

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

**PRODUÇÃO ENXUTA E TEORIA DAS RESTRIÇÕES:
PROPOSTA DE UM MÉTODO PARA IMPLANTAÇÃO CONJUNTA NA INDÚSTRIA DE
BENS DE CAPITAL SOB ENCOMENDA**

RODRIGO GOULART VOTTO

**SÃO CARLOS
2012**

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

**PRODUÇÃO ENXUTA E TEORIA DAS RESTRIÇÕES:
PROPOSTA DE UM MÉTODO PARA IMPLANTAÇÃO CONJUNTA NA INDÚSTRIA DE
BENS DE CAPITAL SOB ENCOMENDA**

RODRIGO GOULART VOTTO

**Dissertação de Mestrado 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 Mestre em Engenharia
de Produção.**

ORIENTADOR: Prof. Dr. Flavio Cesar Faria Fernandes

**SÃO CARLOS
2012**

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

V971pe

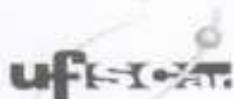
Votto, Rodrigo Goulart.

Produção enxuta e teoria das restrições : proposta de um método para implantação conjunta na indústria de bens de capital sob encomenda / Rodrigo Goulart Votto. -- São Carlos : UFSCar, 2012.
271 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2012.

1. Estratégia de produção. 2. Produção enxuta. 3. Teoria das restrições (Administração). 4. Indústrias de bens de capital. 5. Produção sob encomenda. 6. Sistemas de coordenação de ordens. I. Título.

CDD: 658.5 (20^a)

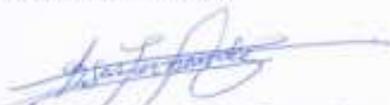


PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
Rua Washington Luís, Km. 235 - CEP. 13505-905 - São Carlos - SP - Brasil
Fone/Fax: (016) 3301-4209 / 3301-6237 / 3301-6254 (atm) - 3333
E-mail : ppgep@dep.ufscar.br

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno(a): Rodrigo Goulart Votto

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DEFENDIDA E APROVADA EM 15/02/2012 PELA
COMISSÃO JULGADORA:


Prof. Dr. Flávio César Faria Fernandes
Orientador(a) PPGE/UFSCar


Prof. Dr. Josadak Astorino Marçola
FMC/UNIP


Prof. Dr. Walther Azzolini Júnior
EESC/USP


Prof. Dr. Mário Otávio Batalha
Coordenador do PPGE/UFSCAR

Aos meus amados pais, Romildo e Catarina, fontes de inspiração e orgulho, ao meu avô, Arceu Goulart, exemplo de determinação e humildade, aos meus queridos irmãos Romildo Jr e Rejane, meus heróis e eternos amigos, e à Clara, minha companheira e amor da minha vida.

Começar é de todos, continuar é dos fortes, concluir é dos heróis
(Autor Desconhecido)

Veni, vidi, vici
(Júlio César, general e cônsul romano em 47 a.C.)

AGRADECIMENTOS

A conclusão desta dissertação de mestrado representa uma grande vitória pessoal e a concretização de um sonho que teve início há 7 anos. Este trabalho não seria possível sem o apoio e contribuição de um grande número de pessoas, algumas as quais eu não posso deixar de agradecer.

À toda minha família, em especial ao meu avô, Arceu Goulart, aos meus pais, Romildo e Catarina, e meus queridos irmãos Junior e Rejane, pelo apoio incondicional em todas as etapas da minha vida e, principalmente, durante esta longa jornada.

À Clara, pelo amor, carinho, paciência, apoio e, acima de tudo, compreensão nesta reta final de conclusão do trabalho.

Ao Professor Dr. Flavio Cesar Faria Fernandes pela orientação, dedicação, ensinamentos e confiança ao longo destes anos. Foi uma honra e um privilégio contar com a orientação de tão renomado professor. Sua contribuição e comprometimento com este trabalho trouxeram a base teórica, a serenidade e os pés no chão necessários a qualquer projeto de pesquisa aplicada.

Aos professores e membros da banca examinadora, Professor Dr. Walther Azzolini Jr. e Professor Dr. Josadak Astorino Marçola, pelas correções, críticas, sugestões e valiosas contribuições apresentadas durante o exame de qualificação deste mestrado.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos.

À empresa Voith Paper, que fez parte desta pesquisa e a todos os colegas de trabalho que me apoiaram e contribuíram para realização e implementação dos estudos aqui apresentados, em especial ao incentivo e suporte de André Dolata e Claudio Massera, que mais do que chefes ao longo destes anos foram verdadeiros tutores práticos dos assuntos aqui tratados.

Aos amigos da USP e UFSCAR pelo companheirismo e troca de experiências que motivaram e apoiaram este trabalho e, em especial, à República Aruêra que me acolheu muitas vezes durante o período deste mestrado.

Para finalizar eu agradeço a Deus, por guiar meus caminhos, me dar saúde e paz de espírito para superar os desafios e abrir novas portas sempre que uma se fecha.

RESUMO

VOTTO, R. G. Produção Enxuta e Teoria Das Restrições: Proposta de um Método para Implantação Conjunta na Indústria De Bens De Capital Sob Encomenda. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, 2012.

Ao longo do tempo, a tarefa de desenvolver e gerir sistemas de produção tem se tornado progressivamente mais complexa e, atualmente, para enfrentar as mudanças de demandas dos clientes e a competição global, os gestores têm a difícil tarefa de combinar a eficiência da produção em massa com a customização da era produção artesanal pré-industrial. Neste contexto, a Indústria de Bens de Capital Sob Encomenda, expostas a condições de mercado muita adversas, como a alta instabilidade cíclica de demanda por seus produtos, que depende exclusivamente dos momentos de expansão da economia causando, portanto, ciclos mais longos de flutuação da demanda com longos períodos de estagnação seguidos por períodos de alta demanda, têm buscado estratégias modernas de gestão da produção, já consolidadas em segmentos mais dinâmicos da economia, como a produção enxuta e a teoria das restrições, para melhorar o fluxo de produção e minimizar o impacto inerente desses sistemas de produção com alta variedade e baixos volumes de produção, altos níveis de estoque em processo, produção em *layouts* funcionais, cargas de trabalho muito variadas, excesso de movimentação de materiais, etc

O presente trabalho estuda o setor de bens de capital sob encomenda, em especial os bens de capital de grande porte, também conhecidas como sistemas de produção de grandes montagens, com objetivo de propor um método de implantação conjunta dos princípios da produção enxuta e da teoria das restrições para simplificar o fluxo de materiais e informações, propor a utilização dos Sistemas de Coordenação de Ordens adequados e reduzir o *lead time* de produção nesse ambiente.

Palavras-Chave: Bens de Capital. *Engineering to Order*. Produção Enxuta. Teoria das Restrições. Sistemas de Coordenação de Ordens.

ABSTRACT

Over the years, the task of developing and managing production systems has become increasingly complex and, currently, to face the changing customer demands and global competition, managers have the difficult task of combining the efficiency of mass production with customization of pre-industrial craft production era. In this context, the Engineering to Order Capital Goods Industry, exposed to a very adverse market conditions such as high cyclical instability of demand for its products, which depends exclusively on the economy expansion moments, causing, therefore, longer cycles of fluctuation demand with long periods of stagnation followed by periods of high demand, have sought for modern production management strategies, already consolidated in more dynamic segments of the economy, such as lean production and the theory of constraints, to improve production flow and minimize the impact inherent in these production systems with high variety and low volume production, high levels of work-in-process, functional production layouts, high varied workloads, excess of materials handling, etc.

This paper studies the Engineering to Order Capital Goods Industry, especially large capital goods, also known as Large Assemblies production systems, aiming to propose a method of joint implementation of lean principles and theory of constraints to simplify the material and information flow, propose the use of suitable SCO (ordering systems) and reduce production lead time in this environment.

Keywords: *Capital Goods. Engineering to Order. Lean Production, Theory of Constraints. Ordering Systems.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Estrutura da Pesquisa.....	8
Figura 2.1 - Tipos de Processo em Operações de Manufatura	15
Figura 2.2 - Arranjo Físico por Processo da Fabricação por Encomenda - <i>Job Shop</i>	18
Figura 2.3 - Modelo de Referência para Sistemas ETO	25
Figura 2.4 - Processo de Negócio de Bens de Capital sob Encomenda.....	26
Figura 2.5 - Gráfico da Variação da Taxa de Câmbio 1994 - 2011	36
Figura 2.6 - Gráfico da Balança Comercial da Indústria de Bens de Capital	36
Figura 2.7 - Gráfico Produção Interna de Bens de Capital.....	37
Figura 3.1 - Tipos de Movimentos de Trabalho.....	48
Figura 3.2 - O Enfoque Tradicional nas Tarefas e o Enfoque da Produção Enxuta	48
Figura 3.3 - Os Três Ms do TPS.....	52
Figura 3.4 - A Casa do TPS	53
Figura 3.5 - 4 Ps - Os 14 Princípios do Modelo Toyota	61
Figura 3.6 - Relação entre Processos e Tempo de Processamento.....	65
Figura 3.7 - Diferenças entre Célula e Mini-Fábrica.....	67
Figura 3.8 - Representação Esquemática do Processo de Fabricação Automobilístico.....	70
Figura 3.9 - Gestão das Interdependências	76
Figura 3.10 - Nivelamento do <i>Mix</i> de Produção.....	81
Figura 3.11 - <i>Heyjunka Box</i> : Quadro de Nivelamento de Carga.....	82
Figura 3.12 - Processo de Melhoria Continua Seguido de Padronização.....	83
Figura 3.13 - Sistema Puxado com Supermercado.....	89
Figura 3.14 - Kanban CNE e Kanban H.....	91
Figura 3.15 - O Sistema CONWIP.....	92
Figura 3.16 - HCA: Arquitetura Hierárquica de Controle.....	94
Figura 3.17 - Etapas do Mapeamento do Fluxo de Valor.....	96
Figura 3.18 - Matriz de Produtos e Etapas de Processo.....	97
Figura 3.19 - Mapeamento do Estado Atual.....	98
Figura 3.20 - Mapeamento do Estado Futuro.....	100

Figura 4.1 - Representação Esquemática da TOC.....	110
Figura 4.2 - As Eras da Evolução da TOC	111
Figura 4.3 - Impactos Diretos dos Indicadores Operacionais nos Indicadores de Resultado Financeiro.....	113
Figura 4.4 - Impacto Diretos e Indiretos dos Indicadores Operacionais nos Indicadores de Resultado Financeiro.....	115
Figura 4.5 - Processo de Melhoria Contínua da TOC.....	116
Figura 4.6 - Relacionamento entre Recursos Gargalos e Não-Gargalos.....	119
Figura 4.7 - Analogia com uma Tropa	123
Figura 4.8 - Três Formas de Manter a Tropa Unida.....	126
Figura 4.9 - DBR para Manter a Tropa Unida	127
Figura 4.10 - A Lógica do DBR.....	129
Figura 4.11 - Perfis do PULMÃO.....	136
Figura 4.12 - Perfil do PULMÃO.....	136
Figura 4.13 - Perfis do Pulmão - Correção.....	137
Figura 4.14 - Furo no Pulmão e Localização	138
Figura 4.15 - Lotes de Transferência e Lotes de Processamento	141
Figura 4.16 - Fluxograma de Funcionamento do Sistema OPT	144
Figura 4.17 - As Ruínas.....	145
Figura 4.18 - Nivelamento de Ruínas com duas Unidades de CCR.....	146
Figura 4.19 - Nivelamento de Ruínas sem Tarefas no Passado.....	146
Figura 4.20 - O Conceito de Hastes.....	150
Figura 5.1 - Método de Aplicação Conjunta da Produção Enxuta e da TOC no Ambiente de Produção de Bens de Capital de Grande Porte sob Encomenda.....	156
Figura 5.2 - Diferentes Níveis de Produção em um Processo de Produção de Grandes Equipamentos.....	159
Figura 5.3 - Exemplo de PIPELINE de Montagem e Entrega de uma <i>Process Lane</i>	171
Figura 5.4 - Exemplo de Divisão de uma Planta em <i>Process Lanes</i> com Definição do <i>Takt Time</i> para Unidades de Montagem e Produtos Intermediários.....	172
Figura 5.5 - Liberação de Trabalho em Incremento $Pitch = Takt Time = TC CCR$	173
Figura 5.6 - Liberação de Trabalho em Incremento <i>Pitch</i> do CCR.....	175

Figura 5.7 - Ocupação dos Recursos Antes do Nivelamento: CCR Flutuante	175
Figura 5.8 - Ocupação dos Recursos Depois do Nivelamento: CCR Fixo (linha menos repetitiva)	176
Figura 5.9 - Ocupação dos Recursos Depois do Nivelamento: CCR Fixo (linha repetitiva).....	176
Figura 6.1 - Unidades Produtivas da Empresa	184
Figura 6.2 - Foto Aérea da Empresa	185
Figura 6.3 - Processos de Negócio da Empresa.....	189
Figura 6.4 - Foto de uma Máquina de Papel.....	190
Figura 6.5 - Máquina de Papel e suas Seções.....	190
Figura 6.6 - Foto e Esquema da Caixas de Entrada.....	191
Figura 6.7 - Seção de Formação.....	193
Figura 6.8 - Seção das Prensas	194
Figura 6.9 - Seção de Secagem Dividida em Grupo.....	196
Figura 6.10 - Grupo de Secagem.....	196
Figura 6.11 - Seção de Acabamento e Final.....	197
Figura 6.12 - PWBS de uma Máquina de Papel - Unidades de Montagem.....	201
Figura 6.13 - Seção de Formação e suas Unidades de Montagem.....	202
Figura 6.14 - PWBS de uma Máquina de Papel - Produtos Intermediários.....	203
Figura 6.15 - Etapas Realizadas para cada Família de Produtos (A).....	205
Figura 6.16 - <i>Layout</i> Original da Empresa - <i>Job Shop</i>	206
Figura 6.17 - <i>Layout Atual: Process Lanes</i> Dedicadas.....	207
Figura 6.18 - Cilindro Secador: Produtos Intermediários.....	209
Figura 6.19 - Cilindro Secador: Componentes.....	209
Figura 6.20 - Mapeamento do Fluxo de Valor do Cilindro Secador - Estado Original.....	211
Figura 6.21 - Estoque em Processo de Cilindros Secadores: Estado Original.....	212
Figura 6.22 - Localização da Linha de Cilindros Secadores.....	213
Figura 6.23 - <i>Layout Atual</i> - Linha de Secadores.....	213
Figura 6.24 - Foto da Linha de Secadores.....	214
Figura 6.25 - Nivelamento do CCR: Cilindro Secadores (Detalhe).....	216
Figura 6.26 - Nivelamento do CCR: Cilindro Secadores (Macro).....	216
Figura 6.27 - Balanceamento da <i>Process Lane</i> de Cilindro Secadores.....	219

Figura 6.28 - Mapeamento do Estado Futuro: Cilindros Secadores	221
Figura 6.29 - Módulo Principal de uma Seção de Formação - Mesa Plana.....	222
Figura 6.30 - Mapeamento do Fluxo de Valor: Produtos Prismáticos.....	223
Figura 6.31 - Simultaneidade entre Projetos.....	224
Figura 6.32 - Família de Produtos Intermediários da <i>Process Lane</i>	225
Figura 6.33 - Job Shops Dedicados.....	226
Figura 6.34 - Redução da Simultaneidade entre Projetos.....	228
Figura 6.35 - Nivelamento da Montagem: Produtos Prismáticos da Parte Úmida.....	229
Figura 6.36 - Período de Produção do CCR: Produtos Prismáticos da Parte Úmida.....	230
Figura 6.37 - Redução da Simultaneidade entre Projetos e do Tamanho dos Lotes.....	235
Figura 6.38 - Mapeamento do Fluxo de Valor - Projeto “Y”	238
Figura 6.39 - Caixa de Entrada.....	239
Figura 6.40 - Mapeamento do Fluxo de Valor: Mapa do Estado Original Caixa de Entrada.....	241
Figura 6.41 - Principais Produtos Intermediários para Caixa de Entrada.....	242
Figura 6.42 - <i>Process Lane</i> Virtual - Recursos Dedicados nos <i>Job Shops</i> Originais	243
Figura 6.43 - Local Definido para Instalação da Mini-Fábrica de Caixa de Entrada.....	244
Figura 6.44 - Projeto da Mini-fábrica de Caixa de Entrada.....	244
Figura 6.45 - Foto da Mini-Fábrica de Caixa de Entrada.....	245
Figura 6.46 - Nivelamento da Montagem: Caixa de Entrada.....	248
Figura 6.47 - Mapeamento do Fluxo de Valor da Caixa de Entrada.....	250
Figura 7.1 - Princípios da Produção Enxuta e Método de Aplicação da Produção Enxuta e da TOC no Ambiente de Produção de Bens de Capital de Grande Porte sob Encomenda.....	259

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Grau de Diversificação e Distinção - Sistemas de Produção Discretos.....	17
Tabela 2.2 - Estrutura do Valor Agregado nos Segmentos da Indústria de Bens de Capital.....	35
Tabela 6.1 - Matriz de Produtos e Família de Produtos.....	204
Tabela 6.2 - Subdivisão das Famílias de Produtos.....	224
Tabela 6.3 - Classificação dos Produtos Intermediários em Unidade Padrão.....	230
Tabela 6.4 - Volume de Trabalho Constante no CCR - <i>Pitch</i>	231
Tabela 6.5 - Balanceamento do CCR de acordo com a Demanda da <i>Process Lane</i>	236
Tabela 6.6 - Balanceamento dos Recursos de Usinagem	236
Tabela 6.7 - Subdivisão das Famílias de Produtos.....	241

LISTA DE ABREVIACÕES

3Ms	<i>Muda, Mura, Muri</i> (desperdício, sobrecarga e irregularidade)
4Ps	<i>Philosophy, Process, People, Problem solving</i> (filosofia, processos, pessoas e resolução de problemas)
APICS	<i>American Production and Inventory Control Society</i>
AV	Atividade que Agrega Valor
BEFIEEX	Benefícios Fiscais a Programas Especiais de Exportação
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CACEX	Carteira de Comércio Exterior do Banco do Brasil
CCR	<i>Capacity Constraint Resource</i> (recurso com restrição de capacidade)
CCPM	<i>Critical Chain Project Management</i> (gestão de projetos pela corrente crítica)
CNE	Controlado pelo Nível de Estoque
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CONWIP	<i>Constant Work in Process</i> (estoque constante em processo)
CPM	<i>Critical Path Method</i> (método do caminho crítico)
CRT	<i>Current Reality Tree</i> (árvore da realidade atual)
DBR	<i>Drum-Buffer-Rope</i> (tambor-pulmão-corda)
DP	<i>Demand Planning</i> (planejamento da demanda)
DSR	<i>Duo-Stabilizer Roll</i> (rolo duo-estabilizador)
EC	<i>Evaporating Clouds</i> (núvem de evaporação)
EPC	<i>Engineering, Procurement and Construction</i> (engenharia, fornecimento e construção)
ETO	<i>Engineering to Order</i> (projeto sob encomenda)
FIFO	<i>First-in-First-Out</i> (primeiro e entrar-primeiro a sair)
FINAME	Financiadora de Máquinas e Equipamentos
FRT	<i>Future Reality Tree</i> (árvore da realidade futura)
GP	Gerenciamento do Pulmão
H	Híbrido
HCA	<i>Hierarchical Control Architecture</i> (arquitetura hierárquica de controle)
HH	Horas-Homem
HM	Horas-Máquina

HVLV	<i>Hight Variety, Low Volumes</i> (alta variedade, baixo volume)
I	<i>Inventory</i> (inventário)
IMVP	<i>International Motor Vehicle Program</i>
IMA	<i>Institute of Management Accounting</i>
JIT	<i>Just in Time</i> (pilar da produção enxuta que significa “produzir no momento certo”)
LL	Lucro Líquido
LOOR	<i>Load-Oriented Order-Release</i> (liberação de ordens orientado pela carga)
MPS	<i>Master Production Scheduling</i> (plano mestre de produção)
MIG	<i>Metal Inert Gas</i> (gás inerte de metal)
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MTO	<i>Make-to-Order</i> (produzido sob encomenda)
MRP	<i>Material Requirement Planning</i> (planejamento da necessidade de materiais)
MRPII	<i>Manufacturing Resources Planning</i> (planejamento dos recursos de manufatura)
MFV	Mapeamento do Fluxo de Valor
NAV	Atividade que Não Agrega Valor
OE	<i>Operating Expenses</i> (despesas operacionais)
OLF	<i>On-Line Feedback</i>
OPT	<i>Optimized Production Timetables</i> (tabela de produção otimizada, denominação inicial de OPT)
OPT	<i>Optimized Production Technology</i> (tecnologia de produção otimizada, denominação atual de OPT)
OTC	<i>Order to Cash</i> (do pedido ao faturamento)
OTO	<i>Opportunity to Order</i> (da oferta ao pedido)
PBC	<i>Period Batch Control</i> (controle do período padrão ou controle de lote periódico)
PCP	Planejamento e Controle de Produção
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PDCA	<i>Plan-Do-Check-Act</i> (planeja, fazer, verificar e agir corretivamente)
PIB	Produto Interno Bruto
PLP	<i>Process Line Package</i> (pacote da linha de processos)
PND	Plano Nacional de Desenvolvimento

POLCA	<i>Paired Cell Overlapping Loops of Cards with Authorization</i> (ciclos sobrepostos de passagem de cartões com autorização entre pares de células)
PRT	<i>Pre Requisite Tree</i> (árvore de pré-requisitos)
PWBS	<i>Product Work Breakdown Structure</i> (estrutura de projeto orientada a produto)
RCCP	<i>Rough Cut Capacity Planning</i>
ROI	<i>Return Over Investment</i> (retorno sobre investimento)
RTS	<i>Real Time Simulation</i> (simulação em tempo real)
SB	<i>Sequencing and Batching</i> (lote e sequenciamento)
SCO	Sistemas de Coordenação de Ordens
SFC	<i>Shop Floor Control</i> (controle do chão de fábrica)
SMED	<i>Single Minute Exchange of Dies and Tools</i> (troca rápida de ferramenta)
STG	<i>Scheduling Technologies Group</i>
TC	Tempo de Ciclo
TOC	<i>Theory of Constraints</i> (teoria das restrições)
TPS	<i>Toyota Production System</i>
TR	Tempo de Troca
T	<i>Throughput</i> (Ganho)
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i> (gás inerte de tungstênio)
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i> (manutenção produtiva total)
TT	<i>Transition Tree</i> (árvore de transição)
UP	Unidade Padrão
WIP	<i>Work in Process</i> (estoque em processo)
WLC	Workload Control (controle da carga de trabalho)
WQS	<i>Work in Process and Quota Setting</i> (determinação do estoque em processo e da taxa de produção)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Apresentação do Trabalho e Contextualização.....	1
1.2 Objetivos e Questões Principais da Pesquisa.....	3
1.3 Justificativa da Pesquisa.....	3
1.4 Método de Pesquisa.....	4
1.5 Estrutura do Trabalho.....	7
2 INDÚSTRIA DE BENS DE CAPITAL SOB ENCOMENDA - “A FÁBRICA DE FABRICAS”.....	9
2.1 Introdução e Contextualização.....	9
2.2 Aspectos Econômicos.....	11
2.3 Aspectos Comerciais e de Desenvolvimento de Produto.....	11
2.4 Aspectos da Customização.....	12
2.5 Aspectos da Gestão da Produção.....	15
2.5.1 Classificação dos Sistemas de Produção.....	15
2.5.1.1 Volume X Variedade.....	15
2.5.1.2 Nível de Repetição e Grau de Variedade.....	16
2.5.2 Arranjo Físico e Centros de Trabalho.....	17
2.5.3 Mão de Obra.....	18
2.5.4 Capacidade e Carga de Trabalho.....	19
2.6 Aspectos do Planejamento e Controle de Produção: Um Modelo Integrado de Planejamento e Controle de Produção para Empresas ETO.....	20
2.6.1 Configuração do Produto.....	21
2.6.2. Planejamento Mestre da Produção.....	21
2.6.3. Planejamento de Engenharia de Produto.....	22
2.6.4 Planejamento das Necessidades dos Projetos.....	23
2.6.5 Programação do Chão-de-Fábrica.....	23
2.6.6 Cronograma de Montagem Final.....	24
2.6.7. Planejamento e Execução Integrados.....	24

2.7 Processos de Negócio de Bens de Capital Sob Encomenda: Resumo.....	25
2.8 O Setor de Bens de Capital no Brasil.....	27
2.8.1 Histórico e Características até a Década de 80.....	27
2.8.2 A Abertura de Mercado da Década de 90.....	32
2.8.3 Evolução dos Indicadores de Bens de Capital (1994-2010).....	34
2.8.4 Desafios para o Setor de Bens de Capital no Brasil.....	37
3 A PRODUÇÃO ENXUTA E O SISTEMA TOYOTA DE PRODUÇÃO.....	40
3.1 As Origens do Sistema Toyota de Produção.....	41
3.2 Objetivo: Redução dos Desperdícios.....	46
3.2.1 Categorias de Desperdícios.....	49
3.2.1.1 Desperdício por Superprodução.....	49
3.2.1.2 Desperdício por Espera.....	49
3.2.1.3 Desperdício por Transporte.....	50
3.2.1.4 Desperdício no Próprio Processamento.....	50
3.2.1.5 Desperdício por Estoque.....	51
3.2.1.6 Desperdício por Movimentação.....	51
3.2.1.7 Desperdício por Fabricação de Produtos Defeituosos.....	51
3.2.2 <i>Muda, Mura, Muri</i>	52
3.3 A Casa do Sistema Toyota de Produção.....	53
3.4 Princípios da Produção Enxuta - <i>Lean Thinking</i>	56
3.4.1 Valor.....	56
3.4.2 Fluxo de Valor.....	57
3.4.3 Fluxo Contínuo.....	58
3.4.4 Produção Puxada.....	58
3.4.5 Perfeição.....	59
3.5 Modelo Toyota.....	59
3.6. Princípios e Elementos de Controle da Produção Enxuta.....	62
3.6.1 Fluxo Contínuo.....	62
3.6.1.1 Balanceamento.....	64
3.6.1.2 Lote de Transferência.....	64

3.6.1.3 <i>Layout</i>	65
3.6.1.4 Lote de Processamento.....	67
3.6.2 <i>Takt Time</i> - A Gestão Baseada no <i>Takt Time</i>	68
3.6.3 Produção Puxada.....	73
3.6.4 Nivelamento da Produção - <i>Heijunka</i>	78
3.7 Melhoria Contínua - <i>Kaizen</i>	83
3.8 Sistemas de Coordenação de Ordens (SCO) para a Produção Enxuta.....	86
3.8.1 Sistema <i>Kanban</i>	86
3.8.2 O Sistema CONWIP.....	91
3.9 Mapeamento do Fluxo de Valor.....	95
3.10 Aplicabilidade no Setor de Bens de Capital sob Encomenda.....	100
4 A TEORIA DAS RESTRIÇÕES E A MANUFATURA SINCRONIZADA.....	105
4.1 Introdução e Histórico.....	105
4.2 A Meta da Organização e os Indicadores de Desempenho.....	112
4.3 O Processo de Melhoria Contínua e os Princípios da TOC e da Manufatura Sincronizada.....	115
4.4 As Restrições do Sistema.....	117
4.4.1 Restrição de Capacidade.....	118
4.4.2 Outras Restrições.....	121
4.5 A Manufatura Sincronizada.....	122
4.5.1 Analogia com uma Tropa.....	122
4.5.1.1 Soldado Mais Lento a Frente.....	123
4.5.1.2 Tambor e Sargento.....	124
4.5.1.3 Cordas Amarradas nos Soldados.....	124
4.5.1.4 DBR: O Tambor-Pulmão-Corda.....	126
4.5.2 Tambor-Pulmão-Corda: Sistema de Coordenação de Ordens DBR.....	128
4.5.3 O DBR e o Processo de Melhoria Contínua.....	131
4.5.3.1 A Batida do Tambor.....	131
4.5.3.2 Pulmão de Tempo - <i>Time Buffer</i>	132
4.5.3.3 A Corda.....	133

4.5.4 Gerenciamento do Pulmão e o Processo de Melhoria Contínua.....	134
4.5.5 Manufatura Sincronizada e o Processo de Melhoria Contínua.....	139
4.6. Outras Implicações da TOC.....	140
4.6.1. Tamanho dos Lotes.....	140
4.6.2. Capacidade Protetora.....	142
4.7. Sistemas Informatizados de Controle de Produção: OPT e DBR.....	143
4.7.1 O Sistema OPT.....	143
4.7.2. O DBR no Âmbito de um Sistema Informatizado	144
4.8 A TOC e Produção Enxuta: Possibilidade de Aplicação Conjunta.....	151
5 PROPOSTA DO MÉTODO.....	155
5.1 Introdução.....	155
5.2 Explicitar o Valor	157
5.3 Definir a Estrutura de Projeto Orientada a Produto - PWBS.....	158
5.4 Definir as Famílias de Produtos.....	159
5.5 Mapear Fluxo de Valor e Analisar o Nível de Repetição.....	160
5.5.1 Definir o Mapeamento do Fluxo de Valor.....	160
5.5.2 Analisar o Nível de Repetição do Fluxo de Valor.....	161
5.6 Criar Fluxo Contínuo Onde Possível.....	162
5.6.1 Criar as <i>Process Lanes</i>	162
5.6.2 Definir os Recursos Dedicados.....	163
5.6.3 Identificar O <i>Pacemaker</i> - Processo Cadenciador.....	165
5.6.4 Reduzir o Tamanho dos Lotes.....	166
5.6.5 Balancear a <i>Process Lane</i>	167
5.7 Nivelar a Produção.....	169
5.7.1 <i>Takt Time</i> - Definir o Ritmo.....	169
5.7.1.1 <i>Takt Time</i> : Exemplo.....	171
5.7.2 <i>Pitch</i> - Incremento de Trabalho Constante.....	172
5.8 Implementar Sistemas de Coordenação de Ordens Híbridos.....	177
5.8.1 CONWIP H.....	177
5.8.2 DBR.....	178

5.9 Definir e Implantar um Processo de Melhoria Contínua para Reduzir a Variabilidade do Sistema.....	179
6 PESQUISA-AÇÃO - APLICAÇÃO DO MÉTODO.....	184
6.1 Introdução e Apresentação da Empresa.....	184
6.1.1 Processos de Negócio da Empresa - ETO.....	185
6.2 A Máquina de Papel.....	189
6.2.1 Formação.....	190
6.2.2 Prensas.....	193
6.2.3 Secagem.....	194
6.2.4 Acabamento e Parte Final.....	196
6.3 Condições de Mercado e Fatores Competitivos: Valor.....	197
6.4 A PWBS: Estrutura de Projeto Orientada a Produto.....	200
6.5 Famílias de Produtos.....	203
6.6 <i>Layout</i> Inicial e Transformação do Chão de Fábrica.....	204
6.7 Cilindros Secadores - Família D.....	207
6.7.1 Mapear Fluxo de Valor e Analisar o Nível de Repetição.....	210
6.7.2 Criação da <i>Process Lanes</i> com Recursos Dedicados.....	212
6.7.3 Identificar o <i>Pacemaker</i> - Processo Cadenciador.....	214
6.7.4 Nivelar a Produção - <i>Takt Time</i>	214
6.7.5 Reduzir o Tamanho dos Lotes.....	217
6.7.6 Balancear a <i>Process Lane</i>	218
6.7.7 Sistemas de Coordenação de Ordens Híbridos.....	220
6.8 Produtos Prismáticos da Parte Úmida - Família B.....	221
6.8.1 Mapear Fluxo de Valor e Analisar o Nível de Repetição.....	222
6.8.2 Criação da <i>Process Lanes</i> com Recursos Dedicados.....	226
6.8.3 Identificar o <i>Pacemaker</i> - Processo Cadenciador.....	227
6.8.4 Nivelar a Produção - <i>Takt Time</i> e <i>Pitch</i>	227
6.8.5 Reduzir o Tamanho dos Lotes.....	232
6.8.6 Balancear a <i>Process Lane</i>	235
6.8.7 Sistemas de Coordenação de Ordens Híbridos.....	237

6.9 Caixa de Entrada - Família A.....	239
6.9.1 Mapear Fluxo de Valor e Analisar o Nível de Repetição.....	240
6.9.2 Criação da <i>Process Lanes</i> com Recursos Dedicados.....	242
6.9.3 Identificar o <i>Pacemaker</i> - Processo Cadenciador.....	245
6.9.4 Nivelar a Produção - <i>Takt Time</i>	245
6.9.5 Reduzir o Tamanho dos Lotes.....	248
6.9.6 Balancear a <i>Process Lane</i>	248
6.9.7 Sistema de Coordenação de Ordens Híbrido.....	249
6.10 Melhoria Contínua.....	250
7 CONCLUSÕES E DISCUSSÃO FINAL.....	256
REFERÊNCIAS.....	264
REFERÊNCIAS CITADAS POR MEIO DE <i>APUD</i>	271

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do Trabalho e Contextualização

Ao longo do tempo, a tarefa de desenvolver e gerir sistemas de produção tem se tornado progressivamente mais complexa. Grandes alterações nos produtos, processos, tecnologias de gestão, conceito e culturas estão resultando em maiores desafios e demandas diferenciadas (FERNANDES e GODINHO FILHO, 2010). Sipper e Bulfin (1997) defendem que atualmente estamos na era do “sistema de produção orientado ao mercado”, onde os clientes, sendo a força direcionadora dos esforços produtivos, ditam o que querem e as empresas industriais devem seguir e atender tais demandas, em contraste com seu antecessor, o “sistema de produção orientado à produção”, onde o cliente tinha pouca influência nas decisões. Atualmente, para enfrentar as mudanças de demandas dos clientes e a competição global, os gestores têm a difícil tarefa de combinar a eficiência da produção em massa com a customização da era produção artesanal pré-industrial.

Condizente com esse novo contexto industrial, na Indústria de Bens de Capital Sob Encomenda os clientes são a principal força direcionadora dos esforços produtivos e os produtos devem ser produzidos segundo determinadas especificações técnicas exigidas pelos clientes e há uma grande variedade de produtos customizados produzidos em pequenos volumes. Nesse ambiente é fundamental a constante inovação dos produtos oferecidos, investimentos em tecnologia e, principalmente, a adoção de estratégias atuais de gestão da produção coerentes e orientadas ao mercado.

As empresas desse setor estão expostas a condições de mercado muito adversas, como a alta instabilidade cíclica de demanda por seus produtos, que depende exclusivamente dos momentos de expansão da economia causando, portanto, ciclos mais longos de flutuação da demanda com longos períodos de estagnação seguidos por períodos de alta demanda. Mesmo nos períodos de prosperidade, essas empresas enfrentam dificuldades no que diz respeito a exigências de seus consumidores. Como seus clientes dependem da entrega do produto (instalações, equipamentos, etc) para iniciar o ciclo de retorno sobre investimento, curtos *lead times* de

fornecimento e pontualidade de entrega são fatores críticos de sucesso para as empresas desse segmento.

Para enfrentar tal ambiente essas empresas têm buscado estratégias modernas de gestão da produção, já consolidadas em segmentos mais dinâmicos da economia, para melhorar o fluxo de produção e minimizar o impacto inerente desses sistemas de produção com alta variedade e baixos volumes de produção, altos níveis de estoque em processo, produção em *layouts* funcionais, cargas de trabalho muito variadas, excesso de movimentação de materiais, etc.

Neste contexto, duas das estratégias mais importantes na busca da melhoria contínua, com a otimização dos fluxos de materiais e informações, sincronização das atividades de manufatura, simplificação das atividades de planejamento e controle de produção e redução dos estoques, são a **Produção Enxuta** (*Lean Production*) e a **Teoria das Restrições** (TOC - *Theory of Constraints*). Suas implantações em diversos segmentos têm trazido resultados no que diz respeito à redução de custos e despesas operacionais, redução de estoques, tempo de resposta, melhora na pontualidade de entrega e aumento da rentabilidade do negócio.

Nesse sentido, esta dissertação busca estudar o setor de bens de capital sob encomenda, em especial os bens de capital de grande porte, também conhecidas como sistemas de produção de grandes montagens, como é o caso da indústria naval, a de máquinas e equipamentos para mineração, óleo e gás, papel e celulose, hidrelétrica, etc, com objetivo de propor um método de implantação dos princípios da produção enxuta e da teoria das restrições neste ambiente.

A relevância de estudar a indústria de bens de capital de grande porte sob encomenda, no âmbito da Engenharia de Produção, se dá pela importância estratégica do setor para a economia do país, pelos desafios impostos ao setor em termos de atingir um melhor desempenho operacional, o que impõe a adoção de estratégias e práticas atuais na gestão da produção, carência de estudos na área de gestão da produção em comparação com outros setores da economia e, somado a isto, ao grande número de engenheiros que esse setor contrata em relação aos demais setores da indústria de transformação.

1.2 Objetivos e Questões Principais da Pesquisa

Esta dissertação tem como objetivo específico desenvolver um método para a implementação dos princípios da produção enxuta suportados pela teoria das restrições no ambiente de produção de bens de capital sob encomenda, com objetivo de reduzir os *lead times* de produção, melhorar a pontualidade de entrega ao cliente, redução dos custos de produção e simplificação do processo de planejamento e controle de produção.

Entretanto, é de entendimento deste autor, que nem todos os princípios e técnicas da produção enxuta e da teoria das restrições são igualmente aplicáveis em tal ambiente. Portanto, para se alcançar o objetivo específico, a dissertação precisa responder às seguintes questões de pesquisa:

- a) Os princípios e técnicas da produção enxuta são aderentes ao ambiente de produção de bens de capital sob encomenda?
- b) Quais são as características do ambiente de produção de bens de capital sob encomenda que dificultam a aplicação dos princípios e técnicas da produção enxuta?
- c) A teoria das restrições pode ser adotada para suportar os princípios da produção enxuta nesse ambiente?
- d) Que Sistemas de Coordenação de Ordens (SCO) podem ser utilizados para sustentar os princípios da produção enxuta e da teoria das restrições nesse ambiente?

Para responder a estas questões, além da revisão bibliográfica sobre a produção enxuta, a teoria das restrições e o ambiente de produção de bens de capital sob encomenda, o método proposto será implantado, por meio de pesquisa-ação, em uma empresa de bens de capital fabricante de máquinas e equipamentos sob encomenda para a indústria de papel e celulose, localizada no estado de São Paulo.

1.3 Justificativa da Pesquisa

A produção enxuta tem sido amplamente estudada e sua aplicação já foi testada em uma variedade de ambientes de produção. No entanto, embora já existam estudos publicados sobre a implementação da produção enxuta em segmentos específicos dentro do setor de bens de capital

sob encomenda como, por exemplo, a indústria naval (STORCH e LIM, 1999 e LIKER e LAMB, 2001), indústria aeronáutica (DUDLEY, 2005, BAMBER e DALE, 2000 e CRUTE *et al*, 2003) e máquinas e ferramentas (JINA *et al*, 1997, ESWARAMOORTHY *et al*, 2010) ainda faltam estudos sobre as dificuldades da implementação nesse ambiente, das particularizações necessárias para esta implementação, bem como a definição de um método que possa ser utilizado por empresas de outros segmentos do setor.

Faltam ainda pesquisas dos impactos da interação entre a produção enxuta e a teoria das restrições, seus pontos de concordância e pontos de conflitos, para a solução de problemas complexos.

Também, o setor de bens de capital, apesar de sua importância estratégica para a economia do país, tem sido foco de poucas pesquisas no âmbito da gestão da produção, em geral, e do planejamento e controle da produção (PCP), mais especificamente.

Portanto, a pesquisa desta dissertação se justifica pela:

- a) Importância do objeto de pesquisa, a indústria de bens de capital sob encomenda, para a economia do país como um todo e para a engenharia de produção de forma mais específica.
- b) Carência de estudos na área de gestão da produção e PCP com foco na Indústria de Bens de Capital sob Encomenda
- c) Carência de estudos sobre a aplicabilidade da produção enxuta, largamente utilizada em diversos ambientes produtivos, em ambientes de produção *Engineering to Order* (ETO), como é o caso a Indústria de Bens de Capital sob Encomenda.
- d) Carência de estudos que mostrem a integração da produção enxuta e da teoria das restrições para resolver problemas complexos de gestão da produção na Indústria de Bens de Capital sob Encomenda.

1.4 Método de Pesquisa

Entre as várias formas de se classificar uma pesquisa, dois critérios básicos são propostos por Vergara (2000), quanto aos fins e quanto aos meios. Quanto aos fins, uma pesquisa pode ser

classificada como exploratória, descritiva, explicativa, metodológica, aplicada e/ou intervencionista.

Esta pesquisa pode ser classificada, quanto aos fins, como metodológica e intervencionista. A pesquisa metodológica, segundo Vergara (2000), apresenta instrumentos ou propostas para manipulação da realidade e está associada a caminhos, formas, maneiras e procedimentos para atingir determinado fim. Já, segundo a autora, a pesquisa intervencionista, tem como objetivo interpor-se, interferir na realidade estudada, para modificá-la. Não se satisfaz, portanto em apenas explicar. Essa pesquisa distingue-se da pesquisa aplicada, que também é motivada pela necessidade de resolver problemas concretos com finalidade prática, pelo compromisso de não somente propor resoluções de problemas, mas também de resolvê-los efetiva e participativamente.

Portanto, esta pesquisa é metodológica, pois procura desenvolver um modelo e um procedimento para atingir o objetivo de melhorar a gestão da produção na indústria de bens de capital de grande porte sob encomenda. E é intervencionista uma vez que a proposta do modelo aqui descrito é aplicada pelo autor a um caso prático de uma empresa industrial desse setor com o objetivo bastante específico de resolver um problema de gestão da produção de forma efetiva e participativamente.

A classificação quanto aos meios pode ser pesquisa de campo, pesquisa de laboratório, documental, bibliográfica, experimental, *ex post facto*, participante, pesquisa-ação ou estudo de caso.

Segundo Thiollent (1997), em pesquisa organizacional, embora outras técnicas como aplicação de questionários, entrevistas e estudos de casos sejam os métodos ou técnicas de maior divulgação, desde a década de 40, a pesquisa-ação é apresentada como um método apropriado para conhecer e intervir nas organizações. A pesquisa-ação consiste essencialmente em acoplar pesquisa e ação em um processo no qual os atores implicados participam, junto com os pesquisadores, para chegarem interativamente e elucidar a realidade em que estão inseridos, identificando problemas coletivos, buscando e experimentando soluções em situação real. Simultaneamente, há produção e uso do conhecimento.

Para o autor, embora não exista uma forma totalmente padronizada para o processo de pesquisa-ação, pois dependendo do quadro organizacional em que se aplica tanto os procedimentos e ordenações das etapas quanto os graus de implicações dos atores possam variar,

ela tem um duplo e explícito propósito de desenvolver, enriquecer ou testar quadros de referências teóricos ou modelos de referência relevantes ao fenômeno em estudo enquanto auxilia a reflexão, formulação ou implementação da ação.

