|4,36||2,71|4,8|2,13|3,46|2,62|2,7|||1,51|;
54;N;-1:XIVEERL;533;3345;5020;5;CF3;24/2/2005;3,12;15,59;|1,21||1,21|1,05|1,23|1,19|1,12|1,2|||1,06|;
55;N;-1:XIVEERL;533;3346;5021;2;WCC;25/2/2005;131,44;788,63;|13,44||9,82|3,72|12,02|7,66|6,65|7,84|||25,77||;
56;N;-1:XIVEERL;533;3347;5022;6;CF3M;16/2/2005;101,84;509,21;|33,89|6,83||2,66|2,25|6,92|3,45|3,88|5,64|||20,63||;
57;N;-1:AQMCLTT;535;3348;5023;4;CF8M;21/2/2005;57,89;231,56;|4,98|1,89|2,44|1,51|1,31|2,06|2,45|2,44|||1,08||;
58;N;-1:HWSACMF;536;3349;5024;8;VSGG25;22/2/2005;232,89;1630,25;|16,79||18,13|4,64|14,26|12,29|12,25|20,89|40,23|63,37||28,81||;
59;N;-1:HWSACMF;536;3349;5025;6;CF3M;22/2/2005;154,37;771,87;|7,79||4,21|2,36|9,09|8,78|4,71|5,51|||1,97|;
60;N;-1:AQMCLTT;535;3350;5026;8;VSGG25;18/2/2005;102,32;716,21;|7,41||6,8|2,13|5,07|10,24|5,36|4,78|||8,96||;
61;N;-1:AQMCLTT;535;3350;5027;5;CF3;18/2/2005;111,36;556,79;|8,69||8,71|3,06|9,09|8,67|6,73|6,27|||2,53|;
62;N;-1:HWSACMF;536;3351;5028;4;CF8M;15/2/2005;38,53;154,11;|3,69||3,02|1,72|2,61|3,46|3,59|2,36|108,44|||1,26|;
63;N;-1:HWSACMF;536;3351;5029;1;WCB;15/2/2005;165,45;992,69;3,82|6,39|3,48|1,53|3,69|5,47|4,68|2,89|||2,65|;
64;N;-1:AQMCLTT;535;3352;5030;8;VSGG25;21/2/2005;25,47;178,31;|3,18||2,87|1,53|2,58|3,88|2,25|2,63|||1,12|;
65;N;-1:HWSACMF;536;3353;5031;10;MOLIBDÊNIO;23/2/2005;29,44;235,48;|4,13||2,92|1,52|2,82|2,81|2,91|2,61|59,43||2,05||;
66;N;-1:HWSACMF;536;3354;5032;2;WCC;16/2/2005;190,06;1140,37;|17,05||10,68|3,83|9,28|8,23|9,17|13,8|||3,01|;
67;N;-1:LWLRZDY;534;3355;5033;4;CF8M;22/2/2005;140,51;562,04;|9,55||8,66|2,7|6,97|7,11|7,18|8,1|||2,07|;
68;N;-1:LWLRZDY;534;3355;5034;9;COBRE;22/2/2005;144,59;1156,71;|8,39||5,43|2,36|7,87|14,35|3,71|6,01|||2,55|;
69;N;-1;OJKNOES;537;3356;5035;7;GG25;21/2/2005;123,99;867,92;|7,31||5,93|2,39|3,2|2,19|3,8|3,11||8,47||;
70;N;-1;OJKNOES;537;3356;5036;3;CF8;21/2/2005;156,34;625,38;|20,88||13,8|3,21|7,38|11,33|8,18|8,42|||2,64|;
71;N;-1:HWSACMF;536;3357;5037;6;CF3M;21/2/2005;75,96;379,78;|6,73||4,81|1,9|3,58|3,87|4,06|4,84|||1,35|;
72;N;-1:HWSACMF;536;3357;5038;3;CF8;21/2/2005;90,26;361,05;|10,4|5,1,2,43|4,06|7,26|3,79|7,38|145,22|||2,28|;
73;N;-1:AQMCLTT;535;3358;5039;2;WCC;17/2/2005;52,69;316,16;|5,55||4,92|2,08|3,88|4,54|2,45|4,59|||1,54|;
74;N;-1:HWSACMF;536;3359;5040;6;CF3M;14/2/2005;18,92;94,61;|2,81||1,81|1,31|1,96|2,29|2,29|2,73|||1,35|;
75;N;-1:HWSACMF;536;3359;5041;7;GG25;14/2/2005;34,48;241,36;|5,62||3,17|1,74|3,39|4,48|3,18|3,45|||4,37||;
76;N;-1:AQMCLTT;535;3360;5042;7;GG25;18/2/2005;2,77;19,36;|1,18||1,12|1,03|1,13|1,15|1,11|1,11|||1,04|;
77;N;-1;OJKNOES;537;3361;5043;2;WCC;20/2/2005;182,8;1096,77;|1,66||6,95|1,69|4,53|4,73,15|6,83|||21,05||;
78;N;-1:HWSACMF;536;3362;5044;7;GG25;17/2/2005;201,72;1412,03;|18,14||15,45|411,99|9,39|6,22|18,32|138,65||1,3|;
79;N;-1:AQMCLTT;535;3363;5045;3;CF8;24/2/2005;164,96;659,84;|17,97||8,92|3,03|6,57|4,43|6,91|7,52|||2,96|;
80;N;-1:AQMCLTT;535;3363;5046;7;GG25;24/2/2005;218,33;1528,31;|2,75||6|2,72|7,53|3,07|6,57|||2,22||;
81;N;-1:AQMCLTT;535;3363;5047;1;WCB;24/2/2005;61,72;370,31;|10,29||5,29|1,95|3,89|3,73|5,06|4,81||75,47||1,51|;
82;N;-1:HWSACMF;536;3364;5048;3;CF8;23/2/2005;241,5;965,99;34,51|3,77||1,98|2,14|1,53|10,73|4,08|2,79|||2|;
83;N;-1:HWSACMF;536;3364;5049;5;CF3;23/2/2005;247,72;1238,6;|25,06||10,37|3,89|12,95|9,54|11,54|11,51|||6,45|;
84;N;-1:XIVEERL;533;3365;5050;1;WCB;18/2/2005;106,66;639,97;|1,33||4,09|1,81|7,19|2,8|2,38|3,34|||1,43|;
85;N;-1:XIVEERL;533;3365;5051;5;CF3;18/2/2005;132,6;662,99;12,12|7,28|1,69|5,76|6,93|2,82|4,17|||3,09||;
86;N;-1:XIVEERL;533;3366;5052;5;CF3;18/2/2005;199,39;996,96;|35,31||11,12|4,85|20,32|16,17|15,74||96,41||3,37|;
87;N;-1:HWSACMF;536;3367;5053;7;GG25;19/2/2005;103,36;723,54;|10,84|1,11|9,42|3,12|7,97|12,3,6|11,32|||1,65|;
88;N;-1:HWSACMF;536;3367;5054;9;COBRE;19/2/2005;73,1;584,81;|6,12|28,44|3,98|2,17|3,37|5,75|3,81|6,44|||1,82|;
89;N;-1:LWLRZDY;534;3368;5055;3;CF8;25/2/2005;94,8;379,18;|6,78||6,92|2,15|4,39|6,81|3,56|5,21|1,66|;

90;N;-1;OJKNOES;537;3369;5056;7;GG25;21/2/2005;41,37;289,58;|3,32||2,41|1,4|2,03|2,19|2,67|2,78|79,33|||1,45|;
91;N;-1;HWSACMF;536;3370;5057;1;WCB;24/2/2005;16,75;100,52;|2,85||2,14|1,27|1,67|1,89|1,79|1,85|||1,07|;
92;N;-1;AQMCLTT;535;3371;5058;7;GG25;20/2/2005;224,47;1571,32;|3,1,07||14,88|5,79|15,84|15,42|10,04|17,9|140,52|||1,12|;
93;N;-1;AQMCLTT;535;3371;5059;5;CF3;20/2/2005;74,92;374,62;|5,42||4,99|1,75|6,3|2,37|2,87|5,79|||1,84|;
94;N;-1;HWSACMF;536;3372;5060;1;WCB;17/2/2005;74,09;444,54;|12,56|34,16|5,51|2,21|4,41|6,32|4,74|6,46|||2|;
95;N;-1;HWSACMF;536;3372;5061;7;GG25;17/2/2005;83,57;585,01;|3,08||2,37|1,68|3,6|2,6|3,2|2,73|||1,69|;
96;N;-1;AQMCLTT;535;3374;5062;2;WCC;19/2/2005;155,32;931,93;|12,95||7,5|2,18|5,32|7,25|5,5|5,36|||7,52||;
97;N;-1;LWLRZDY;534;3375;5063;1;WCB;14/2/2005;58,94;353,61;|7,31|4,07|2|5,44|3,72|4,36|5,15|||2,39|;
98;N;-1;HWSACMF;536;3376;5064;6;CF3M;18/2/2005;39,95;199,75;|2,99||1,61|1,39|1,12|2,48|1,45|1,74|||1,14|;
99;N;-1;AQMCLTT;535;3377;5065;11;LIGA ESPECIAL;19/2/2005;218,9;2189,01;|24,67||9,73|4,82|16,24|19,88|8,03|16,79|158,27|||4,05|;
100;N;-1;AQMCLTT;535;3377;5066;4;CF8M;19/2/2005;189,67;758,68;|3,69||3,75|1,74|6,48|6,63|3,64|1,86|||3,62|;
101;N;-1;LWLRZDY;534;3378;5067;2;WCC;21/2/2005;75,45;452,67;|6,93||3,88|1,44|3,84|1,86|1,74|3,38|||1,62|;
102;N;-1;HWSACMF;536;3379;5068;6;CF3M;22/2/2005;15,12;75,58;7,34|3,01|2,44|1,35|2,36|2,71|7,512,17|||1,36|;
103;N;-1;AQMCLTT;535;3380;5069;6;CF3M;23/2/2005;141,31;706,55;37,44|20,59||12,21|3,47|13,36|25,118,99|1376,12|||3,69|;
104;N;-1;AQMCLTT;535;3380;5070;10;MOLIBDÉNIO;23/2/2005;168,05;1344,41;|15,35|57,11|8,58|2,33|6,39|4,21|4,59|2,69|||20,84||;
105;N;-1;AQMCLTT;535;3380;5071;4;CF8M;23/2/2005;24,17;96,7;|2,19|4,43|1,58|1,05|1,33|1,35|1,51|||1,11|;
106;N;-1;AQMCLTT;535;3381;5072;6;CF3M;23/2/2005;103,76;518,79;|4,73||2,68|1,74|5,58|1,87|3,47|2,48|||1,23|;
107;N;-1;AQMCLTT;535;3381;5073;7;GG25;23/2/2005;116,34;814,4;|16,48||9,48|2,79|4,71|10,91|6,66|8,28|||3,12|;
108;N;-1;HWSACMF;536;3382;5074;3;CF8;22/2/2005;19,2;76,81;|1,31||1,93|1,17|1,51|1,14|1,23|1,66|||1,21|;
109;N;-1;HWSACMF;536;3382;5075;4;CF8M;22/2/2005;142;568;|15,79||7,8|3,21|11,35|8,42|7,61|11,08|||2,2|;
110;N;-1;HWSACMF;536;3383;5076;2;WCC;24/2/2005;32,32;193,93;|3,94||3,29|1,53|1,33|3,82|2,25|3,65|2,73|||1,35|;
111;N;-1;XIVEERL;533;3384;5077;3;CF8;18/2/2005;151,74;606,98;|11,25||8,27|2,84|6,54|12,28|3,43|10,94|142,92||15,38||;
112;N;-1;XIVEERL;533;3384;5078;1;WCB;18/2/2005;229,1;1374,58;|17,88||12,85|4,87|16,79|16,46|16,13|16,02|||5,47|;
113;N;-1;LWLRZDY;534;3385;5079;4;CF8M;22/2/2005;93,18;372,74;|17,67||7,83|7,2|2,36|7,38|4,65|5,76|6,59|||1,46|;
114;N;-1;LWLRZDY;534;3385;5080;3;CF8;22/2/2005;36,16;144,66;|4,64||1,36|1,31|9,62|2,21|9,912,62|||1,25|;
115;N;-1;LWLRZDY;534;3386;5081;7;GG25;19/2/2005;168,71;1180,94;|5,89||3,28|1,78|1,43|9,96|3,76|2,95|17,72|||2,69|;
116;N;-1;HWSACMF;536;3387;5082;4;CF8M;15/2/2005;15,8;63,18;|1,89||1,65|1,19|2,06|1,98|1,44|1,99|||1,13|;
117;N;-1;HWSACMF;536;3387;5083;10;MOLIBDÉNIO;15/2/2005;9,89;79,09;|2,12||1,58|1,15|1,68|1,54|1,45|1,76|||1,14|;
118;N;-1;LWLRZDY;534;3388;5084;7;GG25;17/2/2005;3,51;24,57;|1,84|1,48||1,29|1,06|1,27|1,13|1,13|1,17|||1,03|;
119;N;-1;LWLRZDY;534;3388;5085;9;COBRE;17/2/2005;136,3;1090,39;|12,03|52,99|8,54|3,06|8,66|9,17|8,03|6,58|||1,94|;
120;N;-1;HWSACMF;536;3389;5086;3;CF8;19/2/2005;89,44;357,77;|13,94||6,44|2,83|8|11,24|8,56|5,38|||3,11|;
121;N;-1;LWLRZDY;534;3390;5087;6;CF3M;22/2/2005;137,56;687,78;|5,72||3,57|1,55|3,37|1,31|1,24|3,01|||1,2|;
122;N;-1;XIVEERL;533;3391;5088;1;WCB;17/2/2005;142,84;857,04;|16,92||8,77|3,52|12,77|8,615,48|6,8|||16,67|;
123;N;-1;XIVEERL;533;3391;5089;1;WCB;17/2/2005;215,87;1295,19;|24,55||16,74|5,9|20,97|12,71|16,64|16,24|||3|;
124;N;-1;OJKNOES;537;3392;5090;7;GG25;18/2/2005;193,12;1351,85;|28,11||13,54|4,71|14,94|12,39|10,58|15,43|||2,93|;
125;N;-1;GTJKOVF;546;3393;5091;8;VSGG25;26/2/2005;206,46;1445,22;|14,03||6,16|2,73|7,34|4,88|5,84|9,63|28,24|||2,71|;
126;N;-1;GTJKOVF;546;3393;5092;1;WCB;26/2/2005;10,76;64,57;|1,57|3,28|1,38|1,11|1,25|1,41|1,39|1,11|||1,12|;
127;N;-1;OJKNOES;537;3394;5093;4;CF8M;26/2/2005;60,31;241,26;|8,8||4,89|2|4,45|7,05|4,81|5,62|||1,78|;
128;N;-1;OJKNOES;537;3394;5094;4;CF8M;26/2/2005;222,62;890,47;|22,31||15|5,11|4,13|14,66|12,24|17,25|||5,47|;
129;N;-1;PORLHED;538;3395;5095;3;CF8;17/2/2005;84,18;336,73;|7,06||2,81|1,85|5,54|5,19|2,74|4,61|||1,12|;
130;N;-1;BMRDZYP;541;3396;5096;8;VSGG25;23/2/2005;172,76;1209,29;|6,63||6,84|2,31|2,11|6,07|4,39|9,67|||2,08|;
131;N;-1;LWLRZDY;534;3397;5097;1;WCB;23/2/2005;145,48;872,9;|11,86||8,24|4,16|10,84|12,83|5,93|7,76|||3,51|;
132;N;-1;LWLRZDY;534;3398;5098;10;MOLIBDÉNIO;22/2/2005;204,51;1636,06;|20,52||13,42|4,34|12,04|7,41|12,84|11,36|||7,25|;
133;N;-1;LWLRZDY;534;3398;5099;4;CF8M;22/2/2005;62,67;250,69;|5,08||2,72|1,46|3,64|1,86|3,58|3,68|||1,3|;
134;N;-1;LWLRZDY;534;3399;5100;3;CF8;22/2/2005;40,96;163,85;|3,28||2,97|1,71|4,56|3,99|2,79|5,05|||2|;
135;N;-1;LWLRZDY;534;3399;5101;5;CF3;22/2/2005;196,8;983,99;|22,74||11,63|3,03|14,27|11,49|4,34|10,31|||3,78|;
136;N;-1;VSPVEM;545;3400;5102;10;MOLIBDÉNIO;25/2/2005;200,6;1604,8;|19,01||10,23|3,52|13,92|16,46|12,04|9,46|||2,21|;
137;N;-1;VSPVEM;545;3400;5103;2;WCC;25/2/2005;229,61;1377,64;|9,93||6,7|3,07|3,38,19|6,56|3,44|||2,25|;
138;N;-1;SRDZRD;544;3401;5104;1;WCB;20/2/2005;192,68;1156,08;|19,17||9,11|3,33|8,61|11,18|9,14|9,05|||18,58||;
139;N;-1;SRDZRD;544;3401;5105;5;CF3;20/2/2005;52,1;260,52;|1,71||3,98|1,68|2,57|5,14,02|3,93|65,15|||1,37|;
140;N;-1;BMRDZYP;541;3402;5106;9;COBRE;17/2/2005;193,61;1548,91;|27,91||7,59|3,12|9,74|3,74|8,84|9,72|113,35|||1,83|;
141;N;-1;BMRDZYP;541;3403;5107;9;COBRE;16/2/2005;220,61;1764,87;|1,03||5,26|1,52|7,11|9,53|4,81|0,75|105,09|||10,1|;
142;N;-1;BMRDZYP;541;3404;5108;2;WCC;19/2/2005;83,17;499,01;|7,55||6,74|2,32|7,33|7,68|5,06|8,92|||2,59|;
143;N;-1;OJKNOES;537;3405;5109;1;WCB;18/2/2005;114,52;687,12;|13,77||11,4|3,73|7,16|10,27|9,25|9,36|52,62|||1,08|;
144;N;-1;OJKNOES;537;3405;5110;4;CF8M;18/2/2005;157,19;628,77;|12,4||5,73|2,33|4,12|4,46,14|5,15|||2,13|;
145;N;-1;XIVEERL;533;3406;5111;1;WCB;23/2/2005;239,06;1434,39;|21,05||10,81|4,77|19,85|8,68|10,24|15,62|||5,48|;
146;N;-1;XIVEERL;533;3406;5112;5;CF3;23/2/2005;170,17;850,87;56,51|17,44|86,45|10,36|3,73|11,01|19,08|11,62|8,17|||1,91|;
147;N;-1;VHKPYHW;540;3407;5113;8;VSGG25;17/2/2005;224,48;1571,37;97,83|33,16|12,29|5,29|19,24|20,17|14,01|17,59|||3,8|;
148;N;-1;YALQVSX;542;3408;5114;12;LIGA ANTI OXIDÁVEL;22/2/2005;130,99;1309,86;|15,33||6,67|3,15|9,67|5,71|8,02|10,88|||22,85||;
149;N;-1;AQMCLTT;535;3409;5115;10;MOLIBDÉNIO;18/2/2005;75,36;602,86;|12,98||4,81|2,14|6,46|8,61|3,87|6,78|68,78|||2,18|;
150;N;-1;VSPVEM;545;3410;5116;11;LIGA ESPECIAL;26/2/2005;225,17;2251,72;|22,99||12,95|4,91|8,25|13,35|13,88|13,54|||5,24|;
151;N;-1;VTOHVSA;539;3411;5117;9;COBRE;22/2/2005;156,82;1254,53;|7,03||3,14|1,69|2,46|5,97|2,32|2,3|||1,26|;
152;N;-1;VTOHVSA;539;3411;5118;5;CF3;22/2/2005;109,8;549,02;|1,13||2,75|1,73|2,56|7,97|2,09|2,81|36,33|||1,62|;
153;N;-1;VTOHVSA;539;3411;5119;9;COBRE;22/2/2005;57,66;461,29;|5,71||3,24|1,65|3,51|3,47|3,82|8|||1,95|;
154;N;-1;VHKPYHW;540;3412;5120;3;CF8;25/2/2005;136,27;545,06;|3,56||4,02|1,39|3,37|2,25|3,78|5,36|||1,32|;
155;N;-1;VHKPYHW;540;3413;5121;3;CF8;17/2/2005;56,94;227,75;|5,43||3,44|1,66|2,43|2,51|3,65|3,3|||1,48|;
156;N;-1;QFLUYRO;547;3414;5122;8;VSGG25;22/2/2005;85,95;601,65;|2,61||2,91|1,35|1,78|1,57|2,45|2,13|||1,8||;
157;N;-1;QFLUYRO;547;3414;5123;3;CF8;22/2/2005;166,93;667,73;|13,5||4,79|2,12|4,09|2,5|6,67|1,47|||1,83|;
158;N;-1;PORLHED;538;3415;5124;4;CF8M;19/2/2005;24,9;99,6;|2,56||1,74|1,28|1,64|2,31|1,84|1,54|90,94|||1,12|;
159;N;-1;PORLHED;538;3415;5125;1;WCB;19/2/2005;219,82;1318,91;|26,33||8,88|3,21|11,88|7,68|9,44|6,74|||2,69|;
160;N;-1;VTOHVSA;539;3416;5126;7;GG25;21/2/2005;66,29;464,03;|3,78||3,19|1,18|1,81|4,52|1,87|1,95|13,86|||1,39|;
161;N;-1;GTJKOVF;546;3417;5127;7;GG25;21/2/2005;114,53;801,74;|5,82||2,06|1,39|2,01|7,78|2,51|1,02|||17,58||;
162;N;-1;OJKNOES;537;3418;5128;2;WCC;22/2/2005;247,52;1485,11;|32,4||18,34|4,18|16,41|4,85|9,86|11,8|||4,25|;
163;N;-1;OJKNOES;537;3418;5129;2;WCC;22/2/2005;75,81;454,86;|5,84||3,15|1,33|4,37|5,14|4,29|4,35|||1,57|;
164;N;-1;SRDZRD;544;3419;5130;9;COBRE;19/2/2005;193,9;1551,19;|27,17||5,23|9,12|3,25|5,76|15,7|9,68|5,44|||3,9|;
165;N;-1;VTOHVSA;539;3420;5131;1;WCB;20/2/2005;63,83;382,97;20,97|4,03||4,11|1,79|4,91|2,51|3,54|3,59|45,04|16,75|||1,72|;
166;N;-1;VTOHVSA;539;3420;5132;1;WCB;20/2/2005;223,35;1340,08;|13,78||2,57|1,93|5,39|6,92|7,09|5,1|||4,33|;
167;N;-1;PORLHED;538;3421;5133;8;VSGG25;16/2/2005;156,34;1094,36;|3,99||4,18|1,59|4,07|5,04|2,85,8|||1,45|;
168;N;-1;OJKNOES;537;3422;5134;5;CF3;21/2/2005;57,25;286,23;19,97|8,77||4,84|1,97|5,01|7,37|3,69|4,37|||2,11|;
169;N;-1;OJKNOES;537;3422;5135;6;CF3M;21/2/2005;241,86;1209,3;|6,44||10,66|4,33|13,97|22,61|19,68|8,51|||4,03|;
170;N;-1;HWSACMF;536;3423;5136;9;COBRE;24/2/2005;217;1736;|8,08||8,15|2,87|13,82|11,87|1,88|8,11|||9,98||;
171;N;-1;HWSACMF;536;3423;5137;6;CF3M;24/2/2005;40,88;204,41;|4,37|11,83|0,11|4,13|4,82|3,52|2,12|2,21|||1,01|;
172;N;-1;BMRDZYP;541;3424;5138;1;WCB;26/2/2005;71,7;430,22;7,73||6,03|2,45,73|11,23|5,67|6,62|||1,87|;

173;N;-1;YALQVSX;542;3425;5139;1;WCB;19/2/2005;50,11;300,65;|2,45||2,26|1,45|3,23|3,64|3,37|2,64|||||1,35|;
 174;N;-1;YALQVSX;542;3425;5140;8;VSGG25;19/2/2005;122,97;860,8;|10,57|6,78|3,07|9,07|11,25|6,2|8,55|||||1,43|;
 175;N;-1;GTJKOVF;546;3426;5141;12;LIGA ANTI OXIDÁVEL;25/2/2005;57,31;573,06;|4,38|4,8|1,83|3,58|3,12|4,21|3,36|||||1,6|;
 176;N;-1;GTJKOVF;546;3426;5142;1;WCB;25/2/2005;97,36;584,14;|1,06||1,56|1,51|3,73|3,11|1,53|2,77|||||1,24|;
 177;N;-1;HWSACMF;536;3427;5143;10;MOLIBDÊNIO;17/2/2005;218,88;1751,05;|24,67||13,25|4,7|21,02|24,38|10,66|11,46|||||1,33|;
 178;N;-1;OJKNOES;537;3428;5144;12;LIGA ANTI OXIDÁVEL;22/2/2005;250,06;2500,62;|37,15||23,52|6,2|12,47|20,44|14,53|23,89|||||2,67|;
 179;N;-1;PORLHED;538;3429;5145;7;GG25;22/2/2005;142,73;999,08;29,21|11,81||5,19|2|3,9|3,49|4,35|6,67|||||3,34|;
 180;N;-1;YALQVSX;542;3430;5146;12;LIGA ANTI OXIDÁVEL;21/2/2005;222,63;2226,33;|12,93||18,94|4,74|17,56|18,15|4,82|13,58|||||5,8|;
 181;N;-1;YALQVSX;542;3431;5147;9;COBRE;18/2/2005;173,16;1385,24;|9,13||6,49|2,61|5,73|5,55|3,56|10,51|||||10,45|;
 182;N;-1;YALQVSX;542;3431;5148;10;MOLIBDÊNIO;18/2/2005;220,56;1764,5;|25,22||21,1|5,7|25,72|18,48|18,61|19,03|||||3,74|;
 183;N;-1;BMRDZYP;541;3432;5149;10;MOLIBDÊNIO;24/2/2005;70,19;561,48;|2,07||3,34|1,29|2,51|2,28|2,07|2,22|||||10,23|;
 184;N;-1;VTOHVSA;539;3433;5150;2;WCC;20/2/2005;235,68;1414,06;72,04|27,95||12,03|5,36|15,72|8,25|11,29|18,25|||||4,75|;
 185;N;-1;XIVEERL;533;3434;5151;12;LIGA ANTI OXIDÁVEL;19/2/2005;224,05;2240,53;|14,97||7,04|3,61|8,06|15,86|11,95|12,64|||||1,9|;
 186;N;-1;VSPPVEM;545;3435;5152;7;GG25;2/3/2005;211,21;1478,48;|20,01||10,79|3,53|12,21|8,42|14,05|14,49|||||3,99|;
 187;N;-1;XICKWGV;550;3436;5153;7;GG25;17/2/2005;194,62;1362,35;|16,42||12,82|3,11|12,39|13,52|9,86|6,89|||||9,23|;
 188;N;-1;XICKWGV;550;3436;5154;3;CF8;17/2/2005;83,4;333,58;|5,46||5,04|2|4,38|2,43|3,34|3,29|||||1,84|;
 189;N;-1;HNBHSHT;543;3437;5155;3;CF8;26/2/2005;65,06;260,23;|11,02||5|2,2|4,73|6,25|3,81|5,08|||||1,01|;
 190;N;-1;FHHOVEY;548;3438;5156;1;WCB;22/2/2005;129,82;778,93;|8,75||4,63|2,18|5,52|1,78|3,14,68|||||2,92|;
 191;N;-1;OJKNOES;537;3439;5157;2;WCC;23/2/2005;190,29;1141,76;|21,4||9,54|3,51|13,38|7,33|11,07|17,06|51,9|||||3,01|;
 192;N;-1;VTOHVSA;539;3440;5158;1;WCB;21/2/2005;112,58;675,46;|6,82||3,33|1,89|6,1|9,66|4,03|4,34|||||1,25|;
 193;N;-1;VTOHVSA;539;3440;5159;3;CF8;21/2/2005;54,51;218,04;|2,04|2,91|2,16|1,23|2,32|1,71|2,45|2,23|||||2,91|;
 194;N;-1;XIVEERL;533;3441;5160;3;CF8;23/2/2005;191,51;766,04;|11,58||51,01|8,65|2,7|7,05|8,97|10,24|11,32|22,16|||||4,05|;
 195;N;-1;HWSACMF;536;3442;5161;1;WCB;25/2/2005;82,8;496,81;36,32|5,46||5,48|2,33|5,78|9,94|9,55|7|||||1,69|;
 196;N;-1;HWSACMF;536;3442;5162;12;LIGA ANTI OXIDÁVEL;25/2/2005;216,99;2169,92;|25,54||12,25|4,61|13,27|5,93|12,36|11,18|||||3,79|;
 197;N;-1;VHKPYHW;540;3443;5163;6;CF3M;19/2/2005;15,24;76,22;|1,23||1,4|1,1|1,86|1,25|1,17|1,55|||||1,07|;
 198;N;-1;DKFNNOF;557;3444;5164;10;MOLIBDÊNIO;17/2/2005;225,18;1801,44;|1,05||11,61|3,35|9,83|5,77|5,67|4,3|||||1,76|;
 199;N;-1;DKFNNOF;557;3444;5165;7;GG25;17/2/2005;247,19;1730,34;|33,55||16,46|5,5|20,21|9,12|15,83|14,87|||||4,38|;
 200;N;-1;OJKNOES;537;3445;5166;9;COBRE;21/2/2005;50,58;404,64;|4,78||3,53|1,81|3,15|3,52|3,37|4,74|41,61|||||1,61|;