Segundo Coughlan e Coughlan (2002), a pesquisa-ação focaliza a pesquisa na ação, ao invés de uma pesquisa sobre a ação. Além disso, este tipo de pesquisa deve ser participativa, pois os membros do sistema que está sendo estudado participam ativamente no processo cíclico que envolve a pesquisa-ação, e simultânea à ação, já que o objetivo é tornar essa ação mais eficaz enquanto, simultaneamente, se constrói o conhecimento científico. Para os autores, a pesquisa-ação se caracteriza por uma sequência de eventos e uma abordagem para se resolver problemas. Uma sequência de eventos, pois compreende ciclos interativos de coleta de dados, sendo realimentados aos já realizados, analisando as informações, planejando, executando e avaliando ações, conduzindo a uma coleta adicional de dados, e assim por diante. Como uma abordagem para se resolver problemas, é uma aplicação do método científico de busca e experimentação de problemas práticos que requerem soluções da ação, envolvendo a colaboração e a cooperação dos pesquisadores da ação e dos membros do sistema organizacional. Os resultados desejados da aproximação da pesquisa-ação não são soluções exatas aos problemas imediatos, mas aprendizagem importante dos resultados pretendidos e não pretendidos, e uma contribuição ao conhecimento e à teoria científica.

Neste contexto o presente trabalho se classifica, quanto aos meios, principalmente como uma pesquisa-ação à medida que, além da participação do pesquisador no meio organizacional estudado e da intervenção da pesquisa na realidade desta organização, realiza conjuntamente a produção e o uso de conhecimento, desenvolvendo um modelo teórico e auxiliando a formulação e a implementação da ação.

Além de pesquisa-ação, a pesquisa também é classificada quando aos meios como bibliográfica. A pesquisa bibliográfica, segundo Vergara (2000), é o estudo sistematizado desenvolvido com base em material publicado em livros, revistas, jornais, redes eletrônicas, isto é, material acessível ao público em geral. Portanto esta pesquisa é bibliográfica pois em sua primeira parte é realizada uma extensa revisão bibliográfica da literatura sobre o ambiente de produção de bens de capital sob encomenda, produção enxuta e a teoria das restrições.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em sete capítulos conforme detalhado na figura 1.1. Neste primeiro capítulo são realizadas a apresentação e contextualização do trabalho, bem como apresentados os objetivos, questões e justificativa da pesquisa e a metodologia que será utilizada.

No capítulo dois é feita uma contextualização do objeto de pesquisa, o setor de bens de capital de grande porte sob encomenda e sobre o setor de bens de capital no Brasil. A seguir é realizado um breve resumo dos principais aspectos econômicos, comerciais, no desenvolvimento de produtos, de gestão e do planejamento e controle da produção relacionados a esse ambiente. Também são analisados alguns impactos da customização inerente a tais sistemas de produção.

No capítulo três é realizada a revisão bibliográfica sobre a produção enxuta, iniciando com suas origens, o Sistema Toyota de Produção, e focando em seus principais objetivos, princípios e práticas. Ao final do capítulo é realizada uma revisão bibliográfica sobre a aplicabilidade de tais princípios e práticas no ambiente de alta variedade de produtos e baixo volume de produção como é o caso do setor de bens de capital sob encomenda.

No capítulo 4 é realizada a revisão bibliográfica sobre a teoria das restrições, desde suas origens com o OPT, passando por suas principais aplicações e focando sua aplicação na solução de problemas relacionados à programação do chão-de-fábrica. Ao final do capítulo é realizada uma discussão sobre como a teoria das restrições pode suportar a implementação da produção enxuta em tal ambiente.

No capítulo 5 é proposto um método de aplicação dos princípios da produção enxuta no ambiente de produção sob encomenda de grandes equipamentos, suportado pelo processo decisório e o sistema de coordenação de ordens da teoria das restrições.

No capítulo 6 é realizada a pesquisa-ação, com a implementação do método proposto em uma empresa de bens de capital, fornecedora de máquinas e equipamentos sob encomenda para a indústria de papel e celulose localizada em São Paulo.

No capítulo 7 são apresentadas as considerações finais e conclusões desta dissertação bem como as delimitações da pesquisa e as propostas de pesquisa futura. A bibliografia utilizada será citada a seguir. A figura 1.1 descreve as etapas do método e como se relacionam entre si.

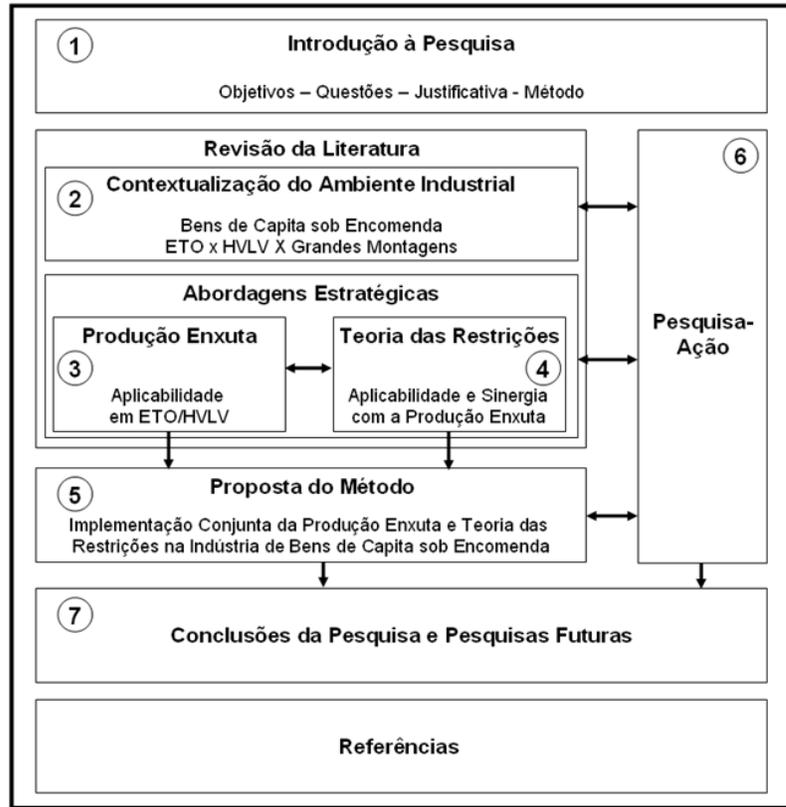


Figura 1.1 - Estrutura da Pesquisa

2 INDÚSTRIA DE BENS DE CAPITAL SOB ENCOMENDA - “A FÁBRICA DE FABRICAS”

o que caracteriza um país desenvolvido é a indústria de bens de capital forte, pelo papel que esta desempenha enquanto difusora do progresso técnico (BNDES, 1988, *apud* MEGLIORINI, 2003).

2.1 Introdução e Contextualização

A indústria de bens de capital, “a fábrica de fábricas”, é vital para o desenvolvimento econômico e tecnológico de um país e sua relevância dentro da economia é representada pelo papel que exerce na estrutura industrial ao gerar e difundir o progresso tecnológico para os demais segmentos industriais. Ao introduzir novos produtos e realizar modificações nos já existentes, proporciona-se um aumento nos níveis de produção e produtividade em todos os setores da economia. Ao incorporar inovações (oriundas de várias fontes como clientes, institutos de pesquisa, consultorias ou desenvolvidas pela própria fabricante) ao leque de bens de capital ofertado a todos os setores da economia, cria-se um efeito multiplicador de melhoria de produtos, aumento de produção e produtividade, beneficiando a economia como um todo (MEGLIORINI, 2003). O bem de capital é uma categoria importante para a análise econômica na medida em que representa a principal dimensão do investimento produtivo. A incorporação de bem de capital ao processo produtivo pode implicar na ampliação da capacidade da economia crescer. Conseqüentemente, o bem de capital tanto amplia a capacidade produtiva como facilita o aumento de produtividade da economia (VERMULM, 2003).

O setor de bens de capital compreende uma variedade muito grande de produtos, dos mais diversos portes e usos, desde equipamentos pesados (turbinas, laminadores, alto fornos, caldeiras, etc), produtos eletro-eletrônicos (geradores, transformadores, transmissores, etc), meios de transporte (caminhões, vagões, aviões e navios) até máquinas ferramenta, máquinas agrícolas e máquinas e equipamentos de grande porte e para uso variado. Na verdade, o que define um bem como de capital é a sua utilização em contínuos processos produtivos de outros bens e serviços, sem que sofra transformação, como ocorre com os insumos. Sendo assim, um bem pode ser ou não caracterizado como de capital de acordo com o seu uso (BNDES, 2005).

Dada a diversidade de produtos considerados bens de capital, os mesmos costumam ser classificados conforme sua produção, sendo o critério mais utilizado aquele que distingue os

produtos resultantes da fabricação seriada, produzidos em larga escala, de forma padronizada, como máquinas agrícolas, tratores, ônibus e caminhões, e os fabricados sob encomenda, produzidos segundo características técnicas associadas a determinado processo produtivo (BNDES, 2005).

Os bens de capital seriados possuem a características de maior homogeneidade, pois resultam de projetos para atender a formulações padronizadas de desenho, em que a característica implícita é a quantidade ponderável de unidades produzidas de um mesmo bem em um determinado período de tempo.

Já os bens de capital de grande porte sob encomenda, são produzidos segundo determinadas especificações técnicas exigidas pelos clientes e, portanto, devem atender a formulações de desempenho específicas para um determinado processo ou instalação industrial, constituindo uma grande variedade de produtos em pequenos volumes. Dentro desse segmento, encontram-se empresas do setor energético (turbinas e geradores), indústria naval (navios), equipamentos para a indústria petrolífera, máquinas e equipamentos pesados (indústria de papel e celulose, açúcar e álcool, mineração, etc)

De forma geral, na produção sob encomenda na indústria de bens de capital, o projeto do produto que será entregue é realizado a partir do pedido do cliente, para só então ser produzido. Esse processo, segundo Fernandes e Godinho Filho (2010), refere-se à estratégia de atendimento à demanda *Engineering to Order* (ETO), onde o projeto do produto é feito após o recebimento do pedido. Os sistemas de produção que operam com essa estratégia caracterizam-se pelo baixo volume de produção, alta variedade de produtos customizados, ou HVLV (*High Variety, Low Volumes*), além de possuir baixos custos de estoques de matéria prima e altos tempos de resposta ao cliente.

O objeto de pesquisa desta dissertação são empresas do setor de bens de capital de grande porte sob encomenda, também conhecidas como sistemas de produção de grandes montagens, como é o caso da indústria naval, de máquinas e equipamentos para mineração, óleo e gás, papel e celulose, hidrelétrica, etc. O produto final dessas empresas podem ser Escavadeiras Especiais, Navios e Plataformas de Petróleo, Plantas de Papel e Celulose, Usinas Hidrelétricas, Pontes Rolantes e Pórticos especiais, etc.

As próximas seções deste capítulo trazem um resumo dos aspectos mais importantes relacionados à produção de bens de capital sob encomenda com maior foco no objeto deste

estudo apresentado acima, bem como o cenário em que as empresas desse setor estão inseridas. Serão analisados alguns dos principais impactos desse ambiente na gestão da produção e planejamento e controle de produção.

2.2 Aspectos Econômicos

A ocupação e o faturamento das empresas de bens de capital é muito sensível às oscilações na atividade econômica ou, em outros termos, a produção de bens de capital é extremamente dependente da taxa de investimento da economia. Em períodos de prosperidade, a produção de bens de capital deve responder prontamente, sem que tenha tempo suficiente para estruturar melhor ou reestruturar a produção e sua própria capacidade produtiva (VERMULM, 1995). Já, em períodos de estagnação da economia e perspectivas pessimistas, há baixíssima demanda por máquinas e equipamentos. Quando a economia volta a aquecer-se, as indústrias em geral tratam, inicialmente, de ocupar sua capacidade produtiva e, só posteriormente, efetuam um novo ciclo de investimentos para a ampliação da produção o que, só então, levam a aquisição de novos equipamentos da indústria de bens de capital (BNDES, 2006).

Esse setor é, por isso, marcado por flutuações mais intensas que nos outros segmentos da economia e, portanto, a produção de bens de capital ocorre em condições adversas sob o ponto de vista da estabilidade da demanda (VERMULM, 1995).

2.3 Aspectos Comerciais e de Desenvolvimento de Produto

O departamento de *marketing*/vendas das empresas de bens de capital de grande porte sob encomenda, por essas empresas não produzirem mediante uma previsão de vendas, estão sempre prospectando oportunidades de negócios que possam se tornar pedidos, para só então poderem ser produzidos. Uma vez detectada a oportunidade, a etapa seguinte consiste na elaboração de uma proposta técnico comercial de fornecimento a ser apresentada ao cliente. Nessa fase, um departamento de engenharia de produto tem a responsabilidade de fornecer um pré-projeto básico que traduza as necessidades dos clientes em especificações técnicas dos produtos e serviços a

serem ofertados. Essas definições técnicas, bem como uma estimativa dos insumos necessários para a produção e montagem do produto final seguem para uma área de orçamentos responsável por realizar os cálculos da estimativa de quanto irá custar o produto. Essa área se relaciona com demais áreas de compras, produção e financeira, que oferecem os subsídios para o cálculo da estimativa de custos (MEGLIORINI, 2003). Nessa fase, como base na especificação do pré-projeto e na capacidade da empresa, uma data de entrega deve ser estimada e incluída na proposta.

Rozenfeld *et al* (2006) afirmam que em empresas que utilizam a estratégia de atendimento à demanda ETO, como as empresas de bens de capital sob encomenda, as fases iniciais do processo de desenvolvimento de produtos, como o pré-projeto, planejamento inicial do projeto e o projeto conceitual, podem ocorrer antes da venda e servir de base para elaboração de uma proposta comercial. O nível de detalhamento dessa fase representa um *trade-off* para a empresa. Caso o pré-projeto seja muito detalhado, com aplicação de muitos recursos, e o cliente não aceitar a proposta, tais recursos terão sido desperdiçados. Por outro lado, se o projeto for muito superficial, fornecendo pouca precisão à fase de orçamento, a falta de precisão do orçamento pode prejudicar a lucratividade do projeto.

Após a entrega da proposta, se segue um período de negociações com o cliente, onde eventuais dúvidas e detalhes possam ser esclarecidos. Caso a proposta seja aceita pelo cliente e o contrato de fornecimento seja fechado, uma ordem interna é criada para que os demais departamentos dêem início às suas atividades. É apenas neste momento que tem início as demais fases do processo de desenvolvimento de produtos como o projeto detalhado e a preparação para a produção.

2.4 Aspectos da Customização

Sievänen (2004) apresenta um amplo estudo do impacto da customização nas empresas de bens de capital sob encomenda. Inicialmente, o autor apresenta um dos modelos mais influentes na área da customização que foi desenvolvido por Lampel e Mintzberg (1996 *apud* SIEVÄNEN, 2004). A estrutura inclui cinco estratégias de customização baseadas no envolvimento dos clientes na cadeia de valor de uma empresa. Duas das estratégias apresentadas, padronização pura

e padronização segmentada, não são estratégias de customização. Os três restantes são padronização customizada, customização adaptada (*tailored customization*) e customização pura. Na customização pura, o cliente influencia todo o processo produtivo e um produto pode até ser concebido a partir do zero. Em uma estratégia de customização adaptada, um protótipo genérico é alterado de acordo com as necessidades do cliente. No âmbito da padronização customizada, o cliente escolhe entre as opções pré-definidas para a fabricação de produtos que utilizam componentes padronizados.

Os resultados do estudo apresentado pelo autor mostram que a maioria das empresas de bens de capital utiliza o conceito de padronização customizada ou de customização adaptada (*tailored customization*). Este tipo de customização é definido por MacCarthy e Fernandes (2000) como semi-customização. Sievänen (2004) afirmam ainda que o conceito de modularização apresentado por Duray *et al* (2000 *apud* SIEVÄNEN, 2004) auxilia na definição da customização utilizada pela indústria de bens de capital.

Nesses mercados, a customização está ligada à solução de problema de um cliente específico. Muitas vezes, um cliente não está apenas buscando um produto customizado, mas sim, procurando simultaneamente uma solução completa, pareceres técnicos e desenvolvimento conjunto.

Os resultados do estudo mostram que a customização é um processo normal para a realização de negócios na indústria de bens de capital, e que as empresas desse setor, em geral, possuem procedimentos bem estabelecidos de aprovação da customização. Ela é vista como uma forma de atender às necessidades dos clientes por produtos não padronizados. Normalmente, o projeto e os componentes centrais permanecem padronizados, deixando apenas algumas opções a serem customizadas.

O autor afirma ainda que o fator crítico de sucesso citado pelas empresas estudadas é a capacidade de compreender e traduzir as necessidades dos clientes em características dos produtos.

Segundo o autor, o impacto da customização dentro da organização é percebido, em maior grau, na engenharia de produto com um maior volume de trabalho desta área, bem como a necessidade de recursos mais experientes. No departamento vendas, apesar de necessitar também dos profissionais de vendas mais experientes, para entender e traduzir as necessidades dos clientes em especificações de produtos, a customização é vista como uma parte normal do

negócio que permite à empresa evitar a concorrência acirrada em preços. No entanto, a venda de produtos customizados traz grande impacto nos custos em ambas as áreas, vendas e engenharia, o que mostra que traduzir as necessidades dos clientes em especificações de produtos e depois, customizar os produtos para atender a tais necessidades são atividades que exigem tanto maior esforço quanto profissionais mais bem qualificados, mais caros por natureza.

Já na manufatura, o estudo mostra que o maior impacto da customização ocorre nas atividades de montagem, exigindo um maior volume de atividades e um maior número de inspeções extras, traduzindo-se em maiores custos e *lead times* de produção. O aumento dos tempos de *setup* não é visto como um problema da customização, já que no ambiente de produção de bens de capital, as máquinas são universais e o volume de produção é sempre baixo, resultando em altos tempos de *setup* mesmo para os produtos padronizados. Os resultados do estudo mostram que o aumento dos custos de produção de produtos customizados pode chegar a aproximadamente 20% em relação à fabricação de produtos padronizados nas mesmas instalações. Apesar do aumento dos custos, o maior problema enfrentado pela manufatura de produtos customizados é a redução da responsividade, ou seja, aumento no tempo de resposta e impacto na pontualidade de entrega.

O impacto da customização na rentabilidade dos produtos também foi estudado pelo autor. Os resultados mostram que, apesar dos maiores custos de vendas, engenharia e produção de produtos customizados, a rentabilidade tende a ser a mesma dos produtos padronizados, já que esses custos são cobertos por um preço de venda mais elevado.

Para concluir, o estudo evidencia que a customização no ambiente de produção de bens de capital é vista como fundamental para manter e aumentar a participação de mercado. Embora as empresas forneçam grande número de produtos padronizados, um certo grau de customização é exigido pelos clientes desse setor. Um segundo benefício percebido da customização é que ela aumenta potencialmente as vendas de peças de reposição, criando assim, além de maior participação e lucratividade para o fornecedor, um relacionamento estável e duradouro entre fornecedor e cliente.

2.5 Aspectos da Gestão da Produção

2.5.1 Classificação dos Sistemas de Produção

Dentre as diversas classificações de sistemas de produção existentes na literatura, duas serão utilizadas para descrever o sistema de produção de empresas de bens de capital sob encomenda descritas neste capítulo:

2.5.1.1 Volume X Variedade

Slack *et al* (1999) propõe um modelo de classificação dos processos de produção baseado na posição que se encontra em um continuum volume variedade, apresentado na figura 2.1, que implicam em formas diferentes de organizar as atividades da produção.

Nesse contexto, as empresas de bens de capital sob encomenda, devido à sua vasta gama de processos, podem estar localizadas entre os processos de Projetos e os processos de *Jobbing*.

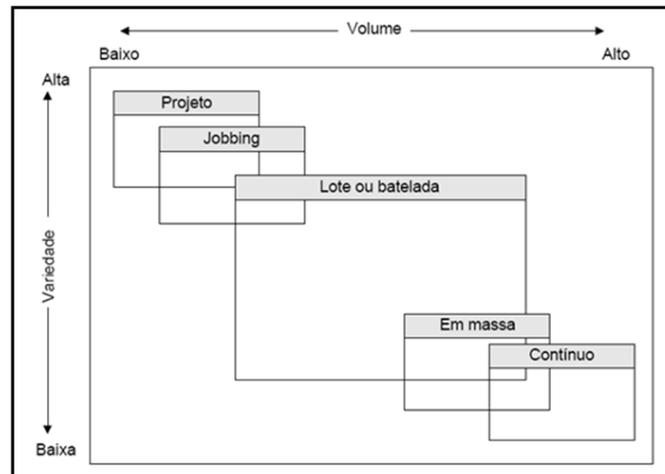


Figura 2.1 - Tipos de Processo em Operações de Manufatura
Fonte: Slack *et al* (1999)

Os processos de Projetos são os que trabalham com alta variedade e baixíssimo volume de produção e são caracterizados por produzirem produtos discretos, muito customizados, com

tempos de produção longos e intervalo de tempo entre a conclusão de cada produto/projeto relativamente longos. Os recursos de produção são normalmente dedicados a cada projeto.

Os processos de *Jobbing*, também lidam com variedade alta e baixos volumes de produção. São caracterizados por um compartilhamento de recursos com os demais produtos da empresa, e cada produto apresenta características diferentes e tem necessidades diferentes entre si.

Alguns bens de capital, como os Grandes Equipamentos, Embarcações, Plataformas, etc, que são o objeto de pesquisa desta dissertação, utilizam um processo híbrido entre esses dois casos. Enquanto fabricam alguns produtos intermediários em processos de *Jobbing*, com recursos compartilhados entre diversos produtos, dentro da planta da empresa, a montagem do produto final é feita em um processo de Projetos, normalmente em uma área externa, com recursos alocados especificamente para determinado projeto, por um longo período de tempo.

2.5.1.2 Nível de Repetição e Grau de Variedade

MacCarthy e Fernandes (2000) apresentam uma classificação para sistemas de produção que levam em consideração quatro grupos de características que englobam 12 variáveis. Segundo Fernandes e Godinho Filho (2010) dentre essas características, a variável de maior impacto na escolha do sistema de controle da produção e, portanto, na forma como gerenciar o próprio sistema, é o nível de repetição do sistema. As demais variáveis, de acordo com os autores, têm impacto na complexidade do detalhamento do sistema de controle da produção.

Segundo essa variável, os sistemas de produção podem ser divididos em sistema contínuo puro, sistemas semi-contínuo, produção em massa, sistema de produção repetitivo, sistema de produção semi repetitivo, sistema de produção não repetitivo e grandes projetos.

Para determinar em qual nível de repetição de cada sistema, é necessário determinar o grau de variedade dos produtos produzidos por este sistema. De acordo com Fernandes e Godinho Filho (2010), a variedade de cada produto pode ser definida como distinção, que se relaciona com a variedade de modelos semelhantes, ou como diversificação, que se relaciona com a variedade de produtos muito diferentes (ver tabela 2.1).

Nesse contexto, as empresas de bens de capital sob encomenda podem estar localizadas desde os sistemas de produção repetitivos, para produtos pouco customizados, ou seja, o sistema de produção apresenta apenas distinção de produtos, passando pelos sistemas semi repetitivos e não repetitivos à medida que aumenta o nível de customização e, portanto, aumenta a diversificação do sistema de produção, até chegar ao sistema de Grandes Projetos.

Tabela 2.1 - Grau de Diversificação e Distinção - Sistemas de Produção Discretos
Fonte: Adaptado de Fernandes e Godinho Filho (2010)

Níveis de Repetição dos Sistemas de Produção Discretos	Diversificação	Distinção
Produção em massa	Inexistente (produto único)	Baixa/Média
Repetitivo	Baixa	Média/Alta
Semi repetitivo	Média	Alta
Não repetitivo	Alta	Alta

Assim como na classificação anterior, os bens de capital objetos deste estudo são classificados como sistemas híbridos. Enquanto fabricam produtos intermediários menos customizados, ou seja, com certo grau de distinção e até diversificação, em sistemas repetitivos, semi repetitivos ou não repetitivos, o sistema de montagem dos produtos finais destas empresas é altamente customizado, e pode ser considerado um sistema de grandes projetos, pois, dificilmente pode ser repetido.

2.5.2 Arranjo Físico e Centros de Trabalho

Segundo Sipper e Bulfin (1997) o chão de fábrica deve ser organizado de forma a facilitar a transformação de matéria prima em produto acabado e esse arranjo físico deve ser determinado pelo volume de produção e variedade de produtos do sistema de produção.

Indústrias de bens de capital sob encomenda, por trabalharem em ambientes de baixo volume com relativa variedade de produtos, tanto distinção quanto diversificação, como foi visto nas seções anteriores, estão historicamente organizados em arranjos físicos funcionais ou por processos, também conhecidos *Job Shops* (SIEVÄNEN, 2004, LITTLE *et al*, 2000 E MEGLIORINI, 2003). Nesse tipo de arranjo físico, processos similares, máquinas similares ou

trabalhadores com habilidades semelhantes, são localizados juntos uns dos outros de forma a aumentar a flexibilidade e ocupação de cada recursos. Cada produto recebe um roteiro com informação sobre por quais recursos devem passar (SLACK *et al*, 1999). Nesse arranjo, o padrão de fluxo de produção é bastante complexo por permitir diferentes fluxos de ordens de produção entre os recursos e diferente número de operações por ordem que são processadas apenas uma vez em cada recurso.

O processo de fabricação de bens de capital de grande porte sob encomenda é intensivo de mão-de-obra e pouco automatizado, porém as máquinas, quando existem, são, geralmente, de grande porte, de uso universal.

Sipper e Bulfin (1997) afirmam ainda que nesse ambiente, o *Job Shop*, são utilizados equipamentos universais de propósito geral que podem realizar uma variedade de tipos de operações, dentro de certos limites.

Da mesma forma, segundo os autores, os trabalhadores também devem ser qualificados o suficiente para produzir uma alta variedade de produtos. Essa característica traz implicações que serão vistas na próxima seção.

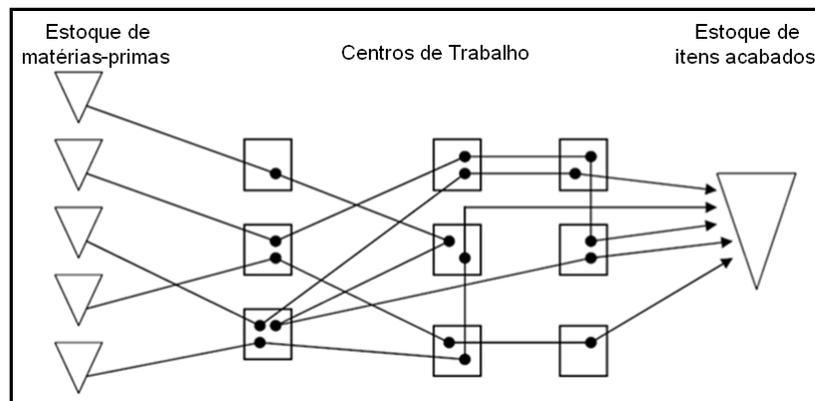


Figura 2.2 - Arranjo Físico por Processo da Fabricação por Encomenda - *Job Shop*
Fonte: adaptado de Zaccarelli (1987)

2.5.3 Mão de Obra

Segundo Megliorini (2003) o avanço da tecnologia das máquinas e equipamentos, aliado à alta especialidade e pouca repetição das operações pode implicar na necessidade de longos períodos de treinamento da mão de obra, condição que recomenda uma relativa estabilidade do quadro de funcionários. Segundo o autor, os administradores desse tipo de empresa tendem, de

algum modo, a recorrer menos à admissão e dispensa para absorver as flutuações da demanda, mantendo um volume de pessoal consistente com a demanda média e absorvendo as flutuações de demanda pela alteração das horas de trabalho, utilizando trabalho extraordinário para atender picos de demanda e reduzindo as horas em situações de baixa demanda. (MEGLIORINI, 2003).

2.5.4 Capacidade e Carga de Trabalho

Em empresas que trabalham com produtos especiais sob encomenda, customizados, em *Job Shops*, geralmente não é possível utilizar unidades de produtos por hora, dia ou mês como unidade de capacidade produtiva, como se faz na indústria seriada, considerando a capacidade em unidades do recurso com menor capacidade (ZACCARELLI, 1987 e MEGLIORINI, 2003). É comum nessas empresas utilizar a unidade HH (horas-homem), ou HM (horas-máquina), disponíveis como unidade de capacidade. A capacidade total, então, é dada pelo produto do número de recursos similares pelo número de horas de trabalho efetivo.

Dessa forma, também a carga de trabalho, ou seja, a capacidade necessária por período para satisfazer o total de pedidos em carteira e o plano (previsões) de vendas, precisa ser explícita em termos de horas (HH ou HM) necessárias para a produção dos diversos pedidos e previsões (ZACCARELLI, 1987). Segundo o autor, na produção sob encomenda, o cálculo da carga de trabalho tem a função importante de permitir calcular, mantendo um certo nível de mão-de-obra, quando será possível entregar um determinado pedido ainda em fase de negociação. Esse tema será visto mais em detalhe na seção 2.6.

Notemos que a situação descrita, representa dizer que em empresas com processos não repetitivos, a capacidade é dada por uma unidade de entrada do processo (*input*), o número de recursos, horas disponíveis de homens ou máquinas, enquanto que em empresas com processos repetitivos, a capacidade é dada por uma unidade de saída (*output*) do processo, ou seja, o número de produtos fabricados, ou *throughput*.

Segunda Zaccarelli (1987), uma exceção se dá em caso de um sistema de produção de uma grande variedade de produtos similares, que utilizam o mesmo roteiro de produção. Neste caso, determinando um produto-padrão, pode-se simplificar a determinação da capacidade de um sistema de produção, por meio de uma relação de equivalência de todos os produtos e esse

produto padrão. A capacidade do sistema se dará, então, em termos de unidades de produto-padrão por hora, dia, mês.

Este caso pode ser utilizado no caso em que o sistema é semi repetitivo, segundo a classificação de MacCarthy e Fernandes (2000).

2.6 Aspectos do Planejamento e Controle de Produção: Um Modelo Integrado de Planejamento e Controle de Produção para Empresas ETO

Little *et al* (2000) afirmam que empresas ETO que fabricam produtos de alto valor agregado têm tentado aumentar sua responsividade aos clientes, em termos de velocidade e pontualidade de entrega, sem comprometer a performance de seus produtos.

Para os autores, a elaboração de uma especificação técnica do produto, com uma configuração de produto para a fase de vendas, o planejamento detalhado dos trabalhos de engenharia de produto bem como uma programação dos recursos críticos do chão de fábrica e o planejamento de montagem são atividades críticas para atender as datas de entrega prometidas, um fator competitivo para empresas que operem nesse ambiente.

Os autores criaram um modelo de referência para o planejamento e a programação em empresas ETO, destacando os seis sub-processos-chave na estratégia de atendimento a pedidos ETO.

- a) Configuração do produto;
- b) Planejamento Mestre de Produção
- c) Planejamento de Engenharia de Produto
- d) Planejamento das necessidades do projeto;
- e) Programação do chão de fábrica;
- f) Cronograma de Montagem

2.6.1 Configuração do Produto

A configuração inicial do produto é uma atividade crítica, pois ela define as partes que precisam ser planejadas do ponto de vista de suprimentos, fabricação ou retiradas do estoque. Omissões, imprecisões ou erros na especificação e configuração inicial do produto aumentam os níveis de retrabalho, tanto na engenharia de produto quanto na fabricação e geralmente levam a atrasos na entrega de produtos/projetos. Segundo os autores, a configuração pode ser definida como a competência para traduzir os requisitos do cliente (funções de aplicação desejada) em módulos de produção, a partir da qual o produto acabado tem de ser construído.

Uma abordagem para reduzir esses problemas de configuração do produto específica para um cliente é o uso de dados históricos, com a reutilização de soluções existentes e aplicação das propostas anteriores sempre que possível. Essa sugestão é corroborada pela intenção de algumas empresas estruturarem o projeto de produto de forma mais modular.

Como visto na seção 2.4, o processo comum de customização nesse ambiente é a adoção da customização a partir de produtos padronizados e, em alguns casos mais específicos, a modularização, onde o cliente possa escolher os módulos dentre uma gama de módulos padronizados oferecidos pela empresa formando um produto customizado.

2.6.2. Planejamento Mestre da Produção

Uma vez que os requisitos do cliente sejam identificados, uma estimativa da carga potencial impostas a alguns recursos críticos deve ser feita antes da aceitação do pedido. Devido a recursos limitados, cuidados devem ser tomados para evitar a sobrecarga da fábrica e engenharia de produto na medida em que as datas do cliente não possam ser cumpridas. Esta é uma parte integrante do planejamento mestre de produção (MPS) e o processo deve ser realizado por meio de uma análise de capacidade denominada *Rough Cut Capacity Planning* (RCCP), fazendo uma análise das implicações do pedido nos diversos recursos críticos de engenharia e manufatura. A identificação ordenada das implicações de novos pedidos na carga dos recursos críticos na planta é vital para a manutenção do fluxo de trabalho e para o cumprimento das datas de entrega.

2.6.3. Planejamento de Engenharia de Produto

Em empresas ETO, o trabalho de engenharia de produto pode demorar mais do que a fabricação em si e deve ser cuidadosamente controlado. Para facilitar esse processo é necessário medir a capacidade de engenharia e monitorar a carga imposta sobre ela. Essa não é uma tarefa fácil e pode precisar ser dividida em um número de sub-funções, como por exemplo, projeto mecânicos, projeto elétricos, hidráulico, etc.

A pesquisa de Little *et al* (2000) concluiu que a capacidade de engenharia em empresas ETO é um produto de horas de trabalho disponíveis, utilização de recursos, eficiência do trabalho e qualificação dos trabalhadores. Uma resposta típica das empresas que participaram do estudo de caso foi que seria muito difícil de definir uma capacidade de engenharia para realizar atividades às vezes muito variadas. Embora seja verdade que os tempos possam variar, isto não impede o estabelecimento de "capacidade demonstrada" baseado na experiência. Os autores sugerem que poucos projetos são inteiramente novos, e uma abordagem modular para a concepção facilita o planejamento do projeto.

Os autores mostram que uma análise de qualquer produto "novo" constantemente mostra que em grande parte se emprega componentes, sistemas e técnicas existentes, para os quais é acrescentado um novo elemento relativamente pequeno. Isto quer dizer, novamente, que mesmo em empresas ETO, o projeto de produto, ou a engenharia de detalhe, parte de soluções já testadas ou de projetos modulares, que devem ser customizados para cada cliente. A implicação desse fato é que deve ser possível associar horas estimadas para os elementos de projeto que já tenham sido realizados anteriormente.

Algumas empresas estudadas pelos autores já haviam mudado da customização total, pura, para o projeto modular dos produtos. Os clientes escolhem entre um conjunto definido de opções, com pequenas modificações no projeto a ser concluído em apenas uma semana. Outras empresas operam com elementos de ambos os sistemas, oferecendo produtos modulares, com um alto grau de customização possível. Neste caso, o processo de engenharia não era responsável por mais que 33% do total de *lead time*.

2.6.4 Planejamento das Necessidades dos Projetos

Para Little *et al* (2000), uma variante de planejamento de recursos de manufatura (MRPII) relacionada a projetos recentemente se tornou uma exigência reconhecida da produção ETO. Como a capacidade de cada recurso é limitada, é vital que a data de entrega para qualquer novo pedido leve em consideração a carga de trabalho existente e a projeção da capacidade prevista para todos os centros de trabalho chave. Se isso não ocorrer, então esses pedidos estarão suscetíveis a atrasos ou à necessidade de uso excessivo de horas extras (ou ambos). Cada novo pedido é considerado um projeto e cada elemento principal da produção é programado em uma base de programação para frente para identificação dos conflitos de recursos e para estabelecer a data provável de conclusão de cada etapa. Este processo, então, fornece a data possível de entrega ao cliente.

2.6.5 Programação do Chão-de-Fábrica

Programações da fabricação dos componentes, sub-montagens e montagens maiores devem ser coordenadas para suportar a programação da montagem final. O atraso na produção mesmo que de componentes menores irá causar atrasos que não podem ser facilmente recuperados. Em um típico *Job Shop* ETO haverá várias ordens em estágios diferentes de produção e o sistema de programação do chão de fábrica deve ser reativo a acontecimentos pontuais e conflitos entre diferentes projetos. O acompanhamento para garantir que todos os itens estão dentro do prazo pode muito bem exigir algum tipo de coleta de dados no chão de fábrica por causa do grande número de itens e relativamente longos *lead times*. Fernandes e Godinho Filho (2010), chamam os sistemas responsáveis por este processo de Sistemas de Coordenação de Ordens (SCO).

2.6.6 Cronograma de Montagem Final

O cronograma de montagem final é vulnerável a qualquer atraso ou falta de componentes ou sub-montagens, e pode levar a um potencial atraso na data de entrega. A carga imposta à montagem pode flutuar consideravelmente devido a um fluxo irregular de peças. Não é incomum que a entrega do produto seja adiada devido à chegada atrasada de um pequeno produto. A montagem também está sujeita a retrabalhos que consomem capacidade causando impactos na data de entrega do produto.

2.6.7. Planejamento e Execução Integrados

Além da operação dos seis sub-processos principais acima identificados, os autores afirmam que para ser eficaz uma empresa ETO deve ser gerida de forma integrada. A fim de melhorar a taxa de atendimento à data prometida, um processo de planejamento execução integrados é proposto, sendo o direcionador a sequência necessária de montagem do produto final. Isso é ilustrado pela figura 2.3, onde a programação da montagem final é utilizada para direcionar as prioridades de trabalho no resto da fábrica, incluindo a função de engenharia.

O objetivo deve ser garantir a entrega suave de peças na sequência correspondente à montagem por meio do planejamento integrado dos processos de engenharia de produto, produção e montagem. O modelo de referência sugere um processo de programação *backwards* orientada pela programação da montagem para estabelecer as prioridades para a programação de chão de fábrica e, em seguida, a programação da engenharia de produto. O objetivo é criar um processo de planejamento integrado, a partir da fase de proposta, que leva em conta as cargas atuais e as capacidades disponíveis nas fases de concepção, produção e montagem simultaneamente, e que permite a aderência ao perfil da carga no departamento de montagem por meio de uma programação *backwards* da fabricação e engenharia.

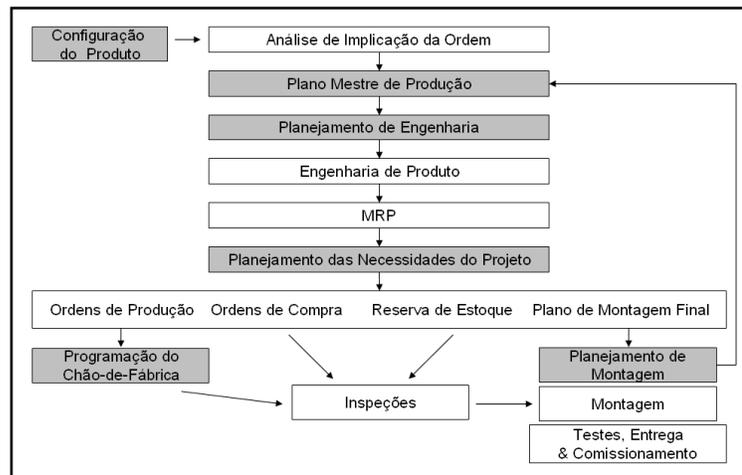


Figura 2.3 - Modelo de Referência para Sistemas ETO
 Fonte: adaptado de Little *et al* (2000)

2.7 Processos de Negócio de Bens de Capital Sob Encomenda: Resumo

Baseado nos conceitos apresentados nas seções anteriores, a seguir é apresentado um resumo do processo de produção em ambientes de produção de bens de capital sob encomenda e as interligações das fases do planejamento e controle de produção com cada fase do projeto desde a identificação da oportunidade até a inicialização (*start-up*) do produto final (figura 2.4). Após a detecção de uma oportunidade por um departamento de *marketing* e vendas, um pré-projeto deve ser realizado e nele as necessidades dos clientes são traduzidas em especificações e configurações do produto que servem de base para uma proposta técnico comercial que será negociada com o cliente. Nesse momento, a partir das especificações do pré-projeto e da análise da implicação da nova ordem por um departamento de planejamento, uma data de entrega é determinada e incluída na oferta.

Depois de realizada a venda, na fase de execução do projeto, as especificações e configurações do produto ajustadas ao escopo vendido são passadas para a engenharia de produto, responsável pela customização final do produto às necessidades do cliente reconhecidas na fase de vendas. Esse trabalho deve ser realizado de acordo com um planejamento estabelecido com base nas datas de necessidades das próximas fases do projeto.

Após a liberação das listas de materiais pela engenharia de produto, com base no plano mestre de produção (MPS), o planejamento das necessidades de materiais (MRP) é executado

suportado pelo planejamento das necessidades dos projetos (LITTLE *et al*, 2000), e são geradas as ordens de compra e reservas de estoque. A liberação das ordens de produção são também geradas suportadas por um sistema de coordenação de ordens de produção (SCO). Os produtos fabricados internamente, comprados ou retirados do estoque devem atender uma data de pré-montagem, realizada internamente que, como veremos no capítulo 5, é planejada de forma a entregar módulos pré-montados, prontos para uma montagem final que acontece fora de planta de produção.

No capítulo 5 desta dissertação serão melhor detalhados os processos de liberação de ordens de produção baseadas nas necessidades dos projetos e o controle do chão de fábrica (em destaque na figura 2.4), que serão realizados utilizando os princípios e ferramentas da produção enxuta e da teoria das restrições detalhados nos próximos capítulos.