Uma vez gerado o arquivo texto com os dados, o tomador de decisões poderá iniciar o processo de elaboração da programação da produção. Para isto, após iniciado o SAD, escolhe-se no “*menu*” “Arquivo” a opção “Abrir programação do ciclo”. Este procedimento é ilustrado na *figura A6.1*.

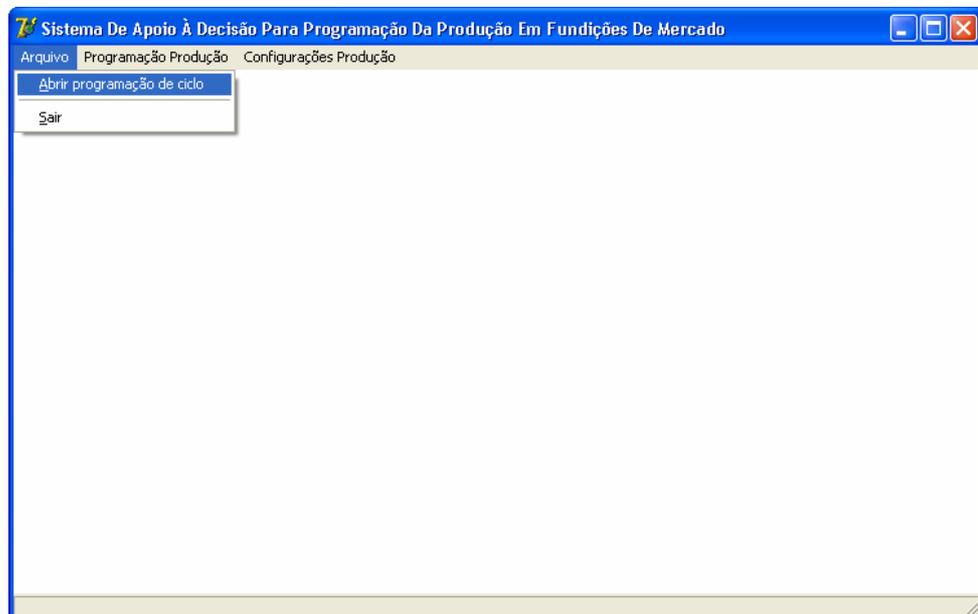


FIGURA A6.1: Abrindo uma programação de ciclo

Feito isto, o usuário escolhe o arquivo texto gerado previamente que corresponde ao ciclo que se deseja programar, usando uma interface comum para abrir arquivos. A *figura A6.2* ilustra este procedimento.

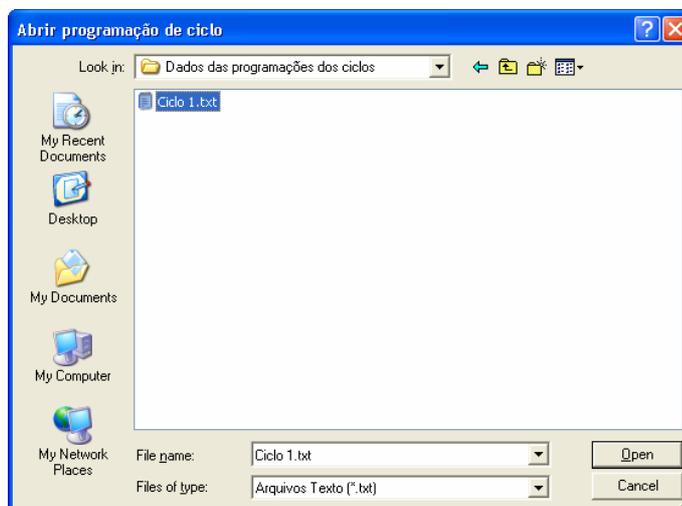


FIGURA A6.2: Caixa de diálogo para abrir uma programação de ciclo

O próximo passo consiste em visualizar os dados de configuração do ambiente de produção com o intuito de conferir as informações e também realizar possíveis modificações necessárias para a situação de decisão em questão. Para isto, escolhe-se no “*menu*” “Configurações Produção” a opção desejada como na *figura A6.3*.

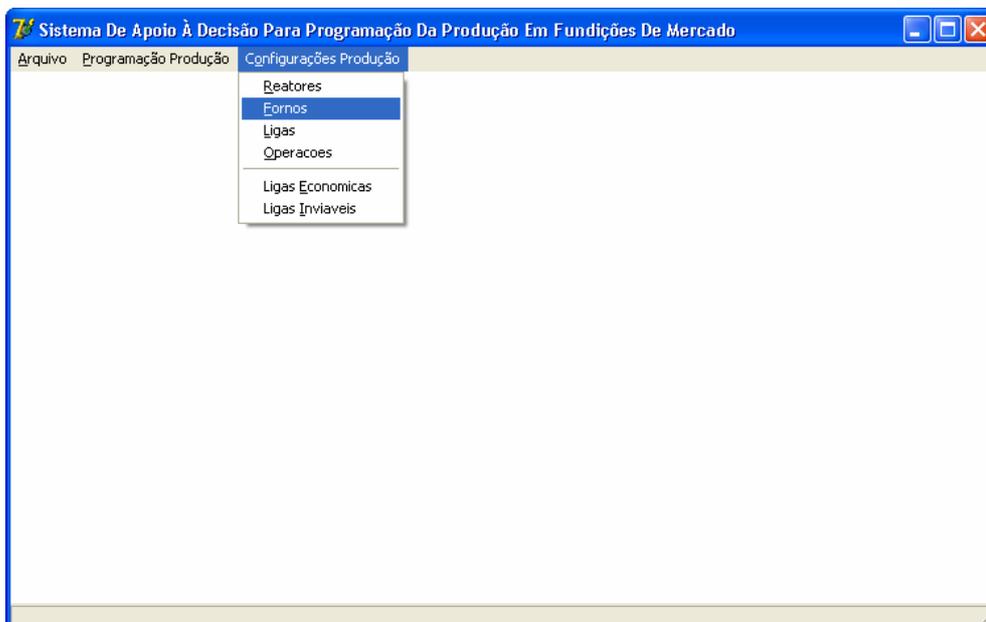


FIGURA A6.3: Conferindo as configurações de produção

Na *figura A6.3* foi escolhido, como exemplo, a opção “Fornos”, que permitirá visualizar as informações dos fornos disponíveis para fundição permitindo também realizar alterações nestas informações, como pode ser visto na *figura A6.4*.

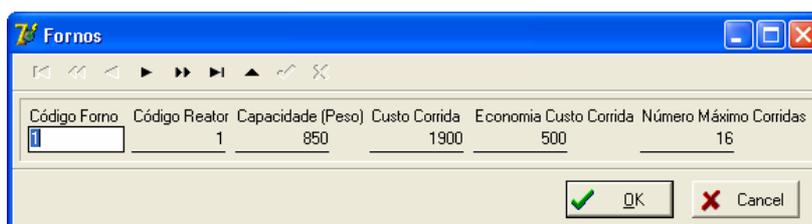


FIGURA A6.4: A caixa de configuração dos fornos disponíveis

Feito isto para todas as opções de configurações de produção, em seguida, deve-se analisar os itens de pedido que serão considerados no processo de elaboração da programação da produção no ciclo. Para isto, escolhe-se no “*menu*” “Programação Produção” a opção “Itens de Pedido”, como ilustra a *figura A6.5*.

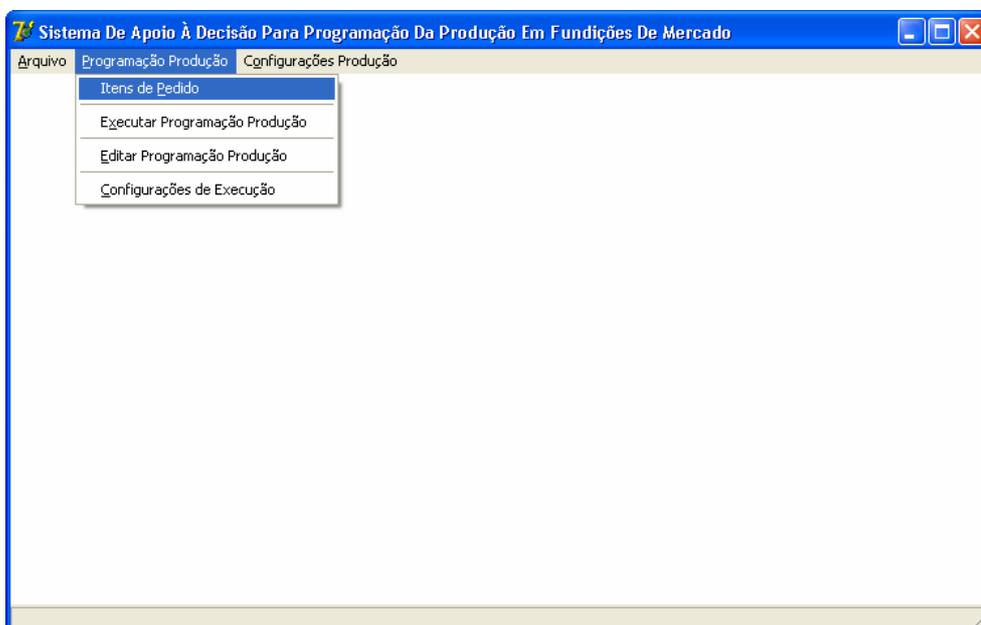


FIGURA A6.5: Conferindo os itens de pedidos à programar

A opção “Itens de Pedido” permite visualizar todos os itens de pedido para programar que estão disponíveis no arquivo de dados. Esta interface possui uma importante função decisória, pois o tomador de decisões deverá selecionar os itens de pedidos que deverão ser considerados no processo de elaboração da programação da produção. Para este

exemplo, será informado que todos os itens de pedidos serão considerados no processo de elaboração da programação da produção, para isto, todos os itens de pedidos serão selecionados, pressionando-se o “botão” “Selecionar todos”. Este procedimento pode ser visualizado na *figura A6.6*. Perceba que todos os itens de pedido possuem o valor “-1” para a coluna “Corrida”, significando que estes itens de pedidos ainda não foram programados em nenhuma corrida de forno.