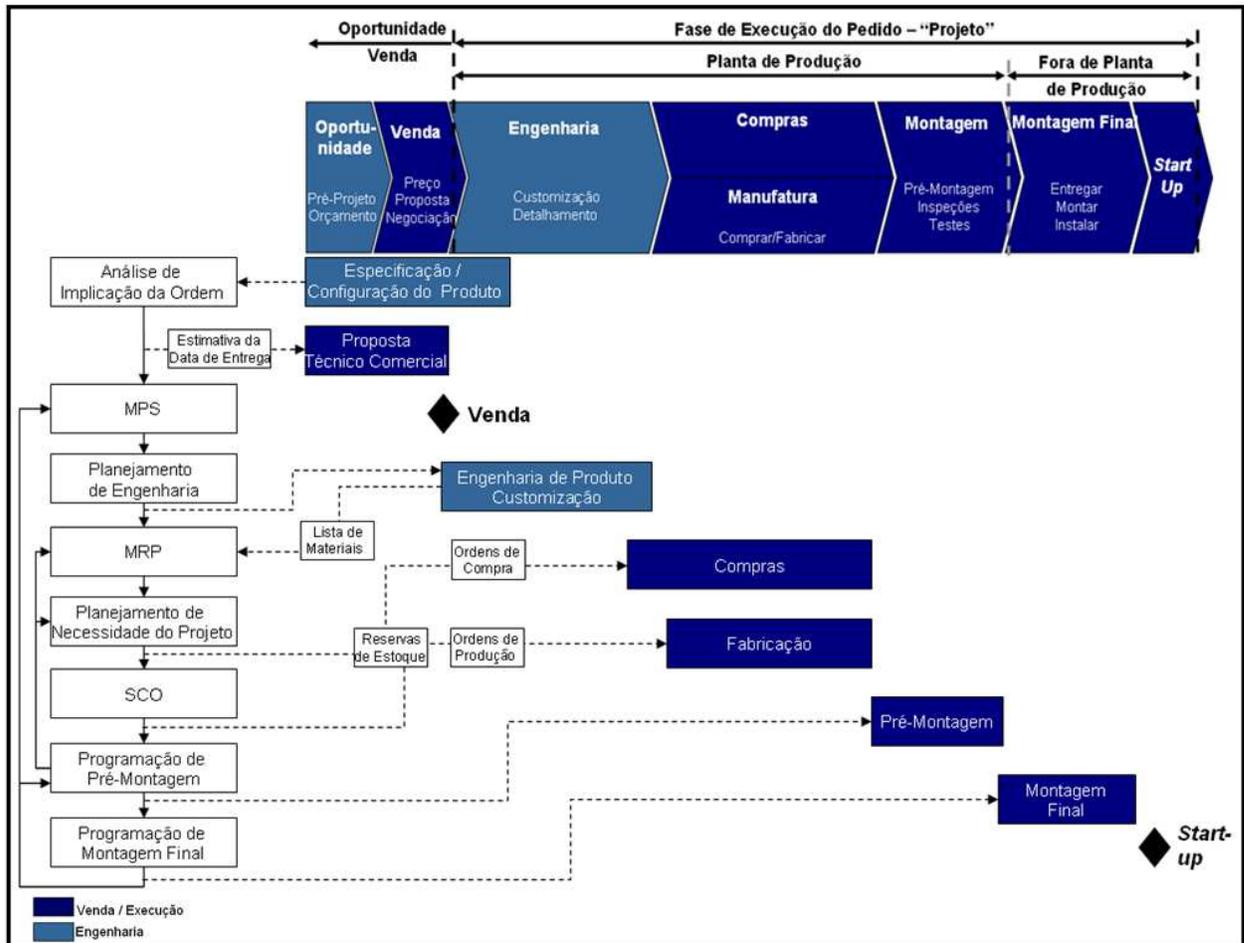


Figura 2.4 - Processo de Negócio de Bens de Capital sob Encomenda

2.8 O Setor de Bens de Capital no Brasil

2.8.1 Histórico e Características até a Década de 80

Apesar de já contar com alguma produção de equipamentos desde o final do século XIX, o setor de bens de capital no Brasil apresentava pouca relevância até o final da década de 40 pela ausência de um projeto nacional para o desenvolvimento dessa indústria (NASSIF, 2007). Foi apenas na primeira metade dos anos 50, estimulada pelos gastos públicos na produção de insumos básicos e em infra-estrutura, que a produção e o investimento industrial cresceram a taxas elevadas, gerando demanda por bens de capital que era parcialmente atendida pelas importações, facilitadas pela política cambial e de comércio exterior. Mesmo com tais importações, a incipiente indústria de bens de capital no Brasil passou a crescer a uma taxa média anual de 11% na primeira metade da década de 50, decorrente das proteções de mercado estabelecidas (VERMULM, 1995).

Entretanto, é no período do Programa de Metas (1956-1961) do presidente Juscelino Kubitschek, quando os investimentos públicos saltaram de 25,8%, em média, do total de investimentos em 1952-1956 para 35,6% em 1956-1960, em virtude sobretudo de investimentos estatais em programas de energia elétrica e infra-estrutura de transportes (ANDRADE, 2002), que a indústria de bens de capital no Brasil passa a representar parcela significativa do dinamismo econômico pelo maior grau de complementaridade da indústria brasileira, avançando a sua estrutura em direção às indústrias do complexo metal-mecânico, que tiveram na indústria automobilística, recém instalada no país, o seu carro chefe (VERMULM, 1995). Graças também aos estímulos propiciados por um aparato mais racional de proteção tarifária, no período entre 1955 e 1962, a produção da indústria de bens de capital cresceu cerca de 27% ao ano.

A trajetória de crescimento da indústria de bens de capital no Brasil foi interrompida devido à estagnação econômica na primeira metade dos anos 1960, que causaram a queda na produção de bens de capital no período de 1962 a 1967 representada por taxas de crescimento negativas, de -2,6% em média ao ano. Mesmo com a retomada do crescimento econômico a partir de 1967/68, essa indústria ainda demandaria alguns anos para retomar o seu ritmo de produção à

medida em que o crescimento da economia brasileira ocorreu pela utilização da capacidade instalada ociosa, portanto, sem necessidade de grandes investimentos.

Foi apenas a partir de 1970 que a indústria de bens de capital no Brasil voltou a crescer a taxas muito elevadas, realizando grandes investimentos e substituindo importações. Foi nesse período que se estruturou a indústria de bens de capital sob encomenda, que teve no investimento público a sua principal fonte de demanda (VERMULM, 1995).

O maior dinamismo ocorreu na primeira metade da década (1970-1974), quando a taxa de investimento bruto da economia brasileira mostrou incremento médio anual de 20,2% (como proporção do PIB), impulsionando a produção de máquinas e equipamentos nacionais. Nesse período, o maior impulso na produção de bens de capital deveu-se menos a incentivos públicos voltados para promover a substituição de importações por produtos nacionais do que ao próprio dinamismo da economia (NASSIF, 2007).

Na segunda metade da década, mesmo com a desaceleração econômica verificada no período que se seguiu ao primeiro choque do petróleo (1974-1979), o setor de bens de capital continuou mostrando taxas robustas de crescimento, embora menos expressivas do que na fase anterior. Nesse período, tendo sido apontado pelo II Plano Nacional de Desenvolvimento (II PND:1974-1979) como um dos setores prioritários para fins de política industrial, a indústria de bens de capital foi beneficiada com diversos incentivos públicos destinados à sua promoção e à substituição de importações, tais como (NASSIF, 2007):

- A prioridade passou a ser concedida aos produtos nacionais nas compras realizadas pelas empresas estatais;
- Os acordos de participação nacional, que, intermediados pela antiga Carteira de Comércio Exterior do Banco do Brasil (CACEX), induziam à compra de equipamentos domésticos nos grandes projetos de investimento realizados pelo setor privado;
- As exigências de índices crescentes de nacionalização para fins de acesso a créditos subsidiados pelo FINAME/BNDES (Financiadora de Máquinas e Equipamentos).
- A maior exigência e seletividade nos critérios para exame de existência de similar nacional, cuja comprovação era condição *sine qua non* para que empresas interessadas obtivessem reduções ou isenções fiscais e tributárias na importação de produtos supostamente concorrentes.

Contraditoriamente, ao mesmo tempo que o governo estimulava a indústria de bens de capital nacional, por meio de mecanismos administrativos não-tarifários, havia ainda um forte estímulo à importação de bens de capital por meio de isenção tarifária. A própria política de isenção de impostos de importação para produtos sem similares no país, embora mais seletiva nesta época, estimulava a importação de bens de capital de alta tecnologia, que não eram produzidos no país. Outro programa, o BEFIEEX, com intuito de estimular as exportações de bens industrializados, isentava da cobrança de impostos de importação de bens de capital as empresas que se comprometessem com valores expressivos de exportação futuros. Na prática, no entanto, os produtos importados com incentivos do programa não necessariamente se destinavam à produção voltada ao mercado externo (VERMULM, 1995).

É verdade que o próprio setor produtor de bens de capital também se beneficiou dos incentivos fiscais à importação, mas, por outro lado, subtraía demanda interna que poderia se constituir em razão suficiente para justificar investimentos adicionais em capacidade produtiva e de desenvolvimento de produtos por parte da indústria nacional produtora de bens de capital. Dessa forma, a indústria nacional de bens de capital foi se desenvolvendo na produção de bens de menor conteúdo técnico, para a qual existia mercado interno, enquanto que os produtos mais sofisticados eram importados, com benefícios fiscais.

A atuação do Estado, portanto, foi decisiva para a expansão da indústria brasileira de bens de capital, pela utilização de vários instrumentos de política industrial como proteção de mercado, incentivos fiscais, disponibilidade de crédito e incentivos financeiros, uso do poder de compra estatal etc. Todavia, produtos que não tivessem similar nacional puderam ser importados com incentivos fiscais, beneficiando o usuário do bem de capital. Dessa maneira, o governo conseguiu resguardar os interesses dos investidores, os usuários de bens de capital, ao mesmo tempo em que estimulou a indústria nacional (VERMULM, 1995).

Dessa maneira, essa política de proteção aos segmentos menos sofisticados e de estímulo às importações de maior conteúdo tecnológico, a indústria de bens de capital brasileira foi sendo desenvolvida com base na complementaridade das importações de bens de capital em relação à sua produção doméstica. Nesse padrão, as importações não descolavam muito da produção doméstica em virtude da complementaridade e de seu caráter condicionante do bom desempenho da indústria doméstica de bens de capital (RESENDE e ANDERSON, 1999).

Outra característica do padrão de desenvolvimento adotado foi que esse setor industrial, como a quase totalidade da indústria brasileira, foi estruturado visando atender basicamente ao mercado interno. Esse padrão de instalação, protegido e focado no mercado interno de produtos pouco sofisticados sob o ponto de vista tecnológico, não viabilizou a gênese e o desenvolvimento de um setor de bens de capital que operasse no vértice de um sistema nacional de inovações, geradora de um movimento endógeno de desenvolvimento e difusão do progresso técnico que apresentasse segmentos capazes de se manterem na fronteira em termos de capacitação tecnológica, custos de produção e qualidade de produtos, conforme se observa nos principais países industrializados (RESENDE e ANDERSON, 1999).

O licenciamento de tecnologia foi a fonte mais utilizada para a capacitação tecnológica do setor. Esse recurso foi utilizado tanto pelas empresas estrangeiras, que adaptavam os produtos às especificidades do mercado interno, quanto pelas empresas nacionais, que viam no licenciamento uma alternativa mais rápida e segura de capacitação tecnológica. Muitos produtos foram desenvolvidos internamente a partir da engenharia reversa, mas quando se tratava de lançamento de novos produtos, a empresa nacional era obrigada a lançar mão do licenciamento. Para os bens de capital sob encomenda, grande parte da produção nacional se encontra em empresas de origem estrangeira, que realizam o desenho básico no exterior e apenas fazem a engenharia de detalhe internamente. Já as empresas nacionais, produtoras de bens de capital sob encomenda, recorreram ao licenciamento para projetos mais sofisticados. Entretanto, o licenciamento de produtos se tornou uma restrição às exportações de bens de capital para os países mais avançados, de onde viriam tais licenças (VERMULM, 1995).

Somado a esse fator, o mercado interno protegido da concorrência externa, apesar da falta de competitividade da indústria brasileira, garantiam às empresas instaladas no Brasil elevadas margens de rentabilidade, que não se arriscavam, assim, no mercado externo. Isso significava que a rentabilidade obtida no mercado interno era bem superior àquela possível de ser obtida no mercado externo. Além disso, as empresas nacionais atuantes na produção de bens de capital são, geralmente, empresas de menor porte, que não têm estrutura e capacitação para enfrentar o mercado externo. Por todos esses fatores, a indústria nacional, manteve os coeficientes de exportação de bens de capital em níveis bem inferiores ao padrão internacional das economias mais desenvolvidas (VERMULM, 1995). Na década de 80, mais de 50% das exportações mundiais de bens de capital estavam concentradas nos Estados Unidos, Alemanha e Japão,

enquanto que a participação das exportações brasileiras no total das exportações mundiais de máquinas e equipamentos não passava de 0,35% (RESENDE e ANDERSON, 1999). Os principais mercados externos dos produtos brasileiros estavam localizados nos países da América Latina. As exportações para os Estados Unidos e para a Comunidade Européia eram limitadas não só pela falta de competitividade da indústria brasileira, mas também porque era justamente nesses países que se obtinha o licenciamento de produtos, cujos contratos vetavam a exportação brasileira para esses mercados (VERMULM, 1995).

Outro fator limitante da competitividade da indústria brasileira de bens de capital até o final dos anos 80 eram os elevados índices de verticalização das empresas desse segmento, uma vez que a precária base de fornecedores não garantia um fornecimento confiável e competitivo de componentes, e o modelo de substituição de importações que impunha os elevados índices de nacionalização, impossibilitava a importação de componentes com similares nacionais. Assim, a indústria brasileira de bens de capital internalizou, para a própria empresa, a produção de uma série de partes, peças e componentes dos seus produtos. Entretanto, na produção desses componentes, o produtor de bens de capital não possuía escala rentável, reduzindo as possibilidades de obtenção de economias de especialização, onerando seu produto e, conseqüentemente, afetando ainda mais a sua competitividade (VERMULM, 1995 e RESENDE e ANDERSON, 1999).

As oscilações e o tamanho limitado do mercado interno justificam também a grande diversificação da linha de produtos das empresas de bens de capital. Essa diversificação de produtos não permitia a concentração dos esforços tecnológicos e acabava inibindo as atividades de desenvolvimento de produtos, contribuindo também para a baixa competitividade internacional da indústria brasileira. Adicionalmente, existia um grande número de produtores para os mesmos tipos de produtos de bens de capital sob encomenda, muito maior que a média dos países mais avançados, limitando assim o mercado para cada empresa individualmente.

Com relação à capacitação tecnológica das empresas, como o recurso à tecnologia externa, por meio de licenciamentos, foi a fonte de tecnologia mais utilizada, as empresas do setor sempre gastaram poucos recursos com o desenvolvimento de atividades próprias de P&D e pouco recorreram às instituições do sistema nacional científico e tecnológico. As empresas nacionais desse setor, de origem fundamentalmente familiar, assim se encontram até os dias atuais, o que leva o conhecimento técnico e gerencial a se concentrarem nas pessoas que são

proprietárias das empresas, sem que haja institucionalização das atividades de pesquisa e desenvolvimento, tornando tais empresas relativamente limitadas sob o ponto de vista tecnológico (VERMULM, 1995).

Durante a década de 1980, o Brasil conviveu com situação quase permanente de crise econômica, caracterizada por severa escassez cambial, dificuldades de acesso a crédito externo e alta inflação. Esse quadro contribuiu para deteriorar ainda mais o perfil competitivo da indústria de bens de capital nacional, seja pelas baixas taxas de crescimento que implicaram na retração de investimento e na demanda de bens de capital, ou pela situação de penúria cambial que acabou levando a um controle extremamente rigoroso das importações, eliminando, na prática, a racionalidade na condução e na implementação das medidas de política industrial (NASSIF, 2007). Nesse período, a grosso modo, os principais elementos de política industrial continuaram em vigência mas, paulatinamente, foram sendo modificados e perderam a força que tiveram na década de 70. A política de incentivos fiscais, que havia sido um dos pilares da política industrial nos anos 70, foi alterada ao longo da década com objetivo de limitar as importações de bens de capital.

A crise da economia brasileira, reforçada por uma política econômica de caráter recessivo, retraiu o nível de investimento da economia, o que representou a queda na demanda por bens de capital, principalmente no segmento de bens de capital sob encomenda, onde foi ainda mais forte comparado ao setor de bens de capital seriados. Como a demanda por bens de capital sob encomenda depende, fundamentalmente, do setor público, a deterioração financeira do Estado, e em especial das empresas públicas de siderurgia e de energia, se refletiu num corte sensível dos investimentos públicos. Essa situação permaneceu ao longo de toda a década de 80, reduzindo a participação dos bens de capital sob encomenda na produção total de bens de capital (VERMULM, 1995).

2.8.2 A Abertura de Mercado da Década de 90

À primeira vista, com a redução das barreiras à importação, a indústria de bens de capital brasileira, em virtude do elevado nível de desvantagem comparativa, figurou como uma das mais afetadas adversamente pela liberalização comercial ao longo da primeira metade da década de 1990, devido ao descompasso expressivo entre a evolução dos coeficientes de importação e de

exportação. O aumento da pressão competitiva externa, no entanto, desencadeou a modificação da estrutura produtiva do setor, o que forçou as firmas estabelecidas a implementar um rápido processo de reestruturação industrial (NASSIF, 2007).

Essa reestruturação da indústria de bens de capital no Brasil caracterizou-se por:

- **Desverticalização:** As empresas brasileiras procuraram reduzir o grau de verticalização de sua produção, notadamente por meio da absorção de insumos e matérias-primas importados (NASSIF, 2007). A partir da liberalização comercial, verifica-se o incremento das importações de peças e componentes e do conteúdo importado dos bens produzidos domesticamente. O grau de complementaridade produtiva e comercial, assim como o padrão dessa complementaridade, é drasticamente afetado, deslocando-se em boa medida para o exterior o fornecimento de peças e componentes requeridos para a produção doméstica (RESENDE e ANDERSON, 1999).
- **Aumento da participação de empresas estrangeiras no setor:** A partir da liberalização comercial o aumento da participação de empresas estrangeiras com controle parcial ou total verifica-se em quase todos os setores da economia. No entanto, é no setor de bens de capital sob encomenda que ele é mais intenso. O *market-share* das empresas estrangeiras com controle total aumentou significativamente neste segmento atingindo quase 40% do setor, em comparação aos 33% da média da indústria de transformação (NASSIF, 2007).
- **Intenso movimento de saída de empresas ineficientes da indústria:** Em contraste com a fase anterior de baixa competitividade externa, o efeito imediato da liberalização comercial foi induzir a saída de empresas ineficientes em alguns ramos, seja porque operavam com escalas sub-ótimas ou porque os preços praticados e os requisitos de qualidade dos produtos fabricados eram pouco competitivos frente às congêneres internacionais (NASSIF, 2007). Segundo Resende e Anderson (1999), a abertura econômica estimula a alocação de recursos que privilegie os segmentos eficientes, segundo parâmetros de preços internacionais, preterindo-se os menos eficientes.
- **A redução expressiva do número de diferentes bens produzidos por empresa:** ao defrontar-se com maior pressão competitiva de produtos importados, as empresas brasileiras foram forçadas a operar com menor diversidade de produtos, relativamente

ao período anterior à liberalização comercial e, apesar de abrirem mão de parte das economias de escopo resultantes de maior diversificação da produção, o efeito líquido dessa estratégia foi propiciar às firmas maiores ganhos de especialização, em especial, no segmento de máquinas e equipamentos, em que a tendência internacional, de maior especialização em nichos específicos de mercado, tem aberto “janelas de oportunidade” para a atuação de pequenas e médias empresas, desde que sejam capacitadas tecnologicamente e estejam aptas a difundir redes de assistência técnica à clientela (NASSIF, 2007).

Como se pode perceber, os efeitos desse processo sobre a competitividade do sistema produtivo nacional foram ambíguos. Se por um lado o processo de liberalização comercial estimulou o aumento da competitividade da indústria de bens de capital e do sistema produtivo nacional por meio da desverticalização, da especialização causada pela redução da gama de bens produzidos pelas empresas e do aumento do conteúdo tecnológico importado dos bens produzidos domesticamente, por outro lado, aumentou o nível de importação e da entrada de empresas internacionais no mercado doméstico o que fez com que diversas empresas produtoras desse tipo de bens tenham sucumbido ao longo dos últimos anos à forte pressão competitiva (RESENDE e ANDERSON, 1999).

2.8.3 Evolução dos Indicadores de Bens de Capital (1994-2010)

Para fazer uma análise dos efeitos da abertura cambial, da estabilização da economia e das diversas políticas econômicas adotadas para a indústria de bens de capital desde a adoção do plano real, esta seção apresenta alguns indicadores setoriais que mostram o efeito das medidas econômicas adotadas no período.

Nassif (2007) apresenta, na tabela 2.2, a evolução da participação da indústria de bens de capital em relação à indústria de transformação como um todo entre 1996 e 2005. Segundo o autor, embora o forte processo de ajustamento produtivo e tecnológico ocorrido após a liberalização comercial não tenha acarretado o desaparecimento da indústria brasileira de bens de capital, causou uma queda na participação dessa indústria no total da produção industrial nacional e mudanças significativas em sua estrutura interna. Enquanto o setor de máquinas e equipamentos

de transporte foi o único que avançou significativamente na estrutura da riqueza, passando de uma participação de 14,7% para 23,1% entre 1996 e 2005, os grupos mais afetados, de máquinas e equipamentos de telecomunicações e o de máquinas e equipamentos tipicamente industriais, apresentaram perdas expressivas em suas participações relativas no valor agregado entre 1996 e 2005.

Tabela 2.2 - Estrutura do Valor Agregado nos Segmentos da Indústria de Bens de Capital
Fonte: Nassif (2007)

Segmentos	Anos									
	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Máquinas e equipamentos tipicamente industriais	52,27	50,69	50,58	48,48	43,72	43,24	45,33	44,68	44,11	46,71
Equipamentos de energia elétrica	3,60	4,29	5,96	3,05	2,74	2,73	2,48	4,40	3,16	4,39
Máquinas e equipamentos de telecomunicações	20,38	18,79	16,04	17,96	20,37	18,30	16,19	11,74	13,38	13,74
Máquinas e equipamentos eletrônicos e não-eletrônicos para escritório	3,52	3,70	3,92	5,71	7,81	8,63	5,07	5,09	3,75	4,40
Equipamentos médico-hospitalares	2,10	1,94	2,16	2,23	2,12	1,60	2,05	2,11	2,15	2,55
Máquinas e equipamentos Agrícolas	3,42	4,23	4,69	3,61	3,53	4,39	5,52	7,79	8,84	5,12
Máquinas e equipamentos de transporte	14,72	16,36	16,66	18,97	19,71	21,11	23,35	24,19	24,81	23,09
Total da Indústria de bens de capita (em relação ao total da indústria de transformação)	14,01	14,72	14,19	13,32	14,20	15,58	14,19	12,03	12,55	12,12

Como apresentado anteriormente, o comércio exterior, representado pela balança comercial, é um fator significativo para esse segmento da indústria. Segundo Nassif (2007), os fluxos de comércio exterior refletem, em termos estáticos, os níveis de vantagem (ou desvantagem) comparativa e, em termos dinâmicos, as mudanças nas condições de competitividade inter-setoriais (vantagens comparativas dinâmicas). Em nível maior de agregação, são também influenciados pelas variáveis macroeconômicas, tais como as taxas de crescimento do PIB real e, principalmente, a taxa de câmbio real. Nesse contexto, a variação da taxa de câmbio tem sido um dos fatores críticos na composição da produção nacional, nas exportações e importações desse segmento. Desde 1994, o país passou por períodos de estabilidade seguidos de crises econômicas, principalmente internacionais como a crise mexicana, asiáticas e russas, além da crise econômica internacional de 2008 iniciada nos EUA, que desestabilizaram o câmbio. A figura 2.5 apresenta o gráfico da variação da taxa de câmbio desde 1994 até 2011.

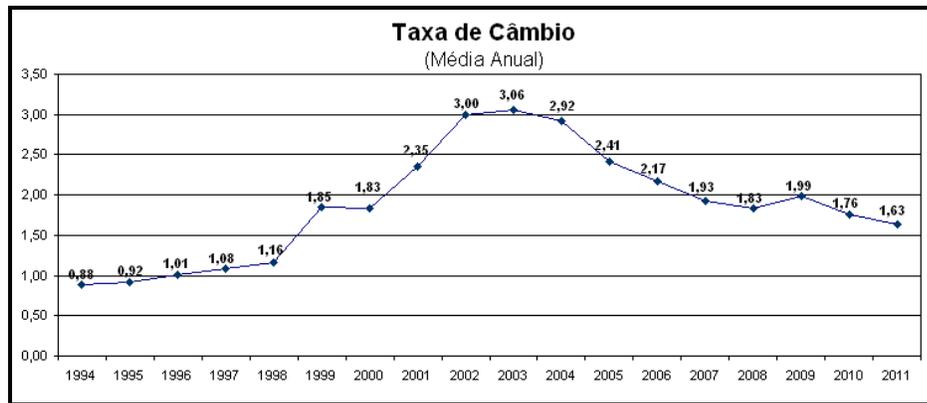


Figura 2.5 - Gráfico da Variação da Taxa de Câmbio 1994 - 2011
Fonte: IPEADATA

A figura 2.6 apresenta o gráfico da variação da balança comercial de bens de capital no período 1994-2010. Pode-se verificar que até a desvalorização do Real, em 1999, o nível de competitividade da indústria nacional era prejudicado pela moeda forte, representado pelo alto nível de importação em comparação com as exportações. Esse cenário se inverte em 2003, quando o dólar atinge o maior valor da série histórica, R\$ 3,06 na média do ano. A partir desse ano tanto exportação quanto as importações voltam a crescer até 2008, quando ocorre a crise das hipotecas americanas.

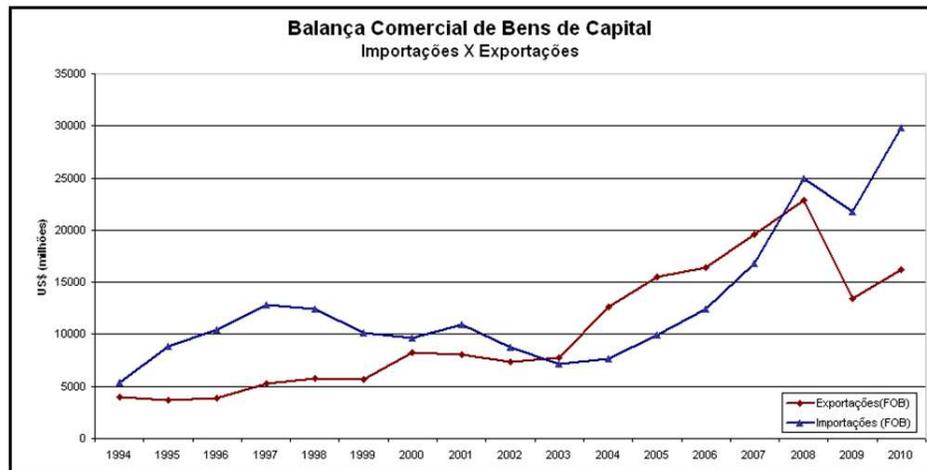


Figura 2.6 - Gráfico da Balança Comercial da Indústria de Bens de Capital
Fonte: IPEADATA

A figura 2.7 apresenta o gráfico da evolução da produção de bens de capital a partir de 1994. Pode-se perceber que o aumento das importações e exportações de bens de capital no período de 2003 e 2008 (figura 2.6) é acompanhado do crescimento da produção nacional no

período o que demonstra o grau de complementaridade atingido por esta indústria na década passada.

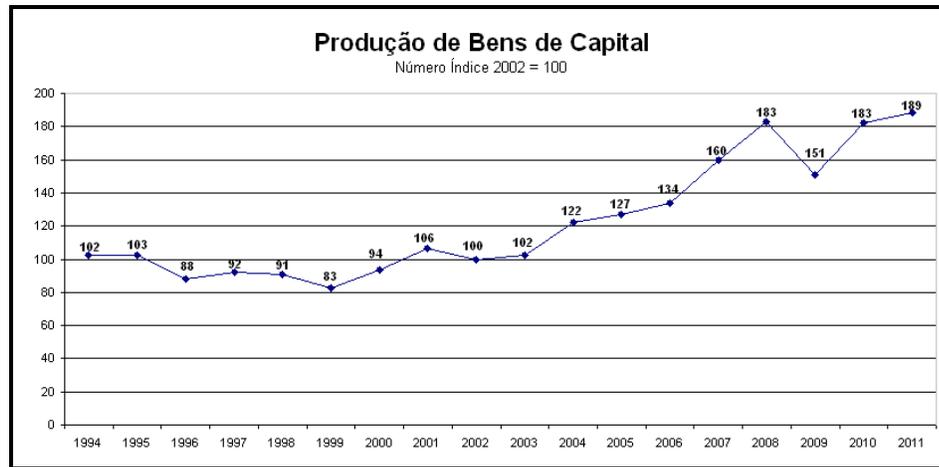


Figura 2.7 - Gráfico Produção Interna de Bens de Capital
Fonte: IPEADATA

2.8.4 Desafios para o Setor de Bens de Capital no Brasil

As principais deficiências identificadas no setor de bens de capital no país são baixa escala produtiva, maquinário desatualizado, pouco conteúdo tecnológico, falta de certificação para colocação dos produtos nos mercados dos países desenvolvidos, estrutura de capital desequilibrada, métodos de gestão ineficazes e estrutura de assistência técnica deficiente, principalmente no caso de exportações (BNDES, 2005). De acordo com BNDES (2005), as principais restrições para o crescimento da indústria nacional de bens de capital são a restrição de demanda, a restrição de crédito e as restrições tecnológicas.

Para os autores, a principal condição para enfrentar a restrição de demanda interna, que estimularia uma retomada de investimentos no setor de bens de capital, é a expectativa de recuperação sustentada e consistente de novos investimentos na economia brasileira, cuja confirmação se refletiria na demanda por bens de capital. Existem alguns setores estratégicos da economia brasileira que já haviam anunciado seus planos de investimento para os próximos anos, destacando-se petróleo e gás, petroquímica, energia elétrica, papel e celulose e siderurgia. Assim, uma possibilidade seria focar as políticas de atração de novos investimentos tendo como base as necessidades de fornecimento dos setores demandantes de bens de capital. No entanto, alguns desses investimentos foram suspensos durante a crise de 2008.

A restrição da demanda interna, porém, pode ser compensada pela conquista de novos mercados externos. Portanto, enquanto não há sinais claros de uma retomada sustentada ao longo do tempo da demanda interna por bens de capital, vale ressaltar a posição de destaque, entre 2003 e 2008, das exportações para o desempenho do setor, as quais foram particularmente importantes na complementação da demanda por bens do segmento sob encomenda. Ainda que a médio e longo prazos a geração de emprego e renda no Brasil dependa, em grande medida, da evolução da demanda interna, tendo em vista as dimensões continentais do país, não se deve menosprezar o papel suplementar que as exportações possam exercer para aumentar a demanda agregada em momentos de crescimento insuficiente do consumo e do investimento, além de serem, sempre, fundamentais à geração de divisas para o país. Até 2008, assistimos a um fato inédito no Brasil, quando as exportações desempenharam um papel dinamizador do ritmo de atividades, e houve um entendimento por parte dos empresários que exportar deve continuar sendo uma prioridade, mesmo com a retomada de um crescimento sustentável do mercado interno. Ou seja, houve uma mudança significativa da “mentalidade” dos empresários brasileiros no sentido de uma preocupação maior com o aumento de sua internacionalização (BNDES, 2005).

Segundo os autores, a segunda restrição ao crescimento desse segmento é a restrição de crédito, que pode ocorrer por falta de linhas adequadas de financiamento no momento em que a demanda interna voltar a crescer e os produtores de fato decidirem investir no setor de bens de capital, já que as taxas de juros praticadas no país ainda são elevadas se comparadas com o padrão internacional, o que favorece as importações, independentemente da competitividade técnica e econômica dos bens de capital produzidos localmente. Isso porque os produtos importados trazem consigo financiamentos externos em condições mais favoráveis do que as concedidas no mercado brasileiro.

A terceira restrição ao crescimento da indústria nacional de bens de capital são as restrições tecnológicas derivadas, conforme vimos nas seções anteriores, de muitos anos em que o mercado brasileiro concentrou-se na produção de bens de menor conteúdo tecnológico, ao mesmo tempo em que os mais sofisticados eram importados. Nesse sentido, segundo BNDES (2005), para fortalecer e aprimorar o parque nacional de bens de capital é essencial que haja um aumento do nível de internacionalização do setor. Um incremento das exportações e um maior dinamismo da demanda interna são fundamentais para viabilizar escalas mínimas competitivas de produção. Dessa forma, a integração da América do Sul poderá ser uma forma de ampliar o

mercado potencial para os produtos brasileiros. Para os autores, portanto, a preocupação com a redução das importações, precisa estar associada, principalmente, a uma expansão das exportações. Nesse sentido, o ideal seria que o Brasil se transformasse em uma plataforma de exportação de bens de capital, particularmente no caso das filiais das multinacionais instaladas no país. Dessa forma, a balança comercial brasileira ganharia duplamente: ao mesmo tempo em que estaríamos “economizando” importações, expandiríamos as exportações. Sem esquecer também do aumento de renda e emprego gerado pela expansão da capacidade produtiva no país viabilizada pelos novos investimentos.

Como apresentado na seção anterior, a variação na taxa de câmbio exerce influência direta em cada uma dessas restrições.

Em linhas gerais, atualmente os principais desafios para a expansão do setor de bens de capital do Brasil segundo BNDES (2005) são:

- ampliar as linhas de financiamento com custos mais próximos aos oferecidos no mercado internacional, o que é particularmente importante com relação ao segmento de bens de capital sob encomenda pois, como vimos, os produtos importados trazem consigo financiamentos externos em condições mais favoráveis do que as concedidas no mercado brasileiro;
- desenvolver a capacidade de engenharia de projeto (atualmente um dos itens de maior agregação de valor), já que no Brasil há, na maioria dos casos, apenas capacidade de detalhamento dos projetos;
- melhorar o nível de profissionalização da gestão no que diz respeito às pequenas empresas com administração familiar;
- fortalecer o desenvolvimento tecnológico e aumentar os gastos em P&D;
- ampliar e fortalecer a integração entre os elos da cadeia produtiva;
- aumentar a escala de produção, que atualmente se encontra em níveis significativamente inferiores aos internacionais;
- expandir o grau de internacionalização do setor, fator indispensável para viabilizar maior escala de produção; e
- aprofundar o desenvolvimento dos serviços pós-venda (assistência técnica).

3 A PRODUÇÃO ENXUTA E O SISTEMA TOYOTA DE PRODUÇÃO

Os princípios e práticas do que é atualmente conhecida como produção enxuta têm como base o Sistema Toyota de Produção, ou TPS (*Toyota Production System*), desenvolvido pela Toyota Motor Company, a partir da década de 1940, para enfrentar certas restrições de mercado que, segundo Ohno (1997), exigiam a produção de pequenas quantidades de muitas variedades sob condição de baixa demanda, um destino que a indústria japonesa enfrentou no período do pós-guerra.

A produção enxuta é uma estratégia de gestão que procura otimizar a organização de forma a atender as necessidades do cliente no menor prazo possível, na mais alta qualidade e ao mais baixo custo, ao mesmo tempo em que aumenta a segurança e o moral de seus colaboradores, envolvendo e integrando não só manufatura, mas todas as partes da organização (GHINATO, 2000). De fato, a produção enxuta (do original em inglês, *Lean*) é um termo cunhado no final dos anos 80 pelos pesquisadores do IMVP (*International Motor Vehicle Program*), um programa de pesquisas ligado ao MIT, para definir o TPS, que é muito mais adequado que a produção em massa em mercados que apresentam mudanças constantes e demanda por pequenas quantidades de itens com alta distinção (variedade de coisas semelhantes).

Os resultados dessa pesquisa do IMVP foram apresentados no livro “A Máquina que Mudou o Mundo” (WOMACK, JONES e ROOS, 1992), também responsável pela popularização do termo “enxuto”. Para os autores, a produção enxuta é “enxuta” por utilizar menores quantidades de tudo em comparação com a produção em massa: metade do esforço dos operários na fábrica, metade do espaço para fabricação, metade do investimento em ferramentas, metade das horas de planejamento para desenvolver novos produtos em metade do tempo. Requer também bem menos da metade dos estoques atuais no local de fabricação, além de resultar em bem menos defeitos e produzir uma maior e sempre crescente variedade de produtos.

Portanto, a melhor forma de entender a produção enxuta é começar pelas suas raízes no TPS. A seguir serão apresentados seus principais elementos, objetivos, bases e pilares, e o que se entende pelos princípios da produção enxuta, que se originaram dentro do TPS. Também serão apresentadas algumas ferramentas da produção enxuta, dentre elas o sistema de coordenação de ordens, SCO, criado para realizar o controle de produção dentro do TPS, o Kanban. O objetivo é

definir o que se entende pelos princípios da produção enxuta e sua aplicabilidade a diferentes ambientes de produção.

3.1 As Origens do Sistema Toyota de Produção

O nascimento da Toyota deve-se ao entusiasmo da família Toyoda, tradicional fabricante de teares para a indústria têxtil japonesa, pela indústria automobilística desde o início do século XX. Como decorrência desse entusiasmo e da crença de que a indústria automobilística em breve se tornaria o carro-chefe da indústria mundial, Kiichiro Toyoda criou o departamento automobilístico na Toyoda Automatic Loom Works, a empresa de teares da família, e, em 1937, fundou a Toyota Motor Company. (GHINATO, 2000).

Sendo proibida pelo governo japonês de fabricar carros de passeio, a Toyota entrou na indústria automobilística produzindo apenas caminhões simples e militares, com métodos artesanais o que levou a empresa a ter pouco sucesso até o término da Segunda Guerra Mundial (WOMACK, JONES e ROOS, 1992, LIKER, 2005).

Em 15 de agosto de 1945 o Japão perdeu a guerra, porém, esta data marcou também um novo começo para a Toyota (OHNO, 1997). Disposta a ingressar definitivamente na fabricação em larga escala de carros e caminhões comerciais, a empresa sabia que teria que se comparar com as grandes produtoras americanas de automóveis. Nessa época, Kiichiro Toyoda, presidente da companhia, acreditava que os produtores japoneses deveriam alcançar os Estados Unidos em três anos, caso contrário a indústria automobilística do Japão não sobreviveria. Isso significava aumentar a produtividade japonesa em oito ou nove vezes (OHNO, 1997).

Isso não seria uma tarefa fácil. Nos anos seguintes o Japão, sob ocupação americana, viu sua economia ser consumida primeiramente por uma inflação crescente e depois, devido à restrição do crédito para conter essa inflação, por uma grave depressão, o que levou a Toyota a um colapso nas vendas. Tal situação forçou a empresa a demitir parte da força de trabalho o que levou a uma longa greve que só teve fim com a demissão de seu presidente e novos acordos trabalhistas, que previam o emprego vitalício e pagamentos crescentes (WOMACK *et al*, 1992).

Então como alcançar a produtividade dos americanos sob essas condições?

Para realizar essa missão, os executivos e engenheiros da empresa tiveram de conhecer melhor os métodos americanos de produção. De fato, desde os anos 30 os líderes da Toyota estiveram diversas vezes nas fábricas da GM e Ford para conhecer suas linhas de montagem e conhecer os métodos de fabricação em larga escala. (LIKER, 2005).

Em 1950, Eiji Toyoda, futuro presidente da companhia, também visitou e estudou o complexo Rouge, da Ford em Detroit, então o maior e mais eficiente complexo fabril do mundo. De volta a Nagoya, Eiji e seu gênio da produção, Taiichi Ohno, logo chegaram à conclusão de que a produção em massa jamais funcionaria no Japão daquela época, que vivia sérias restrições de mercado (WOMACK *et al*, 1992):

- a) o mercado doméstico era limitado, demandando vasta gama de veículos: carros de luxo para autoridades governamentais, caminhões grandes para transportar mercadorias, caminhões pequenos para os agricultores menores e carros pequenos adequados para as cidades populosas e para o alto custo do combustível no Japão;
- b) a força de trabalho nativa do Japão, já não mais estava propensa a ser tratada como custo variável ou peça intercambiável. Ainda mais, as novas leis trabalhistas introduzidas pela ocupação norte-americana, fortaleciam a posição de barganha dos sindicatos e o direito da empresa de demitir funcionários foi rigidamente restrito;
- c) a economia do país, devastada pela guerra, estava ávida por capitais e trocas comerciais, sendo quase impossível compras maciças das tecnologias de produção ocidentais mais recentes;
- d) o mundo exterior estava repleto de imensos produtores de veículos motorizados, ansiosos por operar no Japão e dispostos a defenderem seus mercados contra as exportações japonesas.

Tais restrições deixavam claro que simplesmente copiar o modelo de Rouge seria difícil. O sistema de produção em massa da Ford fora criado para produzir grandes quantidades de um número limitado de modelos. Por outro lado, a Toyota precisava fabricar pequenos volumes de modelos diferentes usando a mesma linha de montagem, pois a demanda no seu mercado era muito baixa para suportar linhas de montagem dedicadas a um só modelo (LIKER, 2005).

Para ilustrar a diferença de realidade vivida pela Toyota, até 1950 a Toyota havia produzido apenas 2.685 automóveis, em comparação com os 7.000 produzidos pela Rouge, em um só dia (WOMACK *et al*, 1992).

Costumava-se dizer, nesta época, que a produtividade dos trabalhadores americanos era aproximadamente dez vezes superior à produtividade da mão-de-obra japonesa. Mas Ohno e sua equipe se perguntavam se seria mesmo verdade que um americano fosse capaz de um esforço físico 10 vezes maior que um trabalhador japonês. Por certo os japoneses estavam desperdiçando alguma coisa. Se fossem capazes de eliminar todo e qualquer tipo de desperdício (*MUDA* em japonês), a produtividade se decuplicaria. Esta idéia marcou o início do atual Sistema Toyota de Produção (OHNO, 1997). O TPS nasceu, então, como um método racional de fabricar produtos pela completa eliminação dos elementos desnecessários na produção, com o propósito de reduzir os custos (MONDEN, 1984).

É importante ressaltar também que o TPS evoluiu da necessidade. Ohno (1997) destaca que seus esforços na criação do TPS se baseavam na necessidade de descobrir um novo método de produção que eliminasse o desperdício e ajudasse a Toyota a alcançar os Estados Unidos em três anos.

Embora Ohno fosse um admirador de Ford e tenha estudado e utilizado muitos dos avanços proporcionados pelo sistema criado por ele, como a forte padronização das atividades e o sistema de fluxo contínuo nas linhas de montagem, julgava que havia uma falha de interpretação de seus seguidores (OHNO, 1997). A Toyota enxergou uma falha inerente ao sistema de produção em massa utilizado pela Ford. Enquanto pregava o fluxo contínuo, nas linhas de montagem, utilizava métodos esbanjadores de produção em grandes lotes dos componentes no decorrer do processo de produção, que formavam grandes depósitos de estoque em processo na cadeia de valor, empurrando o produto para o próximo passo da produção (LIKER, 2005).

Womack *et al* (1992) também mostram como a Toyota aproveitou os ensinamentos de Ford, na criação do fluxo contínuo e, ao mesmo tempo, procurou eliminar as perdas (desperdícios) nas suas atividades de processamento, inspeção e transporte a fim de eliminar a geração de estoques intermediários, de matéria prima, produtos acabados ao longo do sistema de produção.