Cliente	Código Item P.	Data Entrega	Valor	Peso Bruto	Liga Metálica	Corrida
XIVEERL	4966	14/2/2005	184,53	36,91	CF3M	-1
XIVEERL	4967	27/2/2005	641,88	80,24	MOLIBDÉNIO	-1
XIVEERL	4968	16/2/2005	569,16	94,86	WCB	-1
XIVEERL	4969	16/2/2005	1365,9	136,59	LIGA ANTI OXIDÁVEL	-1
XIVEERL	4970	25/2/2005	224	37,33	WCB	-1
XIVEERL	4971	25/2/2005	878,19	219,55	CF8M	-1
XIVEERL	4972	25/2/2005	1271,98	212	WCC	-1
XIVEERL	4973	21/2/2005	265,19	66,3	CF8M	-1
XIVEERL	4975	19/2/2005	469,35	67,05	VSGG25	-1
XIVEERL	4976	19/2/2005	300,43	75,11	CF8	-1
XIVEERL	4977	19/2/2005	223,26	55,82	CF8	-1
XIVEERL	4978	17/2/2005	121,24	30,31	CF8M	-1
XIVEERL	4979	17/2/2005	1043,81	173,97	WCC	-1
XIVEERL	4980	20/2/2005	247,28	41,21	WCB	-1
XIVEERL	4981	20/2/2005	94,81	11,85	CDBRE	-1
XIVEERL	4982	20/2/2005	772,93	128,82	WCC	-1
XIVEERL	4983	20/2/2005	612,94	102,16	WCC	-1
XIVEERL	4984	20/2/2005	218,91	36,49	WCC	-1
XIVEERL	4985	21/2/2005	454,73	90,95	CF3M	-1
XIVEERL	4986	21/2/2005	938,55	134,08	GG25	-1
XIVEERL	4987	22/2/2005	556,81	111,36	CF3M	-1
XIVEERL	4988	22/2/2005	1043,3	173,88	WCC	-1
XIVEERL	4989	13/2/2005	1086,92	217,38	CF3	-1
XIVEERL	4990	13/2/2005	1213,88	151,71	CDBRE	-1
XIVEERL	4991	21/2/2005	1742,04	248,86	VSGG25	-1
XIVEERL	4992	21/2/2005	783,55	195,89	CF8M	-1
XIVEERL	4993	18/2/2005	1729,47	216,18	MOLIBDÉNIO	-1

154644,62 24933,07

Selecionar todos Limpar seleção Modo Edição Ok Cancelar

FIGURA A6.6: Selecionando os itens de pedido à programar

Uma vez selecionados os itens de pedido a programar, pode-se executar o procedimento de elaboração da programação da produção, para isto, deve-se escolher o modelo decisório que será empregado neste processo, configurando também seus parâmetros de execução. Para isto, escolhe-se no “menu” “Programação Produção” a opção “Configurações de Execução”, como ilustrado na *figura A6.7*.

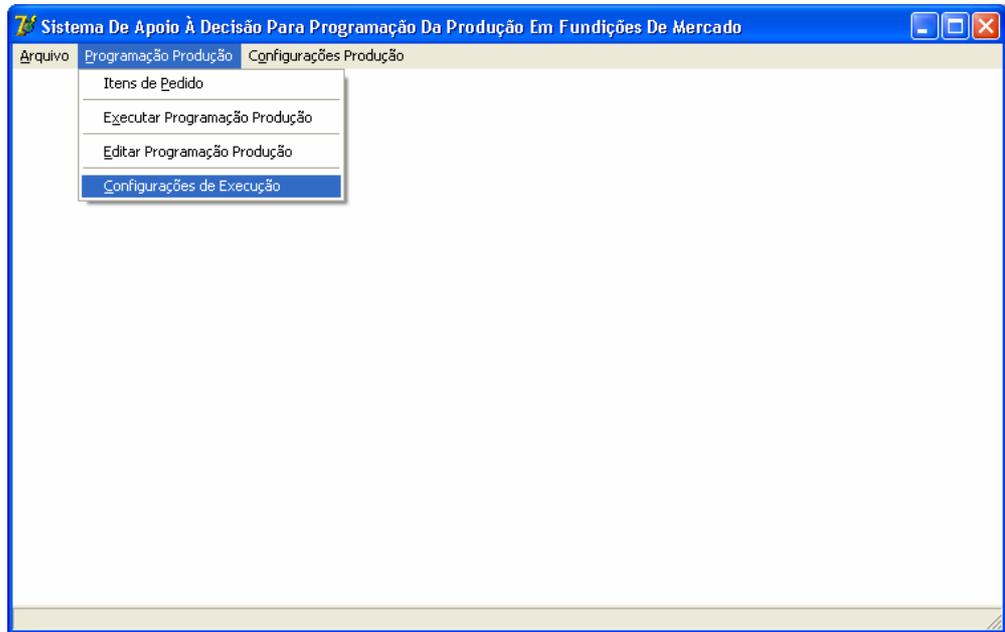


FIGURA A6.7: Definindo as Configurações de execução

A opção “Configurações de Execução” é uma etapa importante do processo decisório, pois o tomador de decisões irá escolher o tipo de modelo empregado no processo de elaboração da programação da produção, definindo também seus parâmetros de solução. É de se esperar que o uso contínuo do sistema pelo tomador de decisões permitirá que se crie maior embasamento nestas escolhas, de acordo com o ambiente produtivo em questão. Um direcionador inicial são os resultados experimentais apresentados pelos modelos decisórios propostos. Por exemplo, para as características produtivas do cenário “BBBB”, empregado neste exemplo, os experimentos apontam resultados mais promissores usando o modelo *HE* com diâmetro de busca igual a 3. Desta forma, será esta a configuração usada para este exemplo como pode ser visualizado na *figura A6.8*.

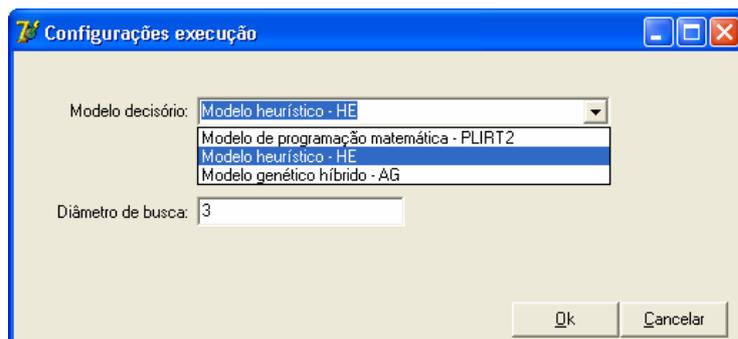


FIGURA A6.8: Escolha do modelo decisório e dos parâmetros de solução

Feito isto, pode-se executar a processo de elaboração da programação da produção, escolhendo-se no “*menu*” “Programação Produção” a opção “Executar Programação Produção” como na *figura A6.9*.

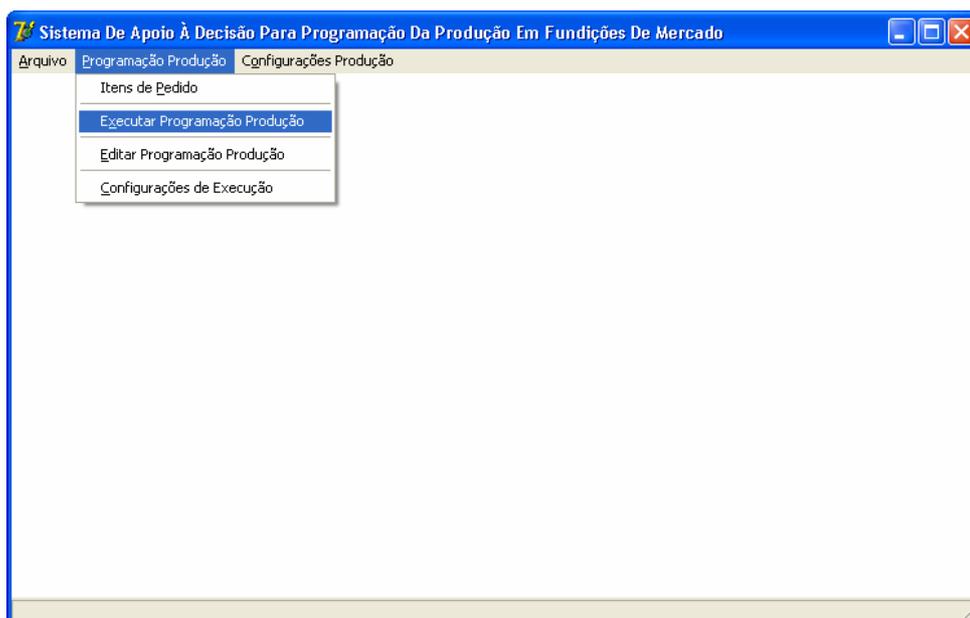


FIGURA A6.9: Executando a programação da produção

Após o tempo de execução do método de solução para o modelo *HE* com diâmetro de busca igual a 3, a programação dos fornos encontra-se disponível para consulta, para isto, pode-se escolher no “*menu*” “Programação Produção” a opção “Editar Programação Produção” como na *figura A6.10*.

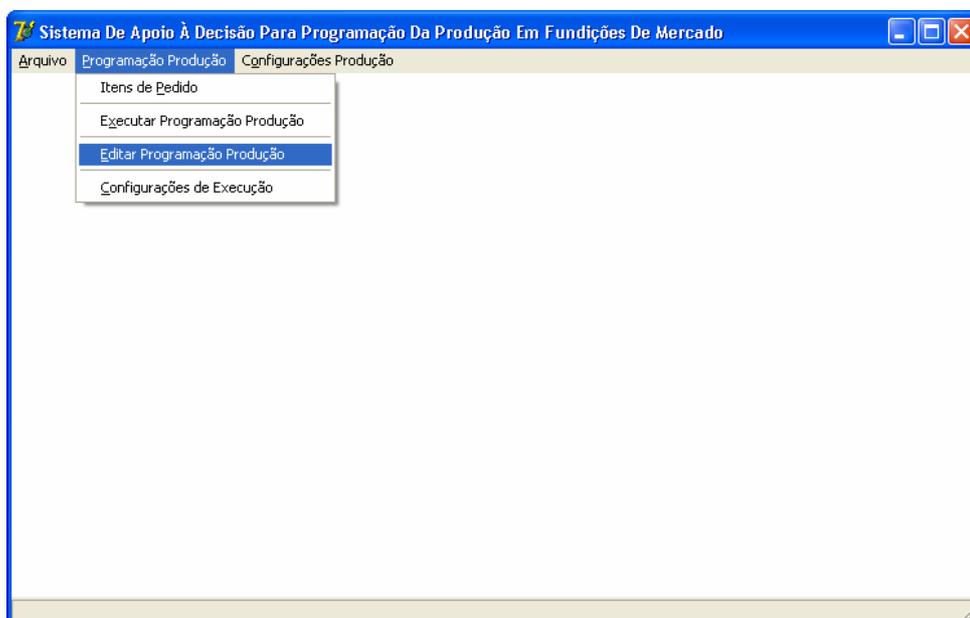


FIGURA A6.10: Consultando e alterando a programação da produção gerada

Nesta etapa o tomador de decisões poderá analisar as corridas de fornos programadas, permitindo analisar para cada corrida de forno os itens de pedidos programados para serem vazados na mesma, assim como os dados relativos à corrida, como: liga metálica a ser fundida, o código e capacidade do forno e o uso desta capacidade pelos itens de pedido programados, como pode ser visto na *figura A6.11*

Programação das Corridas de Fornos

Corridas programadas

Corrida: _____ 16 Código do Forno: _____ 2
Liga da Corrida: CF8M Capacidade do Forno: _____ 850

Itens de Pedidos Programados na Corrida

Cliente	Código Item Pedido	Data Entrega	Valor	Peso Bruto	Liga Metálica	Corrida
XIVEERL	4992	21/2/2005	783,55	195,89	CF8M	16
XIVEERL	4971	25/2/2005	878,19	219,55	CF8M	16
DJKNDES	5094	26/2/2005	890,47	222,62	CF8M	16
HWSACMF	5082	15/2/2005	63,18	15,8	CF8M	16
AQMCLTT	5066	19/2/2005	758,68	189,67	CF8M	16

3374,07 843,53

Consumo Operações Inserir Itens Excluir Itens Terminar

FIGURA A6.11: Visualizando as corridas de fornos

Para visualizar o consumo das operações produtivas pelos itens de pedidos programados em todas as corridas utiliza-se o “botão” “Consumo operações”, permitindo avaliar as capacidades consumidas e disponíveis das operações produtivas, assim como verificar o consumo total das capacidades consumidas cambiáveis. Este procedimento pode ser visto na *figura A6.12*

Código	Descrição	Capacidade Total	Capacidade Cambiável	Capacidade Consumida	Capacidade Cambiável Consumida
1	Projeto Fundição	600	300	547,2	0
2	Moldagem	2200	1100	1960,85	0
3	Macharia	1200	600	655,52	0
4	Fechamento	1200	600	1200	50,07
5	Desmoldagem	350	175	350	124,87
6	Corte	1200	600	1200	127,9
7	Rebarba	1200	600	1200	131,71
8	Lixamento Grosso	1200	600	1057,45	0
9	Lixamento Fino	1200	600	1200	48,37
10	Tratamento Térmico	1200	0	1194,87	0
11	Tratamento Físico	600	0	553,49	0
12	Controle de Qualidade	350	175	141,71	0
13	Controle de Qualidade 2	350	175	297,54	0
14	Controle de Qualidade 3	350	175	350	0,39

Summary values at the bottom of the window:

13200	5700	11908,63	483,31
-------	------	----------	--------

FIGURA A6.12: Consultando o consumo das capacidades das operações produtivas

Esta etapa possui também uma importante finalidade de interação com o tomador de decisões, permitindo que o mesmo realize alterações nas corridas de fornos programadas, por meio da inserção e/ou exclusão de itens de pedidos não programados. Por exemplo, usando o “*mouse*” em conjunto com a tecla “*CTRL*” pressionada pode-se selecionar os itens de pedidos nas corridas de fornos, como na *figura A6.13*.