Para Ohno (1997), estabelecer um fluxo de produção e, uma forma de manter um constante suprimento externo de matérias-primas para as peças a serem produzidas, era a forma como o Sistema Toyota de Produção, ou mesmo o japonês, deveria ser operado.

A idéia básica do TPS é a de manter um fluxo contínuo dos produtos que estão sendo manufaturados, aumentando ou diminuindo a taxa de produção conforme a variação na taxa de

demanda. A realização de tal fluxo de produção é denominada de produção no momento exato, ou *Just-in-Time*, e significa produzir somente os itens necessários na quantidade necessária e no momento necessário. Como resultado, o excesso de inventário e o da força de trabalho são reduzidos naturalmente, obtendo o propósito de aumentar a produtividade e reduzir o custo (MONDEN, 1984).

Para garantir que cada processo fabrique somente a quantidade necessária de produtos, livres de qualquer defeito que possa impedir a sua utilização quando necessário, a Toyota necessitou do suporte de um elemento capaz de eliminar por completo as perdas por super-produção quantitativa e por fabricação de produtos defeituosos. Este elemento é a Autonomia, ou *Jidoka* (GHINATO, 1995). A idéia central é impedir a geração e propagação de defeitos e eliminar qualquer anormalidade no processamento e fluxo de produção. Esse objetivo foi atingido fazendo com que as máquinas e as linhas de montagem parassem sob qualquer sinal de anomalia no processamento.

A Toyota também levou a sério os ensinamentos do pioneiro americano em qualidade W. Edwards Deming. Ele ensinou sobre a qualidade e produtividade em seminários no Japão e apontou que, em um sistema empresarial típico, atender e exceder as exigências dos clientes é tarefa de cada indivíduo em uma organização. Ampliou a definição de cliente, incluindo os clientes internos e externos. Cada pessoa ou passo em um processo deve ser tratado como um “cliente” e receber exatamente o que necessita no tempo certo, ou seja, “o próximo processo é o cliente”, o que se tornou um dos princípios mais importantes do JIT, pois o processo precedente sempre deve fazer o que o processo subsequente indica (LIKER, 2005). Deming também incentivou os japoneses a adotarem uma abordagem sistemática para a solução de problemas, que mais tarde ficou conhecido como PDCA (planejar-fazer-verificar-agir), uma base para a melhoria contínua, ou *Kaizen* em japonês, um dos princípios do TPS.

Dessa forma, com a completa busca pela eliminação dos desperdícios no sistema de produção, buscando alcançar altos padrões de qualidade e atendimento ao cliente e, com o aumento da demanda gerada pela eclosão da guerra da Coreia em 1950, o protecionismo do mercado automobilístico japonês e o excepcional crescimento da economia japonesa entre as décadas de 50 e 60, a Toyota manteve um longo ciclo de expansão.

Paradoxalmente, esse período de crescimento acelerado da economia japonesa ofuscou os resultados do novo sistema que a Toyota estava desenvolvendo. Para Ohno (1997), os gerentes

japoneses, se acostumaram à baixa inflação e às altas taxas de crescimento e perderam a visão no corte dos custos pela eliminação dos desperdícios. Estavam simplesmente adotando o sistema de produção em massa americano, onde os custos unitários eram reduzidos pelo aumento no volume de produção. Nesse período de alto crescimento, tudo que era produzido, era vendido e, assim, a produção em massa demonstrava sua eficiência.

Por esse motivo, mesmo que nos anos 60, o TPS já fosse uma estratégia poderosa que todos os tipos de empresas e de processo poderiam aprender e usar, e que a Toyota já estivesse ensinando seus principais fornecedores, o TPS ainda era muito pouco conhecido fora da Toyota e sua cadeia de suprimentos até a primeira crise do petróleo, em 1973, que levou o mundo a uma recessão, com o Japão entre os países mais atingidos (LIKER, 2005).

Nesse período, os gerentes japoneses, se viram subitamente confrontados com crescimento zero e forçados a lidar com decréscimo de produção. Foi durante essa emergência econômica que eles notaram, pela primeira vez, os resultados que a Toyota estava conseguindo com sua implacável perseguição à eliminação dos desperdícios. Eles começaram a enfrentar o problema de introduzir o sistema nos seus próprios locais de trabalho (OHNO, 1997). O próprio governo japonês percebeu que a Toyota ficou no vermelho por menos tempo que as outras empresas e voltou à lucratividade mais rápido do que o levou a lançar seminários sobre o TPS (LIKER, 2005).

Segundo Mondem (1984), foi nessa época que o sistema desenvolvido pela Toyota tornou-se mais popular em muitos setores da produção japonesa, fora da indústria automotiva. Para o autor, não seria demais dizer que as companhias japonesas venceram a depressão causada pela crise do petróleo pela introdução parcial ou total do TPS.

Para Womack *et al* (1992), mesmo que nem todas as empresas japonesas tivessem adotado com a mesma ênfase o TPS, elas tinham conquistado, em média, até o fim da década de 70, uma grande vantagem sobre os produtores em massa dos outros países e estavam aumentando continuamente sua participação na produção mundial de veículos motorizados, exportando, cada vez mais, de seus complexos produtivos localizados no Japão.

No entanto, essa trilha de desenvolvimento calcado nas exportações, teve um final abrupto em 1979, quando barreiras comerciais foram erguidas na Europa e EUA devido à nova estagnação mundial e ao desequilíbrio da balança comercial com o Japão. A partir da década

seguinte, a Toyota, a Honda e os demais produtores japoneses se viram obrigados a aumentar a participação no mercado mundial mediante investimentos diretos na América do Norte e Europa.

Logo que a revolução da Toyota começou a se fazer sentir fora do Japão, os resultados foram bastante mal interpretados. Algumas explicações se limitavam a apontar os menores salários no Japão, protecionismo do mercado doméstico, apoio financeiro por parte do governo e a adoção generalizada de robôs nas fábricas como o sucesso da produção da Toyota. No entanto, elas não explicavam como as companhias japonesas continuavam avançando nos anos 80, apesar das mudanças cambiais e do maciço movimento dessas empresas em direção à América do Norte e Europa (WOMACK *et al*, 1992). De fato, Cusumano (1984) afirma que foi com a combinação de habilidades de produção e desenvolvimento de produtos, principalmente da Toyota e Honda, que a indústria automobilística japonesa global ultrapassou a indústria americana na produção total pela primeira vez em 1980 (CUSUMANO, 1994).

3.2 Objetivo: Redução dos Desperdícios

O objetivo mais importante do TPS é aumentar a eficiência da produção, reduzindo os custos pela eliminação consistente de desperdícios (OHNO, 1997).

Para Shingo (1996), a maioria das empresas continua determinando o preço de seus produtos utilizando o seguinte princípio básico de custos:

$$\text{Custo} + \text{Lucro} = \text{Preço}$$

Segundo essa lógica, o preço é um resultado de um dado custo de fabricação somado a uma determinada margem de lucro. Ohno (1997) afirma que quando aplicamos esse princípio, fazemos o consumidor responsável por todo custo. Em vez disso, como é o mercado consumidor que determina o preço de venda adequado, a Toyota utiliza o “princípio do não-custo”:

$$\text{Preço} - \text{Custo} = \text{Lucro}$$

Aplicando esta fórmula, que pressupõe que são os consumidores que decidem o preço de venda, o lucro é o que resta, depois de subtrair o custo deste produto final e, portanto, reduzir o custo é a única forma de aumentar o lucro da empresa. Conseqüentemente, a atividade de redução de custos deve ter a mais alta prioridade (SHINGO, 1996). Ao reduzir os desperdícios, os custos também são reduzidos.

Womack e Jones (1998), definem perdas ou desperdício, *Muda*, como toda atividade que consome recurso mas não gera valor. Nesse contexto, Hines e Taylor (2000) afirmam que, dentro de qualquer organização, existem três tipos de atividades:

- a) **atividades que agregam valor:** são atividades que, aos olhos do consumidor final, agregam valor ao produto ou serviço. Ou seja, atividades pelas quais o consumidor ficaria satisfeito em pagar;
- b) **atividades necessárias, mas que não agregam valor:** são atividades que, aos olhos do consumidor final, não agregam valor ao produto ou serviço, mas que são necessárias. São de desperdícios difíceis de serem eliminados em curto prazo e que, portanto, necessitam de um tratamento em longo prazo, ao menos que sejam submetidos a um processo de transformação radical
- c) **atividades desnecessárias e que não agregam valor:** são atividades que, aos olhos do consumidor final, não agregam valor ao produto ou serviço e que são desnecessárias em qualquer circunstância. Essas atividades são nitidamente desperdícios e devem ser eliminadas a curto e médio prazo.

Hines e Taylor (2000) acrescentam ainda, que em ambientes de manufatura esses três tipos de atividades são encontrados, em média, na seguinte proporção:

- a) 5% de atividades que agregam valor (AV);
- b) 60% de atividades que não agregam valor (NAV);
- c) 35% de atividades que não agregam valor, porém necessárias (NAV).

Da mesma forma, Rother e Harris (2002) acrescentam que ao se observar o movimento de um operador trabalhando, será possível observar os três tipos de atividade classificadas, conforme figura 3.1 como:

- a) Agregação de valor;
- b) Trabalho Incidental (necessário, mas devendo ser minimizado);
- c) Desperdícios (deve ser eliminado).

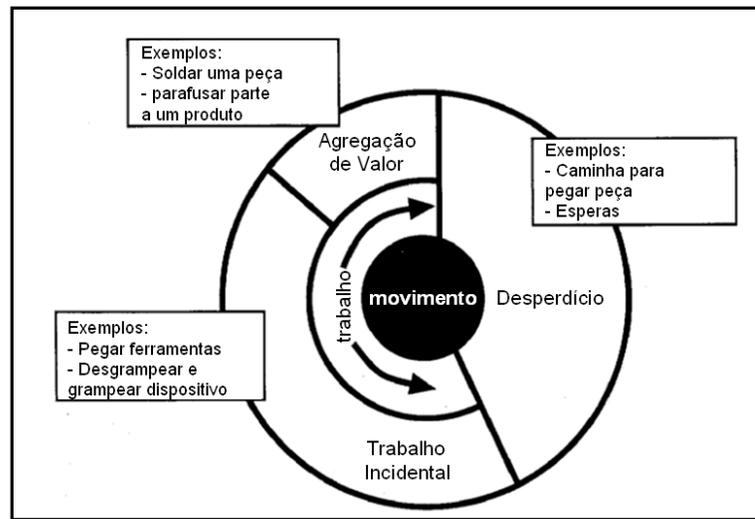


Figura 3.1 - Tipos de Movimentos de Trabalho
 Fonte: Ohno (1997) e Rother e Harris (2002)

Esse cenário sugere grande oportunidade para a otimização dos processos de produção com o direcionamento de todos os esforços de melhoria às atividades que não agregam valor, *Muda*. Essa abordagem diverge do enfoque dos programas de melhorias tradicionais que buscam a otimização das atividades que agregam valor ao produto (figura 3.2).

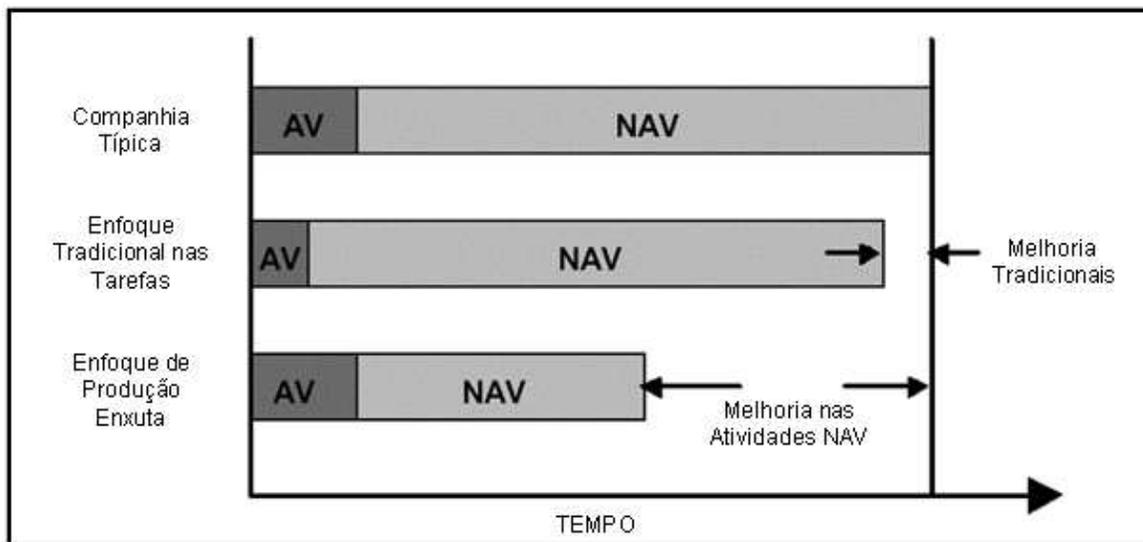


Figura 3.2 - O Enfoque Tradicional nas Tarefas e o Enfoque da Produção Enxuta
 Fonte: Hines e Taylor (2000)

Eliminar desperdícios significa analisar todas as atividades realizadas na fábrica e eliminar aquelas que não agregam valor à produção (CORREA e GIANESI, 1996). Para Ohno (1997), como o passo preliminar para a aplicação do TPS é a identificação completa dos

desperdícios, torna-se necessário entender a sua natureza. Ele os classificou em sete categorias (CORRÊA & GIANESI, 1996; GHINATO, 2002)

- a) Desperdício por superprodução;
- b) Desperdício por espera;
- c) Desperdício por transporte;
- d) Desperdício no próprio processamento;
- e) Desperdício por estoque;
- f) Desperdício por movimentação;
- g) Desperdício por fabricação de produtos defeituosos.

3.2.1 Categorias de Desperdícios

3.2.1.1 Desperdício por Superprodução

De todos os sete desperdícios, a superprodução é o mais prejudicial, pois tem a propriedade de esconder todos os demais e é o mais difícil de ser eliminado.

Existem dois tipos de desperdício por superprodução:

- a) Superprodução Quantitativa: é o desperdício por produzir além do volume programado ou necessário (sobram peças/produtos). É um tipo de desperdício inadmissível sob qualquer hipótese.
- b) Superprodução Antecipada: a perda decorrente de uma produção realizada antes do momento necessário, ou seja, as peças/produtos fabricadas ficarão estocadas aguardando a ocasião de serem consumidas ou processadas por etapas posteriores.

3.2.1.2 Desperdício por Espera

Este desperdício refere-se ao material que está esperando para ser processado formando filas que visam garantir altas taxas de utilização dos equipamentos. Existem três tipos de desperdício por espera:

- a) **Espera no Processo:** o lote inteiro aguarda o término da operação que está sendo executada no lote anterior, até que a máquina, dispositivos e/ou operador estejam disponíveis para o início da operação (processamento, inspeção ou transporte);
- b) **Espera do Lote:** representa a espera a que cada peça componente de um lote é submetida até que todas as peças do lote tenham sido processadas para, então, seguir para o próximo passo ou operação. Em resumo, o lote de transferência é igual ao lote de processamento.
- c) **Espera do Operador:** que é a ociosidade devido ao desbalanceamento de operações.

3.2.1.3 Desperdício por Transporte

A atividade de transporte e movimentação de materiais não agrega valor ao produto e só é necessária devido a restrições do processo e das instalações, que impõe grandes distâncias a serem percorridas pelo material ao longo do processamento. Encaradas como desperdícios de tempo e recursos, as atividades de transporte e movimentação devem ser eliminadas ou reduzidas ao máximo, por meio da elaboração de um arranjo físico adequado, que minimize as distâncias a serem percorridas. A otimização do transporte é, no limite, a sua completa eliminação.

3.2.1.4 Desperdício no Próprio Processamento

São parcelas do processamento que poderiam ser eliminadas sem afetar as características e funções básicas do produto/serviço. Nesse sentido, torna-se importante a aplicação das metodologias de engenharia e análise de valor, que consistem na simplificação ou redução do número de componentes ou operações necessários para produzir determinado produto. Qualquer elemento que adicione custo e não valor ao produto é candidato a investigação e eliminação.

3.2.1.5 Desperdício por Estoque

É a perda sob a forma de estoque de matéria-prima, material em processamento e produto acabado que significam desperdício de investimento e espaço. Uma grande barreira ao combate desse desperdício é a “vantagem” que os estoques proporcionam de aliviar os problemas de sincronia entre os processos. Essa vantagem é, na realidade, o efeito danoso que os estoques têm de ocultar os demais desperdícios.

3.2.1.6 Desperdício por Movimentação

O desperdício por movimentação relaciona-se aos movimentos desnecessários realizados pelos operadores na execução de uma operação. Esse tipo de perda pode ser eliminado por meio de melhorias baseadas no estudo de tempos e movimentos ou pela mecanização de operações, transferindo para a máquina atividades manuais realizadas pelo operador.

Tipicamente, a introdução de melhorias como resultado do estudo dos movimentos pode reduzir os tempos de operação em 10 a 20%. Já, a introdução de melhorias nas operações via mecanização é recomendada somente após terem sido esgotadas todas as possibilidades de melhorias na movimentação do operário e eventuais mudanças nas rotinas das operações.

3.2.1.7 Desperdício por Fabricação de Produtos Defeituosos

O desperdício por fabricação de produtos defeituosos é o resultado da geração de produtos que apresentem alguma de suas características de qualidade fora de uma especificação ou padrão estabelecido e que por esta razão não satisfaçam a requisitos de uso. Significa desperdiçar materiais, disponibilidade de mão-de-obra, disponibilidade de equipamentos, movimentação de materiais defeituosos, armazenagem de materiais defeituosos, inspeção de produtos, entre outros.

O processo produtivo deve ser desenvolvido de maneira tal que previna a ocorrência de defeitos e que possam eliminar as inspeções. Os defeitos não devem ser aceitos e não devem ser gerados.

3.2.2 Muda, Mura, Muri

No TPS, o conceito de Muda vem acompanhado de outros dois efeitos comuns aos ambientes de produção, Mura e Muri. Em conjunto, eles formam os três “Ms” que devem ser perseguidos e eliminados para se atingir a produção enxuta (OHNO, 1997, LIKER, 2005 e LEAN ISNTITUTE, 2003):

- a) **Muda** - Desperdício: Como já vimos, representam todo tipo de atividade que não agrega valor, aumentam os *lead times* de produção, criam excesso de inventário, movimentação e transporte extras produtos defeituosos e algum tipo de espera.
- b) **Muri** - Despropósito ou Sobrecarga de Equipamentos e Pessoas: Significa colocar uma máquina ou pessoa trabalhando além de seus limites naturais. Exigir que pessoas e equipamentos trabalhem a um ritmo mais intenso ou acelerado, empregando mais força ou esforço, por um período maior de tempo do que podem suportar. Sobrecarga de pessoas causa problemas de segurança e qualidade. Sobrecarga de equipamentos causa interrupções e defeitos.
- c) **Mura** - Irregularidade ou Desnívelamento: Em sistemas de produção, às vezes há mais trabalho do que se pode realizar e outras vezes há falta de trabalho, ociosidade. Este desnívelamento resulta em uma programação de produção irregular ou de volumes de produção flutuantes devido a problemas internos como paralisações, falta de peças ou defeitos.

Os três conceitos acima estão frequentemente relacionados (figura 3.3), de forma que a presença de um é geralmente acompanhada pela presença dos demais. Porém, a eliminação de um ajuda na eliminação dos outros.

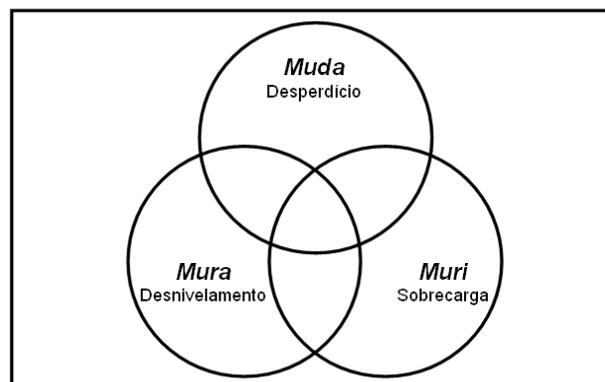


Figura 3.3 - Os Três Ms do TPS
Fonte: Liker (2005)

3.3 A Casa do Sistema Toyota de Produção

Segundo Liker (2005) a Casa do TPS, figura 3.4, um dos símbolos mais facilmente reconhecíveis da indústria moderna, foi desenvolvida por Fujio Cho, discípulo de Taiichi Ohno, para difundir o TPS. Ela representa um sistema estrutural que só é forte se o telhado, as colunas e as fundações são fortes.

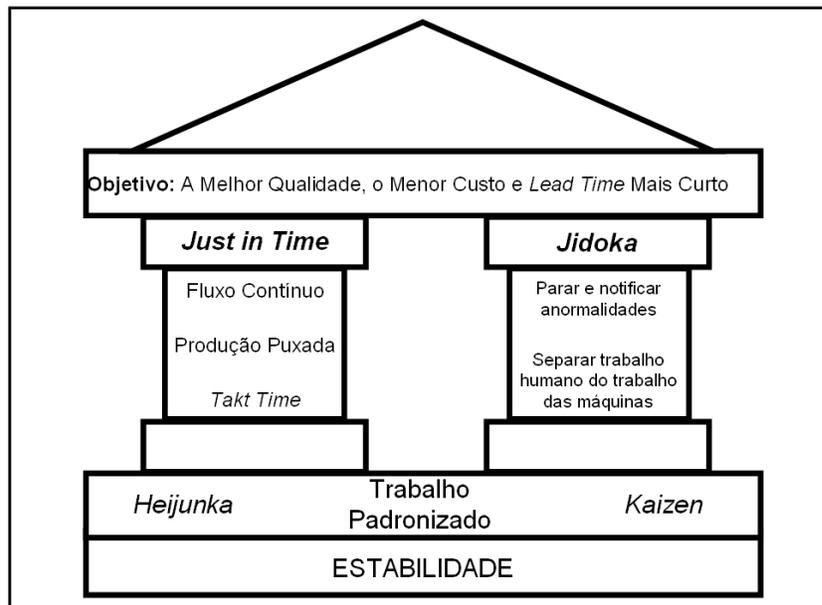


Figura 3.4 - A Casa do TPS

Fonte: adaptado de Lean Institute (2003).

O telhado representa as metas e objetivos do TPS que são fornecer a melhor qualidade, o menor custo e o *lead time* mais curto por meio da eliminação dos desperdícios (LEAN INSTITUTE, 2003).

Segundo Ohno (1997), o TPS é formado por dois pilares necessários à sustentação do sistema: o *Just-in-Time*, que significa que cada processo receba o item correto, no momento correto e na quantidade correta, e o *Jidoka* ou Autonomia, que desempenha a dupla função de eliminar a superprodução e evitar a produção de produtos defeituosos.

Just-in-Time significa que, em um processo de fluxo, as partes corretas necessárias à montagem alcançam a linha de montagem no momento em que são necessários e somente na quantidade necessária (OHNO, 1997). Se JIT é realizado em toda a empresa, então inventários desnecessários na fábrica são completamente eliminados, tornando grandes almoxarifados e

depósitos desnecessários. O custo de manter estoques é reduzido e a rotatividade do capital de giro aumentada (MONDEN, 1984).

Do ponto de vista da gestão da produção esse é um estado ideal. Entretanto um produto feito com milhares de componentes, o número de processos envolvidos é enorme. Obviamente, é muito difícil aplicar esse fluxo ao plano de produção de todos os processos de forma ordenada, pois os problemas no início do processo, como uma falha na previsão, produtos defeituosos e retrabalho, problemas com equipamentos e absenteísmo, sempre resultam em um produto defeituoso ou falta de produtos no final do processo, o que irá parar a linha de produção ou alterar o plano. Ao desconsiderar tais situações e considerando apenas o plano de produção para cada processo, as partes seriam produzidas sem preocupação com os processos seguintes. O resultado seria desperdício - componentes defeituosos, de um lado, imensos estoques de componentes desnecessários, de outro. Isto reduziria tanto a produtividade quanto a lucratividade. Portanto, para produzir usando o JIT de forma que cada processo receba o item exato necessário, quando for necessário e na quantidade necessária, os métodos convencionais de gestão não funcionam bem (OHNO, 1997).

Portanto, no TPS, é necessário ver o fluxo de produção inversamente. Qualquer processo deve produzir somente a quantidade suficiente de unidades para atender a necessidade do cliente, ou processo cliente. Nessa forma inversa, o processo de fabricação, vai do produto acabado ao início do processo e cada elo da cadeia JIT está conectado e sincronizado (OHNO, 1997). Essa conexão e sincronização se dão por meio do fluxo contínuo ou da produção puxada e é cadenciada pelo *Takt Time*.

Segundo Ghinato (2000), o objetivo do JIT é identificar, localizar e eliminar as perdas, garantindo um fluxo contínuo de produção e sua viabilização depende de três elementos intrinsecamente relacionados, o fluxo contínuo, a produção puxada e o *Takt Time*, que serão vistos em seções subsequentes.

A idéia do *Jidoka* teve início na Toyoda Spinning and Weaving com a invenção, por Sakichi Toyoda, da máquina de tecer auto-ativada. O tear parava instantaneamente se qualquer um dos fios da urdidura ou da trama se rompesse. Dessa forma, com um dispositivo que podia distinguir entre condições normais e anormais inserido na máquina, produtos defeituosos não eram produzidos (OHNO, 1997). Antes disso, se um fio quebrasse, o tear continuaria funcionando e os resultados eram grandes quantidades de tecido com defeito.

Esse conceito não deve ser confundido com a simples automação. De fato, a palavra japonesa *Ninben no aru Jidoka* expressa o significado correto desse pilar, que é a verificação autônoma de irregularidade no processo (MONDEM, 1984). Para Ohno (1997), o *Jidoka*, ou Automação, significa dotar a máquina de inteligência humana.

No TPS, praticamente todas as máquinas, sejam novas ou velhas, são automatizadas com um toque humano, o que significa que possuem algum dispositivo de parada automática associados a demais mecanismos de segurança, parada de posição fixa e sistemas *Bakayoke* (ou *Pokayoke*, “a prova de erro”) com o claro objetivo de impedir a produção de produtos defeituosos.

Para Ohno (1997), esse mecanismo muda o significado da gestão pois permite a separação do homem da máquina à medida que um operador não será necessário enquanto a máquina estiver funcionando normalmente. Apenas quando a máquina pára devido a uma situação anormal é que ela recebe atenção humana. Como resultado, um trabalhador pode atender diversas máquinas, tornando possível reduzir o número de operadores e aumentar a eficiência da produção.

Outro resultado, que também aumenta a eficiência da produção, é a exposição dos problemas e anormalidades. Quando um problema é evidenciado e claramente compreendido, torna-se possível uma melhoria no processo. Do contrário, quando um trabalhador toma conta de uma máquina e fica parado atento a ela para quando ocorrer uma anormalidade, os problemas ficam ocultos e os custos nunca serão reduzidos.

O conceito de um mecanismo de controle autônomo, capaz de distinguir entre condições normais e anormais de trabalho e de evidenciar as anormalidades para que sejam eliminadas foi expandido para as linhas de produção operadas manualmente, estabelecendo-se uma regra de que os próprios operadores devem acionar um botão de parada para interromper a produção assim que qualquer anormalidade for detectada (OHNO, 1997).

A idéia central, portanto, é impedir a geração e propagação de defeitos e eliminar qualquer anormalidade no processamento e fluxo de produção. Quando a máquina interrompe o processamento ou o operador pára a linha de produção, imediatamente o problema torna-se visível ao próprio operador, aos seus colegas e à sua supervisão. Isto desencadeia um esforço conjunto para identificar a causa fundamental e eliminá-la, evitando a reincidência do problema e consequentemente reduzindo as paradas da linha (GHINATO, 2000).

Os pilares JIT e *Jidoka* estão assentados sobre uma base formada por uma ferramenta muito importante, o trabalho padronizado, e por dois princípios, o *Heijunka*, que é o nivelamento da produção e significa nivelar a programação da produção tanto em volume quanto em variedade, e o *Kaizen* ou melhoria contínua. Cada um desses elementos em si só é crítico, mas mais importante é o modo como os elementos reforçam uns aos outros (LIKER, 2005).

3.4 Princípios da Produção Enxuta - *Lean Thinking*

Womack e Jones (1998) definem os cinco princípios do *Lean Thinking*, o pensamento enxuto, fundamentais para a eliminação do desperdício e que tornam a empresa mais flexível e capaz de responder efetivamente às necessidades dos clientes. Para Hines e Taylor (2000) esses princípios devem ser um guia para todas as organizações que desejam implementar a produção enxuta.

Segundo Womack e Jones (1998), esses princípios são aplicáveis a qualquer tipo de organização e são uma forma de especificar valor, alinha na melhor sequência as atividades que agregam valor, realizar essas atividades sem interrupção toda vez que alguém as solicita e realizá-las de forma cada vez mais eficaz.

3.4.1 Valor

O ponto de partida essencial para o pensamento enxuto é a especificação do valor, ou seja, definir detalhadamente o significado de valor de um produto a partir da perspectiva do cliente final, em termos das suas especificações como preço e prazo de entrega.

O valor deve ser definido do ponto de vista do cliente final e só é significativo quando expresso em termos de um produto específico que atenda às necessidades do cliente a um preço específico em um momento específico.

Muitas empresas têm dificuldade em definir o valor certo porque embora a criação de valor frequentemente flua através de muitas empresas, cada uma tende a definir valor da forma mais adequada às próprias necessidades.

3.4.2 Fluxo de Valor

Identificar o fluxo de valor, ou cadeia de valor (*value stream*) para cada produto, ou família de produtos, incluindo os dados de cada operação de transformação necessária, bem como as características deste fluxo e o fluxo de informação inerente a esta família ou produto.

O fluxo de valor é o conjunto de todas as ações específicas necessárias para se levar um produto específico a passar pelas três tarefas gerenciais críticas em qualquer negócio: a tarefa de solução de problemas que vai da concepção até o lançamento do produto passando pelo projeto detalhado e pela engenharia; a tarefa de gestão da informação, que vai do recebimento do pedido até a entrega, seguindo um detalhado cronograma; e a tarefa de transformação física, que vai da matéria-prima ao produto acabado nas mãos do cliente.

Este princípio parte da premissa simples de que as atividades que não podem ser medidas não podem ser adequadamente geridas, as atividades necessárias para criar, pedir e produzir um produto específico que não possam ser precisamente identificadas, analisadas e associadas não podem ser questionadas, melhoradas (ou inteiramente eliminadas) e, por fim, aperfeiçoadas.

O objetivo inicial é a criação de um mapa do fluxo de valor que identifique as ações necessárias para projetar, pedir e produzir um produto específico e dividi-las nas três categorias de atividades descritas anteriormente: as que realmente agregam valor, as que não agregam valor, mas são necessárias no estágio atual e as ações que não agregam valor conforme percebido pelo cliente final e, portanto, devem ser eliminadas imediatamente.

Na seção 3.9 será apresentado uma ferramenta para fazer o Mapeamento do Fluxo de Valor, o MFV, que contribui para compreender o fluxo completo de uma família de produtos, identificar os desperdícios e fontes dos desperdícios, além de integrar princípios e ferramentas da produção enxuta evitando a implementação de algumas técnicas separadamente (ROTHER E SHOOK, 2003).

3.4.3 Fluxo Contínuo

Uma vez definido o valor, identificadas as atividades que geram desperdícios, é necessário fazer com que as etapas restantes, que agregam valor, fluam sem interrupções.

A tarefa constitui em focalizar um objeto específico, um produto, por exemplo - poderia ser também um projeto ou um pedido específico - e garantir que este objeto seja processado do início à conclusão, ignorando as fronteiras tradicionais de tarefas, profissionais, funções, departamentos e empresas, eliminando todos os obstáculos ao fluxo do produto ou família de produtos e repensar as práticas e ferramentas de trabalho específicas, a fim de eliminar os retrofluxos, retrabalhos e paralisações de forma que todas as etapas do processo possam seguir continuamente.

Esse princípio exige uma mudança de mentalidade pois é frequente a percepção de que as atividades semelhantes devem ser agrupadas por tipo, para serem gerenciadas mais facilmente, e executadas em lotes, para serem realizadas de forma mais eficiente.

Segundo Storch e Lim (1999), desenvolver e manter um fluxo contínuo e uniforme, em que todos os processos ao longo do fluxo de valor possam manter o ritmo em um padrão sincronizado dos processos de criação de valor ao longo do fluxo de valor, é a chave para conseguir atingir a produção enxuta. Uma revisão mais detalhada sobre o fluxo contínuo será realizada na seção 3.6.1.

3.4.4 Produção Puxada

A produção puxada significa produzir somente os itens certos, na quantidade certa e no momento certo, de forma que o processo inicial não produza um bem ou serviço sem que o cliente de um processo posterior o solicite.

Em outras palavras, o ritmo da demanda do cliente final deve repercutir ao longo de toda a cadeia de valor, desde o armazém de produtos acabados até os fornecedores de matérias-primas, com a informação de produção fluindo em sentido contrário ao fluxo dos materiais (GHINATO, 2000). Este princípio tem por objetivo evitar a superprodução, mantendo uma coordenação entre

os processos clientes e fornecedores e deve ser implementado sempre que o fluxo contínuo não for possível (LIKER, 2005).

Apesar deste princípio muitas vezes ser confundido com o sistema *Kanban*, o sistema de coordenação de ordens criado por Ohno para puxar a produção, ele envolve uma série de conceitos mais abrangentes que serão apresentados na seção 3.8.1. Uma definição mais detalhada sobre a produção puxada e os sistemas de coordenação de ordens que puxam a produção também será realizada na seção 3.6.3.

3.4.5 Perfeição

Buscar incessantemente a melhoria do fluxo de valor por meio de um processo contínuo de redução dos desperdícios.

À medida que a organização começar a especificar o valor com precisão, identificar a cadeia de valor como um todo, fazer com que as etapas para a criação de valor referente fluam continuamente e, deixar que os clientes puxem o valor da empresa, tem início um processo de melhoria contínua.

Isto se dá, pois os quatro princípios anteriores interagem entre si em um círculo poderoso. Equipes de produtos dedicadas, em diálogo direto com clientes, encontram formas de especificar o valor com maior precisão. Puxar a produção a partir da demanda do cliente e fazer com que o valor flua mais rapidamente através de uma cadeia de valor bem definida expõe os desperdícios (*muda*) e obstáculos ocultos nesta cadeia, permitindo sua eliminação.

3.5 Modelo Toyota

Os princípios fundamentais da produção enxuta, com foco nos processos de produção, vistos na seção anterior, em conjunto com alguns princípios complementares que têm por objetivo a solução de problemas, o desenvolvimento de funcionários e parceiros e uma filosofia de longo prazo, formam os 14 princípios do Modelo Toyota.

Liker (2005) deixa claro que o TPS não é o Modelo Toyota em si, mas que o TPS está relacionado com a aplicação dos princípios do Modelo Toyota e que esses princípios possibilitaram o desenvolvimento e o sucesso do Sistema Toyota de Produção e, por consequência, do que chamamos de produção enxuta.

Os 14 princípios do Modelo Toyota, apresentados na figura 3.5, que impulsionaram as técnicas e ferramentas do TPS estão divididos em quatro categorias, ou os 4 “Ps” (do nome de cada categoria em inglês):

- a) **Filosofia** (*Philosophy*) de longo prazo: O foco constitui em fornecer valor aos clientes e à sociedade. Isto impulsiona a abordagem de longo prazo para a construção de uma organização de aprendizagem capaz de adaptar-se às mudanças do ambiente e sobreviver como organização produtiva:
 - **Princípio 1:** Basear as decisões administrativas em uma filosofia de longo prazo, mesmo em detrimento de metas financeiras de curto prazo.
- b) **Processos** (*Process*): A Toyota é uma empresa orientada a processo que acredita que o processo certo produzirá os resultados certos. O autor afirma que dentro desses sete princípios encontram-se a maioria dos instrumentos do Sistema Toyota de produção, que seriam um aspecto operacional no Modelo Toyota como um todo:
 - **Princípio 2:** Criar um fluxo contínuo de processo para trazer os problemas à tona;
 - **Princípio 3:** Usar produção puxada para evitar a superprodução;
 - **Princípio 4:** Nivelar a carga de trabalho (*Heijunka*). Trabalhar como a tartaruga, não como a lebre;
 - **Princípio 5:** Autonomia. Construir uma cultura de parar e resolver os Problemas, obtendo a qualidade logo na primeira tentativa;
 - **Princípio 6:** Tarefas padronizadas são a base para a melhoria continua e a capacitação dos funcionários;
 - **Princípio 7:** Usar gestão visual para que nenhum problema fique oculto.
 - **Princípio 8:** Usar somente tecnologia confiável e completamente testada que atenda aos funcionários e processos.

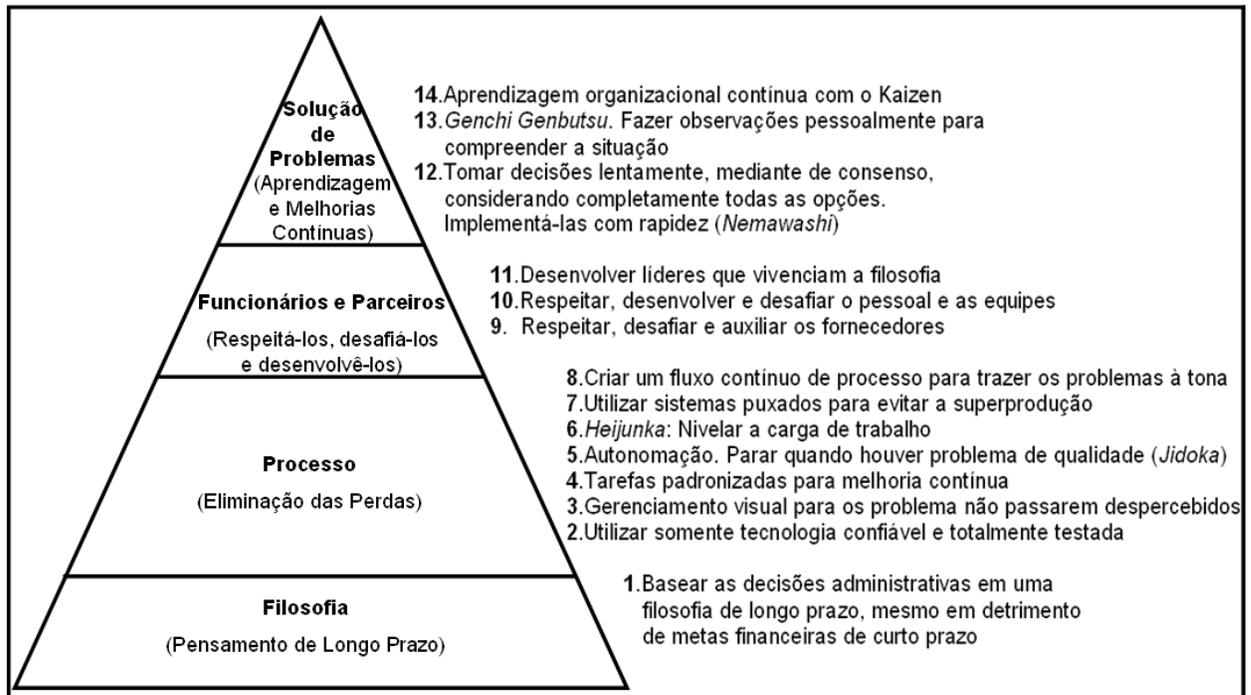


Figura 3.5 - 4 Ps - Os 14 Princípios do Modelo Toyota
 Fonte: adaptado de Liker (2005)

- c) **Pessoas e Parceiros (*People and Partners*):** Valorização da organização por meio do desenvolvimento de seus funcionários e parceiros:
- **Princípio 9:** Desenvolver líderes que compreendam completamente o trabalho, que vivam a filosofia e a ensinem aos outros.
 - **Princípio 10:** Desenvolver pessoas e equipes excepcionais que sigam a filosofia da empresa.
 - **Princípio 11:** Respeitar sua rede de parceiros e de fornecedores desafiando-os e ajudando-os a melhorar.
- d) **Solução de Problemas (*Problem Solving*):** A identificação das causas e solução contínua de problemas básicos, impedindo que voltem a ocorrer, impulsiona a aprendizagem contínua organizacional:
- **Princípio 12:** Ver por si mesmo para compreender completamente a situação (*genchi genbutsu*);
 - **Princípio 13:** Tomar decisões lentamente por consenso, considerando completamente todas as opções; implementá-las com rapidez;

- **Princípio 14:** Tornar-se uma organização de aprendizagem por meio da reflexão incansável (*hansel*) e da melhoria contínua (*Kaizen*).

3.6. Princípios e Elementos de Controle da Produção Enxuta

A seguir será realizada uma revisão mais detalhada dos princípios e conceitos definidos anteriormente ligados ao fluxo de materiais e informações da Produção Enxuta e de algumas ferramentas necessárias para alcançar tais princípios.

3.6.1 Fluxo Contínuo

O princípio do fluxo contínuo foi primeiramente utilizado, com grande eficiência, nas linhas de montagem criadas por Henri Ford. No sistema criado por Ford, o material usinado é transportado em correias transportadoras para serem transformadas em peças de montagem. Os componentes de vários tipos são então fornecidos a cada um dos processos de montagem finais, sendo que a própria linha de montagem se movimenta a uma velocidade regular, enquanto as peças são montadas para finalmente tornarem-se carros totalmente montados saindo da linha, um a um (OHNO, 1997). Ford, em seu livro “*Today and Tomorrow*”, prega, também, a importância de criar um fluxo contínuo de material no decorrer do processo de produção, além de padronizar os processos e eliminar as perdas. Entretanto, sua empresa nem sempre se empregava tais conceitos, pois enquanto pregava o fluxo contínuo nas linhas de montagem, utilizava métodos esbanjadores de produção em grandes lotes dos componentes no decorrer do processo de produção, que formavam grandes depósitos de estoque em processo na cadeia de valor, empurrando o produto para o próximo passo da produção (LIKER, 2005).

Portanto, a Toyota precisou idealizar um sistema novo, utilizando a idéia original de Ford, de fluxo contínuo de material, como era realizado na linha de montagem, para desenvolver um sistema de fluxo unitário de peças, ao longo de todo o processo produtivo, que fosse flexível e mudasse de acordo com a demanda dos clientes.