Programação das Corridas de Fornos

Corridas programadas

Corrida: Código do Forno:
 Liga da Corrida: Capacidade do Forno:

Itens de Pedidos Programados na Corrida

Cliente	Código Item Pedido	Data Entrega	Valor	Peso Bruto	Liga Metálica	Corrida
XIVEERL	4992	21/2/2005	783,55	195,89	CF8M	16
XIVEERL	4971	25/2/2005	878,19	219,55	CF8M	16
DJKNOES	5094	26/2/2005	890,47	222,62	CF8M	16
HWSACMF	5082	15/2/2005	63,18	15,8	CF8M	16
AQMCLTT	5066	19/2/2005	758,68	189,67	CF8M	16

3374,07 843,53

FIGURA A6.13: Excluindo itens de pedido de uma corrida de forno programada

Uma vez selecionados, os itens de pedido poderão ser excluídos da referida corrida usando o botão “Excluir itens”. É importante lembrar que o processo manual de alteração das corridas de fornos é de responsabilidade do tomador de decisões, de forma que o mesmo deverá garantir que a capacidades do forno da referida corrida seja satisfeita, assim como as capacidades das operações, estas ultimas, devem ser analisadas usando o “botão” “Consumo operações”, como já visto na *figura A6.12*. Na *figura A6.14* é possível visualizar o resultado deste processo de exclusão dos itens selecionados.

Programação das Corridas de Fornos

Corridas programadas

Corrida: Código do Forno:
 Liga da Corrida: Capacidade do Forno:

Itens de Pedidos Programados na Corrida

Cliente	Código Item Pedido	Data Entrega	Valor	Peso Bruto	Liga Metálica	Corrida
▶ AQMCLTT	5066	19/2/2005	758,68	189,67	CF8M	16
XIVEERL	4971	25/2/2005	878,19	219,55	CF8M	16
XIVEERL	4992	21/2/2005	783,55	195,89	CF8M	16

2420,42 605,11

Consumo Operações Inserir Itens Excluir Itens Terminar

FIGURA A6.14: Analisando o resultado da exclusão de itens de pedido de uma corrida de forno programada

Da mesma forma, para se inserir outros itens de pedidos a uma corrida programada, usa-se o “botão” “Inserir itens”. Feito isto, pode-se escolher entre os itens de pedidos que ainda não foram programados da mesma liga metálica que a referida corrida de forno, como pode ser visto na *figura A6.15*.

Cliente	Código Item Pedido	Data Entrega	Valor	Peso Bruto	Liga Metálica	Corrida
XIVEERL	4978	17/2/2005	121,24	30,31	CF8M	-1
XIVEERL	4995	18/2/2005	294,15	73,54	CF8M	-1
AQMCLTT	5023	21/2/2005	231,56	57,89	CF8M	-1
HWSACMF	5028	15/2/2005	154,11	38,53	CF8M	-1
AQMCLTT	5071	23/2/2005	96,7	24,17	CF8M	-1
HWSACMF	5082	15/2/2005	63,18	15,8	CF8M	-1
DJKNDES	5094	26/2/2005	890,47	222,62	CF8M	-1

801,06 200,27

Ok Cancelar

FIGURA A6.15: Inserindo itens de pedido a uma corrida de forno programada

Usando o “mouse” em conjunto com a tecla “CTRL” seleciona-se os itens de pedidos que deseja-se incluir na referida corrida de forno, novamente obedecendo a capacidade do forno e as capacidades disponíveis das operações produtivas. O procedimento resultante é mostrado na *figura A6.16*.

Programação das Corridas de Fornos

Corridas programadas

Corrida: 16 Código do Forno: 2
 Liga da Corrida: CF8M Capacidade do Forno: 850

Itens de Pedidos Programados na Corrida

Cliete	Código Item Pedido	Data Entrega	Valor	Peso Bruto	Liga Metálica	Corrida
XIVEERL	4978	17/2/2005	121,24	30,31	CF8M	16
XIVEERL	4995	18/2/2005	294,15	73,54	CF8M	16
AQMCLTT	5023	21/2/2005	231,56	57,89	CF8M	16
PQRLHED	5124	19/2/2005	99,6	24,9	CF8M	16
Hw/SACMF	5028	15/2/2005	154,11	38,53	CF8M	16
XIVEERL	4971	25/2/2005	878,19	219,55	CF8M	16
XIVEERL	4992	21/2/2005	783,55	195,89	CF8M	16
AQMCLTT	5066	19/2/2005	758,68	189,67	CF8M	16

3321,08 830,28

Consumo Operações Inserir Itens Excluir Itens Terminar

FIGURA A6.16: Analisando o resultado da inserção de itens de pedido de uma corrida de forno programada

Feito isto é necessário conferir se as alterações realizadas na corrida programada continuam respeitando as capacidades das operações produtivas, para isto, usa-se o “botão” “Consumo Operações”, que irá mostrar os consumos de capacidade para as operações produtivas de acordo com a *figura A6.17*.

Código	Descrição	Capacidade Total	Capacidade Cambiável	Capacidade Consumida	Capacidade Cambiável Consumida
1	Projeto Fundação	600	300	547,2	0
2	Moldagem	2200	1100	1956,37	0
3	Macharia	1200	600	657,41	0
4	Fechamento	1200	600	1200	48,04
5	Desmoldagem	350	175	350	126,35
6	Corte	1200	600	1200	123,34
7	Rebarba	1200	600	1200	130,67
8	Lixamento Grosso	1200	600	1058,23	0
9	Lixamento Fino	1200	600	1200	40,95
10	Tratamento Térmico	1200	0	1200	395,24
11	Tratamento Físico	600	0	600	156,01
12	Controle de Qualidade	350	175	141,71	0
13	Controle de Qualidade 2	350	175	301,69	0
14	Controle de Qualidade 3	350	175	348,63	0

Summary values at the bottom of the window:
 Total Capacity: 13200 | Available Capacity: 5700 | Consumed Capacity: 11961,24 | Available Consumed Capacity: 1020,6

FIGURA A6.17: Analisando o consumo das operações produtivas após a inserção de itens de pedido em uma corrida de forno programada

Perceba que as alterações realizadas não respeitam as restrições de capacidade máxima cambiável para as operações de “Tratamento térmico” e “Tratamento físico”. Em uma situação destas o tomador de decisões poderá manter sua decisão e planejar alguma forma de provir a capacidade desejada, como, por exemplo, uso de horas-extras, ou, poderá voltar atrás e aceitar a programação inicial sugerida pelo método de solução do modelo *HE*.

Por fim, caso o tomador de decisões queira que o processo de elaboração da programação da produção não considere alguns itens de pedido programados, este poderá desmarcá-los usando novamente a opção “Itens de pedido” do “menu” “Programação da Produção”, veja a figura *A.6.18*, e executar o método de solução novamente. Este ciclo de interação com o tomador de decisões se repete até que a solução gerada seja satisfatória.

Cliente	Código Item Pedido	Data Entrega	Valor	Peso Bruto	Liga Metálica	Corrida
XIVEERL	4995	18/2/2005	294,15	73,54	CF8M	-1
HWSACMF	5028	15/2/2005	154,11	38,53	CF8M	-1
DJKNDES	5096	21/2/2005	289,58	41,37	GG25	-1
HWSACMF	5044	17/2/2005	1412,03	201,72	GG25	-1
XIVEERL	5062	18/2/2005	996,96	199,39	CF3	-1
HWSACMF	5038	21/2/2005	361,05	90,26	CF8	-1
HWSACMF	5064	18/2/2005	199,75	39,95	CF3M	-1
XIVEERL	4966	14/2/2005	184,53	36,91	CF3M	-1
AQMCLTT	5071	23/2/2005	96,7	24,17	CF8M	-1
HWSACMF	5068	22/2/2005	75,58	15,12	CF3M	-1
XIVEERL	5111	23/2/2005	1434,39	239,06	WCB	1
VTOHVSA	5132	20/2/2005	1340,08	223,35	WCB	1
LWLRZDY	5097	23/2/2005	872,9	145,48	WCB	1
GTJKQVF	5032	26/2/2005	64,57	10,76	WCB	1
XIVEERL	5078	18/2/2005	1374,58	229,1	WCB	1
PDRLHED	5125	19/2/2005	1318,91	219,82	WCB	2
XIVEERL	5089	17/2/2005	1295,19	215,87	WCB	2
DJKNDES	5109	18/2/2005	687,12	114,52	WCB	2
SRTDZRD	5104	20/2/2005	1156,08	192,68	WCB	2
HWSACMF	5029	15/2/2005	992,69	165,45	WCB	2
XIVEERL	5088	17/2/2005	857,04	142,84	WCB	2
HWSACMF	5057	24/2/2005	100,52	16,75	WCB	2
FHHOVEY	5156	22/2/2005	778,93	129,82	WCB	2
VSPPVEM	5116	26/2/2005	2251,72	225,17	LIGA ESPECIAL	3
AQMCLTT	5065	19/2/2005	2189,01	218,9	LIGA ESPECIAL	3
XIVEERL	4981	20/2/2005	94,81	11,85	COBRE	4
BMRDZYP	5106	17/2/2005	1548,31	193,61	COBRE	4

151622,95 24429,46

Selecionar todos Limpar seleção Modo Edição Ok Cancelar

FIGURA A6.18: Desmarcando alguns itens que não se deseja considerar no processo de elaboração da programação da produção

A seguir o arquivo texto do componente “banco de dados” após o processo decisório de elaboração da programação da produção é mostrado em detalhes, podendo-se perceber as alterações resultantes do processo de elaboração da programação da produção do sistema proposto. Este arquivo texto poderá ser usado em um procedimento automatizado de atualização da base de dados do sistema de informação empresarial, ou simplesmente armazenado convenientemente para futuras consultas.

```

*****Reatores*****
1;Reator 1;32;
2;Reator 2;32;
*****Fornos*****
1;1;850;1900;500;16;
2;1;850;1900;500;16;
3;1;1500;3200;1000;16;
4;2;1200;2600;800;16;
5;2;1000;2200;700;16;
6;2;200;600;100;16;
7;2;100;400;100;16;
*****Ligas*****
1;WCB;6;
2;WCC;6;
3;CF8;4;
4;CF8M;4;
5;CF3;5;
6;CF3M;5;
7;GG25;7;
8;VSGG25;7;
9;COBRE;8;
10;MOLIBDÊNIO;8;
11;LIGA ESPECIAL;10;
12;LIGA ANTI OXIDÁVEL;10;
*****LigasEconomicas*****
1;1;
2;1;

```

1:2;
2:2;
1:3;
2:3;
3:3;
4:3;
1:4;
2:4;
3:4;
4:4;
1:5;
2:5;
3:5;
4:5;
5:5;
6:5;
1:6;
2:6;
3:6;
4:6;
5:6;
6:6;
1:7;
2:7;
3:7;
4:7;
5:7;
6:7;
7:7;
8:7;
1:8;
2:8;
3:8;
4:8;
5:8;
6:8;
7:8;
8:8;
*****LigasInviaveis*****
5:1;
6:1;
7:1;
8:1;
5:2;
6:2;
7:2;
8:2;
7:3;
8:3;
7:4;
8:4;
1:9;
2:9;
3:9;
4:9;
5:9;
6:9;
7:9;
8:9;
1:10;
2:10;
3:10;
4:10;
5:10;
6:10;
7:10;
8:10;
1:11;
2:11;
3:11;
4:11;
5:11;
6:11;
7:11;
8:11;
1:12;
2:12;
3:12;
4:12;
5:12;
6:12;
7:12;
8:12;

*****Operacoes*****

- 1;Projeto Fundação;600;300;547,2;0;
- 2;Moldagem;2200;1100;1960,85;0;
- 3;Macharia;1200;600;655,52;0;
- 4;Fechamento;1200;600;1200;50,07;
- 5;Desmoldagem;350;175;350;124,87;
- 6;Corte;1200;600;1200;127,9;
- 7;Rebarba;1200;600;1200;131,71;
- 8;Lixamento Grosso;1200;600;1057,45;0;
- 9;Lixamento Fino;1200;600;1200;48,37;
- 10;Tratamento Térmico;1200;0;1194,87;0;
- 11;Tratamento Físico;600;0;553,49;0;
- 12;Controle de Qualidade;350;175;141,71;0;
- 13;Controle de Qualidade 2;350;175;297,54;0;
- 14;Controle de Qualidade 3;350;175;350;0,39;