Então, um bom lugar para qualquer empresa começar a jornada rumo à produção enxuta é criar um fluxo contínuo, onde for possível aplicá-lo, em seus principais processos de fabricação e serviços. O fluxo contínuo está no centro do conceito enxuto, de que a redução do intervalo de tempo entre a matéria prima e os produtos acabados leva a uma melhor qualidade, a um menor custo e a um menor prazo de entrega. Este princípio também tende a forçar a implementação de outros princípios e algumas ferramentas da produção enxuta, uma vez que eliminado os estoques intermediários entre as operações e fazendo o material fluir unitariamente de uma estação para a outra, situações de ineficiência são expostas e passam a exigir soluções imediatas (LIKER, 2005).

Embora, a implementação de um fluxo contínuo ao longo do fluxo de valor normalmente esteja relacionado à reorganização do *layout* fabril, que será apresentado mais adiante, este é apenas um passo em direção a este princípio pois, o que realmente conduz ao fluxo contínuo é a capacidade de implementar um fluxo unitário (um a um) de produção, onde, no limite, os estoques entre processos sejam completamente eliminados. Esse fluxo unitário leva, no limite, à eliminação completa dos estoques intermediários, garantindo assim a eliminação das perdas por estoque, perdas por espera e obtendo a redução do *lead time* de produção (GHINATO, 2000).

Rother e Shook (2003) afirmam que o fluxo contínuo é o modo mais eficiente de se produzir um bem e significa produzir uma peça de cada vez, com cada item sendo passado imediatamente de um estágio do processo para o seguinte sem nenhuma parada (e muitos outros desperdícios) entre eles.

Para Rother e Harris (2002), o fluxo contínuo é o objetivo principal da produção enxuta e criá-lo tem sido alvo de inúmeros projetos de melhoria. Idealmente os produtos deveriam fluir continuamente pelo fluxo total de valor, da matéria prima ao produto acabado. Para Shingo (1996), este é o objetivo final do TPS, um sistema ideal, muito difícil de ser atingido, no qual todos os materiais, desde a matéria prima, forjados, fundidos e prensados, até usinagem, montagem inicial, sub-montagens e montagem final esteja encadeado em um fluxo contínuo de peças unitárias.

Naturalmente, o ideal de fluxo unitário de peças não é a realidade em qualquer situação de produção. Ninguém pode simplesmente agrupar máquinas e fornecedores repentinamente e forçar um fluxo unitário de peças onde ele não for adequado. Como será apresentado na próxima seção, alguns *buffers* (pulmões ou estoques amortecedores) devem ser definidos onde o fluxo contínuo não for possível, pelo menos temporariamente. Porém, o ideal de fluxo contínuo, unitário, de

peças oferece uma direção clara (LIKER, 2005). Na produção enxuta, isso significa o uso de pequenos lotes de produção, os menores possíveis, a aproximação dos processos em células de manufatura e a manutenção do material em movimento através dos processos sem interrupção.

Segundo Shingo (1996), o fluxo unitário de peças através dos processos tem como resultado reduções radicais no *lead time* de produção. Este fluxo unitário pode ser conseguido seguindo as etapas abaixo:

- a) Balanceamento
- b) Reduzir o tamanho dos lotes de transferência para um;
- c) Melhorar *layout*;
- d) Reduzir o tamanho do lote de processamento.

3.6.1.1 Balanceamento

Balanceamento das quantidades de produção entre os processos e sincronização de todos os processos para eliminar as esperas de processo. Esta etapa equivale a balancear o fluxo de produção (um dos princípios da TOC) e exige que mesmo que a capacidade de cada processo seja diferente, os processos devem ter a mesma velocidade, ou seja, produzir no mesmo ritmo. Isto irá obrigar uma redução na velocidade dos processos mais velozes.

3.6.1.2 Lote de Transferência

Reduzir o tamanho dos lotes de transferência para um, para eliminar as esperas do lote. Em geral, as demoras causadas pelas esperas dos lotes, ou seja, por um lote de transferência igual ao lote processamento, estão ocultas na forma de tempo de processamento.

Mondem (1984) utiliza o exemplo da figura 3.6 para explicar como a redução do tamanho dos lotes de transferência pode reduzir o *lead time* do processo, mesmo sem alterar o tamanho dos lotes de processamento, ou seja, sem a necessidade de se realizar mais trocas de ferramenta. Suponhamos que para produzir 600 unidades de um determinado produto, sejam necessários três processos e que cada um gaste um minuto para a produção de uma unidade. No primeiro caso,

onde as unidades são fabricadas e transportadas em lote, são necessários 600 minutos (10 horas) para que este lote seja processado em cada processo e, no mínimo, 30 horas para a conclusão de todo o lote. Porém, se cada unidade for para o processo subsequente tão rapidamente quanto for processada pelo processo precedente, os processos dois e três poderão operar no mesmo tempo do primeiro. O processo dois terá que aguardar somente um minuto para receber a primeira unidade, e o processo três, apenas mais um minuto. Portanto, para processar as 600 unidades serão necessários apenas 602 minutos (600 minutos + 1 minuto + 1 minuto).

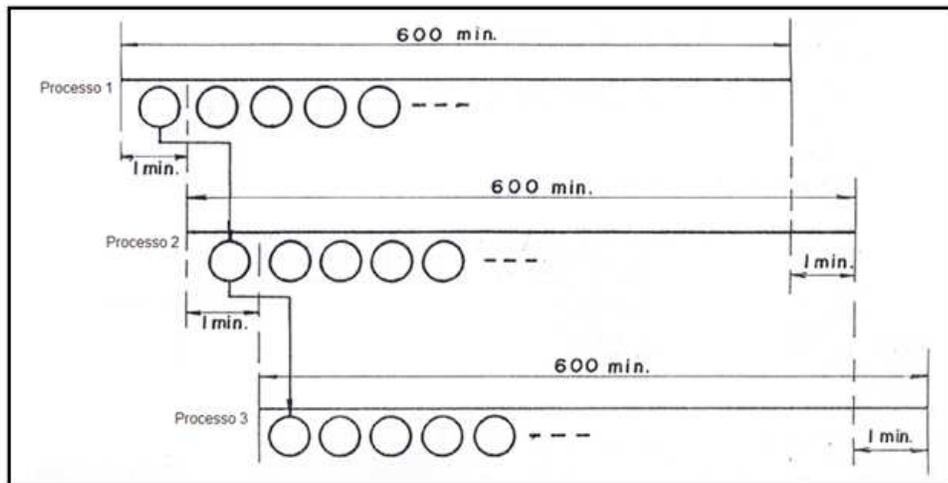


Figura 3.6 - Relação entre Processos e Tempo de Processamento
Fonte: Monden (1984)

3.6.1.3 Layout

Melhorar o *layout* para reduzir a necessidade de transporte. Esta etapa exige a modificação dos convencionais *layouts* funcionais, onde os processos semelhantes estão agrupados por função, em *layouts* celulares.

A formação de células de manufatura traz uma segunda vantagem, além de possibilitar o fluxo unitário, contínuo, de materiais ao longo de processo, que é o de possibilitar o emprego flexível de mão de obra por meio de trabalhadores multifuncionais, ou *Shojinka*. Segundo Mondem (1984) o *layout* em U é um dos pré-requisitos para se atingir o *Shojinka*, que significa variar o número de operadores em uma linha/célula quando a demanda é alterada.

Segundo Giansesi e Correa (1996), o *layout* celular, associado à técnica denominada tecnologia de grupo, procura trazer as vantagens do *layout* em linha, no qual os recursos estão

dispostos segundo o roteiro de produção dos produtos, sem restringir demais a variedade possível de produtos, ou seja, mantendo uma certa flexibilidade. Em termos simples, a tecnologia de grupo é uma técnica que permite o agrupamento de componentes fabricados em famílias cuja característica principal em comum são os roteiros de fabricação. Para Nazareno (2003), a tecnologia de grupo é uma técnica que define a solução de problemas explorando semelhanças, para se obter vantagens operacionais e econômicas mediante um tratamento de grupo. Na produção, buscam-se as características semelhantes no projeto ou no processo de produção, os roteiros, para a formação de células de manufatura.

Shingo (1996) afirma que, apesar desta reorganização do *layout* fabril trazer diversas vantagens, pode apresentar certas dificuldades como o balanceamento das capacidades de cada máquina dentro da linha/célula. O autor, porém, deixa claro que, conforme a etapa I, o importante é balancear as quantidades de produção e, portanto, desde que a máquina mais lenta seja capaz de produzir a quantidade necessária, essa diferença na capacidade das máquinas não é considerado um fator relevante pois, para um sistema sem estoque, não será permitida às máquinas mais rápidas produzirem mais que o necessário. Gianesi e Correa (1996) afirmam ainda que outras desvantagens na mudança para este tipo de arranjo físico são a redução da flexibilidade do sistema de produção em relação ao *layout* funcional e a menor utilização de algumas máquinas dedicadas a uma das células.

Por estas razões, Silva (2009) apresenta o arranjo de *layout* de Mini-Fábrica (figura 3.7) que, embora não ofereçam todas as vantagens do *layout* celular, é mais flexível e pode ser utilizado quando a variedade de produtos em uma mesma família de produtos for maior ou quando algumas máquinas não puderem ser dedicadas exclusivamente a poucos produtos. Esse *layout* é mais eficiente que o *Job Shop* pois os recursos já estão organizados em ilhas de produção, dedicadas a uma determinada família de produtos, porém são mais flexíveis, e portanto menos eficientes, que as células já que possibilitam um fluxo de produtos mais flexível, ou seja, possibilita um fluxo multi-direcional, enquanto o *layout* celular exige um fluxo unidirecional.

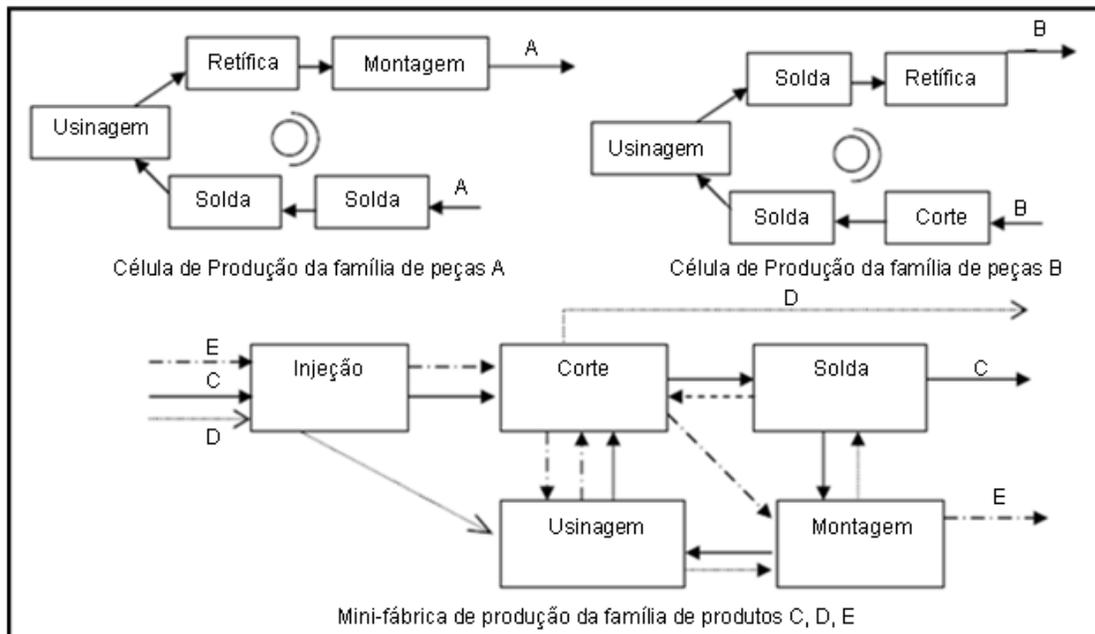


Figura 3.7 - Diferenças entre Célula e Mini-Fábrica
 Fonte: Silva e Rentes (2002)

3.6.1.4 Lote de Processamento

Reduzir o tamanho do lote de processamento por meio da implementação do sistema de troca rápida de ferramenta SMED (*Single Minute Exchange of Dies and Tools*). O objetivo é reduzir os tempos de troca, em um primeiro momento, para menos de 10 minutos, um dígito de minuto e, posteriormente, para menos de um minuto por meio de *setups* em um único toque (SHINGO, 1996).

Segundo esse autor, reduzir o tempo de preparação ajuda a melhorar a produção como um todo e o SMED tem sido um elemento fundamental no desenvolvimento do TPS e, portanto, da produção enxuta. Ele está baseado em uma série de técnicas, que serão apenas apresentadas abaixo, pois não é o objetivo desta dissertação explicar detalhadamente as técnicas do SMED:

- Separação das ações de *setup* interno em externo;
- Converter *setup* interno em *setup* externo;
- Padronizar a função e não a forma, ou seja, padronizar as peças necessárias às operações de *setup* e não a forma das matrizes;
- Utilizar grampos funcionais ou eliminar a necessidade de grampos;

- e) Utilizar dispositivos intermediários padronizados;
- f) Adotar operações paralelas, com mais de uma pessoa;
- g) Eliminar ajustes,
- h) Mecanização. Só deve ser realizado após a total linearização das atividades de *setup* por meio das técnicas anteriores,

Segundo Shingo (1996), embora a utilização das técnicas de troca rápida de ferramentas possa elevar de forma significativa as taxas de utilização das máquinas e operadores, este nunca foi o foco para sua utilização. Ao invés disso, os objetivos principais do SMED são possibilitar a redução do tamanho dos lotes de processamento e atender rapidamente a variações na demanda atingindo, dessa forma, a redução drástica dos estoques em processo e de produtos acabados. Goldratt (1996) afirma que o objetivo de Ohno e sua equipe ao implementar o SMED na Toyota também não era reduzir os custos de *setup* e sim realizar mais *setups* de forma a melhorar o fluxo de materiais por meio da redução dos lotes de processamento.

Para concluir esta seção, deve-se ressaltar que o fluxo contínuo é o primeiro padrão de fluxo que uma empresa que busca implementar a produção enxuta deve perseguir. Para Storch e Lim (1999) desenvolver e manter um fluxo contínuo e uniforme dos processos de criação de valor ao longo do fluxo de valor é a chave para conseguir atingir a produção enxuta.

Portanto, nesta dissertação, o princípio do fluxo contínuo significa um fluxo unitário de peças, ou seja, lotes de transferência igual a um, através de uma cadeia de recursos dedicados a uma família de produtos, organizados na sequência de fabricação desses produtos, trabalhando de forma sincronizada e balanceada, ou seja, sob o mesmo ritmo de produção, de forma que qualquer problema na linha faça com que o fluxo completo pare, evidenciando os desperdícios e evitando que produtos defeituosos sejam passados adiante e a geração e acúmulo de estoque em processo no fluxo de valor.

3.6.2 Takt Time - A Gestão Baseada no Takt Time

O termo alemão “*takt*” serve para designar o compasso de uma composição musical e foi utilizado pela primeira vez como ferramenta de gestão de produção na indústria alemã na década de 1930 como sendo o intervalo em que uma aeronave era transportada à estação de produção

seguinte (LEAN INSTITUTE, 2003). No TPS ele representa a frequência com que se deve produzir uma peça ou produto, baseado no ritmo de vendas, para atender a demanda dos clientes (ROTHER e SHOOK, 2003).

Segundo Ohno (1997), o *Takt Time*, termo utilizado por ele para diferenciar da definição clássica de tempo de ciclo, é o tempo alocado para se produzir uma unidade e é calculado dividindo-se as horas de operação diária da fábrica pela quantidade de unidades necessárias por dia. A idéia de “alocação” de um tempo para produção pressupõe, naturalmente, que alguém o “aloca”. O *Takt Time* não é dado absoluto, mas sim determinado (ALVAREZ e ANTUNES JR, 2001).

Matematicamente, resulta da razão entre o tempo disponível para a produção e o número de unidades a serem produzidas para atender a demanda dos clientes.

$$\textit{Takt Time} = \frac{\text{Tempo Disponível (por turno, dia, mês, etc.)}}{\text{Demanda (por turno, dia, mês, etc.)}}$$

Para Womack e Jones (1996), o *Takt Time* sincroniza precisamente a velocidade de produção e a velocidade de vendas aos clientes. Para fazer essa sincronização é importante definir sempre o *Takt Time* com precisão, em um determinado momento, em relação à demanda, e processar toda a sequência de produção com base nele.

Linck e Cochran (1999), afirmam que o *Takt Time* é um elemento fundamental e poderoso da produção enxuta que relaciona a demanda do cliente com o tempo de produção disponível e deve ser utilizado para ritmar a produção. Ele traz impacto tanto na fase de projeto quanto na operação de um sistema de produção.

Para Alvarez e Antunes Jr (2001), a variável tempo é crucial na sincronização do fluxo dos materiais ao longo do tempo e do espaço na gestão dos sistemas de produção e tem importância fundamental com diferentes dimensões competitivas sob o ângulo da produção, com ênfase na flexibilidade.

Para os autores a compreensão da lógica de gestão baseada no *Takt Time* só é possível com o reconhecimento da natureza processual do mecanismo da função de produção e os vínculos entre o *Takt Time* e Tempo de Ciclo.

Segundo Shingo (1996), os sistemas de produção podem ser entendidos como redes de processos e operações. Um processo é visualizado como o fluxo de materiais no tempo e no

espaço, é a transformação da matéria prima em semi-acabados e daí a produto acabado. A análise do processo examina o fluxo de produtos.

Já as operações, podem ser visualizadas como o trabalho realizado para efetivar essa transformação. É a interação do fluxo de equipamentos e operadores no tempo e no espaço. A análise das operações examina o trabalho realizado sobre o produto pelo trabalhador e pela máquina.

Uma vez entendida a diferença entre os conceitos de processo e operações surge a necessidade de definição de mecanismos que permitam a construção de sistemas de produção conforme a lógica das melhorias voltadas para o processo (ALVAREZ e ANTUNES JR, 2001)

O esquema apresentado na figura 3.8 representa o processo de fabricação de um automóvel na Toyota Motor Company. Conforme se pode observar, há uma divisão do fluxo em duas grandes fases. A primeira é a fase de fabricação dos componentes. Na segunda fase ocorre a agregação desses componentes, a qual termina com a montagem final dos veículos.

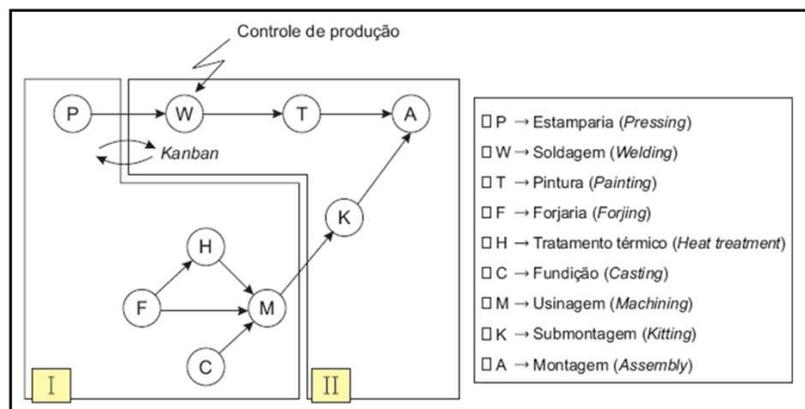


Figura 3.8 - Representação Esquemática do Processo de Fabricação Automobilístico
 Fonte: adaptado de Toyota Motor Company (1998) *apud* Alvarez e Antunes Jr (2001)

Na Toyota, o *Kanban* é utilizado coordenar a movimentação dos materiais entre as etapas da primeira fase e nas interfaces com a fase II. Na fase II o processo ocorre em fluxo contínuo e o sistema é controlado com base no *Takt Time*.

A indicação de controle de produção na Figura 1 aponta que o *Takt Time* é informado à etapa de soldagem. Daí para frente, o fluxo é contínuo e o processo coordenado pelo *Takt Time*.

A definição do *Takt Time* também é realizada, individualmente, para cada célula de produção da fase I, sendo esse um dos componentes das rotinas de operação-padrão das células.

O *Takt Time*, portanto, faz-se presente como elemento central, em dois subsistemas da manufatura que trabalham com fluxos unitários: na montagem e, internamente nas células de produção.

Sua marcação, porém, é diferenciada quando analisadas as fases I e II.

- a) Fase I: No caso da produção de componentes nas células, o *Takt Time* é elemento integrante das rotinas de operação-padrão, sendo a observância dessas a garantia da cadência de produção. A lógica de controle está, pois, fortemente baseada na padronização.
- b) Fase II: No caso da linha de montagem, particularmente em linhas *transfer*, o *Takt Time* é determinado com a programação da sua velocidade. No caso da soldagem o fluxo é unitário, mas tende a não ser integrado fisicamente através de sistemas de transporte de fluxo contínuo. O fluxo é unitário e o deslocamento se dá de modo descontínuo, com o avanço dos componentes posto a posto comandado pelos próprios operadores. O ritmo definido pelo *Takt Time* também é mantido pela observação das rotinas de operação-padrão.

Verifica-se, pois, que tanto a coordenação interna dos subsistemas de produção como a amarração geral do fluxo dos materiais ao longo do tempo e do espaço na fábrica são feitas com base no *Takt Time*, ou seja, ele é o principal elemento concreto de modelagem e representação para a função processo no TPS.

Como vimos, o *Takt Time* é definido a partir da demanda do mercado e do tempo disponível para produção, ou seja, é o ritmo de produção necessário para atender a demanda dos clientes. Dessa forma, o *Takt Time* pode ser legitimamente entendido como o tempo que rege o fluxo dos materiais em uma linha ou célula. Logo, é fundamental salientar que o conceito de *Takt Time*, sob a visão do mecanismo da função produção, está diretamente relacionado com a Função Processo, à medida que trata do fluxo dos materiais ao longo do tempo e espaço.

Já, o Tempo de Ciclo, sob o prisma do mecanismo da função produção, está associado à Função Operação. É uma característica de cada operação da rede de processos e operações. De fato, a noção de ciclo só tem sentido para os sujeitos do trabalho (máquinas e operadores), e não para os objetos do trabalho (materiais), posto que é o trabalho realizado por homens e máquinas que se repete regularmente. Para os materiais a idéia de ciclo não tem sentido. Uma mesma peça não passa mais de uma vez pelo processamento, ou seja, não há um “ciclo”.

A duração de um ciclo é dada pelo período transcorrido entre a repetição de um mesmo evento que caracteriza o início ou fim desse ciclo.

Em um sistema de produção, o Tempo de Ciclo é determinado pelas condições operativas da célula ou linha. Considerando-se uma célula ou linha de produção com 'n' postos de trabalho, o Tempo de Ciclo é definido em função de dois elementos:

- a) Tempos unitários de processamento em cada máquina/posto (tempo-padrão);
- b) Número de trabalhadores na célula ou linha.

O Tempo de Ciclo (TC) é o tempo necessário para a execução do trabalho em uma peça. É o tempo transcorrido entre o início/término da produção de duas peças sucessivas de um mesmo modelo em condições de abastecimento constante.

Quando analisada uma operação isolada, o tempo de ciclo é igual ao tempo padrão da operação. Já, ampliando-se a unidade de análise dos sistemas de produção (células, linhas ou mesmo a fábrica inteira), torna-se necessário contemplar as relações sistêmicas de dependência entre os equipamentos e as operações. Portanto, o Tempo de Ciclo da linha ou célula é o tempo de execução da operação, ou das operações, na máquina/posto mais lento. Em outras palavras, é o ritmo máximo possível, mantidas as condições atuais.

Para os autores, os vínculos entre *Takt Time* e Tempo de Ciclo são estreitos, o que sugere a amarração entre função processo e função operação de forma a visualizar a compatibilização da demanda com a capacidade. Essa amarração pode ser entendida por meio do conceito de *Takt Time Efetivo*.

O ***Takt Time Efetivo*** é o ritmo de produção necessário para atender a um determinado nível considerado de demanda, dadas as restrições atuais de capacidade da linha ou célula.

Em verdade, o ritmo da linha é sempre limitado, seja pela capacidade (representada pelo Tempo de Ciclo) ou pela demanda (representada pelo *Takt Time* calculado). O *Takt Time Efetivo*, tal como definido aqui, será igual ao *Takt Time* calculado, caso a capacidade for maior ou igual à demanda, e igual ao Tempo de Ciclo quando a capacidade for inferior à demanda.

A apresentação desses conceitos adicionais deve ser acompanhada de duas considerações:

- a) O que se denomina aqui de *Takt Time* calculado corresponde à primeira formulação relativa ao conceito apresentada, que, visivelmente, considera a capacidade do sistema como infinita. O *Takt Time Efetivo* é definido com base na capacidade real do sistema.

- b) Que o Tempo de Ciclo certamente não é imutável, e muitos são os artifícios que podem ser utilizados para reduzi-lo. A vinculação entre o Tempo de Ciclo e a alocação de funcionários à linha remete também à discussão da separação entre os tempos de processamento manual e os tempos de máquina, a base conceitual para o pilar da Autonomia.

Alvarez e Antunes Jr (2001) concluem que transparece dessa discussão que a gestão baseada no *Takt Time* tem inserção ampla no sistema de gestão da produção tanto no âmbito da logística interna quanto no projeto e melhoria do sistema de produção:

- a) **Projeto e Melhorias** do sistema de produção: A imposição de um ritmo mais acelerado (diminuição do *Takt Time*) serve para destacar as operações e os equipamentos que restringem a capacidade de produção. Caso a capacidade de uma linha ou célula não seja suficiente, identifica-se a operação que define o tempo de ciclo e concentra-se a atenção na sua melhoria. Essa será a operação para a qual deverão ser canalizadas as atenções de engenheiros, supervisores e grupos *Kaizen*.
- b) **Controle de Produção:** O controle da produção é realizado *on-line* e de forma descentralizada. O controle com base no *Takt Time* dá visibilidade ao fluxo dos materiais e aos problemas ocorridos. Tipicamente, em uma linha programada com base no *Takt Time*, existem *Andons* e dispositivos sonoros que indicam o progresso do trabalho. Quando um posto ultrapassa o limite de tempo estipulado para a operação (ou conjunto de operações) na rotina de operação-padrão, são acionados alarmes visuais e sonoros.

Para Bokhorst e Slomp (2007), uma vantagem importante da gestão baseada no *Takt Time* é a realização de *lead times* curtos e confiáveis. O controle do *Takt Time* também traz benefícios comportamentais uma vez que oferece *feedback* imediato sobre o desempenho o que permite atuar rapidamente sobre desvios na produção.

3.6.3 Produção Puxada

Como foi apresentado na seção anterior, idealmente, os produtos deveriam fluir unitária e continuamente pelos fluxos de valor, da matéria prima ao produto acabado mas, frequentemente,

por diversos fatores, há pontos no fluxo de valor onde o fluxo contínuo não é possível, como processos compartilhados com tempos de ciclo muito lentos ou muito rápidos para atender diferentes famílias de produtos, processos muito distantes em que o transporte unitário não é realista, *lead time* do processo muito elevado ou pouco confiável, entre outros (ROTHER e SHOOK, 2003). Nesses pontos, a conexão entre esses processos e o processo cliente deverá ser feita, se possível, por meio da produção puxada.

A produção puxada, em termos simples, significa que um processo inicial não deve produzir um bem ou serviço sem que o cliente de um processo posterior o solicite (WOMACK e JONES, 1998). O princípio da produção puxada confunde-se com a própria definição de *Just-In-Time*, que é produzir somente os itens certos, na quantidade certa e no momento certo. Isto significa que o ritmo da demanda do cliente final deveria repercutir ao longo de todo o fluxo de valor, desde os produtos acabados até os fornecedores de matérias-primas. A informação de produção deve fluir em sentido contrário ao fluxo dos materiais, isto é, do processo-cliente para o processo-fornecedor (GHINATTO, 2000).

Para Liker (2005), o princípio da produção puxada tem por objetivo evitar a superprodução, mantendo uma coordenação entre os processos que não possam ser conectados através de um fluxo contínuo e controlando o estoque em processo do sistema. O contrário seria a produção empurrada, em que a produção baseia-se em uma programação feita com antecedência, baseada em uma demanda real ou projetada, se não houver uma coordenação real entre os processos, que continuam a produzir de acordo com esta programação independente e, caso não se leve em consideração a situação real do sistema, como os problemas na produção e a mudança de demanda, que exigem reprogramação, podem gerar grandes estoques.

No TPS a produção puxada é realizada por meio do sistema de coordenação de ordens criado por Taiichi Ohno, o sistema *Kanban* (apresentado na seção 3.8.1), um sistema de sinalização entre processo cliente e fornecedor que informa ao processo fornecedor exatamente o que, quanto e quando produzir pelo do consumo de um estoque pré-determinado e controlado existente entre dois processos do fluxo de valor ou, ainda, de produtos acabados. No sistema *Kanban*, este estoque recebe o nome de supermercado, pois a idéia por traz da produção puxada no STP surgiu dos supermercados americanos na década de 50 (LEAN INSTITUTE, 2003).

Para Ohno (1997) um supermercado é onde o cliente pode obter o que é necessário, no momento em que é necessário na quantidade necessária. Em princípio, o supermercado é o lugar

onde compramos conforme a necessidade. Os trabalhadores dos supermercados, portanto, devem garantir que os clientes possam comprar o que precisam a qualquer momento. Daí surgiu a idéia de visualizar um processo inicial (fornecedor) em uma linha de produção como um tipo de loja. O processo cliente vai até o processo fornecedor para retirar as peças necessárias, no momento necessário e na quantidade necessária. O processo inicial “reabastece as prateleiras”, produzindo a quantidade recém retirada.

O sistema *Kanban* não deve ser confundido com o próprio princípio de produção puxada. Para Sipper e Bulfin (1997), a produção puxada é um princípio de controle de fluxo de materiais enquanto o *Kanban* é um método manual de implementar esse princípio utilizado pela Toyota.

O princípio de puxar a produção e seus benefícios têm sido largamente estudados e muitas definições foram criadas para tentar explicar as diferenças e benefícios da produção puxada e muitos outros SCOs foram desenvolvidas para atingir os mesmos objetivos.

Para se entender esse princípio será necessário uma discussão sobre algumas definições de sistemas puxados existentes na literatura e suas diferenças com os sistemas empurrados.

Para Sipper e Bulfin (1997), uma forma de entender a diferença entre o princípio da produção puxada e da produção empurrada é a gestão das interdependências. Todo sistema de produção pode ser entendido como uma série de interdependências entre os recursos produtivos. Enquanto em um sistema empurrado a interdependência entre os processos é sequencial, os sistemas puxados trabalham com interdependência recíproca.

Em uma interdependência sequencial, um sistema empurrado, o *output* de uma operação, a operação dois da figura 3.9, por exemplo, depende do *input* vindo da operação anterior, operação um, de forma que se houver um problema com a operação um, a dois também será paralisada. Entretanto, a operação um é totalmente independente da operação dois, o que permite que esta operação continue trabalhando mesmo que haja um problema na operação dois. Nesses sistemas, geralmente existe um certo nível de inventário entre as operações para reduzir a interdependência da operação dois em relação à operação um.

Já, em uma interdependência recíproca, um sistema puxado, existe um relacionamento de mão dupla entre um par de processos, ou seja, cada operação afeta e é afetada por uma outra operação. Esse relacionamento de mão dupla pode ser representado pelo fluxo de material, fluxo abaixo, e de informação, fluxo acima, de forma que a operação dois depende do material vindo da operação um, enquanto a operação um depende da informação vinda da operação dois. Um

problema em qualquer uma das operações tem o efeito de parar a outra operação, mesmo que a outra situe-se antes no fluxo à montante.

Para Hopp e Spearman (2004), a diferença básica entre puxar e empurrar a produção está no gatilho da produção, ou seja, na liberação de trabalho para o sistema de produção. Esse gatilho vem de fora em um sistema empurrado, ou seja, baseado em uma demanda gerada por um sistema de planejamento, o MRP, por exemplo, enquanto que um sistema puxado autoriza a liberação de trabalho baseado no *status* do sistema de produção, ou seja, o gatilho vem de dentro do sistema puxado. Para os autores, um sistema puxado é aquele que explicitamente limita a quantidade de estoque em processo que pode estar no sistema. Ao contrário de um sistema empurrado, que não estabelece um limite específico de estoque em processo que pode estar no sistema. Portanto, o maior benefício de um sistema puxado estaria na propriedade de limitar a quantidade máxima de estoque em processo, *WIP*, em um sistema e não na necessidade de puxar de fato a produção entre cada estação de trabalho a partir de um supermercado de produtos acabados.

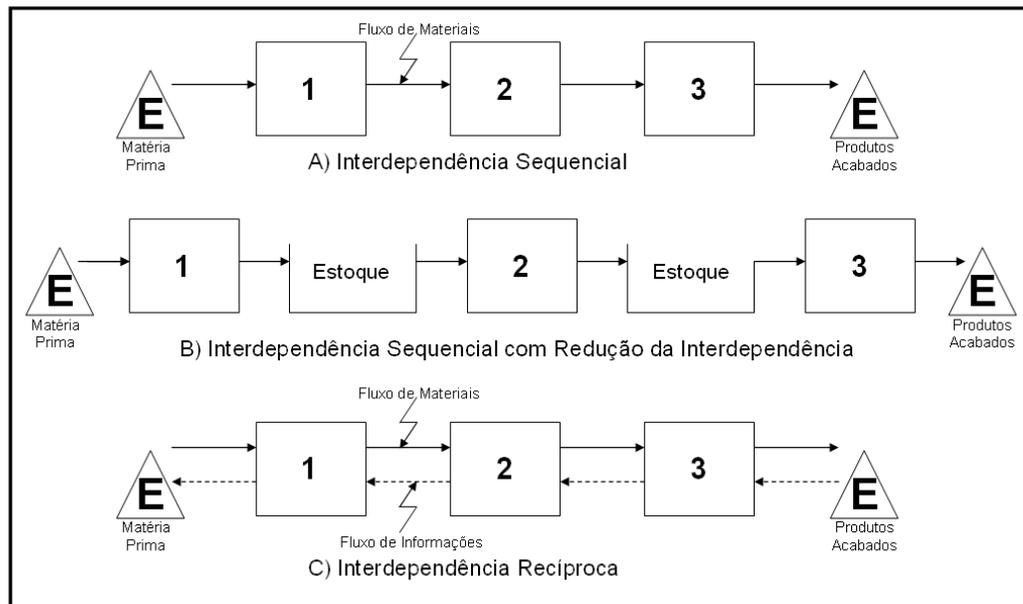


Figura 3.9 - Gestão das Interdependências

Fonte: adaptado de Sipper e Bulfin (1997)

Para Hopp e Spearman (2004), também existe uma confusão entre os conceitos de produção puxada e a forma de atendimento à demanda *Make-to-Order* (MTO). Para os autores, a definição e diferenças entre sistema puxado e empurrado é completamente independente da definição de produção para estoque e produção por encomenda e é perfeitamente possível ter

tanto sistemas puxados quanto empurrados trabalhando tanto para estoque quanto por encomenda.

Fernandes e Godinho Filho (2010) apresentam e classificam diversos sistemas de coordenação de ordens, os SCOs, que têm como objetivo regular o fluxo de materiais programando ou explodindo as necessidades em termos de componentes e materiais, controlar a liberação de ordens de produção e compra e programar/sequenciar as tarefas nas máquinas. Os autores afirmam que em um SCO puxado, o fluxo de informação caminha em um sentido e o fluxo de materiais caminha em sentido contrário. Já, em um SCO que empurra a produção, o fluxo de informação e o fluxo de materiais caminham no mesmo sentido. Porém, alguns SCOs apresentam características tanto de puxar quanto de empurrar a produção, são os sistemas híbridos, em que algum recurso recebe uma programação de um planejamento central, porém a informação de quando produzir vem do nível de estoque do fluxo de produção.

Portanto, para evitar uma confusão de linguagem, nesta dissertação será feita uma separação entre o princípio da produção puxada e os sistemas, SCOs, que puxam a produção.

O princípio da produção puxada:

- a) Tem por objetivo evitar a superprodução, mantendo uma coordenação entre os processos que não possam ser conectados através de um fluxo contínuo e controlando o estoque em processo do sistema (LIKER, 2005);
- b) Mantém uma interdependência recíproca dentro de um fluxo de valor, ou seja, um relacionamento de mão dupla entre alguns processos (SIPPER e BULFIN, 1997);
- c) Explicitamente limita a quantidade de estoque em processo que pode estar no sistema (HOPP e SPEARMAM, 2004);
- d) O gatilho da produção, a autorização para a liberação de trabalho para o sistema de produção, está dentro do sistema de produção (HOPP e SPEARMAM, 2004).

Já a definição de sistemas de puxar e empurrar a produção, será a mesma adotada por Fernandes e Godinho Filho (2010), ou seja:

- a) Quando os fluxos de informação e de materiais caminham no mesmo sentido, será um SCO empurrado.
- b) Quando o fluxo de informação caminha em um sentido e o fluxo de materiais caminha em sentido contrário, será um SCO puxado, ou controlado pelo nível de estoque, CNE. Nesta dissertação adotaremos o termo “puxado puro”;

- c) Quando apresentar características de ambos os sistemas, ou seja, apesar de puxar a produção, tem um dos estágios programados por um PCP central e, assim, será um SCO Híbrido.

Portanto, o princípio da produção puxada, de evitar a superprodução, limitando a quantidade de estoque em processo em níveis baixos e padronizados, pode ser atingido tanto com um sistema puxado puro, um SCO controlado pelo nível de estoque (CNE), quanto com um sistema híbrido, em que apesar de um dos estágios ser programado por um PCP central, a informação de quando produzir, na forma de uma autorização, vem do próprio sistema de produção.

3.6.4 Nivelamento da Produção - *Heyjunka*

Neste capítulo já foram apresentados o principal objetivo do TPS e da produção enxuta, a completa eliminação de desperdícios, *Muda*, e os princípios do fluxo contínuo e da produção puxada para atingir tal objetivo. Porém, para se obter as vantagens de um fluxo contínuo e uniforme, será necessário eliminar os outros dois efeitos comuns a qualquer ambiente de produção: a sobrecarga, *Muri*, e o desnivelamento, *Mura*. O *Heyjunka*, o princípio do nivelamento de produção, se concentra na eliminação de *Mura*, por meio de uma programação nivelada ao longo do tempo e, conseqüentemente, na eliminação de *Muri*, a sobrecarga causada nos seus funcionários, equipamentos e fornecedores (LIKER, 2005).

Segundo Monden (1984), o nivelamento de produção, é a base do TPS e sua condição mais importante para possibilitar o *Just-in-Time*, ou seja, o fluxo contínuo, a produção puxada e ritmada pelo *Takt Time*, e minimizar a flutuação nas linhas de produção no que se refere a mão-de-obra, equipamentos e materiais em processo.

Para Ohno (1997) as flutuações nas linhas de produção fazem aumentar o desperdício pois equipamentos, trabalhadores, inventário precisam sempre estar preparados para um pico de produção, ou seja, um excesso de capacidade e estoques deverá ser planejado para atender esses picos de produção. Se um processo posterior varia sua retirada de peças em termos de tempo e quantidade, a extensão dessas flutuações aumentará conforme elas forem avançando na linha em direção aos processos anteriores.

Portanto, tentar implementar o fluxo unitário de peças, contínuo, seguindo a demanda real do cliente, sem nivelar a produção, irá criar um ritmo errático de produção, com produtos fluindo aos trancos pelos centros de trabalho por todo o fluxo de valor, cujos resultados serão funcionários hora sobrecarregados, hora ociosos, quebras mais frequentes de equipamentos, falta de peças, entre outros (LIKER, 2005). Da mesma forma, utilizar a produção puxada antes de se realizar um nivelamento de produção irá exigir grandes níveis de inventário entre processos para acomodar os picos de demanda dos processos clientes.

O nivelamento de produção deve ser feito em termos da quantidade (volume) e tipo (*mix*) de produtos durante um período fixo de tempo. Esse nivelamento permite que a produção atenda eficientemente as exigências do cliente ao mesmo tempo em que evita excessos de estoque, reduz custos, mão de obra e o *lead time* de produção em todo o fluxo de valor (LEAN INSTITUTE, 2003).

Não é realista esperar que a demanda do cliente seja completamente regular em termos de volume, nem que o *mix* de tipos de produtos dessa demanda seja constante. Tentar ajustar a produção para responder a cada hora a toda pequena mudança de volume e *mix* torna muito difícil manter algum tipo de fluxo e pode incorrer em problemas de movimentação e produtividade. Para atingir e manter um fluxo contínuo em uma cadeia de valor enxuta é necessário programar o processo de produção com uma flutuação de volume tão pequena quanto possível e decidir o menor tamanho do lote possível ao realizar a troca para outro tipo de produto (ROTHER e HARIS, 2001).

Para esses autores, como a demanda a médio e longo prazo tende a ser estável, liberar pequenos incrementos de trabalho e manter um pequeno supermercado de produtos acabados pode nivelar o volume de produção fazendo com que a demanda do cliente seja atendida e os picos e vales da demanda diária não sejam sentidos pela produção.

Liberar pequenos incrementos de trabalho significa reduzir e padronizar o tamanho dos lotes (volume de trabalho) liberados para o *pacemaker*, o único processo que recebe a programação nivelada em um fluxo de valor, estabelecendo um ritmo de trabalho consistente, nivelado, que cria um fluxo de produção previsível que alerta para possíveis problemas rapidamente possibilitando rápidas ações corretivas (ROTHER e SHOOK, 2003). Esse incremento é chamado de **PITCH** e se torna a unidade básica de programação de produção para uma determinada família de produtos. Ele é calculado multiplicando-se o *Takt Time* por uma

determinada quantidade de produtos, que pode variar de acordo com a realidade de cada sistema de produção, mas deve ser tão pequeno quanto possível.

Notemos que a tradução usual de *pacemaker*, o único processo que recebe a programação nivelada em um fluxo de valor, é “processo puxador”. No entanto, nesta dissertação, esta tradução não será utilizada, pois este autor acredita que não representa a função principal deste processo que é o de ditar a sequência e o ritmo para todo o fluxo de valor, ou seja, cadenciar o fluxo de valor, ou seja, uma tradução melhor seria processo cadenciador.

Com relação ao supermercado de produtos acabados, Rother e Shook (2003) afirmam que a vantagem desse nivelamento, não tendo que manter grande excesso de capacidade para atender picos de demanda do cliente, supera em muito a desvantagem de custo de manter esse pequeno estoque de produtos acabados. Liker (2005) também afirma que o desperdício de manter um pequeno supermercado de produtos acabados permite eliminar muito mais perdas dentro do sistema de produção causadas por uma programação desnivelada.

Portanto, embora manter esse supermercado de produtos acabados possa parecer contradizer os objetivos da produção enxuta, ele atua como um pulmão para proteger a programação da produção nivelada contra a flutuação na demanda dos clientes.

Notemos que a necessidade de manter um supermercado de produtos acabados, ou mesmo intermediários, mostra que o “zero estoque” do JIT é uma utopia e que o objetivo deve ser mantê-lo em níveis tão baixos quanto possível.

Para ser possível manter esse supermercado em níveis baixos e fornecer aos clientes uma variedade de produtos a um *lead time* curto será necessário nivelar também o *mix* de produtos, evitando a produção de grandes lotes de uma mesma família de produtos, que enviam ondas de demanda por componente por toda a cadeia de valor, o que força os processos fornecedores a manter maior inventário para administrar essas ondas (ROTHER e HARIS, 2002). Nivelar o *mix* de produtos significa distribuir a produção de diferentes produtos uniformemente durante um período de tempo. Quanto mais se nivela o *mix* de produtos (no *pacemaker*) mais apto se estará para responder às diferentes solicitações dos clientes com um pequeno *lead time*, enquanto mantém apenas um pequeno estoque de produtos acabados (ROTHER e SHOOK, 2003).

Considere o exemplo da figura 3.10, em que uma empresa tem que produzir três produtos na mesma linha de produção. A demanda mensal é de 5200 unidades para o produto A e 2600 unidades para os produtos B e C. No primeiro caso, sem nivelamento de *mix*, a empresa fabrica

nos dez primeiros dias do mês a quantidade para atender a demanda mensal para o produto A, 5200 produtos, nos cinco dias seguintes, as unidades para atender a demanda para o produto B, 2600 e nos últimos cinco dias do mês, outras 2600 unidades para atender a demanda do produto C, fabricando um total de 520 peças por dia, ou 260 em cada um de dois turnos. No segundo caso, com um nivelamento do *mix* de produção por turno, a empresa fabrica a mesma quantidade diária, porém, em cada turno, fabrica uma certa quantidade de todos os produtos, ou seja, 130 unidades de A e 65 de B e C.

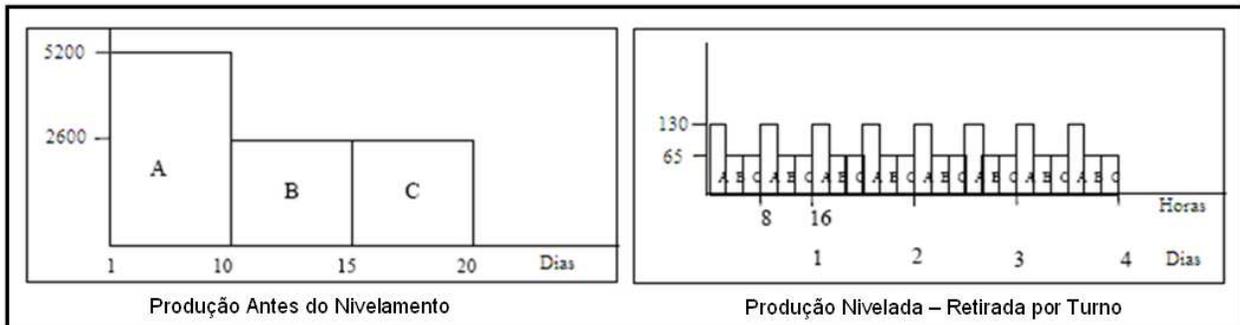


Figura 3.10 - Nivelamento do *Mix* de Produção

Fonte: adaptado de Reynal (1998)

Esse nivelamento no *mix* de produção implica, logicamente, em um maior número de *setups*. No primeiro caso, a empresa realiza os *setups* para mudar do produto A para o B e de B para C apenas uma vez por mês cada. No caso nivelado, será necessário fazer cada *setup* dentro de um mesmo turno de trabalho. Portanto, para que o nivelamento de *mix* de produção seja realizado, ou seja, que o tamanho dos lotes de produção sejam reduzidos de forma a produzir todos os produtos em cada turno de trabalho, de acordo com a quarta etapa sugerida por Shingo (1996) para se atingir princípio do fluxo contínuo apresentado na seção 3.6.1, será necessário a utilização das técnicas de troca rápida de ferramentas, SMED, apresentadas em tal seção.

Uma ferramenta geralmente utilizada para ajudar a nivelar *mix* e o volume de produção é o quadro de nivelamento de carga (figura 3.11), também chamado de *Heyjunka Box*, baseado no Gráfico de Gantt. Para Tardin (2001) o *Heyjunka Box* é complementar ao sistema *Kanban* pois apresenta a condição do estoque de cada item, pelo número de *Kanbans* de cada item, o que deve ser produzido e o ritmo que a linha deve produzir para atender a demanda.

Esse quadro tem escaninhos com cartões *Kanban* para cada intervalo de *Pitch* e uma fileira de escaninhos para o *Kanban* de cada tipo de produto. Neste sistema, o *Kanban* indica não só a quantidade a ser produzida, mas também quanto tempo leva para produzir esta quantidade

(baseado no *Takt Time*). Os *Kanban* são colocados (carregados) no quadro de nivelamento na sequência do *mix* desejado por tipo de produto. O responsável pela movimentação de materiais retira estes *Kanbans* e os leva até o *pacemaker*, um de cada vez, no incremento *PITCH* (ROTHER e SHOOK, 2003).

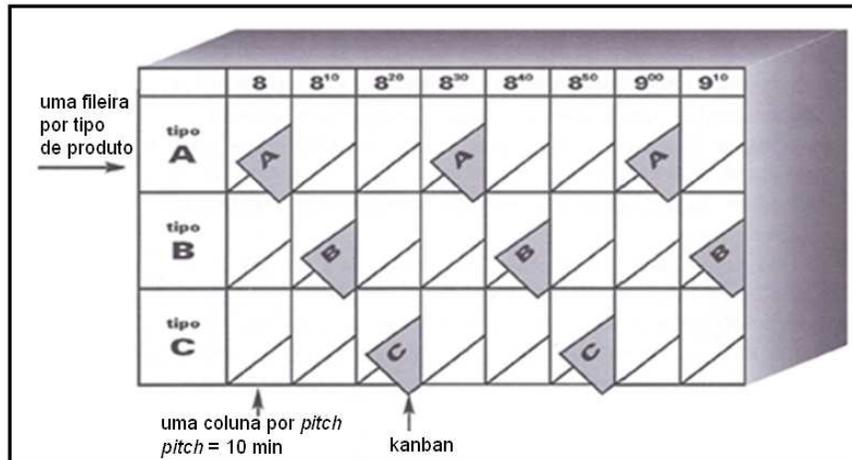


Figura 3.11 - *Heyjunka Box*: Quadro de Nivelamento de Carga
Fonte: Rother e Shook (2003)

Em ambientes sob encomenda, o nivelamento de produção é um pouco mais complicado. Rother e Harris (2002) afirmam que o problema nesses ambientes é que a liberação das ordens de fabricação para o fluxo de valor é feita de acordo com cada ordem do cliente e, cada ordem pode ter um volume de trabalho muito diferente das demais. Esse processo leva a uma situação onde as ordens tendem a se acumular excessivamente entre algumas etapas de processamento o que pode levar a uma perda do princípio FIFO à medida que os processos individuais selecionam os trabalhos com base na eficiência de *setup* e outros fatores. Também é muito difícil verificar se alguma ordem está adiantada ou atrasada em qualquer das etapas de processamento e perceber anormalidades, de forma a ter uma resposta rápida a alterações para que o fluxo possa ser rapidamente restabelecido (ROTHER, 2005). A solução, para os autores, é liberar o trabalho em incrementos de trabalho constantes, *PITCH*, definido de acordo com a capacidade do recurso com restrição de capacidade, o CCR (*Capacity Constraint Resource*), da linha. O *PITCH*, então, se torna a unidade básica de programação de produção para uma determinada família de produtos.

Tardin (2001) também apresenta uma forma de nivelamento de produção em sistemas com maior variedade de produtos em que os tempos de ciclo podem variar muito. O autor propõe um sistema de classificação dos produtos em pontos, de acordo com o tempo de ciclo em

determinados recursos, como uma forma de normalização dos tempos de ciclo de diferentes produtos. Utilizando esse sistema de pontos para normalizar os tempos de ciclo dos diferentes produtos no CCR e calcular o *Takt Time* do fluxo de valor, Stefanelli (2010) propõe um método para nivelamento de produção em ambientes *Engineering to Order*. O método proposto considera o *Takt Time* (minutos/pontos), a carga do CCR e o posicionamento deste recurso para programar o fluxo, de acordo com o ritmo necessário para atender a demanda dos clientes.

3.7 Melhoria Contínua - *Kaizen*

Kaizen é a melhoria incremental e contínua de uma atividade, focada na eliminação dos desperdícios. A prática do *Kaizen* depende do monitoramento contínuo dos processos, por meio da utilização do ciclo de Deming (ciclo PDCA). Esse processo desenvolve-se a partir da padronização da melhor solução e subsequente melhoria desse padrão, garantindo que os pequenos e incrementais ganhos sejam incorporados às práticas operacionais. A melhoria estável só é atingida quando a cada passo da melhoria, o processo é padronizado (figura 3.12). A prática do *Kaizen* sem padronização corresponde à tentativa de subir uma escada, depositando-se todo o peso do corpo sobre um degrau mal estruturado, ou seja, o risco do degrau ruir e com ele nos levar escadaria abaixo é iminente (GHINATTO, 2000).

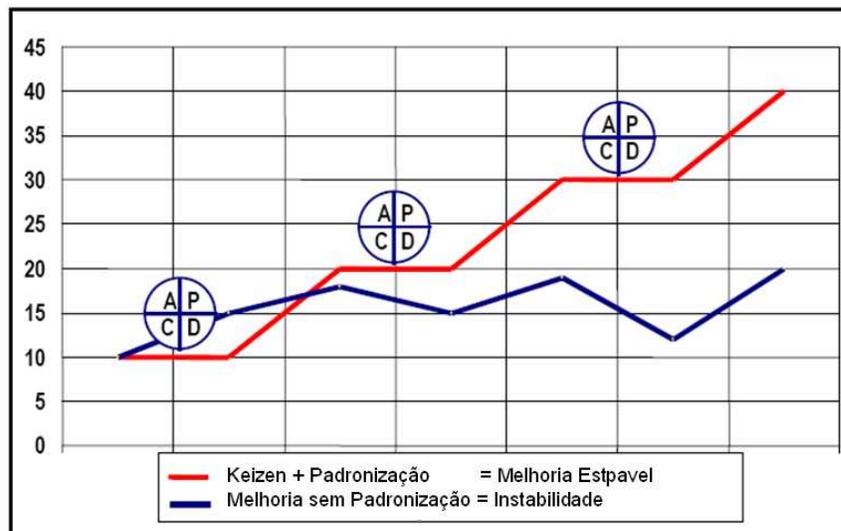


Figura 3.12 - Processo de Melhoria Contínua Seguido de Padronização
Fonte: Ghinatto (2000)

Hopp e Spearman (2004) propõem um processo sistemático de melhoria contínua baseado na exposição e eliminação dos desperdícios. Os autores afirmam que existem fontes óbvias de desperdício, que são as atividades que não agregam valor e que devem ser eliminadas imediatamente, o que está de acordo com o conceito de atividades desnecessárias e que não agregam valor de Hines e Taylor (2000). Dentro dessa categoria estão os desperdícios de movimentação e transporte desnecessários, entre outros.

Porém, os autores afirmam que a fonte menos óbvia da maioria dos desperdícios de um sistema de produção é a variabilidade contida nesse sistema. Essa variabilidade pode assumir diversas formas que podem ser provenientes de fatores internos, como tempos de *setup*, paradas de máquina programadas ou não, flutuações nas taxas de produção, perda de produtividade, retrabalho, pedidos de alteração de engenharia, e muitos outros, e provenientes de fatores externos, como demanda irregular dos clientes, alta variedade de produtos para atender às necessidades do mercado, pedidos de alteração de clientes, entre outros.

Algumas fontes de variabilidade são parte da estratégia da empresa como a alta variedade de produtos oferecida aos clientes, porém, outras fontes de variabilidades devem ser reconhecidas e minimizadas para garantir o processo de melhoria contínua, como os problemas de manutenção e quebra de máquina, problemas no suprimento de matéria prima, entre outros.

Para esses autores, sempre que existir alguma forma de variabilidade, algum tipo de *buffers*, ou pulmão, será criado, natural ou propositalmente, para proteger o sistema dessa variabilidade.

Existem três tipos de pulmão: o pulmão de inventário, na forma de estoques de segurança contra variabilidade na demanda, o pulmão de capacidade, na forma de capacidade protetora contra flutuação na demanda ou na produção, e o pulmão de tempo, na forma de *lead times* de segurança contra variabilidade na produção. Ao reduzir um, deve-se aumentar algum outro, caso contrário, um dos demais fatores se tornará naturalmente um pulmão, causando efeitos indesejáveis.

Portanto, uma forma de manter um processo de melhoria contínua é criar um processo de identificação e redução consistente das variabilidades do sistema. Esse processo segue os seguintes passos, adaptados de Hopp e Spearman (2004):

1. Eliminar os Desperdícios Óbvios: Exemplos típicos são a movimentação e transporte causado por *layouts* inadequados (*Job Shops*). Esta categoria de desperdício é atacada pelos princípios e ferramentas apresentadas em seções anteriores.
2. Trocar o Pulmão de Inventário pelo **Pulmão de Capacidade**: Como vimos ao longo deste trabalho, o pulmão de inventário é extremamente prejudicial pois esconde uma série de desperdícios e deve ser reduzido por meio de um fluxo contínuo e um sistema puxado (ou híbrido). Porém, ao reduzir e controlar pulmão de inventário deve-se manter o pulmão de capacidade para garantir o atendimento das datas de entrega. Esse conceito é largamente utilizado pela Toyota, embora muitas vezes seja negligenciado, na forma de intervalos desprogramados (em geral, duas horas) entre cada turno de trabalho para lidar com eventuais problemas, variabilidades, ocorridas em cada turno, não deixando que problemas de um turno afetem o turno seguinte. Com esse pulmão de capacidade, a empresa pode lidar com um pulmão menor de inventário.
Aumentando a capacidade em um primeiro momento e, em seguida, reduzindo o estoque em processo utilizando, por exemplo, um sistema puxado ou híbrido, faz com que os *lead times* sejam reduzidos, sem prejudicar a taxa de produção ou o serviço ao cliente. Com a redução dos *lead times* pode-se determinar mais facilmente a causa raiz dos problemas de variabilidade.
3. Reduzir a variabilidade: À medida que os estoques em processo, pulmão de inventário, são reduzidos, outras formas de variabilidade serão expostas e devem ser atacadas por meio de diversos métodos e ferramentas como SMED, para a redução e padronização dos tempos de *setup*, TPM (Manutenção Produtiva Total) para a minimização dos problemas causados por quebra de máquina, *Poka-Yoke*, para eliminação de alguns problemas de qualidade do processo. (Não é objetivo desta dissertação apresentar a aplicação de todas essas ferramentas)
4. Reduzir o Pulmão de Capacidade: À medida que as variabilidades aparecem e são reduzidas, e o processo se torne mais robusto, pode-se reduzir gradativamente a capacidade protetora dos recursos, podendo operar mais próximo da utilização máxima do CCR (*Capacity Constraint Resource*).

Pode-se perceber que o processo de melhoria contínua se dá por um ciclo de redução de variabilidade, que permite a redução dos estoques em processo, que expõe os desperdícios que causam variabilidade permitindo atacá-los e minimizá-los, com a conseqüente redução, ainda maior, da variabilidade.

3.8 Sistemas de Coordenação de Ordens (SCO) para a Produção Enxuta

3.8.1 Sistema *Kanban*

Muitos autores confundem o *Kanban* com o *Just in Time* e com o próprio TPS. Para Ohno (1997), o TPS é o sistema de produção, que tem como objetivo a redução dos custos pela sistemática eliminação dos desperdícios. O *Just in Time*, por sua vez, é um dos pilares do sistema e tem como objetivo a produção somente dos itens necessários na quantidade necessária e no momento necessário. Já, o *Kanban* é apenas uma ferramenta para atingir o JIT, ou seja, o sistema de controle do sistema.

Outros autores concordam. Monden (1984) também afirma que o *Kanban* é uma ferramenta para se obter a produção *Just in Time*. É um meio de puxar a produção. Para Shingo (1996) é um método de controle de produção, projetado para maximizar o potencial do TPS. Mas é também um sistema com suas próprias funções independentes.

O *Kanban* é a materialização da idéia de sistema de produção puxada. Trata-se de um sistema projetado para assegurar que seja produzida somente a quantidade de itens necessários. Em outras palavras, é um subsistema do JIT usado para controlar os estoques em processo, a produção e o suprimento de componentes e, em determinados casos, de matérias primas (LAGE e GODINHO, 2006).

A forma mais frequentemente utilizada de *Kanban* é um pedaço de papel dentro de um envelope de vinil retangular. Nele, as informações podem ser divididas em três categorias: informação de coleta, informação de transferência e informação de produção (OHNO, 1997).

Ohno (1997) afirma que o *Kanban* é uma daquelas ferramentas que se utilizada de forma incorreta pode causar uma série de problemas. Para utilizá-lo de forma correta, deve-se entender

com clareza seu propósito e seu papel e então estabelecer regras para seu uso. Seu propósito é atingir o JIT. Ele é o nervo autônomo da linha de produção, que controla o fluxo de mercadorias dentro da empresa com objetivo de minimizar estoques, produtos defeituosos e impedir a recorrência de panes.

Monden (1984) apresenta as regras do sistema *Kanban*:

Regra 1: O processo subsequente deve retirar, no processo precedente, os produtos necessários, nas quantidades necessárias e no momento necessário.

Esta regra reflete o princípio da produção puxada e requer uma alteração da forma de ver o fluxo de produção. Ela exige a produção nivelada e a retirada de pequenos lotes pelo processo subsequente. Para que esta regra funcione as sub-regras abaixo devem ser seguidas:

- Nenhuma retirada sem o *Kanban* é permitida;
- A quantidade retirada deve ser igual ao descrito pelo *Kanban*;
- Os produtos devem sempre estar acompanhados pelo *Kanban*

Regra 2: O processo precedente deve produzir os produtos nas quantidades retiradas pelo processo subsequente.

Esta regra impede a superprodução de itens que não seja necessário nos processos seguintes. Para isso, as sub-regras abaixo devem ser seguidas:

- Só será permitida a produção dos itens indicados e nas quantidades indicadas *Kanban*;
- A produção no processo precedente deve seguir a sequência indicada pela chegada dos cartões *Kanban*.

Regra 3: Produtos defeituosos não devem ser enviados ao processo subsequente.

Se esta regra não for seguida e um defeito for detectado no processo seguinte, ele deverá enviar de volta todos os produtos defeituosos e, como ele não possui quantidades extras no inventário, o processo irá parar. Portanto o *Kanban* expõe os processos que estiverem gerando produtos defeituosos de forma a evitar a repetição de tais defeitos.

Regra 4: O número de *Kanbans* deve ser minimizado.

O número de *Kanbans* representa o inventário máximo de determinado item em cada processo e este número deve ser o menor possível. Esse número é determinado de acordo com a situação atual do processo. O alto nível de inventário esconde perdas de todos os tipos e origens. A redução do número de *Kanbans*, ou seja, do inventário, aumenta a sensibilidade do processo

aos problemas. Portanto, projetos de melhoria devem ser realizados com foco de reduzir cada vez mais o número de *Kanbans*.

Regra 5: *Kanban* é utilizado para adaptar pequenas flutuações de demanda.

Este processo, conhecido como auto-sincronismo da produção, é uma notável característica do *Kanban*. Quando ocorrem pequenas flutuações repentinas na demanda, não há a necessidade de distribuir a programação de produção detalhada pela fábrica. Apenas um processo, o *pacemaker*, recebe a programação diária baseada na demanda. Os processos precedentes são programados de acordo com a chegada dos *Kanbans* e as variações de programação são realizadas naturalmente.

Segundo Monden (1984), os dois principais tipos de *Kanban* são (figura 3.13):

- a) ***Kanban de Requisição:*** Também chamado de *Kanban* de Retirada, Movimentação ou Transporte, detalha o tipo e quantidade de produto que o processo subsequente deve retirar do processo precedente. Tem a função de autorizar a transferência de peças definidas no cartão, de um centro de trabalho a seu subsequente. Contém as seguintes informações:
 - descrição da peça;
 - capacidade do contenedor;
 - centro de trabalho precedente e seu local de estocagem;
 - centro de trabalho subsequente e seu local de estocagem.
- b) ***Kanban de Ordem de Produção:*** Também chamado apenas de *Kanban* de Produção, especifica o tipo e a quantidade do produto que o processo precedente terá que produzir. É usado apenas no processo de produção que produz a peça, e usualmente contém as seguintes informações:
 - descrição da peça;
 - descrição do processo onde a peça é fabricada;
 - capacidade do contenedor;
 - local para estocagem;
 - número de contenedores em uso no centro de trabalho específico, ou seja, a quantidade total de peças em processo.

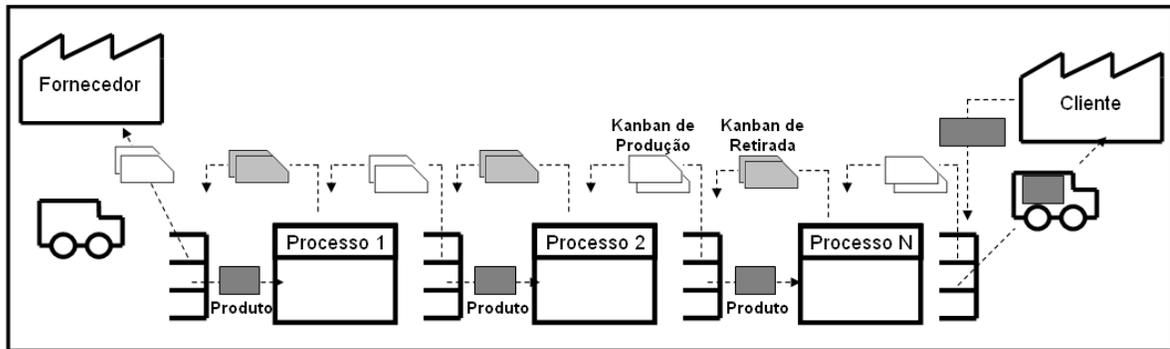


Figura 3.13 - Sistema Puxado com Supermercado
 Fonte: adaptado de Rother e Shook (2003)

Monden (1984) descreve em detalhe o funcionamento do sistema de *Kanban* com dois cartões apresentado na figura 3.13:

1. O abastecedor ou operário do processo subsequente se dirige ao estoque do processo precedente com o número de cartões *Kanban* de requisição e os contenedores vazios correspondentes. Ele executa essa ação quando um número predeterminado de *Kanban* de requisição tiver sido destacado e acumulado no painel correspondente, ou em horários regulares predeterminados.
2. Quando o abastecedor do processo subsequente retira as peças do estoque do processo precedente, ele destaca o *Kanban* de produção que estava afixado junto às peças, nos contenedores, e deixa o *Kanban* de produção no posto de recebimento. Além disto, deixa os contenedores vazios no lugar assinalado para seu posterior uso no posto precedente.
3. Para cada *Kanban* de produção que ele destacou e colocou no posto de recebimento, anexa em seu lugar um *Kanban* de requisição, verificando que as informações dos dois *Kanban* coincidam. Feita a verificação, leva de volta para o estoque de entrada no processo subsequente os contenedores com peças com seus *Kanban* de requisição correspondentes.
4. Conforme são consumidas as peças do estoque no processo subsequente, vai-se separando os contenedores e colocando os *Kanban* de requisição no painel correspondente, para uma vez acumulados em quantidades predeterminadas, ou a intervalos regulares de tempo, iniciar novamente a operação de requisição desde o ponto 1.

5. Os *Kanban* de produção coletados no posto de recebimento são retirados em horários determinados e colocados no painel de *Kanban* de produção na mesma sequência em que foram requisitados os materiais pela estação subsequente. Este fato é importante, já que com uma análise dos *Kanban* que não estão sendo movimentados pode-se identificar oportunidades para sua eliminação e conseqüente redução de estoques em processo.
6. A estação de trabalho no posto precedente continua a produção de peças de acordo com a sequência no painel de *Kanban* e segundo a quantidade ou número de *Kanban* de uma mesma peça, o que indica ao operador a prioridade de produção.
7. Já no processo de produção, cada *Kanban* de produção deve acompanhar suas peças correspondentes. Pode-se notar que existe um consumo de peças ou matérias-primas do estoque de entrada, o que no momento necessário produzirá uma requisição para o processo anterior, com a mesma sequência de operações que as indicadas de 1. a 4.
8. Uma vez que as peças sejam processadas, elas são colocadas junto ao *Kanban* de produção correspondente no estoque de saída, permitindo ao abastecedor do posto subsequente retirá-las no tempo que seja necessário.

Como resultado de todas essas atividades, cada estação de trabalho receberá as peças e materiais necessários no momento e no tempo que sejam realmente necessários, ajudando o *Kanban* no balanceamento das linhas de produção de acordo as necessidades de cada processo.

Fernandes e Godinho Filho (2010) afirmam que um sistema *Kanban* pode ser considerado um SCO Híbrido, o *Kanban* H, quando um dos processos, a montagem por exemplo, é programada por um PCP central, ou um SCO CNE (controlado pelo nível de estoque), ou seja, puxado puro, quando nenhum processo recebe uma programação (figura 3.14). Os autores apresentam 5 variantes deste sistema:

- a) *Kanban* CNE de duplo Cartão
- b) *Kanban* CNE somente com cartão de produção
- c) *Kanban* H de duplo Cartão
- d) *Kanban* H somente com cartão de produção
- e) *Kanban* H somente com cartão de requisição

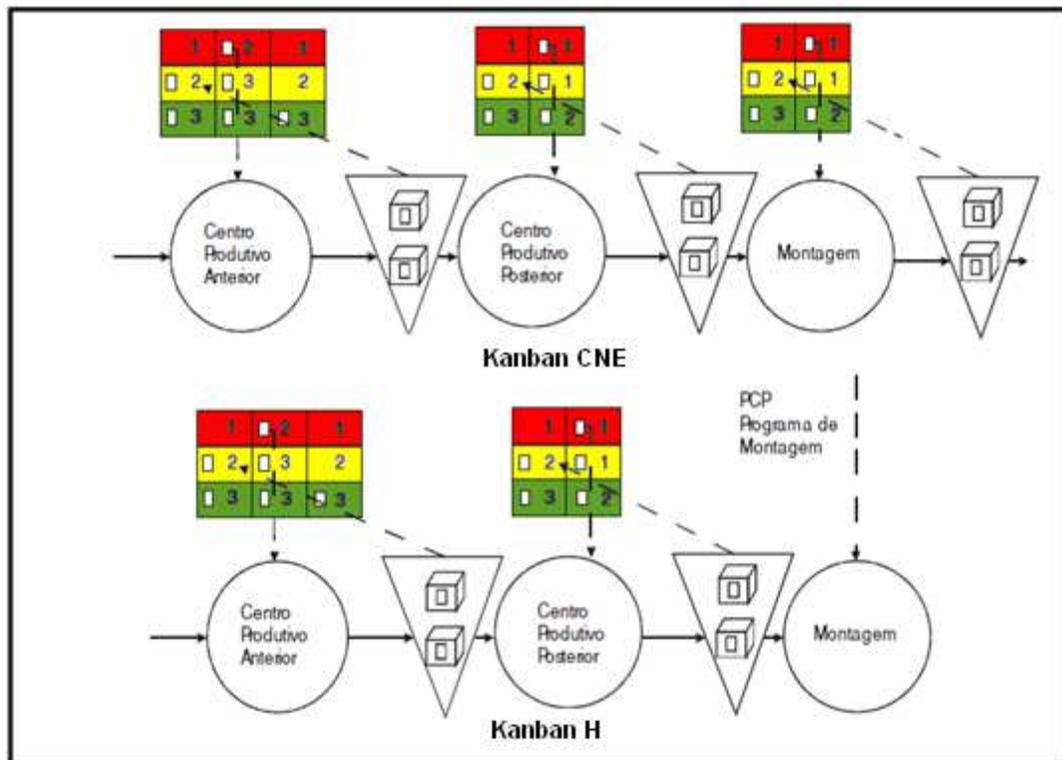


Figura 3.14 - Kanban CNE e Kanban H
 Fonte: Fernandes e Godinho filho (2010)

Para os autores, esse SCO é adequado para sistemas repetitivos, que apresentam condições de baixos tempos de *setup*, baixa variedade de itens (baixa diversificação e baixa ou média distinção) e demanda relativamente estável.

No entanto, ambientes com alta variedade de produtos é uma condição desfavorável à implantação do sistema *Kanban*, pois este ambiente aumenta a complexidade do fluxo de materiais, dificulta a adaptação dos painéis de cartões, cria irregularidades nos tempos e diminui o nível de repetição do sistema produtivo (LAGE e GODINHO, 2006).

3.8.2 O Sistema CONWIP

Para obter as vantagens do sistema *Kanban* de limitar a quantidade máxima de estoque em processo, WIP, mas que pudesse ser aplicado a casos e configurações mais gerais de manufatura, Spearman *et al* (1990) propuseram um sistema híbrido, também baseado em cartões, conhecido como CONWIP, ou *Constant Work in Process* (HOPP e SPEARMAN, 2004).

Hoop *et al* (1989) afirmam que a utilização do CONWIP suporta a produção enxuta, com redução do *lead time* e do estoque em processo que permite a rápida detecção de problemas de qualidade e desvios de processo, de forma mais robusta que o *Kanban* em ambientes de maior variedade de produtos, com alteração periódica do *mix* de produtos e produção de pequenos volumes de produtos específicos sob encomenda.

O CONWIP é um sistema baseado em um sinal (que pode ser um cartão, um sinal eletrônico ou mesmo um contenedor) de autorização para a produção baseado no nível de estoque da linha, em que uma lista de trabalhos em carteira, *backlog list*, gerada pelo plano mestre ou a partir da entrada de pedido, é passada ao primeiro processo do fluxo de materiais. Portanto, a *backlog list* passa informação sobre o que entra na linha e o sinal de autorização informa quando (SIPPER e BULFIN, 1997). Havendo um cartão e um contenedor com matéria prima disponíveis, o cartão é anexado ao contenedor no início da linha e viaja com ele até o término da linha. Nesse ponto, o cartão é removido e retorna para a fila de cartões para ser então anexado a um outro contenedor com produtos para atravessar a linha novamente (figura 3.15).

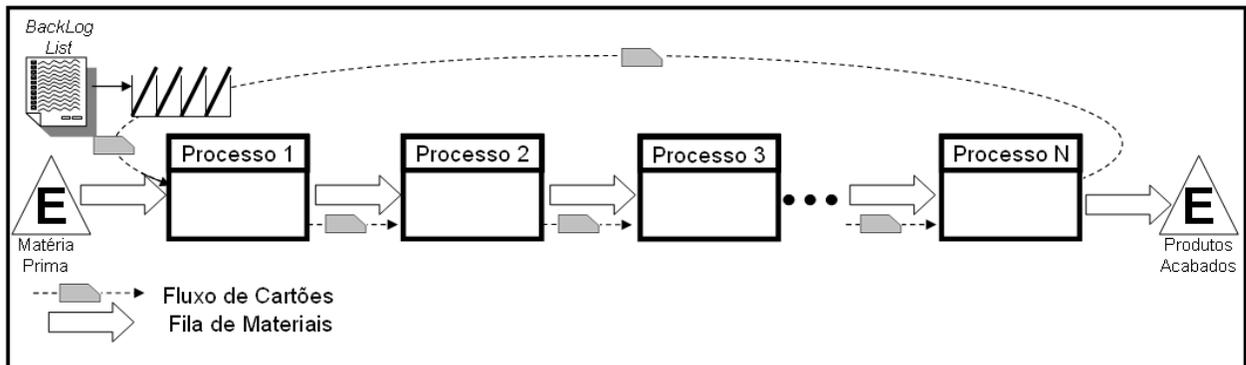


Figura 3.15 - O Sistema CONWIP
Fonte: adaptado de Sipper e Bulfin (1997)

Portanto, a necessidade de um produto específico é determinada pela *backlog list*. Quando o cartão estiver disponível, ele irá sinalizar a produção do primeiro item da *backlog list*, desde que haja matéria prima disponível para ele.

Para Fernandes e Godinho Filho (2010), o que confere a esse sistema a característica de puxar a produção é que a informação de que o nível de WIP abaixou caminha em direção oposta ao fluxo de materiais.

Para Sipper e Bulfin (1997), enquanto no sistema *Kanban* um cartão circula entre duas estações de trabalho, no CONWIP o cartão atravessa um circuito que inclui a linha de produção

completa. Também, no sistema *Kanban*, cada *Kanban* de produção indica a fabricação de um item específico enquanto que no CONWIP os cartões estão designados a uma linha de produção e não a um produto específico, o que garante maior flexibilidade a este sistema.

Para Hopp e Spearman (2001), no sistema CONWIP, o estoque em processo, vai se acumular naturalmente em frente ao CCR, exatamente onde é necessário para garantir que a linha mantenha a sua taxa de produção. Portanto, pode-se afirmar que um sistema CONWIP será regulado pela taxa de produção do CCR.

O CONWIP também está baseado na idéia de contenedores atravessando uma linha, cada um com uma mesma quantidade de volume de trabalho, garantindo que os tempos de ciclo de cada centro de trabalho, incluindo o CCR, sejam constantes (SIPPER e BULFIN, 1997).

Fernandes e Godinho Filho (2010) afirmam que o CONWIP também tem duas variantes, uma na qual o primeiro processo é programado, o CONWIP H, e uma em que nenhum estágio produtivo é programado, o CONWIP CNE.

O CONWIP, combinando a abordagem de “cartões por linha” com uma *backlog list* lida bem com situações onde as demandas são flutuantes e os tempos de *setup* longos (SIPPER e BULFIN, 1997). Pode também ser utilizado para famílias de produtos com um certo grau de variedade, tanto diversificação quanto distinção, de produtos. (FERNANDES e GODINHO FILHO, 2010).

Para Spearman *et al* (1989) apesar, do CONWIP não ser desenhado para um *Job Shop* puro pode ser utilizado em ambientes sob encomenda e lida bem com mudanças periódicas no *mix* de produtos, e mesmo com ordens unitárias, produzidas uma única vez (“one of a kind product”), desde que utilizem o mesmo roteiro de produção.

Em um sistema CONWIP com maior variedades de produtos, os autores sugerem a medição e classificação da contribuição do WIP de cada peça ou ordem em relação a um produto padrão em termos de trabalho no CCR da linha CONWIP. O volume de trabalho deste produto padrão no CCR se torna uma unidade padrão (*standard unit*). Dessa forma 100 peças de um produto em particular que necessitem do dobro de trabalho no CCR que o produto padrão, representariam 200 unidades padrões na linha.

Spearman *et al* (1989) apresentam uma hierarquia de planejamento baseado no sistema CONWIP (figura 3.16) chamada de arquitetura hierárquica de controle, HCA (*Hierarchical Control Architecture*). Essa hierarquia inicia com um módulo de planejamento da demanda (DP,

demand planning) que utiliza a previsão de demanda e os dados de capacidade para determinar qual é o recurso com restrição de capacidade (CCR) da linha e prever ou determinar a demanda desse recurso. Nesta fase os produtos são classificados em unidades padrões, de acordo com o volume de trabalho necessário no CCR, de forma a determinar e manter o nível de utilização do CCR nas linhas CONWIP.

O próximo módulo é chamado de WQS (*WIP and quota setting*, ou determinação do estoque em processo e da taxa de produção) que estabelece a taxa de produção periódica, em termos de unidades padrões, e o número de cartões CONWIP de forma a proteger o CCR sem manter um WIP excessivo. Estes dois módulos interagem entre si até haver balanceamento entre a demanda e o ritmo de produção.

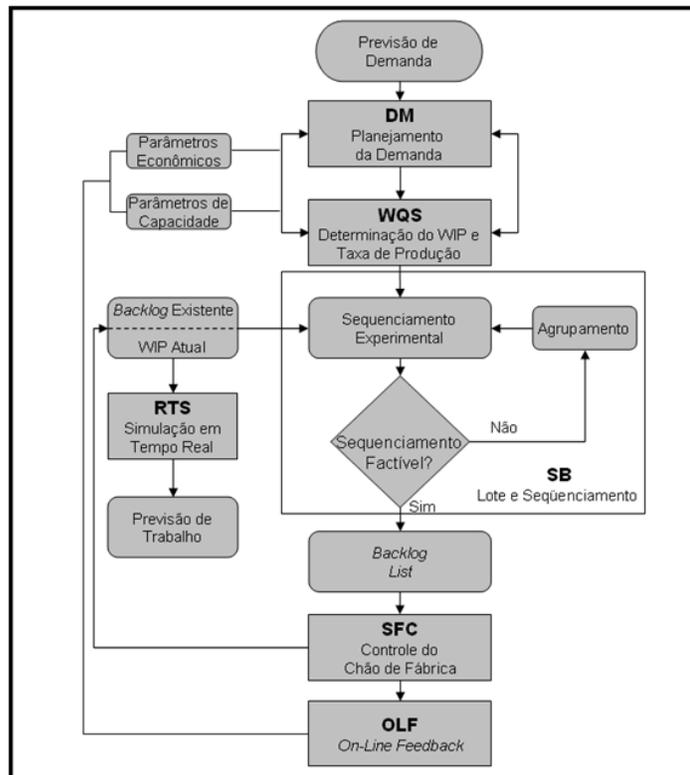


Figura 3.16 - HCA: Arquitetura Hierárquica de Controle

Fonte: Spearman et al (1989)

Esses dados são então enviados ao módulo de lote e sequenciamento (SB, *sequencing and batching*) para determinar a seqüência de trabalho do CCR e estabelecer as datas de entrega de cada ordem. Diferente do MRPII, o objetivo desse módulo não é programar as ordens em todos os recursos, e sim sequenciar os trabalhos com base na capacidade do CCR e nos tempos de

setup, e sugerir o agrupamento necessário das partes em pequenos lotes de processamento até alcançar um sequenciamento que seja factível para cumprir as datas de entrega.

Uma vez encontrado um sequenciamento factível, ele é transferido ao módulo de controle de chão de fábrica, SFC (*shop floor control*) que mantém a *backlog list* no início do processo, monitora a liberação de ordens que é realizada por meio dos cartões CONWIP que chegam da última estação de cada linha CONWIP, e gerencia os *hot jobs*, trabalhos urgentes, que precisam ser realizados e são, então, inseridos no início da *backlog list*. O impacto desses *hot jobs* deve ser avaliado e monitorado por um sistema de simulação em tempo real (RTS, *real time simulation*) que, utiliza informações sobre as condições atuais da linha. O módulo *on-line feedback* (OLF) é responsável por monitorar o sistema completo fornecendo informações sobre o estado atual da linha para a tomada de decisão de curto e longo prazo.

Bokhorst e Slomp (2010) recomendam a utilização do CONWIP em conjunto com o sequenciamento FIFO (*First-in-First-Out*) e do *Takt Time* para alcançar os princípios da produção enxuta em ambientes de alta variedade de produtos e baixo volume (HVLV, *High-Variety, Low-Volume*). Para esses autores enquanto o CONWIP é útil para limitar o inventário em processo, o que reduz e mantém o *lead time* médio de produção, o sequenciamento FIFO faz com que os operadores focalizem os itens mais antigos na fila de trabalho, reduzindo a variabilidade do *lead time* uma vez que nenhum trabalho pode “furar a fila” dos demais, e o *Takt Time* regula o fluxo de trabalho através do sistema em razão da demanda do cliente final. Desta forma, com esses três elementos em conjunto, o *lead time* é reduzido e constante para todos os trabalhos.

3.9 Mapeamento do Fluxo de Valor

O Mapeamento de Fluxo de Valor (MFV) é uma ferramenta utilizada para suportar a implementação do segundo princípio da produção enxuta proposto por Womack e Jones (1998). Ele tem os objetivos de compreender o fluxo completo de uma família de produtos, identificar os desperdícios e fontes dos desperdícios, mostrar a relação entre o fluxo de informação e o fluxo de material, formar a base para um plano de implementação identificando a relação de fluxo de informação e materiais, além de integrar princípios e guiar a utilização das ferramentas da

produção enxuta evitando a implementação de algumas técnicas separadamente (ROTHER E SHOOK, 2003).

Mapear o fluxo de valor é acompanhar a trajetória de produção de uma família de produtos desde o cliente até o fornecedor fazendo uma representação visual do fluxo de materiais e informações. Nesse mapeamento o fluxo de informação deve ser tratado com tanta importância quanto o fluxo de materiais. Depois, por meio de um conjunto de questões chaves desenha-se o mapa do “estado futuro”, uma representação visual de como o fluxo deveria fluir (ROTHER E SHOOK, 2003).

Os objetivos do MFV são a identificação dos desperdícios encontrados ao longo do fluxo produtivo, e revelar oportunidades para utilização dos princípios e ferramentas enxutas para eliminá-los como, por exemplo, o excesso de inventário entre as estações de trabalho, movimentações desnecessárias e tempos de espera elevados.

O MFV também é uma ferramenta baseada no princípio da melhoria contínua, onde os passos devem ser graduais seguindo as etapas básicas da figura 3.17. Ele deve ser realizado em diferentes momentos, sempre fazendo um novo mapeamento do estado atual, uma fotografia do momento atual do sistema de produção, propor um estado futuro, que possa ser alcançado em um curto espaço de tempo, e um plano de ação para alcançar tal estado, baseado nas melhorias para eliminar os desperdícios identificados no estado atual.

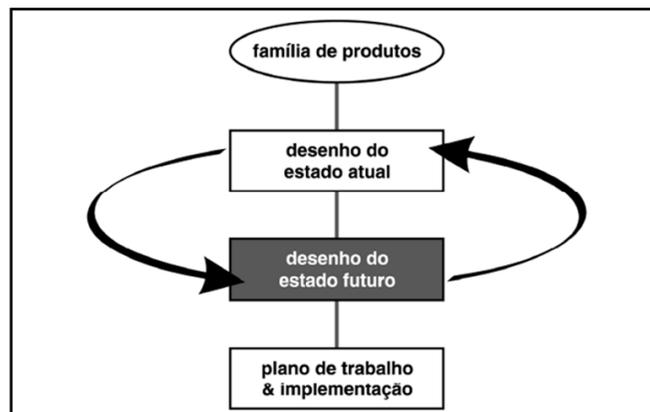


Figura 3.17 - Etapas do Mapeamento do Fluxo de Valor
Fonte: Rother e Shook (2003)

Rother e Shook (2003) afirmam que mapear o chão de fábrica completo, desenhando todo o fluxo de produtos de uma planta industrial em único mapa é muito complexo e contra-produtivo. Ao invés disso, o mapeamento do fluxo de valor deve focalizar em uma família de

produtos, desenhando todas as etapas de processamento, de materiais e informação, necessários para essa família de produtos, de porta-a-porta na empresa.