*****ItensPedido*****

- 1;S;-1;XIVEERL;533;3310;4966;6;CF3M;14/2/2005;36,91;184,53;|5,37|16,45|3,86|1,73|2,28|4,03|2,91|2,78||||1,22|;
- 2;S;20;XIVEERL;533;3311;4967;10;MOLIBDÊNIO;27/2/2005;80,24;641,88;|3,44|24,53|3,39|1,94,12|5,09|2,96|3,78|||||2,03|;
- 3;S;5;XIVEERL;533;3312;4968;1;WCB;16/2/2005;94,86;569,16;|4,37|22,72|4,04|2,14|5,7|2,48|4,07|8,51|||||1,95|;
- 4;S;14;XIVEERL;533;3312;4969;12;LIGA ANTI OXIDÁVEL;16/2/2005;136,59;1365,9;|8,24|7,7|2,85|8,24|9,51|6,08|4,48|||||1,47|;
- 5;S;5;XIVEERL;533;3314;4970;1;WCB;25/2/2005;37,33;224;|2,99||2,63|1,49|2,26|3,42|1,6|2,76|||||5,71|;
- 6;S;16;XIVEERL;533;3318;4975;8;VSGG25;19/2/2005;219,55;878,19;|30,61|74,28|19,9|5,13|17,92|1,63|14,97|16,6|||||5|;
- 7;S;7;XIVEERL;533;3314;4972;2;WCC;25/2/2005;212;1271,98;|19,14||14,59|4,65|20,13|24,45|12,97|13,63|||||5,14|;
- 8;S;25;XIVEERL;533;3315;4973;4;CF8M;21/2/2005;66,3;265,19;|3,12||2,38|1,29|2,06|3,11|2,19|1,81|||||6,63|;
- 9;S;26;XIVEERL;533;3316;4975;8;VSGG25;19/2/2005;67,05;469,35;|2,4||3,64|1,98|3,28|4,4|4,57|1,87|67|||||1,67|;
- 10;S;29;XIVEERL;533;3317;4976;3;CF8;19/2/2005;75,11;300,43;|7,46|29,78|5,39|1,85|3,88|4,23|3,64|3,97|||||1,85|;
- 11;S;29;XIVEERL;533;3317;4977;3;CF8;19/2/2005;55,82;223,26;|21,07|6,04|5,12,2|3,9|6,42|4,67|4,91|||||1,53|;
- 12;S;-1;XIVEERL;533;3318;4978;4;CF8M;17/2/2005;30,31;121,24;|1,91||1,61,14|2,01|1,03|1,27|1,67|76,51|112,89|3,07|;
- 13;S;7;XIVEERL;533;3318;4979;2;WCC;17/2/2005;173,97;1043,81;|10,48|7,01||2,3|1,67|2,38|2,94|1,23|3,91|||||8,29|;
- 14;S;5;XIVEERL;533;3319;4980;1;WCB;20/2/2005;41,21;247,28;|3,83|4,72|1,7|3,41|2,14|3,14|3,6|||||1,77|;
- 15;S;4;XIVEERL;533;3319;4981;9;COBRE;20/2/2005;11,85;94,81;|2,76||1,64|1,19|1,74|1,19|1,85|1,7|||||1,04|;
- 16;S;8;XIVEERL;533;3319;4982;2;WCC;20/2/2005;128,82;772,93;|6||3,79|1,37|2,12|2,19|1,4|2,79|||||1,22|;
- 17;S;8;XIVEERL;533;3320;4983;2;WCC;20/2/2005;102,16;612,94;|10,98|5,94|2,08|4,91|4,48|5,99|4,48|||||1,63|;
- 18;S;7;XIVEERL;533;3320;4984;2;WCC;20/2/2005;36,49;218,91;5,63|3,16||2,01|1,23|2,56|1,97|1,86|2,29|||||1,01|;
- 19;S;-1;XIVEERL;533;3321;4985;6;CF3M;21/2/2005;90,95;454,73;|5,42||4,25|1,41|2|6,11|1,81|4,73|63,45|9,71|;
- 20;S;30;XIVEERL;533;3321;4986;7;GG25;21/2/2005;134,08;938,55;|17,54||10,56|3,73|11,71|7,87|12,95|11,71||87,68|||||3,92|;
- 21;S;-1;XIVEERL;533;3322;4987;6;CF3M;22/2/2005;111,36;556,81;|2,89||4,97|1,73|2,76|4,02|4,32|94|117,08|||18,09|;
- 22;S;7;XIVEERL;533;3323;4988;2;WCC;22/2/2005;173,88;1043,3;|10,88||10,78|3,24|7,87|4,71|8,62|10,08|||||3,49|;
- 23;S;31;XIVEERL;533;3324;4989;5;CF3;13/2/2005;217,38;1086,92;|13,03|9,11|3|10,1,6,36|4,3|2,61|||||1,46|;
- 24;S;13;XIVEERL;533;3324;4990;9;COBRE;13/2/2005;151,71;1213,68;|13,9||10,76|2,82|7,57|4,03|7,31|6,41|||||3,09|;
- 25;S;22;XIVEERL;533;3325;4991;8;VSGG25;21/2/2005;248,86;1742,04;|13,31||7,61|2,96|14,52|7,73|12,09|10,6|||||2,56|;
- 26;S;16;XIVEERL;533;3325;4992;4;CF8M;21/2/2005;195,89;783,55;|6,19||6,43|2,93|7,16|10,07|1,21|5,71|||||17,06|;
- 27;S;20;XIVEERL;533;3326;4993;10;MOLIBDÊNIO;18/2/2005;216,18;1729,47;|2,51||1,26|1,91|4,34|2,75|2,87|3,26|||||13,03|;
- 28;S;31;XIVEERL;533;3327;4994;5;CF3;18/2/2005;95,86;479,3;|8,75||4,87|2,29|5,56|4,92|3,54|4,98|||||2,1|;
- 29;S;-1;XIVEERL;533;3327;4995;4;CF8M;18/2/2005;73,54;294,15;|6,58||5,82|2,12|4,06|6,74|5,31|3,81|124,52|89,63|||||2,46|;
- 30;S;18;XIVEERL;533;3328;4996;5;CF3;18/2/2005;227,54;1137,68;|14,14||13,16|3,44|15,32|17,92|11,03|||||16,21|;
- 31;S;29;XIVEERL;533;3328;4997;3;CF8;18/2/2005;90,23;360,93;|21,04|6,25||5,86|2,11|2,65|7,51|4,99|6,02|||||1,62|;
- 32;S;19;XIVEERL;533;3329;4998;10;MOLIBDÊNIO;16/2/2005;234,01;1872,06;|17,38||9,67|2,77|6,5|8|4,35|5,23|||||11|;
- 33;S;7;XIVEERL;533;3330;4999;2;WCC;22/2/2005;179,99;1079,95;|16,17||8,36|4,12|17,01|12,14|7,02|11,03|156,5||44,73|;
- 34;S;30;XIVEERL;533;3330;5000;7;GG25;22/2/2005;165,34;1157,41;|2,46||7,42|2,43|5,3|6,56|5,02|3,72|||||3,3|;
- 35;S;12;XIVEERL;533;3331;5001;3;CF8;16/2/2005;151,2;604,81;|8,46||5,56|2,02|7,84|3,82|4,68|1,18|||||2,29|;
- 36;S;25;XIVEERL;533;3332;5002;4;CF8M;15/2/2005;119,92;479,67;|8,04||7,62|3,24|10,99|6,06|7,66|8,03|21,13|||||3,36|;
- 37;S;10;XIVEERL;533;3332;5003;3;CF8;15/2/2005;156,21;624,82;|27,03|8,71|86,88|8,96|2,99|10,45|8,63|8,45|10,15||55,23||2,6|;
- 38;S;26;XIVEERL;533;3333;5004;8;VSGG25;20/2/2005;60,89;426,22;|7,48||3,91|1,93|4,78|4,8|2,64|5,02|||||1,95|;
- 39;S;23;XIVEERL;533;3333;5005;3;CF8;20/2/2005;57,79;231,17;|4,96||3,34|1,91|4,32|4,48|2,51|3,44|8,22|||||1,8|;
- 40;S;12;XIVEERL;533;3334;5006;3;CF8;18/2/2005;5,54;22,15;|1,57||1,31|0,71|1,28|1,37|1,21|1,22|||||1,05|;
- 41;S;22;XIVEERL;533;3335;5007;8;VSGG25;16/2/2005;19,24;134,68;|2,42||2,06|1,23|1,56|1,61,96|2,13|||||1,25|;
- 42;S;10;XIVEERL;533;3335;5008;3;CF8;16/2/2005;249,76;999,04;|15,95||9,19|2,57|10,36|7,96|6,13|43|||||16,22|;
- 43;S;20;XIVEERL;533;3336;5009;10;MOLIBDÊNIO;16/2/2005;37,21;297,68;|3,25||1,96|1,48|3,26|1,98|2,22|3,28||43,84|||11,15|;
- 44;S;13;XIVEERL;533;3336;5010;9;COBRE;16/2/2005;92,3;738,39;|16,29||7,88|2,71|6,78|4,8|7,78,91|||||1,89|;
- 45;S;12;XIVEERL;533;3337;5011;3;CF8;19/2/2005;42,31;169,23;|4,96||3,69|1,75|3,29|1,87|3,91|4,18|||||1,67|;
- 46;S;27;XIVEERL;533;3338;5012;6;CF3M;17/2/2005;237,45;1187,23;|30,37||16,26|5,59|19,32|19,8|20,19|17,7||14,58||4,85|;
- 47;S;21;XIVEERL;533;3339;5013;4;CF8M;20/2/2005;188,48;753,93;|16,39||14,76|3,96|12,85|19,15|10,27|9,03|||3,45|;
- 48;S;32;XIVEERL;533;3340;5014;6;CF3M;18/2/2005;93,24;466,18;|8,45||4,98|2,2|5,9|5,12|4,06|6,5|||14,92|;
- 49;S;18;XIVEERL;533;3341;5015;5;CF3;21/2/2005;248,07;1240,33;|22,82||14,14|5,3|6,3|11,97|10,51|15,52|||||4,81|;
- 50;S;8;XIVEERL;533;3342;5016;2;WCC;16/2/2005;81,81;490,86;|6,45||2,05|1,38|1,93|4,59|1,63|2,38|||6,61|;
- 51;S;17;XIVEERL;533;3343;5017;6;CF3M;19/2/2005;40,68;203,42;|3,77||2,49|1,24|2,56|2,42|2,12|2,11|||||1,01|;
- 52;S;11;XIVEERL;533;3344;5018;3;CF8;17/2/2005;97,62;390,49;|10|42,84|4,48|2,1|6,09|4,5|5,55|4,26|||||1,81|;
- 53;S;32;XIVEERL;533;3344;5019;6;CF3M;17/2/2005;28,89;144,45;|4,36||2,71|4,8|2,13|3,46|2,62|2,7|||||1,51|;
- 54;S;18;XIVEERL;533;3345;5020;5;CF3;24/2/2005;3,12;15,59;|1,21||1,21|1,05|1,23|1,19|1,12|1,2|||1,06|;
- 55;S;6;XIVEERL;533;3346;5021;2;WCC;25/2/2005;131,44;788,63;|13,44||9,82|3,72|12,02|7,76|6,65|7,84|||||25,77|;
- 56;S;27;XIVEERL;533;3347;5022;6;CF3M;16/2/2005;101,84;509,21;|33,89|6,83||2,66|2,25|6,92|3,45|3,88|5,64|||||20,63|;
- 57;S;-1;AQMCLTT;535;3348;5023;4;CF8M;21/2/2005;57,89;231,56;|4,98|1,89|2,44|1,51|1,31|2,06|2,45|2,44|||||1,08|;
- 58;S;22;HWSACMF;536;3349;5024;8;VSGG25;22/2/2005;232,89;1630,25;|16,79||18,13|4,64|14,26|12,29|12,25|20,89|40,23|63,37||28,81|;
- 59;S;9;HWSACMF;536;3349;5025;6;CF3M;22/2/2005;154,37;771,87;|7,79||4,21|2,36|9,09|8,78|4,71|5,51|||||1,97|;
- 60;S;26;AQMCLTT;535;3350;5026;8;VSGG25;18/2/2005;102,32;716,21;|7,41||6,8|2,13|5,07|10,24|5,36|4,78|||||8,96|;
- 61;S;18;AQMCLTT;535;3350;5027;5;CF3;18/2/2005;111,36;556,79;|8,69||8,71|3,06|9,09|8,67|6,73|6,27|||||2,53|;
- 62;S;-1;HWSACMF;536;3351;5028;4;CF8M;15/2/2005;38,53;154,11;|3,69||3,02|1,72|2,61|3,46|3,59|2,36|108,44|||||1,26|;
- 63;S;2;HWSACMF;536;3351;5029;1;WCB;15/2/2005;165,45;992,69;3,82|6,39|3,48|1,53|3,69|5,47|4,68|2,89|||||2,65|;
- 64;S;26;AQMCLTT;535;3352;5030;8;VSGG25;21/2/2005;25,47;178,31;|3,18||2,87|1,53|2,58|3,88|2,25|2,63|||||1,12|;
- 65;S;20;HWSACMF;536;3353;5031;10;MOLIBDÊNIO;23/2/2005;29,44;235,48;|4,13||2,92|1,52|2,82|2,81|2,91|2,61|59,43|||2,05|;
- 66;S;7;HWSACMF;536;3354;5032;2;WCC;16/2/2005;190,06;1140,37;|17,05||10,68|3,83|9,28|8,23|9,17|13,8|||||3,01|;
- 67;S;25;LWLRZDY;534;3355;5033;4;CF8M;22/2/2005;140,51;562,04;|9,55||8,66|2,76|9,77|1,17,18|8,1|||||2,07|;