Portanto, a primeira etapa do mapeamento é a definição da família de produtos seguindo os seguintes critérios:

- a) Uma família de produtos é um grupo de produtos que passa por etapas semelhantes de processamento, utilizem equipamentos em comum nos seus processos e possuam uma quantidade de trabalho semelhante. Para o auxílio na definição da família de produtos é possível utilizar uma matriz que cruza etapas de processamento e equipamentos utilizados com os produtos disponibilizados pela organização. Ela é útil em situações em que a definição de uma família não é tão trivial devido ao *mix* de produtos complexo da empresa (ROTHER e SHOOK, 2003). A figura 3.18 mostra como uma família pode ser definida mediante esse tipo de matriz.

		Etapas de Fabricação & Montagem							
		1	2	3	4	5	6	7	8
PRODUTOS	A	X	X	X		X	X		
	B	X	X	X	X	X	X		
	C	X	X	X		X	X	X	
	D		X	X	X			X	X
	E		X	X	X			X	X
	F	X		X		X	X	X	
	G	X		X		X	X	X	

Uma Família de Produtos

Figura 3.18 - Matriz de Produtos e Etapas de Processo
Fonte: Rother e Shook (2003)

- b) Nazareno (2003) acrescenta que produtos que possuem similaridade de processos, porém com tempos de ciclo muito diferentes, deveriam ser tratados como família de produtos diferente. O autor diz ainda, que o padrão de demanda deveria ser considerado ao formar as famílias de produtos.
- c) Storch e Lim (1999) mostram ainda alguns outros critérios que podem ser utilizados para fazer o agrupamento das famílias como a matéria-prima utilizada, a forma geométrica e o tamanho dos produtos.

A seguir deve-se coletar todas as informações referentes à demanda dos clientes e a frequência de entregas para a família selecionada.

O segundo passo é desenhar o mapa do estado atual (figura 3.19). Para isso, será necessário mapear cada etapa do processo de produção, o fluxo de materiais, indo no sentido da área de expedição para a de recebimento, colhendo todas as informações referentes ao processamento. Para essa etapa são utilizadas as caixas de processo e as caixas de dados, que coletam as informações de tempo de ciclo TC, tempo de trocas TR (*setup*), disponibilidade, número de operadores, tamanho dos lotes, taxa de refugo, etc.

Identificar onde se localizam os estoques e qual o tamanho médio desses estoques em peças e, em dias, considerando o consumo médio diário desses produtos (dividindo-se a quantidade de estoques pelo consumo médio diário). Esses pontos representam onde o fluxo está parando. Identificar se as a movimentação de materiais interna ocorre de forma puxada ou empurrada e indicar as movimentações de expedição para o cliente e a de entrega dos fornecedores.

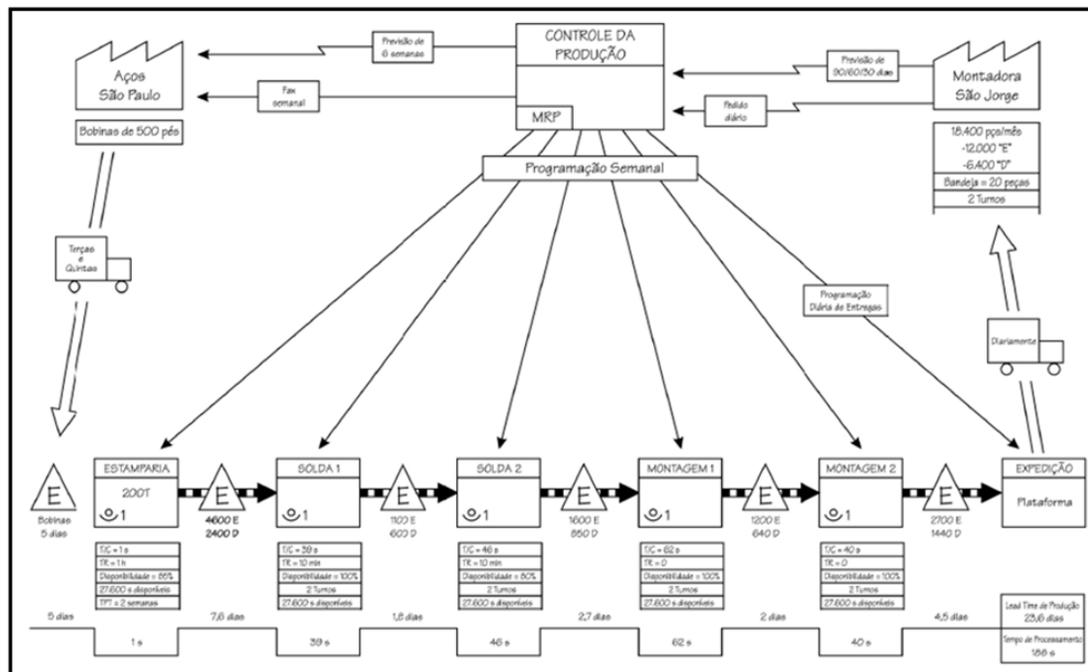


Figura 3.19 - Mapeamento do Estado Atual

Fonte: Rother e Shook (2003)

Deve-se mapear também o fluxo de informação dos processos internos, e a frequência com que são realizados as previsões e os pedidos aos fornecedores, bem como a frequência de recebimento de previsões e pedidos dos clientes. Finalmente, para completar o mapa do estado

atual deve-se desenhar uma linha do tempo sob os processos e os estoques e calcular o tempo total que leva um produto para percorrer todo o chão de fábrica, da chegada da matéria prima até a liberação para o cliente, ou seja, o seu *lead time*. Somando-se somente os tempos de processamento tem-se o tempo total de agregação de valor.

O terceiro passo do mapeamento é realizar o mapeamento do estado futuro, a partir de uma série de procedimentos e questões chaves que guiam a utilização dos princípios e ferramentas enxutas para a eliminação dos desperdícios identificados nas observações do estado atual.

A partir dos princípios da produção enxuta apresentados nas seções anteriores, o objetivo é desenhar um fluxo de valor onde todos os processos estejam conectados ou por meio de um fluxo contínuo ou por meio da produção puxada e que produzindo, de forma nivelada, apenas o que seus clientes necessitem, de acordo com a demanda do cliente final, representada pelo *Takt Time*.

Rother e Shook (2003) apresentam uma lista de questões chaves para o estado futuro, baseados nos conceitos apresentados nas seções anteriores, que devem ser seguidas na sequência abaixo:

1. Qual é o *Takt Time*?
2. A linha produzirá para um supermercado de produtos acabados ou diretamente para a expedição?
3. Onde pode ser usado o fluxo contínuo?
4. Onde precisará ser introduzido um sistema puxado?
5. Em que ponto da cadeia será programado a produção (qual será o *pacemaker*)?
6. Como será nivelado o *mix* de produção?
7. Qual será o incremento de trabalho, *PITCH*, liberado uniformemente ao *pacemaker*?
8. Quais melhorias de processo serão necessárias para fazer fluir o fluxo de valor conforme seu projeto do estado futuro?

A partir das respostas a essas questões chaves e seguindo tais procedimentos, é possível fazer o desenho do mapa do estado futuro (figura 3.20), identificando os pontos de melhoria propostas.

Por fim, na última etapa do mapeamento, as melhorias propostas no mapa do estado futuro devem ser organizadas em um plano de implementação, com atividades viáveis e concretas

e um cronograma para fazer o acompanhamento dessas atividades. Para os autores, a menos que se atinja o estado futuro desenhado em um curto período de tempo, a aplicação de tal ferramenta será inútil. Essa implementação pode ser dividida em etapas, ou *loops*, para cada grande melhoria sugerida no mapa. Por exemplo, o *loop* do fluxo contínuo, com a formação de linhas ou células de manufatura onde o fluxo será unitário, o *loop* puxador, onde será utilizado um sistema puxado de controle de produção, entre outros.

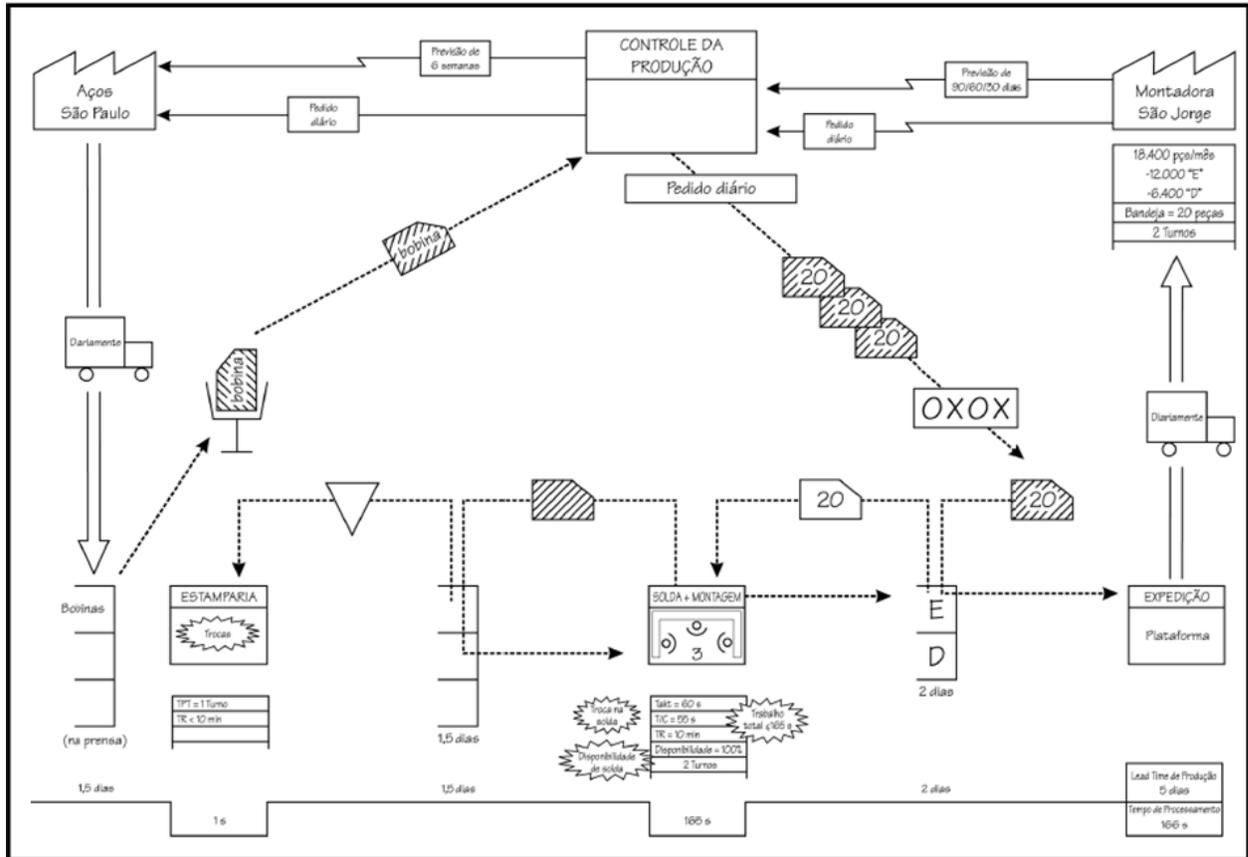


Figura 3.20 - Mapeamento do Estado Futuro

Fonte: Rother e Shook (2003)

3.10 Aplicabilidade no Setor de Bens de Capital sob Encomenda

As drásticas melhorias de desempenho alcançadas por empresas que adotaram a produção enxuta são reconhecidas em sistemas de produção com relativa baixa variedade de produtos e altos volumes de produção (JINA *et al*, 1995). Já a aplicabilidade dos princípios e práticas da produção enxuta em ambientes de produção de alta variedade e baixo volume de produtos,

produzidos sob encomenda, como é o caso do setor de bens de capital sob encomenda, tem gerado um grande debate no meio acadêmico. Esse debate está no centro das duas primeiras questões de pesquisa deste trabalho e esta seção busca trazer algumas contribuições a essa discussão.

White e Prybutok (2001) realizam um estudo da relação entre produção enxuta e o tipo de sistema de produção. Os autores comparam o grau de utilização de dez ferramentas e métodos da produção enxuta em aproximadamente 450 empresas de diferentes tamanhos e segmentos da indústria americana e fazem uma avaliação de sua aderência em sistemas de produção repetitivos, com baixa variedade de produtos, e não repetitivos, com maior variedade de produtos. Embora a maior parte das ferramentas sejam muito mais utilizadas por empresas com sistemas de produção repetitiva, mostrando uma maior aderência dessas práticas a esse tipo de sistema de produção, quase todas puderam ser evidenciadas sendo utilizadas, em maior ou menor grau, também nos sistemas de produção não repetitivos o que, segundo os autores, suporta a premissa de que a produção enxuta pode ser adaptada e implementada em diferentes sistemas de produção. Os autores destacam o *Kanban* como uma das práticas menos aderentes aos sistemas de produção não repetitivos e o *layout* celular da tecnologia de grupo como um método largamente utilizado tanto em sistemas de produção repetitivos quanto não repetitivos.

Para Jina *et al* (1995) a abordagem tradicional da produção enxuta é aplicada apenas em uma pequena proporção de casos e a maioria das empresas deve ter cuidado ao utilizar as práticas da produção enxuta e se preocupar em adaptá-las às suas necessidades específicas. Os autores apresentam os desafios enfrentados por empresas com esse ambiente e como os princípios da produção enxuta podem ser adaptados para atender suas necessidades. Também identificam as vantagens específicas inerentes a tal ambiente que podem ser explorados além de ilustrar como tais princípios estão sendo aplicados dentro dessas empresas. A engenharia de produto voltado para os processos de manufatura e logística, o relacionamento de parceria com os fornecedores e a reorganização do chão de fábrica e dos processos de planejamento de acordo com os princípios da produção enxuta, com a separação em família de produtos de acordo com seu nível de repetição, são os três componentes inter-relacionados que, suportados por um processo de avaliação de desempenho consistente, fazem parte da estrutura proposta pelos autores para a aplicação dos princípios da produção enxuta em ambientes de alta variedade de produtos e baixo volumes.

Na indústria aeroespacial Bamber e Dale (2000) avaliam a aplicação dos princípios da produção enxutas em uma tradicional empresa desse setor e concluem que alguns dos métodos e ferramentas não se mostram tão eficientes como na indústria automotiva em razão das características da demanda e da posição da empresa no mercado. Outros autores, no entanto, afirmam que apesar das dificuldades e adaptações necessárias a produção enxuta é aderente a esse setor (DUDLEY 2005; CRUTE *et al*, 2003 e HAQUE, 2003).

Dudley (2005) apresenta a aplicação dos princípios da produção enxuta em uma planta de manufatura do setor aeroespacial com grande *mix* de produtos e baixos volumes de produção. Esse autor enfatiza que a dificuldade de se criar o fluxo contínuo em uma situação de alta variedade de produtos e baixos volume pode ser superada a medida que se consiga agrupar os produtos em família de produtos e recomenda que a engenharia de produto seja realizada em conjunto e com foco na engenharia de processos como forma de simplificar o fluxo entre os processos produtivos. O autor ressalta ainda a utilização do mapeamento do fluxo de valor, o sequenciamento FIFO e a gestão visual como formas de entender, simplificar e dar visibilidade ao fluxo de valor entre os *Job Shops*. Crute *et al* (2003) acrescentam que os desafios de se implementar a produção enxuta nesse segmento não são maiores do que foram em outros setores, apenas diferentes. Para esses autores, a aplicação desses princípios é mais rápida e eficaz quando realizado em um fluxo de valor dedicado a um produto do que em grandes *Job Shops* com recursos compartilhados e, portanto, a mudança de *layout*, apesar de levar tempo e ser trabalhosa, precisa ser realizada para ter resultados realmente significativos. Além disso, identificar e eliminar os desperdícios e definir objetivos claros como redução do *lead time*, do estoque em processo e estabelecer sistemas puxados de controle de produção devem ser parte da estratégia de manufatura específica de cada planta de produção. A criação de um sistema de produção enxuta, em vez de apenas aplicar certas ferramentas, e o suporte da alta gerência também são fatores necessários para o sucesso de tal implementação (CRUTE *et al*, 2003).

Storch e Lim (1999) apresentam aplicação dos princípios da produção enxuta na indústria da construção naval e mostram como o fluxo contínuo e uniforme pode ser atingido em um típico sistema de produção sob encomenda. Esses autores ressaltam a utilização da tecnologia de grupo e de uma estrutura de projeto orientada a produto para criar um fluxo nivelado com volume de trabalho constante em todos os níveis de fabricação de um navio através de processos com recursos dedicados a cada família de produtos (*Process Lanes*) como pré-requisitos para essa

implementação. Liker e Lamb (2001) também explicam como os princípios da produção enxuta podem ser utilizados na indústria naval e apresentam o termo *Lean Shipbuilding* para definir o processo de produção de alguns estaleiros japoneses. Os autores mostram como a produção sob encomenda de navios pode ser realizada em fluxo contínuo, unitário, em linhas de produção dedicadas a cada família de produtos (blocos curvos e blocos retos), em ritmo constante conforme o *Takt Time* e os resultados de redução de estoque em processo e *lead time* alcançados.

Bokhorst *et al* (2009) apresentam como os princípios de controle da produção enxuta podem ser aplicados em ambientes de produção sob encomenda com alta variedade e baixo volume de produtos. Para esse ambiente, os autores propõe um modelo adaptado das práticas enxutas de controle da produção com a utilização de um sistema híbrido de controle de produção, o CONWIP, integrado com o controle FIFO e a utilização do *Takt Time* para nivelar a produção e reduzir e manter padronizado os estoques em processo e o *lead time* de produção. Os autores apresentam os resultados de um estudo de caso com aumento de 50 a 80 % na pontualidade de entrega e redução de *lead time*.

Outros autores também apresentam como algumas ferramentas da produção enxuta também são utilizadas em menor ou maior grau em ambiente de produção sob encomenda como Irani, (2001), Hendry (1998), Eswaramoorthi (2010).

No Brasil, algumas pesquisas também já discutem a aplicação da produção enxuta em ambientes de produção sob encomenda e com alta variedade de produtos. Stefanelli (2010) propõe um método para nivelamento de produção em ambientes *Engineering to Order* de acordo com os princípios da produção enxuta. Para essa autora, o nivelamento deve ser realizado considerando a carga do CCR e o *Takt Time*, que é calculado de acordo com o procedimento de pontos para normalização dos tempos de ciclo de cada produto, apresentado por Tardin (2001). Dessa forma, a programação do CCR é realizada considerando os diferentes tempos de ciclo dos produtos e de acordo com o ritmo necessário para atender a demanda dos clientes.

Gambi *et al* (2011) estudam a aplicação da produção enxuta em empresa fabricante de produtos sob encomenda do interior de São Paulo que utilizavam, inicialmente, um sistema de produção tradicional para a fabricação de pás para hidro-geração de energia, com *layout* funcional, processamento em grandes lotes, altos tempos de *setup*, transporte e movimentação. Após a implementação dos princípios da produção enxuta, principalmente do fluxo contínuo e o nivelamento da produção, com a adoção do *layout* celular, balanceamento e padronização de

atividades e troca rápida de ferramentas (SMED, para eliminar a superprodução e reduzir o estoque em processo, os autores reportam uma redução de *lead time* em torno de 25% e do estoque em processo em torno de 40%. Gambi (2011) estuda a aplicação de uma série de técnicas e ferramentas da produção enxuta em empresas de produção sob encomenda do pólo industrial de Sertãozinho, interior de São Paulo, e conclui que muitas dessas ferramentas são adaptáveis a tal ambiente. Thompson (2009) estuda a aplicação dos princípios e ferramentas da produção enxuta em estaleiros nacionais, com produção sob encomenda, baseado do processo desenvolvido por Liker e Lamb (2001) e conclui que apesar de tais princípios serem aplicáveis no ambiente estudado, ainda não estão completamente estabelecidos nos estaleiros nacionais.

Parece consenso, portanto, que nem todas as práticas e ferramentas da produção enxuta podem ser utilizadas em ambiente de produção sob encomenda, com alta variedade e baixos volumes de produção. Entretanto, uma série de estudos demonstram que, apesar da necessidade da escolha correta e de certas adaptações em suas práticas e ferramentas, os princípios da produção enxuta são aplicáveis a sistemas de produção sob encomenda, o que auxilia a responder a primeira questão desta pesquisa.

O próximo capítulo apresenta a teoria das restrições e busca identificar que elementos da TOC podem ser utilizados para suportar a implementação dos princípios da produção enxuta nesse ambiente de produção de bens de capital sob encomenda, uma das hipóteses deste projeto de pesquisa.

4 A TEORIA DAS RESTRIÇÕES E A MANUFATURA SINCRONIZADA

4.1 Introdução e Histórico

A teoria das restrições, TOC, não teve um início espetacular, foi resultado não de uma grande visão de futuro da gestão da produção, mas a partir de um simples pedido de ajuda. Dr. Eliyahu Goldratt, físico israelense, se envolveu pela primeira vez com sistemas de produção para ajudar um amigo que possuía uma fábrica de galinheiros. A ajuda consistia em projetar um sistema de programação da produção (SIPPER e BULFIN, 1997). Ele desenvolveu um sistema informatizado que triplicou a produção da planta de galinheiros em um curto período de tempo. Esse programa foi aperfeiçoado nos anos seguintes até poder ser comercializado (WATSON, BLACKSTONE e GARDINER, 2006)

As raízes da teoria das restrições, portanto, remonta a um programa de programação finita baseado em um algoritmo proprietário chamado OPT, que originalmente significava *Optimized Production Timetables* (Tabela de Produção Otimizada) e depois foi mudado para *Optimized Production Technology*. Ele foi desenvolvido por Goldratt e três parceiros israelitas, que levaram para os EUA no final de 1979 e formaram uma empresa chamada Creative Output Inc (FOX, 2010). A solução foi apresentada quando Goldratt entregou um artigo para a Conferência Internacional APICS de 1980.

O OPT foi rapidamente adotado por um grande número de grandes corporações que afirmavam que o retorno do investimento no *software* ocorria em menos de seis meses, mesmo que o produto não fosse exatamente barato (GOLDRATT e COX, 2003). Em setembro de 1985 a Harvard Business Review publicou que mais de 100 empresas já haviam adquirido o OPT nos EUA, a um preço mínimo de R \$ 2 milhões.

No entanto, com o sucesso vieram as controversas, à medida que diversas empresas tiveram problemas de execução do OPT pela falta de entendimento no que dizia respeito à forma como as programações do OPT eram geradas, pois enquanto mantinham algumas estações eficientemente ocupadas, outras ficavam ociosas por muitos momentos. Isso contrariava o sistema de medição de desempenho em vigor na maioria das fábricas nos EUA, uma vez que os trabalhadores geralmente eram medidos pela eficiência individual, por vezes, eles ignoravam a

programação e produzam peças em antecipação ou para estoque, na tentativa de permanecerem ocupados e evitar avaliações de desempenho desfavoráveis. Essas ações criavam fluxos de materiais dessincronizados através da fábrica, colocando em risco o sucesso da OPT. (WATSON *et al*, 2006).

Para combater esse comportamento, Goldratt decidiu educar os gestores e trabalhadores. Ele e sua equipe passaram a dar seminários que, apesar de não abordarem o *software*, abordavam a falácia da eficiência como sendo o principal indicador de produtividade e as relações de causa e efeito que existem na produção (GOLDRATT e COX, 2003 e WATSON *et al*, 2006).

Nos anos seguintes, portanto, enquanto o sistema de *software* foi evoluindo, o outro lado da OPT foi sendo desenvolvido - a filosofia de gestão OPT e suas regras, que a maioria das pessoas entendeu, primeiramente, como uma forma de gerir a manufatura e lidar com gargalos, e evoluiu, posteriormente, para uma abordagem de gestão mais robusta de lidar com a geração de *throughput* em vez da redução de custos (FOX, 2010). Essas regras se tornaram os princípios da TOC e da manufatura sincronizada e serão apresentadas na seção 4.3.

A atenção de Goldratt na educação dos gestores, e a dificuldade deles em entender os princípios apresentados proporcionaram o impulso para a publicação de “A Meta”, uma novela de produção em que o protagonista, salva sua planta com a ajuda de algumas sugestões apontadas por um mentor. A Meta foi escrita, em grande parte, para educar os trabalhadores nas instalações empregando o OPT em um esforço para que eles seguissem as programações do OPT, no entanto, tornou-se um *best-seller* de negócios com várias empresas tentando implementar os conceitos divulgados no livro (WATSON *et al*, 2006).

Apesar do sucesso de A Meta e da própria filosofia de gestão OPT ter desafiado muitos princípios de gestão e criado sua própria controvérsia, foi o *software* OPT que causou as maiores polêmicas e tomou as atenções da comunidade industrial e acadêmica. Primeiro com uma série de artigos intitulados "OPT, MRP ou JIT Qual é melhor?" que desafiaram a supremacia do MRP como uma abordagem de programação e criaram uma grande agitação na comunidade APICS (FOX, 2010). Depois, com a forma com que a Creative Output tentou proteger os algoritmos proprietários, instalando OPT em uma caixa inviolável para que a única saída que a planta recebia era uma programação. Assim, a maneira pela qual o OPT foi inicialmente comercializado contribuiu para a falta de entendimento no que diz respeito à forma como as programações eram geradas. Esse véu de sigilo foi perfurado na sequência de uma falha de execução na M&M Mars,

que entrou com uma ação contra a Creative Output e pediu a liberação dos algoritmos OPT em um esforço para provar sua afirmação de que a empresa deveria ter percebido que o OPT era uma solução inadequada à sua situação específica e não poderia ter oferecido os benefícios prometidos (WATSON *et al*, 2006)

A história da Creative Output continuou como uma montanha-russa, que terminou em uma grande disputa entre Goldratt e seus sócios e na falência da empresa. Os direitos do *software* OPT foram vendidos a uma empresa inglesa chamada Scheduling Technologies Group (STG). No final de 1986, Goldratt e Fox, fundaram o Avraham Y. Goldratt Institute e desenvolveram ao longo de um período de dez anos, o que é hoje conhecido como TOC (FOX, 2010).

A polêmica do *software* e o sucesso do livro e das implementações baseadas no conjunto de heurísticas e técnicas apresentadas nele, fez com que Goldratt admitisse que o esforço para implementar o *software* desviava a atenção da organização para o que realmente importava: as mudanças necessárias em conceitos fundamentais, indicadores de desempenho e procedimentos.

No entanto, as dificuldades encontradas por muitas empresas na aplicação dos princípios e heurísticas do livro, como a falta de habilidade em propagar a mensagem pela empresa, falta de habilidade para aplicar os conceitos em procedimentos práticos para a fábrica e a falta de habilidade de persuasão dos tomadores de decisão, fizeram com que Goldratt se concentrasse em descrever de forma precisa a necessidade de mudar os indicadores de desempenho, e as regras para o que o autor chamou de procedimentos logísticos, decorrente diretamente das cinco etapas de focalização, o Tambor-Pulmão-Corda, ou DBR, que deriva seu nome de metáforas desenvolvidas em “A Meta”, e a Gestão do Pulmão, que foram enunciados e publicados no livro “A Corrida” (The Race, GOLDRATT E FOX, 1989) e formaram a base do que foi chamado nesse livro de manufatura sincronizada.

Nesse período, Goldratt conseguiu verbalizar os cinco passos do processo decisório de melhoria contínua, descritos na seção 4.3, apenas implícitos nos trabalhos anteriores e publicados mais tarde na segunda edição de “A Meta”, que possibilitaram, entre outras coisas, a criação de um *software* melhor que o OPT (ver seção 4.7.2) para a programação da produção, o desenvolvimento de soluções para duas outras áreas que sofrem com problemas logísticos, a gestão de projetos e a distribuição. Esse corpo de conhecimento se tornou tão amplo que passou a ser chamado de **teoria das restrições** (GOLDRATT e COX, 2003). Nas próprias palavras de Goldratt (1988, *apud* SIPPER e BULFIN, 1997):

Provavelmente o resultado mais importante foi a formulação do que eu considero uma teoria geral de como administrar uma organização. Eu a chamo de teoria das restrições e eu considero tudo o que eu fiz anteriormente, como uma mera derivação desta teoria.

Desde o início do seu desenvolvimento, os defensores da TOC estão em campanha para a reforma do sistema de contabilidade padrão de absorção de custos, a Contabilidade de Custos. Essa campanha foi iniciada na International Conference APICS de 1983 quando Goldratt proclamou que “a contabilidade de custos é o inimigo público número um da produtividade”. Segundo Goldratt, os princípios de contabilidade de custos, quando aplicada a indicadores de desempenho locais, ao custo do produto, e às decisões de investimento fornecem informações enganosas ou incorretas aos tomadores de decisão, que pode causar a execução de políticas ou práticas que são incompatíveis com a meta da empresa. Os defensores da reforma afirmam que a contabilidade de custos tradicional sofre de pressupostos antiquados que não cabem mais nos sistemas de produção altamente flexíveis (WATSON *et al*, 2006).

Confrontando a TOC e a contabilidade de custos, Goldratt publicou “A Síndrome de Palheiro” (*The Haystack Syndrome*, GOLDRATT, 1991), que apresentou as bases de confronto entre o que chamou de “o mundo dos custos” e “o mundo dos ganhos” (*throughput world*) que incitou o interesse renovado entre os defensores do TOC na revisão do quadro de contabilidade de custos. Seu trabalho, em conjunto com outros posteriores, levou ao desenvolvimento de um sistema de medição de desempenho focado em processos que foca a organização em ações que melhorem o desempenho financeiro global. Esse sistema, chamado de *Throughput Accounting*, ou Contabilidade de Ganho, composto por nove medidas inter-relacionadas para uso em vários níveis de organização que foi apresentada para ser válida no contexto da teoria econômica (WATSON *et al*, 2006).

Há indícios claros de que a comunidade contábil tradicional tem tomado conhecimento da Contabilidade de Ganhos e seus benefícios. Em 1995 o Institute of Management Accounting (IMA) dos EUA patrocinou uma pesquisa sobre implantação da TOC na indústria americana e publicou as conclusões ressaltando muitos dos benefícios da TOC e dos indicadores de desempenho utilizados pela Contabilidade de Ganhos (GOLDRATT e COX, 2003). Em 1999, novamente o IMA, em conjunto com a Arthur Andersen, publicou a declaração 4HH afirmando que a TOC é uma parte fundamental no *kit* de ferramentas para focar nos produtos e serviços que irão maximizar o valor agregado aos clientes e a lucratividade das organizações. Em novembro de 2004, o Financial Accounting Standards Board divulgou na Declaração 151, a primeira

mudança substancial de custeio de estoque em 50 anos, uma mudança que representa uma oportunidade para futura compatibilidade entre as comunidades da contabilidade tradicionais e da Contabilidade de Ganho (WATSON *et al*, 2006).

À medida que as organizações e seus gestores se acostumaram e passaram a implementar muitas das soluções da TOC para o chão de fábrica e seus indicadores de desempenho, muitas empresas passaram a se defrontar com situações onde a restrição saía da manufatura e passava a não ser mais física, e sim resultado de uma série de políticas errôneas das organizações. Ficou evidente, então, que tudo que havia sido feito até o momento dizia respeito ao caso específico onde a restrição é física (mercado, recurso ou matéria prima) e que seria preciso desenvolver um processo de raciocínio genérico que iria capacitar as pessoas a identificar rapidamente políticas errôneas, a restrição, elaborar novas políticas que não implicassem em novos problemas devastadores e construir um plano de implementação viável (GOLDRATT e COX, 2003). Mantendo seu interesse pelo método socrático e de auto-descoberta, em 1994, Goldratt publicou *It's Not Luck* (“Isto Não é Sorte”, GOLDRATT, 1994), que não era um livro de receitas para a implementação de alguma nova solução genérica da TOC, mas sim apresentava um roteiro para descobrir soluções inovadoras para problemas complexos não estruturados: o *The Thinking Process* ou o Processo de Raciocínio (WATSON *et al*, 2006).

As ferramentas desse processo fornecem um meio rigoroso e sistemático para direcionar a identificação e a solução de problemas de negócios não estruturados relacionados às políticas de gestão. As ferramentas do processo de raciocínio são compostas de duas categorias de lógica: a lógica Efeito-Causa-Efeito que está na base da Árvore da Realidade Atual (CRT), Árvore da Realidade Futura (FRT), e da Árvore de Transição (TT) e a lógica da condição necessária na qual é utilizada a Nuvens de Evaporação (EC) e Árvore Pré-Requisito (PRT) para evidenciar pressupostos ocultos que impedem a identificação de soluções eficazes para os problemas específicos principais. As ferramentas de aplicação são inter-relacionados, de forma que a saída de um é usado como entrada para um ou mais outros (WATSON *et al*, 2006).

Ultimamente, em uma extensão lógica dos instrumentos de aplicação do Processo de raciocínio, vários autores começaram a experimentar a utilização das ferramentas para análise e formulação de estratégias. Para analisar o ambiente externo competitivo e identificar o que mudar, os autores empregam a CRT. A EC e ferramentas FRT são utilizadas para identificar qual

a estratégia a adotar. Finalmente, a PRT e TT são usados para desenvolver planos de implementação da estratégia.

Dessa forma, a TOC evoluiu a partir de um (não tão) simples sistema informatizado de programação de produção em um conjunto de ferramentas de gestão integrada que abrange três áreas interligadas: produção/logística, medição de desempenho e ferramentas para solução de problemas/processo de raciocínio, figura 4.1.

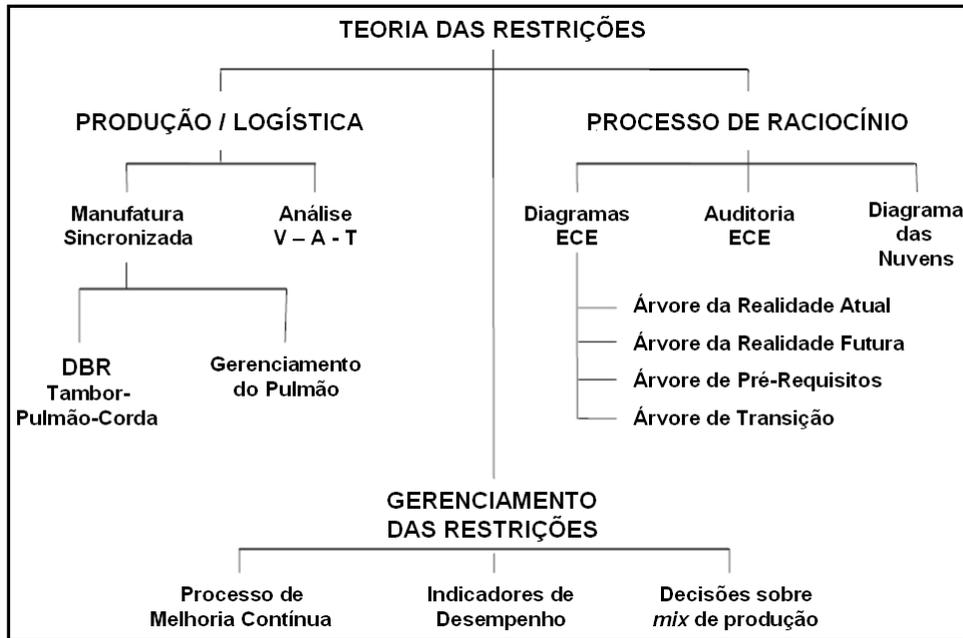


Figura 4.1 - Representação Esquemática da TOC

Fonte: adaptado de Cox III e Spencer (2002)

Mais recentemente, também o campo da gestão de projetos tem sido foco da teoria das restrições. Embora a gestão de projetos pela corrente crítica, o CCPM (*Critical Chain Project Management*), um método para planejamento e controle de projetos baseado na TOC, tenha sido apresentado pela primeira vez em 1990, na *International Jonah Conference*, ele permaneceu pouco estudado até a publicação em 1997 do livro “A Corrente Crítica” (*The Critical Chain*, GOLDRATT, 1997).

Na essência, o CCPM é a aplicação dos cinco passos de melhoria contínua à gestão de projetos, empregando Pulmões em pontos críticos de controle para alavancar o desempenho dos projetos por meio da proteção contra e gestão proativa das variações dos tempos de conclusão das atividades. O CCPM é similar ao CPM (*Critical Path Method*), gestão de projetos pelo caminho crítico, embora existam três grandes diferenças como o método de alocar o tempo das atividades,

a utilização dos pulmões e a eliminação dos conflitos de recursos. Embora ainda existam críticas referentes ao CCPM no que se refere à duração maior dos cronogramas com adição dos pulmões e à dificuldade de empregar o gerenciamento de pulmões nos projetos por serem únicos, o CCPM foi desenvolvido para produzir cronogramas que possam realizar os projetos no prazo planejado e fornecer um método para gerir os projetos proativamente para minimizar os danos causados pela variação no tempo de conclusão das tarefas. Existem diversos estudos que comprovam a robustez do método no que diz respeito à duração dos projetos e confiabilidade de conclusão no prazo planejado em comparação com as formas tradicionais de gestão de projetos por PERT e CPM (WATSON *et al*, 2006). Rand (2000) afirma que a cadeia crítica é definida como a maior cadeia de etapas dependentes dos mesmos recursos, ou seja, da restrição, e que as mensagens chave do CCPM são o foco em áreas críticas por meio da identificação de tal cadeia crítica, a utilização dos pulmões em pontos apropriados e evitar a utilização de marcos (*milestones*). Herroelen e Leus (2001), afirmam que o gerenciamento de projeto por meio da corrente crítica é realizado pelo gerenciamento dos pulmões de tempo e utiliza três tipos de pulmão para proteger a linha de base do cronograma a fim de lidar com as incertezas do projeto: o pulmão de recurso, o pulmão de alimentação e o pulmão de projeto.

A figura 4.2 apresenta a evolução da Teoria das Restrições desde seu início como um sistema informatizado de programação da produção passando pelas diversas disciplinas da gestão de operações até os dias de hoje. Essa evolução está dividida em Eras, cuja fronteira está demarcada pelos lançamentos de cada livro de Goldratt, embora seja considerado o grande criador dessa abordagem, ele não foi o único a contribuir para a formação desse corpo de conhecimento (WATSON *et al*, 2006).

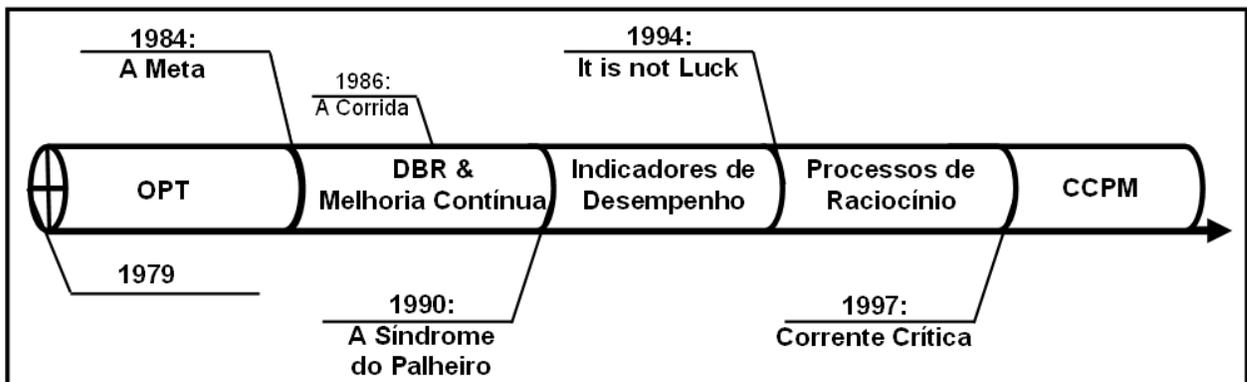


Figura 4.2 - As Eras da Evolução da TOC
Fonte: adaptado de Watson *et al* (2006)

Esta dissertação se aterá aos aspectos da gestão da produção da teoria das restrições, mais especificamente, no que ficou conhecida nos anos 80 como manufatura sincronizada, que estão baseados no processo decisório de melhoria contínua, nos indicadores de desempenho operacional, nos princípios da TOC para a manufatura, no sistema de coordenação de ordens DBR e no método do gerenciamento de pulmão. Todos serão mais detalhadamente apresentados nas seções a seguir.

4.2 A Meta da Organização e os Indicadores de Desempenho

Para a TOC, a principal condição necessária à sobrevivência de uma empresa com fins lucrativos, a sua “Meta”, é ganhar mais dinheiro hoje e no futuro, representada por meio dos indicadores de resultado financeiro, Lucro Líquido, Retorno Sobre Investimento e Fluxo de Caixa. Para a produção, essa Meta pode ser traduzida como a busca constante pela melhoria de três indicadores de desempenho operacional, que devem ser medidos para identificar se a organização está atingindo a sua “Meta” (GOLDRATT e COX, 2003; GOLDRATT e FOX, 1989; GOLDRATT, 1991):

- a) **Throughput - “T” (Ganho):** índice pelo qual o sistema gera dinheiro por meio das vendas. É importante observar na definição que o *Throughput* só é obtido quando o produto é efetivamente vendido. Dessa forma evita-se qualquer confusão entre produção e *Throughput*. Se o que foi produzido não for realmente vendido não se obtém *Throughput*.
- b) **Inventário- “I” (Inventory):** todo o dinheiro que o sistema investe em coisas que pretende vender, transformar em *Throughput*. Inventário, como usado aqui se desvia das definições tradicionais, já que exclui o valor agregado pela mão de obra.
- c) **Despesa Operacional -“OE” (Operating Expenses):** todo o dinheiro que o sistema gasta para transformar Inventário em *Throughput*. Inclui não só a despesa de mão de obra direta, mas também a administração, computadores, etc.

Dessa forma podemos definir a rentabilidade do ponto de vista da TOC. Para ser rentável, a empresa deve gerar *Throughput* (T) a uma taxa maior do que gasta (OE). Sendo assim, o lucro líquido é calculado simplesmente como:

$$\text{Lucro Líquido (LL)} = \text{Throughput} - \text{Despesa Operacional} = T - OE$$

A outra importante medida de lucratividade é o retorno sobre investimento, pois um lucro inaceitável é feito quando está trazendo uma baixa taxa de retorno sobre investimento e esse retorno é muito influenciado pela quantidade de dinheiro que está “empitada” no sistema, ou seja, o Inventário. Dessa forma, define-se o retorno sobre investimento como:

$$\text{ROI} = \text{Lucro Líquido} / \text{Inventário} = (T - OE) / I$$

Aumentar o *Throughput*, reduzindo simultaneamente o Inventário e a Despesa Operacional deveria ser o objetivo de qualquer empresa. Mas, naturalmente, um dos três indicadores tem prioridade sobre os outros. Uma das características da TOC é a ênfase no *Throughput* como o indicador com o maior grau de alavancagem, tanto a curto como a longo prazo. Isto se dá principalmente devido ao fato de que, dos três indicadores, as oportunidades para aumentar o ganho são praticamente ilimitadas. Certamente, as reduções de estoque e/ou despesa operacionais não podem ir para menos de zero, e em muitos casos, a redução de um ou ambos pode ter um impacto negativo significativo sobre o ganho. Enquanto isso, o ganho não apresenta qualquer limitação intrínseca e deve ser a pedra fundamental de um processo de melhoria contínua que está de acordo com a Meta da empresa de ganhar mais dinheiro hoje e no futuro (GOLDRATT, 1991).