68;S;13;LWLRZDY;534;3355;5034;9;COBRE;22/2/2005;144,59;1156,71;8,39||5,43|2,36|7,87|14,35|3,71|6,01||||2,55|;
69;S;30;OJKNOES;537;3356;5035;7;GG25;21/2/2005;123,99;867,92;|7,31||5,93|2,39|3,2|2,19|3|8,31||||8,47|;
70;S;10;OJKNOES;537;3356;5036;3;CF8;21/2/2005;156,34;625,38;|20,88||13,8|3,21|7,38|11,33|8,18|8,42||||2,64|;
71;S;32;HWSACMF;536;3357;5037;6;CF3M;21/2/2005;75,96;379,78;|6,73||4,81|1,9|3,58|3,87|4,06|4,84||||1,35|;
72;S;-1;HWSACMF;536;3357;5038;3;CF8;21/2/2005;90,26;361,05;|10,4||5,1|2,43|4,06|7,26|3,79|7,38||145,22||2,28|;
73;S;8;AQMCLTT;535;3358;5039;2;WCC;17/2/2005;52,69;316,16;|5,55||4,92|2,08|3,88|4,54|2,45|4,59||||1,54|;
74;S;27;HWSACMF;536;3359;5040;6;CF3M;14/2/2005;18,92;94,61;|2,81||1,81|1,31|1,96|2,29|2,29|2,73||||1,35|;
75;S;30;HWSACMF;536;3359;5041;7;GG25;14/2/2005;34,48;241,36;|5,62||3,17|1,74|3,39|4,48|3,18|3,45||||4,37|;
76;S;24;AQMCLTT;535;3360;5042;7;GG25;18/2/2005;2,77;19,36;|1,18||1,12|1,03|1,13|1,15|1,11,11||||1,04|;
77;S;7;OJKNOES;537;3361;5043;2;WCC;20/2/2005;182,8;1096,77;|1,66||6,95|1,69|4,53|4,7|3,15|6,83||||21,05|;
78;S;-1;HWSACMF;536;3362;5044;7;GG25;17/2/2005;201,72;1412,03;|18,14||15,45|4|11,99|9,39|6,22|18,32||138,65||1,3|;
79;S;10;AQMCLTT;535;3363;5045;3;CF8;24/2/2005;164,96;659,84;|17,97||8,92|3,03|6,57|4,43|6,91|7,52||||2,96|;
80;S;24;AQMCLTT;535;3363;5046;7;GG25;24/2/2005;218,33;1528,31;|2,75||6|2,72|8,27|7,53|3,07|6,57||||21,22|;
81;S;5;AQMCLTT;535;3363;5047;1;WCB;24/2/2005;61,72;370,31;|10,29||5,29|1,95|3,89|3,73|5,06|4,81||75,47||1,51|;
82;S;10;HWSACMF;536;3364;5048;3;CF8;23/2/2005;241,5;965,99;34,5|3,77||1,98|2,14|1,53|10,73|4,08|2,79||||2|;
83;S;18;HWSACMF;536;3364;5049;5;CF3;23/2/2005;247,72;1238,6;|25,06||10,37|3,89|12,95|9,54|11,54|11,51||||6,45|;
84;S;5;XIVEERL;533;3365;5050;1;WCB;18/2/2005;106,66;639,97;|1,33||4,09|1,81|7,19|2,8|2,38|3,34||||1,43|;
85;S;31;XIVEERL;533;3365;5051;5;CF3;18/2/2005;132,6;662,99;|9,12||7,28|1,69|5,76|6,93|2,82|4,17||||3,09|;
86;S;-1;XIVEERL;533;3366;5052;5;CF3;18/2/2005;199,39;996,96;|35,31||11,12|4,85|20,32|16,17|15,74|19,74||96,41||3,37|;
87;S;30;HWSACMF;536;3367;5053;7;GG25;19/2/2005;103,36;723,54;|10,8|4|1,11|9,42|3,12|7,97||12,3|6,61|11,32||||1,65|;
88;S;13;HWSACMF;536;3367;5054;9;COBRE;19/2/2005;73,1;584,81;|6,12||28,44|3,98|2,17|3,7|5,75|3,81|6,44||||1,82|;
89;S;29;LWLRZDY;534;3368;5055;3;CF8;25/2/2005;94,8;379,18;|6,78||6,92|2,15|4,39|6,81|3,56|5,2||||1,66|;
90;S;-1;OJKNOES;537;3369;5056;7;GG25;21/2/2005;41,37;289,58;|3,32||2,41|1,42|0,3|2,19|2,67|2,78|79,33||||1,45|;
91;S;2;HWSACMF;536;3370;5057;1;WCB;24/2/2005;16,75;100,52;|2,85||2,14|1,27|1,67|1,89|1,79|1,85||||1,07|;
92;S;24;AQMCLTT;535;3371;5058;7;GG25;20/2/2005;224,47;1571,32;|31,07||14,88|5,79|15,84|15,42|10,04|17,91|40,52||||1,12|;
93;S;31;AQMCLTT;535;3371;5059;5;CF3;20/2/2005;74,92;374,62;|5,42||4,99|1,75|6,3|2,37|2,87|5,79||||1,84|;
94;S;5;HWSACMF;536;3372;5060;1;WCB;17/2/2005;74,09;444,54;|12,56|34,16|5,5|2,21|4,4|16,32|4,74|6,46||||2|;
95;S;30;HWSACMF;536;3372;5061;7;GG25;17/2/2005;83,57;585,01;|3,08||2,37|1,68|3,6|2,6|3,2|2,73||||1,69|;
96;S;7;AQMCLTT;535;3374;5062;2;WCC;19/2/2005;155,32;931,93;|12,95||7,5|2,18|5,32|7,25|5,5|5,36||||7,52|;
97;S;5;LWLRZDY;534;3375;5063;1;WCB;14/2/2005;58,94;353,61;|7,31||4,07|2|5,44|3,72|4,36|5,15||||2,39|;
98;S;-1;HWSACMF;536;3376;5064;6;CF3M;18/2/2005;39,95;199,75;|2,99||1,61|1,39|1,12|2,48|1,45|1,73||||1,14|;
99;S;3;AQMCLTT;535;3377;5065;11;LIGA ESPECIAL;19/2/2005;218,9;2189,01;|24,67||9,73|4,82|16,24|19,88|8,03|16,79|158,27||||4,05|;
100;S;16;AQMCLTT;535;3377;5066;4;CF8M;19/2/2005;189,67;758,68;|3,69|3,75|1,74|6,48|6,63|3,64|1,86||||3,62|;
101;S;8;LWLRZDY;534;3378;5067;2;WCC;21/2/2005;75,45;452,67;|6,93||3,88|1,44|3,84|1,86|1,74|3,38||||1,62|;
102;S;-1;HWSACMF;536;3379;5068;6;CF3M;22/2/2005;15,12;75,58;7,34|3,01||2,44|1,35|2,36|2,71|7,5|2,17||||1,36|;
103;S;17;AQMCLTT;535;3380;5069;6;CF3M;23/2/2005;141,31;706,55;37,44|20,59||12,21|3,47|13,36|25,11|8,99|13|76,12||||3,69|;
104;S;19;AQMCLTT;535;3380;5070;10;MOLIBDÊNIO;23/2/2005;168,05;1344,41;|15,35|57,11|8,58|2,33|6,39|4,21|4,59|2,69||||20,84|;
105;S;-1;AQMCLTT;535;3380;5071;4;CF8M;23/2/2005;24,17;96,7;|2,19|4,43|1,58|1,05|1,33|1,35|1,51|1,03||||1,11|;
106;S;27;AQMCLTT;535;3381;5072;6;CF3M;23/2/2005;103,76;518,79;|4,73||2,68|1,74|5,58|1,87|3,47|2,48||||1,23|;
107;S;30;AQMCLTT;535;3381;5073;7;GG25;23/2/2005;116,34;814,4;|16,48||9,48|2,79|4,7|10,91|6,66|8,28||||3,12|;
108;S;10;HWSACMF;536;3382;5074;3;CF8;22/2/2005;19,2;76,81;|1,31||1,93|1,17|1,51|1,14|1,23|1,66||||1,21|;
109;S;25;HWSACMF;536;3382;5075;4;CF8M;22/2/2005;142;568;|15,79||7,8|3,21|11,35|8,42|7,61|11,08||||2,2|;
110;S;8;HWSACMF;536;3383;5076;2;WCC;24/2/2005;32,32;193,93;|3,94||3,29|1,53,13|3,8|2,25|3,6|5,2|73||||1,35|;
111;S;10;XIVEERL;533;3384;5077;3;CF8;18/2/2005;151,74;606,98;|11,25||8,27|2,84|6,54|12,28|3,43|10,94|142,92||15,38||;
112;S;1;XIVEERL;533;3384;5078;1;WCB;18/2/2005;229,1;1374,58;|17,88||12,85|4,87|16,79|16,46|16,13|16,02||||5,47|;
113;S;25;LWLRZDY;534;3385;5079;4;CF8M;22/2/2005;93,18;372,74;|17,67|7,83||7,2|2,36|7,38|4,65|5,76|6,59||||1,46|;
114;S;29;LWLRZDY;534;3385;5080;3;CF8;22/2/2005;36,16;144,66;|4,64||1,36|1,31|1,96|2,2|1,99|2,62||||1,25|;
115;S;28;LWLRZDY;534;3386;5081;7;GG25;19/2/2005;168,71;1180,94;|5,89||3,28|1,78|1,43|9,96|3,76|2,95||17,72||2,69|;
116;S;16;HWSACMF;536;3387;5082;4;CF8M;15/2/2005;15,8;63,18;|1,89||1,65|1,19|2,06|1,98|1,44|1,99||||1,13|;
117;S;20;HWSACMF;536;3387;5083;10;MOLIBDÊNIO;15/2/2005;9,89;79,09;|2,12||1,58|1,15|1,68|1,54|1,45|1,76||||1,14|;
118;S;24;LWLRZDY;534;3388;5084;7;GG25;17/2/2005;3,51;24,57;|1,84||1,48|1,29|1,06|1,27|1,13|1,13|1,17||||1,03|;
119;S;13;LWLRZDY;534;3388;5085;9;COBRE;17/2/2005;136,3;1090,39;|12,03|52,99|8,54|3,06|8,66|9,71|18,03|6,58||||1,94|;
120;S;29;HWSACMF;536;3389;5086;3;CF8;19/2/2005;89,44;357,77;|13,94||6,44|2,83|8|11,24|8,56|5,38||||3,11|;
121;S;27;LWLRZDY;534;3390;5087;6;CF3M;22/2/2005;137,56;687,78;|5,72||3,57|1,55|3,37|1,31|1,24|3,01||||1,67|;
122;S;2;XIVEERL;533;3391;5088;1;WCB;17/2/2005;142,84;857,04;|16,92||8,77|3,52|12,77|8,61|5,48|6,8||||16,67|;
123;S;2;XIVEERL;533;3391;5089;1;WCB;17/2/2005;215,87;1295,19;|24,55||16,74|5,9|20,97|12,71|16,64|16,24||||3|;
124;S;28;OJKNOES;537;3392;5090;7;GG25;18/2/2005;193,12;1351,85;|28,11||13,54|4,71|14,94|12,39|10,58|15,43||||2,93|;
125;S;26;GTJKOVF;546;3393;5091;8;VSGG25;26/2/2005;206,46;1445,22;|14,03|6,16|2,73|7,34|4,88|5,84|9,63|28,24||2,71|;
126;S;1;GTJKOVF;546;3393;5092;1;WCB;26/2/2005;10,76;64,57;|1,57|3,28|1,38|1,1|1,25|1,44|1,39|1,1||||1,12|;
127;S;25;OJKNOES;537;3394;5093;4;CF8M;26/2/2005;60,31;241,26;|8,8||4,89|2|4,45|7,05|4,81|5,62||||1,78|;
128;S;16;OJKNOES;537;3394;5094;4;CF8M;26/2/2005;222,62;890,47;|22,31||15,5,11|14,13|14,66|12,24|17,25||||5,47|;
129;S;29;PORLHED;538;3395;5095;3;CF8;17/2/2005;84,18;336,73;|7,06||2,81|1,85|5,54|5,19|2,74|4,61||||1,12|;
130;S;26;BMRDZYP;541;3396;5096;8;VSGG25;23/2/2005;172,76;1209,29;|6,63|6,84|2,31|2,11|6,07|4,39|9,67||||2,08|;
131;S;1;LWLRZDY;534;3397;5097;1;WCB;23/2/2005;145,48;872,9;|11,86||8,24|4,16|10,84|12,83|5,93|7,6||||3,51|;
132;S;20;LWLRZDY;534;3398;5098;10;MOLIBDÊNIO;22/2/2005;204,51;1636,06;|20,52||13,42|4,34|12,04|7,4|12,84|11,36||||7,25|;
133;S;25;LWLRZDY;534;3398;5099;4;CF8M;22/2/2005;62,67;250,69;|5,08||2,72|1,46|3,64|1,86|3,58|3,68||||1,3|;
134;S;29;LWLRZDY;534;3399;5100;3;CF8;22/2/2005;40,96;163,85;|3,28||2,97|1,71|4,56|3,99|2,79|5,05||||2|;
135;S;31;LWLRZDY;534;3399;5101;5;CF3;22/2/2005;196,8;983,99;|22,74||11,63|3,03|14,27|1,49|4,34|10,31||||3,78|;
136;S;20;VSPPVEM;545;3400;5102;10;MOLIBDÊNIO;25/2/2005;200,6;1604,8;|19,01||10,23|3,52|13,92|16,46|12,04|9,46||||2,21|;
137;S;6;VSPPVEM;545;3400;5103;2;WCC;25/2/2005;229,61;1377,64;|9,93||6,73|0,73,3|8,19|6,56|3,44||||2,25|;
138;S;2;SRTDZRD;544;3401;5104;1;WCB;20/2/2005;192,68;1156,08;|19,17||9,11|3,33|8,6|11,18|9,14|9,05||||18,58||;
139;S;-1;SRTDZRD;544;3401;5105;5;CF3;20/2/2005;52,1;260,52;|1,71||3,98|1,68|2,57|5,14,02|3,93|65,15||||1,37|;
140;S;4;BMRDZYP;541;3402;5106;9;COBRE;17/2/2005;193,61;1548,91;|27,91||7,59|3,12|9,74|3,74|8,84|9,72||113,35||1,83|;
141;S;4;BMRDZYP;541;3403;5107;9;COBRE;16/2/2005;220,61;1764,87;|1,03||5,26|1,5|2,71|1,95|3,48|1,07|105,09||10,1||;
142;S;8;BMRDZYP;541;3404;5108;2;WCC;19/2/2005;83,17;499,01;|7,55||6,74|2,32|7,33|7,68|5,06|8,92||||2,59|;
143;S;2;OJKNOES;537;3405;5109;1;WCB;18/2/2005;114,52;687,12;|13,77||11,4|3,73|7,16|10,27|9,25|9,36|52,62||||1,08|;
144;S;25;OJKNOES;537;3405;5110;4;CF8M;18/2/2005;157,19;628,77;|12,4||5,73|2,33|4,12|4,46,14,5,15||||2,13|;
145;S;1;XIVEERL;533;3406;5111;1;WCB;23/2/2005;239,06;1434,39;|21,05||10,81|4,77|19,85|8,68|10,24|15,62||||5,48|;
146;S;31;XIVEERL;533;3406;5112;5;CF3;23/2/2005;170,17;850,87;56,51|17,44|86,45|10,36|3,73|11,01|19,08|11,62|8,17||||1,91|;
147;S;22;VHKPYHW;540;3407;5113;8;VSGG25;17/2/2005;224,48;1571,37;97,83|33,16||12,29|5,29|19,24|20,17|14,01|17,59||||3,8|;
148;S;14;YALQVXS;542;3408;5114;12;LIGA ANTI OXIDAVEL;22/2/2005;130,99;1309,86;|15,33||6,67|3,15|9,67|5,71|8,02|10,88||||22,85||;
149;S;20;AQMCLTT;535;3409;5115;10;MOLIBDÊNIO;18/2/2005;75,36;602,86;|12,98||4,81|2,14|6,46|8,61|3,87|6,78|68,78||||2,18|;
150;S;3;VSPPVEM;545;3410;5116;11;LIGA ESPECIAL;26/2/2005;225,17;2251,72;|22,99||12,95|4,91|8,25|13,88|13,54||||5,24|;

151;S;13;VTOHVSA;539;3411;5117;9;COBRE;22/2/2005;156,82;1254,53;|7,03|3,14|1,69|2,46|5,97|2,32|2,3|1,26|;
 152;S;-1;VTOHVSA;539;3411;5118;5;CF3;22/2/2005;109,8;549,02;|1,13|2,75|1,73|2,56|7,97|2,09|2,81|36,33|1,62|;
 153;S;13;VTOHVSA;539;3411;5119;9;COBRE;22/2/2005;57,66;461,29;|5,71|3,24|1,65|3,51|3,47|3,82|2,8|1,95|;
 154;S;23;VHKPYHW;540;3412;5120;3;CF8;25/2/2005;136,27;545,06;|3,56|4,02|1,39|3,37|2,25|3,78|5,36|1,32|;
 155;S;29;VHKPYHW;540;3413;5121;3;CF8;17/2/2005;56,94;227,75;|5,43|3,44|1,66|2,43|2,51|3,65|3,3|1,48|;
 156;S;26;QFLUYRO;547;3414;5122;8;VSGG25;22/2/2005;85,95;601,65;|2,61|2,91|1,35|1,78|1,57|2,45|2,13|1,8|11,8|11|;
 157;S;10;QFLUYRO;547;3414;5123;3;CF8;22/2/2005;166,93;667,73;|13,5|4,79|2,12|4,09|2,56|6,67|1,47|11,1,83|;
 158;S;-1;PORLHED;538;3415;5124;4;CF8M;19/2/2005;24,9;99,6;|2,56|1,74|1,28|1,64|2,31|1,84|1,54|90,9|1,12|;
 159;S;2;PORLHED;538;3415;5125;1;WCB;19/2/2005;219,82;1318,91;|26,33|8,88|3,2|11,88|7,68|9,44|6,74|11,2|6,9|;
 160;S;28;VTOHVSA;539;3416;5126;7;GG25;21/2/2005;66,29;464,03;|3,78|3,19|1,18|1,81|4,52|1,87|1,95|13,86|1,39|;
 161;S;30;GTJKOVF;546;3417;5127;7;GG25;21/2/2005;114,53;801,74;|5,82|2,06|1,39|2,01|7,78|2,51|11,02|11,7,58|11|;
 162;S;6;OJKNOES;537;3418;5128;2;WCC;22/2/2005;247,52;1485,11;|32,4|11,8,34|4,18|16,4|14,85|9,86|11,8|11,4,25|;
 163;S;8;OJKNOES;537;3418;5129;2;WCC;22/2/2005;75,81;454,86;|5,84|3,15|1,33|4,37|5,14|4,29|4,35|11,1,57|;
 164;S;4;SRTDZRD;544;3419;5130;9;COBRE;19/2/2005;193,9;1551,19;|27,17|5,23|9,12|3,2|5,57|6,15|7,96|8,54|11,3,9|;
 165;S;5;VTOHVSA;539;3420;5131;1;WCB;20/2/2005;63,83;382,97;|20,97|4,03|4,11|1,79|4,91|2,51|3,54|3,59|45,04|16,75|1,72|;
 166;S;1;VTOHVSA;539;3420;5132;1;WCB;20/2/2005;223,35;1340,08;|13,5|8,13|7,8|2,57|11,93|5,39|6,92|7,09|5,1|11,4,33|;
 167;S;26;PORLHED;538;3421;5133;8;VSGG25;16/2/2005;156,34;1094,36;|3,99|4,18|1,59|4,07|5,04|2,8|5,8|11,1,45|;
 168;S;31;OJKNOES;537;3422;5134;5;CF3;21/2/2005;57,25;286,23;|19,9|7,87|4,84|1,97|5,01|7,37|3,69|4,37|11,2,11|;
 169;S;5;BMRDZYP;541;3424;5135;6;CF3M;21/2/2005;241,86;1209,3;|6,44|10,66|4,33|13,97|22,61|9,68|8,51|11,4,03|;
 170;S;4;HWSACMF;536;3423;5136;9;COBRE;24/2/2005;217;1736;|8,08|8,15|2,87|13,82|11,87|1,88|8,11|11,9,98|;
 171;S;9;HWSACMF;536;3423;5137;6;CF3M;24/2/2005;40,88;204,41;|4,37|11,8|3,01|1,41|3,48|2,35|2,21|2,21|11,1,01|;
 172;S;5;BMRDZYP;541;3424;5138;1;WCB;26/2/2005;71,7;430,22;|7,73|6,03|2,45;73|11,23|5,67|6,62|11,87|;
 173;S;5;YALQVXS;542;3425;5139;1;WCB;19/2/2005;50,11;300,65;|2,45|2,26|1,45|3,23|3,64|3,37|2,64|11,35|;
 174;S;22;YALQVXS;542;3425;5140;8;VSGG25;19/2/2005;122,97;860,8;|10,57|6,78|3,07|9,07|11,25|6,2|8,55|11,4,43|;
 175;S;15;GTJKOVF;546;3426;5141;12;LIGA ANTI OXIDÁVEL;25/2/2005;57,31;573,06;|4,38|4,81|8,3|3,58|3,12|4,21|3,36|11,6|;
 176;S;5;GTJKOVF;546;3426;5142;1;WCB;25/2/2005;97,36;584,14;|1,06|1,56|1,51|3,73|3,11|1,53|2,77|11,24|;
 177;S;20;HWSACMF;536;3427;5143;10;MOLIBDÊNIO;17/2/2005;218,88;1751,05;|24,67|13,25|4,7|21,02|24,38|10,66|11,46|11,33|;
 178;S;14;OJKNOES;537;3428;5144;12;LIGA ANTI OXIDÁVEL;22/2/2005;250,06;2500,62;|37,15|23,52|6,21|2,47|20,44|14,53|23,89|11,2,67|;
 179;S;24;PORLHED;538;3429;5145;7;GG25;22/2/2005;142,73;999,08;29,21|11,81|5,19|2|3,9|3,49|4,35|6,67|11,3,34|;
 180;S;14;YALQVXS;542;3430;5146;12;LIGA ANTI OXIDÁVEL;21/2/2005;222,63;2226,33;|12,93|18,94|4,74|17,56|18,15|4,82|13,58|11,5,8|;
 181;S;13;XICKWGV;550;3431;5147;9;COBRE;18/2/2005;173,16;1385,24;|9,13|6,49|2,61|5,73|5,55|3,56|10,51|11,10,45|;
 182;S;19;YALQVXS;542;3431;5148;10;MOLIBDÊNIO;18/2/2005;220,56;1764,5;|25,22|21,1|5,72|5,72|18,48|18,61|19,03|11,3,74|;
 183;S;20;BMRDZYP;541;3432;5149;10;MOLIBDÊNIO;24/2/2005;70,19;561,48;|2,07|3,34|1,29|2,51|2,28|2,07|2,22|11,0,23|;
 184;S;6;VTOHVSA;539;3433;5150;2;WCC;20/2/2005;235,68;1414,06;|72,04|27,95|12,03|5,36|15,72|8,25|11,29|18,25|11,4,75|;
 185;S;14;XIVEERL;533;3434;5151;12;LIGA ANTI OXIDÁVEL;19/2/2005;224,05;2240,53;|14,97|7,04|3,61|8,06|15,86|11,95|12,64|11,9|;
 186;S;28;VSPPEM;545;3435;5152;7;GG25;2/3/2005;211,21;1478,48;|20,01|10,79|3,53|12,21|8,42|14,05|14,49|11,3,99|;
 187;S;28;XICKWGV;550;3436;5153;7;GG25;17/2/2005;194,62;1362,35;|16,42|12,82|3,11|2,39|13,52|9,86|6,89|11,9,23|;
 188;S;29;XICKWGV;550;3436;5154;3;CF8;17/2/2005;83,4;333,58;|5,46|5,04|2,4,38|2,43|3,34|3,29|11,84|;
 189;S;29;HNBHSH;543;3437;5155;3;CF8;26/2/2005;65,06;260,23;|11,02|5,2,4,73|6,25|3,81|5,08|11,1,01|;
 190;S;2;FKHVOEY;548;3438;5156;1;WCB;22/2/2005;129,82;778,93;|8,75|4,63|2,18|5,52|1,78|3,14,68|11,2,92|;
 191;S;7;OJKNOES;537;3439;5157;2;WCC;23/2/2005;190,29;1141,76;|21,4|9,54|3,51|13,38|7,33|11,07|17,06|51,9|11,3,01|;
 192;S;5;VTOHVSA;539;3440;5158;1;WCB;21/2/2005;112,58;675,46;|6,82|3,33|1,89|6,1|9,66|4,03|4,34|11,1,25|;
 193;S;29;VTOHVSA;539;3440;5159;3;CF8;21/2/2005;54,51;218,04;|2,04|2,91|2,16|1,23|2,32|1,71|2,45|2,23|2,91|;
 194;S;10;XIVEERL;533;3441;5160;3;CF8;23/2/2005;191,51;766,04;|11,58|51,01|8,65|2,7|7,05|8,97|10,24|11,32|22,16|11,4,05|;
 195;S;5;HWSACMF;536;3442;5161;1;WCB;25/2/2005;82,8;496,81;36,32|5,46|5,48|2,33|5,78|9,94,95|5,7|11,1,69|;
 196;S;14;HWSACMF;536;3442;5162;12;LIGA ANTI OXIDÁVEL;25/2/2005;216,99;2169,92;|25,54|12,25|4,61|13,27|5,93|12,36|11,18|11,3,79|;
 197;S;17;VHKPYHW;540;3443;5163;6;CF3M;19/2/2005;15,24;76,22;|1,23|1,41,1|1,86|1,25|1,17|1,55|11,1,07|;
 198;S;19;DKFNNOF;557;3444;5164;10;MOLIBDÊNIO;17/2/2005;225,18;1801,44;|1,05|11,61|3,35|9,83|5,77|5,67|4,3|11,1,76|;
 199;S;24;DKFNNOF;557;3444;5165;7;GG25;17/2/2005;247,19;1730,34;|33,55|16,46|5,5|20,219,12|15,83|14,87|11,4,38|;
 200;S;13;OJKNOES;537;3445;5166;9;COBRE;21/2/2005;50,58;404,64;|4,78|3,53|1,81|3,15|3,52|3,37|4,74|4,1,61|1,61|;
 *****CorridasProgramadas*****
 1;1;850;1;WCB;
 2;4;1200;1;WCB;
 3;1;850;11;LIGA ESPECIAL;
 4;1;850;9;COBRE;
 5;4;1200;1;WCB;
 6;2;850;2;WCC;
 7;3;1500;2;WCC;
 8;2;850;2;WCC;
 9;6;200;6;CF3M;
 10;3;1500;3;CF8;
 11;7;100;3;CF8;
 12;6;200;3;CF8;
 13;4;1200;9;COBRE;
 14;4;1200;12;LIGA ANTI OXIDÁVEL;
 15;7;100;12;LIGA ANTI OXIDÁVEL;
 16;2;850;4;CF8M;
 17;6;200;6;CF3M;
 18;2;850;5;CF3;
 19;1;850;10;MOLIBDÊNIO;
 20;4;1200;10;MOLIBDÊNIO;
 21;6;200;4;CF8M;
 22;2;850;8;VSGG25;
 23;6;200;3;CF8;
 24;2;850;7;GG25;
 25;2;850;4;CF8M;
 26;5;1000;8;VSGG25;
 27;2;850;6;CF3M;
 28;2;850;7;GG25;
 29;2;850;3;CF8;
 30;5;1000;7;GG25;
 31;5;1000;5;CF3;
 32;6;200;6;CF3M;