Essa ênfase de primeiro pensar no *Throughput*, depois no inventário e, só então as despesas operacionais é conhecido como "Mundo do *Throughput*", e muitas vezes é realizada em contraste com a obsessão comum da gestão pela redução de custos, daí o termo "Mundo dos Custos" (GOLDRATT, 1991). Veja esquema na figura 4.3.

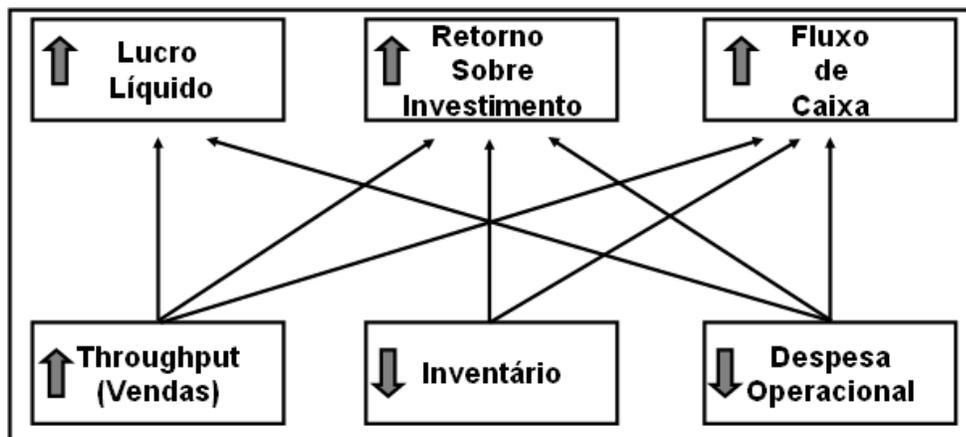


Figura 4.3 - Impactos Diretos dos Indicadores Operacionais nos Indicadores de Resultado Financeiro
Fonte: adaptado de Goldratt e Fox (1989)

Embora a ênfase esteja no aumento do *Throughput*, Goldratt e Fox (1989) ressaltam também a grande importância da redução de Inventário para atingir a Meta da organização, pois determina a futura habilidade da empresa em competir em seus mercados. Embora, a primeira vista, ele só apresente um impacto direto no Retorno Sobre Investimento e no Fluxo de Caixa, sem afetar diretamente o Lucro Líquido, é necessário um olhar mais aguçado nesse indicador. Pelo custo de carregamento, ou manutenção de inventário, a redução do inventário reduz diversas despesas operacionais, como despesas de estocagem, juros, obsolescência, movimentação de materiais, retrabalhos, etc. Dessa forma, ela tem um primeiro impacto indireto óbvio nos três indicadores de resultado financeiro.

Existe ainda, porém, um segundo impacto indireto, menos óbvio, causado por alguns benefícios “intangíveis” da redução do inventário, o que está em sintonia com as estratégias japonesas de redução drásticas dos estoques em processo. Para os autores, essa redução do inventário é conseguida pela divisão e sobreposição dos lotes e da liberação de matéria prima apenas para manter a restrição ocupada. Dessa forma, a matéria prima deve ser liberada em função da necessidade da restrição e os lotes de processamento da restrição devem ser divididos em pequenos lotes de transferência, que passam rapidamente aos processos seguintes, possibilitando uma redução do estoque em processo e simultaneamente, uma drástica redução dos *lead times*.

Goldratt e Fox (1989) chamam essas novas ligações indiretas causadas pela redução de inventário de Canal da Vantagem Competitiva, pois tem um impacto adicional na redução das despesas operacionais, na forma de redução de horas extras, equipamentos adicionais, etc, e podem afetar três categorias da vantagem competitiva de uma empresa causando impacto nas suas vendas futuras, ou seja, aumentando o *Throughput*. Afetam a vantagem em **Produto**, pelo aumento dos níveis de qualidade trazidos pela redução dos inventários, e da introdução mais rápida de novos produtos. Afetam também a vantagem em **Preço**, ao possibilitar uma margem mais alta, por meio da redução do custo pela necessidade de horas extras e equipamentos adicionais para cumprimento dos pedidos no prazo e, portanto, uma maior flexibilidade de negociação. Afeta, por último, a **Resposta** ao cliente, possibilitando uma resposta compatível com a realidade de competição pela redução dos *lead times* trazidos pela redução dos estoques em processo e, uma maior pontualidade de entrega, mediante uma melhor previsibilidade na estimativa da data de entregas dos produtos aos clientes, trazidos pela manutenção de níveis

baixos e constantes de estoque em processo. Dessa forma, a redução do Inventário está afetando o Lucro Líquido duas vezes, de forma indireta, e o Retorno sobre Investimento e o Fluxo de Caixa três vezes, de forma direta e indireta (figura 4.4)

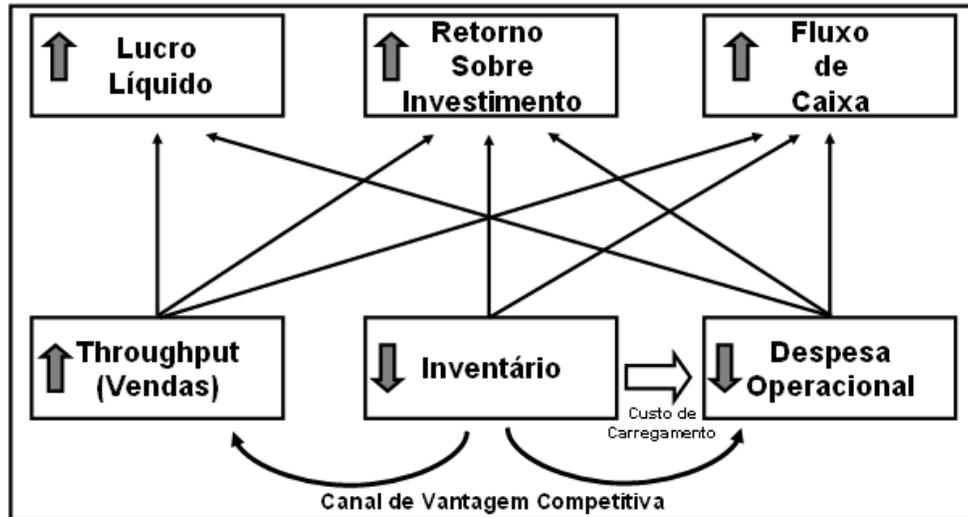


Figura 4.4 - Impacto Diretos e Indiretos dos Indicadores Operacionais nos Indicadores de Resultado Financeiro
Fonte: adaptado de Goldratt e Fox (1989)

4.3 O Processo de Melhoria Contínua e os Princípios da TOC e da Manufatura Sincronizada

A crença fundamental da TOC é que todo sistema constituído com uma meta definida deve possuir ao menos um componente que limita seu desempenho em relação àquela meta. Se assim não fosse, a empresa teria uma lucratividade infinita. Tal componente é definido pela TOC como “restrição” do sistema. Também, esses mesmos sistemas, por apresentarem um conjunto de variáveis dependentes, deverão ser sempre limitados por um número pequeno de restrições.

A TOC propõe que toda organização deve seguir o seguinte processo decisório (figura 4.5) focalizado como parte de um processo de melhoria contínua (GOLDRATT e COX, 2003):

1. Identificar a restrição do sistema;
2. Explorar ao máximo a restrição do sistema;
3. Subordinar todo o resto à política de exploração da restrição;
4. Elevar a restrição do sistema;

- Assim que a restrição for quebrada, voltar ao primeiro passo, evitando que a inércia das políticas atuais se torne uma restrição.

O primeiro passo é identificar as restrições do sistema e priorizá-las de acordo com seu impacto na meta do sistema. Embora possa haver muitas restrições em um dado momento, apenas algumas realmente restringem o sistema naquele momento. O segundo passo é determinar como explorar aquela restrição para melhorar o desempenho. Uma vez que se acredite que há apenas algumas restrições que limitam o desempenho, todos os demais recursos são não-restritivos. Portanto o terceiro passo é incluído para garantir que os demais recursos estejam subordinados a essas restrições. Não há razão alguma para gastar um tempo extra gerindo tais recursos, para melhorar o desempenho do sistema. O quarto passo afirma que a restrição deve ser elevada de forma que algumas ações sejam tomadas para minimizar seu impacto e melhorar o desempenho. Quando isso é realizado, não se pode parar, pois existe uma forte tendência de retornar à antiga forma. O último passo é incluído para garantir que se continue com esse processo e encontre a nova restrição do sistema, garantindo assim a melhoria contínua (NARASIMHAM, *et al*, 1995).



Figura 4.5 - Processo de Melhoria Contínua da TOC
Fonte: adaptado de Rahman (1998)

Partindo do lema de que “a soma dos ótimos locais não é igual ao ótimo global” Goldratt e Fox (1989) formulam as nove regras que formam a base para a Manufatura Sincronizada (NARASIMHAM, *et al*, 1995):

- Não balanceie a capacidade, balanceie o fluxo;

2. O nível de utilização de um não gargalo é determinado por alguma outra restrição do sistema, não por sua própria capacidade.
3. Utilização e ativação de um recurso não são sinônimos.
4. Uma hora perdida no gargalo é uma hora perdida em todo o sistema.
5. Uma hora poupada num recurso não gargalo é uma miragem
6. Os gargalos governam tanto o *Throughput* como os inventários do sistema.
7. O lote de transferência não precisa ser, e muitas vezes não deveria ser, igual ao lote de processamento.
8. O lote de processamento deveria ser variável, não fixo.
9. As prioridades só podem ser estabelecidas analisando as restrições do sistema.

4.4. As Restrições do Sistema

Como foi apresentado, a base da teoria das restrições é que toda organização tem restrições que a impedem de atingir um nível maior de desempenho e que, portanto devem ser identificadas e geridas para aumentar o desempenho.

Para Rahman (1998) os dois conceitos fundamentais da TOC são que todo sistema deve ter pelo menos uma restrição, pois do contrário teria um lucro ilimitado, e que, ao contrário do pensamento convencional, a existência de tal restrição é uma oportunidade de melhoria e não um fator negativo do sistema.

A restrição tem uma importância vital em um sistema de produção ao determinar os dois principais indicadores de desempenho operacional para a TOC, o *Throughput* e o Inventário (princípio 6).

Embora possa haver muitas restrições em um dado momento, apenas algumas realmente restringem o sistema naquele momento e quando uma restrição for quebrada, caso seja, deve-se identificar a próxima restrição e “melhorá-la”, continuando, dessa forma, o processo de melhoria.

4.4.1 Restrição de Capacidade

Segundo Goldratt e Cox (2003), é necessário diferenciar os recursos da empresa em dois tipos de recurso, Gargalos e não-Gargalos. Um gargalo é um recurso cuja capacidade é igual ou inferior à demanda imposta, alocada, a ele.

Os gargalos não são necessariamente bons ou ruins, são simplesmente uma realidade, e à medida que eles existam, devem ser usados para controlar o fluxo de materiais através do sistema até o mercado, e isso deveria ser feito fazendo o fluxo através do gargalo ser igual à demanda do mercado.

Para Narasimham, *et al* (1995), enquanto um recurso gargalo é o recurso cuja capacidade é igual ou menor que a demanda alocada a ele, um recurso não-gargalo é aquele cuja capacidade é maior que a demanda alocada para ele.

Sipper e Bulfin (1997) afirmam que o conceito de gargalo está associado com um fluxo de eventos, onde o gargalo é o componente do fluxo que permite, por qualquer razão, que menos eventos passem por ele que no restante do fluxo. Na TOC o gargalo é um tipo de restrição do sistema ligado ao chão de fábrica. Para os autores, o gargalo é um recurso cuja capacidade é menor ou igual à demanda de mercado, ou seja, um recurso que restringe o *Throughput*.

Goldratt e Cox (2003) afirmam que existem quatro combinações fundamentais entre os recursos gargalos e não-gargalos que podem representar qualquer situação de manufatura. As quatro combinações estão representadas na figura 4.6.

Nesse exemplo, o recurso X representa um gargalo e o Recurso Y representa um não-gargalo. Podemos supor que, neste caso, a capacidade disponível nos Recursos X e Y seja a mesma, porém, para o mesmo nível de demanda, a capacidade utilizada em X será de 100%, por definição, e no Recurso Y será menor, 75%, por exemplo.

1. Caso 1: No primeiro caso, em que o material flui de um recurso não-gargalo para um recurso gargalo, apenas parte da produção total de Y pode ser processada por X e, caso o Recurso Y não seja paralisado, o restante se transformará em estoque no sistema.
2. Caso 2: Neste caso, em que o material flui de um recurso gargalo para um não-gargalo, toda a produção de X será processada por Y, deixando o recurso Y ocioso, o que é perfeitamente aceitável.

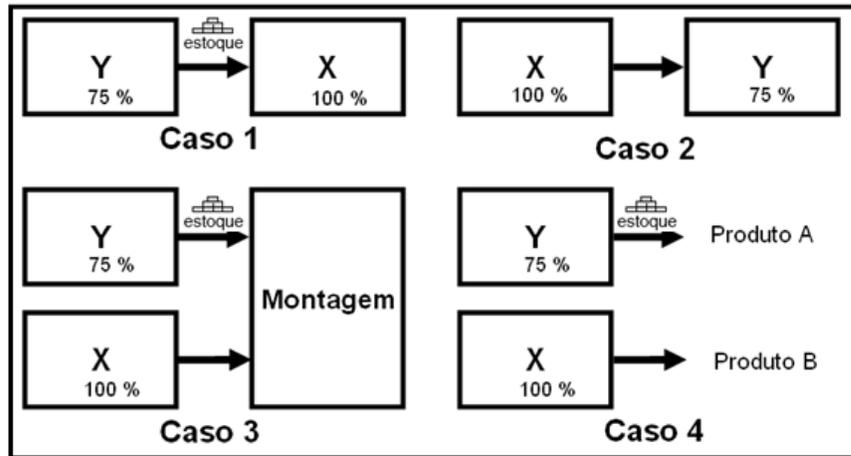


Figura 4.6 - Relacionamento entre Recursos Gargalos e Não-Gargalos
 Fonte: adaptado de Goldratt e Cox (2003)

3. Caso 3. Neste terceiro caso, algumas peças não passam por um gargalo, seu processamento é feito apenas por não-gargalos, e o fluxo vai diretamente de Y para a montagem. Outras peças, porém, passam por um gargalo e estão no trajeto de X para a montagem, onde são combinadas com as peças de Y para acabarem um produto. Neste caso o fluxo da montagem fica limitado pela produção do recurso gargalo X e, caso Y seja ativado mais do que necessário, se formarão estoques em processo antes da montagem. Este caso pode representar uma série de outras situações onde a rota Y representaria alguns recursos não-gargalos alimentando outros não-gargalos até a montagem final e a rota X representaria uma série de recursos não-gargalos alimentando um gargalo que por sua vez alimenta outros recursos não-gargalos. O resultado de manter os recursos não-gargalos ativados apenas para mantê-los trabalhando é o mesmo, ou seja, estoque em processo se formando antes da montagem.
4. Caso 4: Neste caso, X e Y processam produtos diferentes, ou seja, têm demanda independente. Dessa forma, X é o gargalo para a produção do produto B e o mercado é a restrição para a produção do produto A e, caso Y seja ativado mais do que o necessário para atender a demanda de mercado do produto A, irão se formar estoques de produtos acabados.

Essas quatro situações confirmam o segundo princípio que afirma que o nível de utilização de um recurso não-gargalo é determinado por outra restrição do sistema e não pela sua própria capacidade.

Em seu segundo livro sobre o tema (GOLDRATT e FOX, 1989), Goldratt utiliza a expressão Recurso com Restrição de Capacidade, ou CCR (*Capacity Constraint Resource*), para denominar os recursos que impõem o índice de produção da fábrica inteira.

Para Narasimham, *et al* (1995) um CCR é um recurso que, caso não programado e gerido adequadamente, pode impedir que o fluxo de produção atinja o fluxo planejado e afirma que um gargalo pode ser um CCR, mas um não-gargalo também pode ser um CCR caso não seja programado corretamente.

A identificação de um recurso-gargalo pressupõe a existência de uma escala de tempo, ou seja, um recurso possui ou não capacidade suficiente de atendimento da demanda em um determinado horizonte de tempo. Para verificar se há um verdadeiro gargalo, deve-se calcular a carga total, gerada pelos pedidos que deveriam ser trabalhados durante o horizonte de tempo, imposta em cada um dos tipos de recursos. Uma vez calculada a carga para cada tipo de recurso, tem-se que comparar esse valor com a disponibilidade de tempo dos recursos calculada no mesmo intervalo de tempo, considerando-se o número de unidades disponíveis de cada tipo de recurso e de acordo com o calendário da empresa. Se a carga colocada em um recurso for maior que sua disponibilidade, ter-se-á um recurso-gargalo. Se mais de um recurso apresentar uma capacidade inferior a sua carga, deverá ser considerado como Recurso com Restrição de Capacidade (CCR), aquele que estiver mais sobrecarregado (SOUZA, 2005).

Para Correa e Gianesi (1996) a diferença entre o CCR e o Gargalo é simples. Em algumas situações podem não haver gargalos reais em uma fábrica, ou seja, todos os centros produtivos estão superdimensionados (com excesso de capacidade) em relação à demanda, mas sempre haverá algum recurso que restrinja a produção. Este, então, será o CCR, apesar de não ser um gargalo real. Pode também haver o caso em que, pela definição, vários recursos sejam gargalos, ou seja, vários recursos têm a capacidade menor do que à demanda de mercado. Nesse caso o CCR será o recurso com menor capacidade produtiva, aquele que limitará a capacidade produtiva de todo o sistema.

Nesta dissertação, o CCR será o recurso com maior carga de trabalho em relação a sua capacidade para um determinado nível de demanda, ou seja, será o recurso que, para um

determinado nível de demanda, impõe o índice de produção de todo o sistema de produção, de acordo com a definição de Goldratt e Fox (1989), e deve ser utilizado para controlar o fluxo de materiais através do sistema.

4.4.2 Outras Restrições

Nem sempre o que limita o desempenho do sistema será necessariamente uma restrição de capacidade. Uma restrição de mercado, por exemplo, pode limitar a utilização dos recursos disponíveis de fabricação. Caso a demanda de mercado aumente, o *Throughput* e, portanto, o lucro líquido, serão aumentados. Uma restrição no fornecimento de matéria prima, no caso dos recursos de fabricação ter sua utilização limitada por falta de material, pode também limitar o desempenho do sistema, nesse caso, um suprimento maior de material aumentaria o *Throughput* e a lucratividade da empresa (NARASIMHAM, *et al* 1995).

Existem ainda outras formas de restrições não físicas, como as restrições de coordenação que incluem as funcionalidades de planejamento e controle como os sistemas de entrada de pedido e de controle de materiais, com longos *lead times* de entrada de pedido e programação que podem criar uma restrição na habilidade da empresa em ganhar pedidos por meio do serviço rápido ao cliente, restrições gerenciais, na forma de estratégias e políticas que limitam o desempenho do sistema como, por exemplo, a política de lote econômico de produção que podem não ser adequadas para a sincronização do fluxo de materiais através do sistema, e as restrições comportamentais que podem ser as mais difíceis de serem eliminadas. Um bom exemplo é o comportamento de manter todos os centros de trabalho funcionando para tentar aumentar a eficiência do sistema, enquanto na verdade, o que se desejaria seria exatamente o contrário (NARASIMHAM, *et al* 1995). Esse tipo de restrição, não física, quando encontrada deve ser elevada rapidamente e não exploradas como as restrições de mercado e recurso (GOLDRATT, 1991).

4.5 A Manufatura Sincronizada

A manufatura sincronizada descrita por Goldratt e Fox (1989), com base nos princípios da teoria das restrições, tem o objetivo de balancear o fluxo, ao movimentar os materiais de forma rápida e uniforme através dos vários recursos da fábrica de acordo com a demanda do mercado.

Para isso faz uso do SCO Tambor-Pulmão-Corda, DBR (*Drum-Buffer-Rope*), suportado pelo mecanismo do Gerenciamento do Pulmão (*Buffer Management*) ambos descritos nas próximas seções.

Da mesma forma que a produção enxuta utiliza uma analogia com um rio, seus riachos, regatos e represas para representar o fluxo de materiais em uma fábrica, a TOC fará uso de outra analogia que melhor represente os seus princípios.

4.5.1. Analogia com uma Tropa

Para explicar o conceito de sincronização e comparar o sistema DBR, com outros SCOs, os sistemas empurrados ou o Kanban, por exemplo, a TOC utiliza uma analogia com uma tropa em marcha forçada para expressar o fluxo de materiais em uma fábrica e seu objetivo de balancear o fluxo, e não a capacidade, para aumentar o *Throughput* e reduzir o Inventário sem aumentar as despesas operacionais.

Essa analogia foi primeiramente apresentada no livro *A Meta (The Goal)*, GOLDRATT e COX, 2003), e melhor detalhada no livro *A Corrida pela Vantagem Competitiva (The Race)*, GOLDRATT e FOX, 1989), conforme apresentado na figura 4.7.

Os soldados (ou escoteiros, no primeiro livro) representam os recursos de produção. A estrada a frente deles representa as matérias primas de forma que o primeiro soldado, o primeiro recurso, ao avançar pela estrada representa a liberação de material para os demais recursos. O último soldado libera/expede os produtos acabados na forma da estrada por onde toda a tropa já passou. A dispersão entre a tropa, ou seja, a distância entre o primeiro e o último soldado, é análoga ao WIP, ou seja, a quantidade de material em processo entre a primeira e a última operação do sistema. O soldado mais lento representa o CCR, que determina a velocidade de toda a tropa, ou seja, o *Throughput* de todo o sistema. O objetivo é aumentar a velocidade da tropa,

mantendo os soldados agrupados, situação análoga a aumentar o *Throughput* mantendo o inventário em níveis baixos e constantes.



Figura 4.7 - Analogia com uma Tropa
Fonte: adaptado de Goldratt e Fox (1989)

Goldratt e Fox (1989) mostram 4 formas diferentes de manter a tropa unidade e suas respectivas implicações:

1. Colocar o soldado mais lento à frente e os mais fortes/rápidos atrás;
2. Tambor e Sargento Gritando;
3. Passar uma corda pelos soldados, como nos alpinistas;
4. DBR: Amarrar uma corda entre o primeiro soldado e o mais lento e bater o tambor no soldado mais lento.

4.5.1.1 Soldado Mais Lento a Frente

Organizar a fila de soldados por ordem de velocidade de cada soldado, de forma que quando ocorrer uma dispersão, os soldados de trás podem utilizar sua velocidade extra, capacidade ociosa, para fechar os intervalos, WIP (Caso I da figura 4.8).

Essa situação sugere reorganizar os recursos de produção de forma que o CCR seja o primeiro recursos da linha e que os recursos seguintes tenham um nível cada vez maior de capacidade ociosa. Essa idéia, apesar de boa, se torna muito cara e inflexível para a maioria dos sistemas de produção.

4.5.1.2 Tambor e Sargento

Manter os soldados na posição original e colocar um tambor na primeira fileira de soldados, o primeiro recurso, para marcar o ritmo da tropa e fazer com que todos marchem no mesmo ritmo, mesmo os soldados mais rápidos apesar da possibilidade de andarem mais rápido. Sempre que ocorrer a dispersão da tropa, o sargento deve gritar para que retomem o ritmo e fechem o intervalo entre eles. Se o soldado mais lento puder marchar no ritmo do tambor, a dispersão da tropa é contida e a velocidade é mantida (Caso II da figura 4.8).

Essa situação sugere que o primeiro recurso, ou o sistema de administração de materiais, produza ou libere material a partir de uma programação, o Tambor. Se o CCR puder manter esse ritmo, o sistema deve ser capaz de cumprir toda a programação. O Sargento gritando representa os supervisores ou aceleradores de produção, que correm para acelerar as ordens que estão atrasadas.

Como não há uma ligação física com os primeiros recursos e como eles ficam ociosos, os problemas ocorridos no CCR, que fazem com que tal recurso não consiga seguir o ritmo e fique mais atrasado, não são transmitidos para o início da fila onde os recursos continuam produzindo no ritmo do tambor, gerando uma maior dispersão, estoque em processo.

Esse caso apresenta ainda outras complicações. Uma delas é saber o ritmo correto para bater o tambor. Quando o tambor está no primeiro processo e este não é o CCR, é necessário utilizar algumas suposições para determinar o ritmo do tambor como a ocupação do CCR, os *lead times* pré-determinados e os tamanhos dos lotes. Outra complicação é fazer com que os recursos antes do CCR andem no ritmo do Tambor, pois a cultura convencional geralmente faz com que se libere mais material para que os recursos não fiquem ociosos.

4.5.1.3 Cordas Amarradas nos Soldados

Passar uma corda pelos soldados, como nos alpinistas. Dessa forma, a tropa permanece unidade durante toda a marcha, mantendo a dispersão entre os soldados limitada de acordo com o tamanho das cordas entre eles (caso III da figura 4.8). Dessa maneira pode-se limitar a dispersão, o WIP, ao comprimento da corda. Essa idéia foi primeiramente utilizada por Henry Ford e

representa a linha de montagem, mecanicamente cadenciada. Mais tarde, foi utilizada por Taiichi Ohno, no Sistema Toyota de Produção, por meio do sistema *Kanban*.

As duas idéias funcionaram e funcionam muito bem sob algumas condições. Nas linhas de montagem, essa corda é física, representada pelos transportadores de correia e funcionam muito bem na fabricação e montagem de altos volumes de produtos com equipamentos especialistas e dedicados. O sistema *Kanban* utiliza uma corda de coordenação, os cartões, e estendeu a idéia de Ford para a fabricação de produtos fabricados repetitivamente em equipamentos não dedicados.

No sistema *Kanban*, o Tambor é tocado pela demanda do mercado, uma analogia ao tambor ser tocado pelo último soldado da tropa. Uma vez que ele marche e toque o tambor, todos os demais soldados avançam. Caso aja algum problema, as cordas, cartões, fazem com que todos parem, mantendo a tropa agrupada.

A chave desse sistema, não está nas correias de Ford nem nos cartões de Ohno, mas sim no fato de que esses dois tipos de corda, as correias e os cartões, estabelecem um pulmão predeterminado de inventário (comprimento da corda) entre dois centros de trabalho. Na linha de montagem, esse pulmão é o espaço na correia transportadora entre duas operações e, no sistema *Kanban*, é o número de cartões *Kanban* entre duas operações, que informam ao operador quando produzirem ou quando não produzirem novos itens. Dessa forma, nos dois sistemas, o fluxo de trabalho é sincronizado e os níveis de estoque em processo são controlados.

No entanto, segundo os autores, a desvantagem nesse sistema de cordas é que qualquer interrupção significativa em qualquer centro de trabalho fará com que o fluxo total pare e o *Throughput* seja perdido, pois quando uma interrupção ocorre em um recurso não-gargalo e faz com que todo o sistema pare, faz com que o CCR também pare e perca tempo de processamento que nunca será recuperado.

Essas interrupções ocorrem na forma de flutuações e interrupções no fluxo de materiais, quebra de máquinas, tempos de *setup*, etc e devem ser minimizadas e controladas com muita atenção.

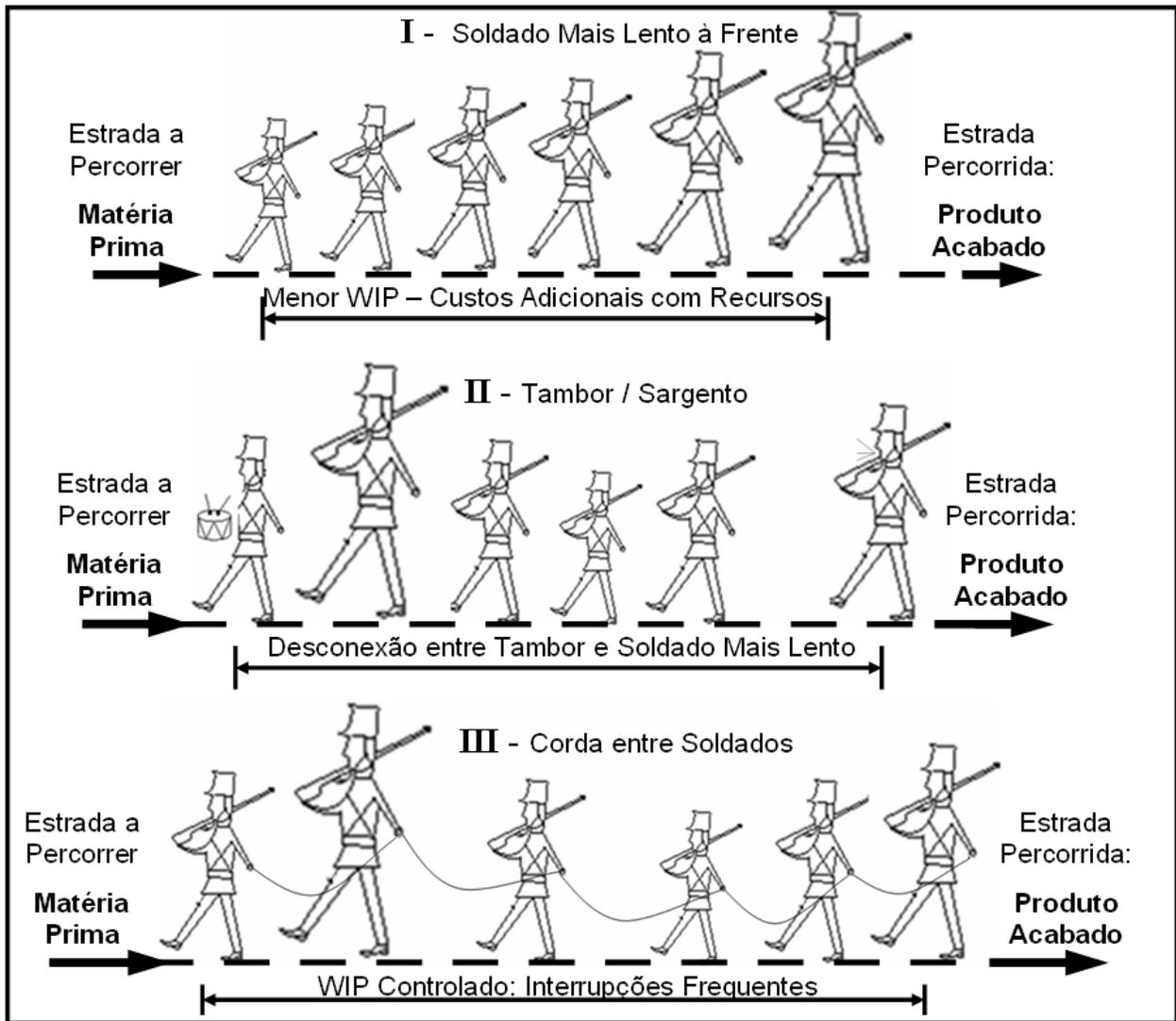


Figura 4.8 - Três Formas de Manter a Tropa Unida
 Fonte: adaptado de Goldratt e Fox (1989)

4.5.1.4 DBR: O Tambor-Pulmão-Corda

Amarrar uma corda entre o primeiro soldado e o mais lento e bater o tambor no soldado mais lento. Dessa forma, o soldado que estão atrás do soldado mais lento estarão encostados nele e marchando no mesmo ritmo que ele e, caso ocorra algum problema, causando alguma dispersão, por serem mais rápidos, podem alcançá-lo rapidamente, mantendo a tropa com pouca dispersão, pouco WIP (figura 4.9).

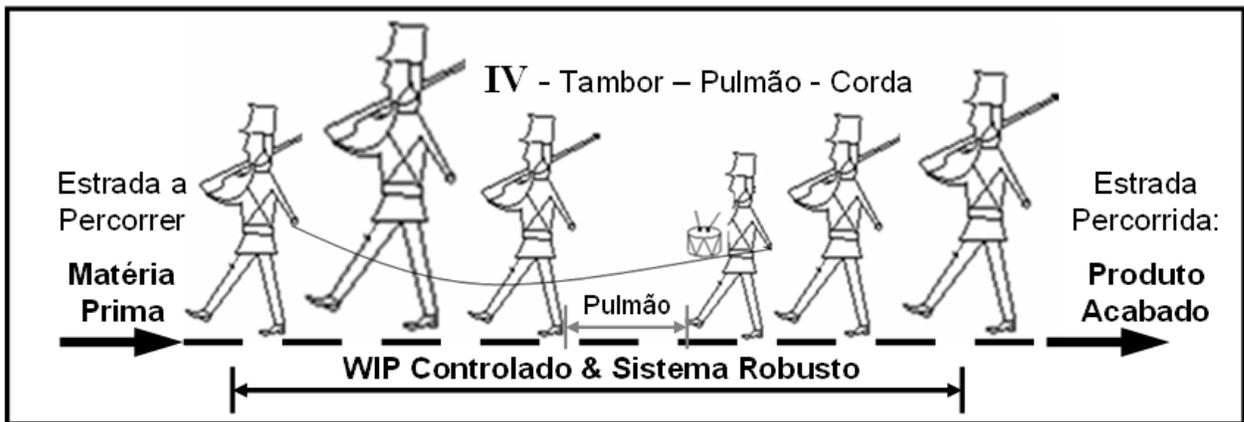


Figura 4.9 - DBR para Manter a Tropa Unida
 Fonte: adaptado de Goldratt e Fox (1989)

O primeiro soldado é mais rápido que o soldado mais lento, mas não pode andar mais rápido, pois está preso pela corda ao mais lento. Os soldados entre o primeiro e o mais lento são mais rápidos que esse mais lento e ficarão sempre encostados no primeiro. A única dispersão, ou intervalo, estará na frente no soldado mais lento e será determinada pelo tamanho da corda que for escolhido.

Caso ocorra algum problema com os soldados a frente do mais lento, se houver uma corda de tamanho adequado, o problema pode ser resolvido e a marcha retomada sem que o soldado mais lento precise parar. A tropa inteira só irá parar se ocorrer algum problema com o soldado mais lento o que torna o estoque em processo controlado e ao mesmo tempo garante robustez ao sistema.

Dessa forma o Tambor está com o soldado mais lento, que determina o ritmo da tropa inteira, e que está ligado ao primeiro soldado por meio da corda, que determina a dispersão permitida para a tropa inteira. A seguir, essa alternativa será detalhada para o ambiente de manufatura por meio do sistema de coordenação de ordens DBR.

Notemos que essa situação, em que o tambor bate no soldado mais lento, o CCR, que está preso ao primeiro soldado por meio de uma corda, e em que o caminho a percorrer corresponde à demanda, podemos dizer que o primeiro soldado precisa ter em mãos um mapa de qual caminho seguir, ou seja, quais produtos iniciar. Esse mapa corresponde à *backlog list* que deve ser enviada ao primeiro processo do fluxo.

4.5.2 Tambor-Pulmão-Corda: Sistema de Coordenação de Ordens DBR

Como foi apresentado na seção 4.4, em qualquer sistema de produção, existem apenas alguns recursos com restrição de capacidade, os CCRs, e deve-se reconhecer que esses recursos irão impor o ritmo de produção da fábrica inteira. Por isso, o CCR, deve ser considerado como o Tambor do sistema. O seu ritmo de produção servirá como batida de tambor para o sistema inteiro (GOLDRATT e FOX, 1989).

Também será necessário criar um pulmão de tempo na frente de cada CCR, com o inventário necessário para manter o CCR ocupado apenas durante um intervalo predeterminado seguinte de tempo. Este pulmão tem a finalidade de proteger o *Throughput* do sistema contra qualquer interrupção que possa ser superada dentro do intervalo predeterminado de tempo.

Para assegurar que o inventário não crescerá além do nível imposto pelo pulmão de tempo, devemos limitar a taxa pela qual a matéria prima é liberada para a fábrica por meio de uma corda, que prenda o CCR à operação inicial. Em outras palavras, o ritmo pelo qual será permitido que a operação inicial produza e libere material para o sistema será imposto pelo ritmo que o CCR estiver produzindo.

Segundo Goldratt e Fox (1989), o DBR possibilita uma programação implícita de todos os recursos não-restritivos da empresa. Aqueles situados antes do CCR deverão processar o mais rápido possível os materiais advindos da primeira operação (controlados pela Corda), de acordo com a sua ordem de chegada. Uma vez que tais recursos possuem excesso de capacidade em relação ao CCR, eles não deverão ter dificuldades para seguir a programação. Da mesma forma, os recursos não-restritivos localizados após o CCR estarão diretamente sob o controle deste, pois receberão apenas as peças liberadas pelo CCR. Como tais recursos também têm capacidade ociosa, não deverá haver nenhum problema também nesse ponto. Logo, ordens de produção explícitas são necessárias apenas em alguns pontos específicos, como nos CCRs e nas primeiras operações onde ocorre a liberação de material para a fábrica.

A seguir veremos essa programação de forma um pouco mais detalhada (figura 4.10).

Como as duas principais restrições para um sistema de produção são a demanda do mercado e a capacidade do CCR, a programação será baseada nessas duas restrições:

1. A primeira etapa será determinar a programação do CCR levando em consideração apenas a sua capacidade e a demanda do mercado que ele está tentando atender. Uma

vez feita essa programação, será necessário gerar a programação para todos os demais recursos não-restritivos.

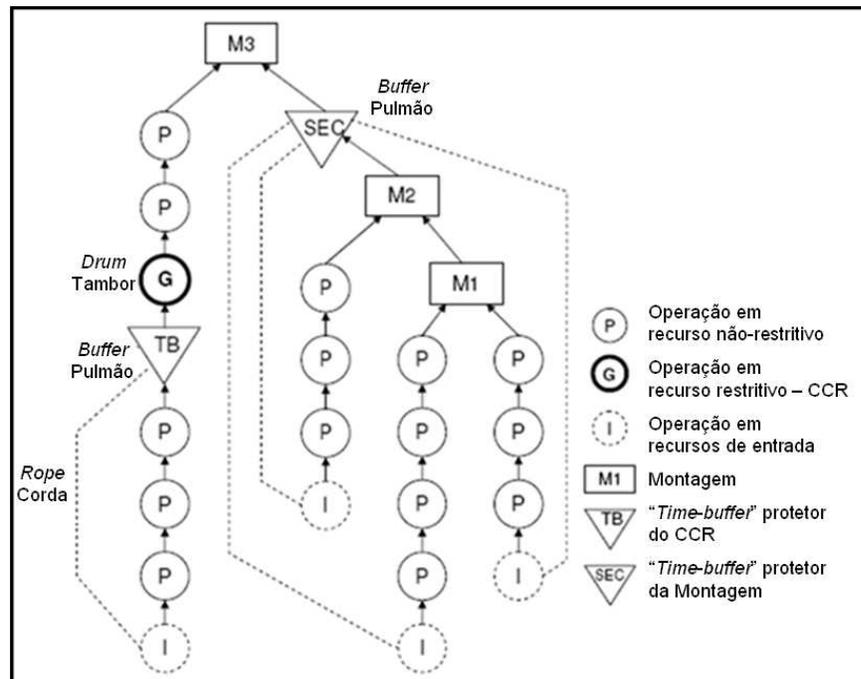


Figura 4.10 - A Lógica do DBR

Fonte: adaptado de Gianesi e Correa (1996)

2. Utilizando a programação do CCR, a programação para as operações posteriores, incluindo a montagem, é facilmente obtida, pois qualquer peça pode ser programada para a operação seguinte assim que saia do CCR. Programar as operações anteriores ao CCR é um pouco mais complicado.
3. Como foi dito, será necessário definir e limitar um pulmão a um intervalo específico de tempo, que deverá ser determinado pelos tipos de interrupções que geralmente ocorrem em cada sistema de produção.
4. Os demais recursos, anteriores ao CCR, devem ser programados para trás a partir do CCR de forma que o recurso anterior a ele termine suas operações um intervalo de tempo, igual ao pulmão, antes da data programada para serem processadas pelo CCR. Cada uma das operações anteriores a esta (a diretamente anterior ao CCR) deverá ser programada para trás, de maneira que os materiais estejam disponíveis no momento exato para a operação seguinte.

5. Dessa forma, todas as perturbações nas operações anteriores que puderem ser superadas dentro do intervalo de tempo do pulmão não afetarão o *Throughput* do sistema, mantendo o inventário reduzido e controlado sem aumentar a despesa operacional.
6. A próxima etapa é determinar a programação da montagem e dos demais recursos não-restritivos. A programação da montagem é imposta pela disponibilidade das peças que vêm do CCR. A disponibilidade dessas peças controla quando será possível montar e expedir os produtos finais da empresa e, por isso, deve-se garantir que as peças que não passam por um CCR estejam disponíveis quando necessárias.
7. Para isso, deve ser criado um novo pulmão de tempo, desta vez, em frente à operação de montagem que utilize peças que passem por um CCR. O propósito desse pulmão é proteger a programação da montagem contra problemas que possam ocorrer na compra e fabricação das peças que não passam por um CCR
8. A programação das peças dessa ramificação, que alimenta a montagem, porém que não contém um CCR deve ser feita da mesma forma que na etapa 4, ou seja, as peças que vêm do recurso que antecede imediatamente a montagem devem ser programadas para serem finalizadas um intervalo de tempo, igual a esse novo pulmão, antes da data programada para o início da montagem desse produto. As demais operações são programadas para trás, sem folga, até a data de chegada e liberação do material para o sistema.

Dessa forma, qualquer interrupção que ocorra nos demais recursos ou nos fornecedores que sejam resolvidas dentro do intervalo de tempo do pulmão, não afetarão a programação da montagem e a entrega dos produtos pela empresa.

Segundo Goldratt e Fox (1989), o conceito apresentado não tem limite de aplicação, embora a complexidade de alguns sistemas de produção possa exigir o auxílio de um sistema computadorizado.

A TOC vem procurando demonstrar e convencer as comunidades acadêmica e empresarial de que o sistema DBR pode alcançar excelentes resultados práticos mesmo quando sua implementação não vem acompanhada por um sistema computacional especializado em programação da produção baseada na capacidade limitada dos recursos, como o OPT. Apesar desse fato, de alta relevância, algumas situações particulares quase que impõem o apoio de um

sistema computacional. Fábricas muito balanceadas, onde pequenas oscilações no *mix* de produtos levam a alterações na localização dos recursos gargalos, são exemplos de situações que tornam imperativo o uso de um sistema computacional especialista (SOUZA, 2005).

Segundo Fernandes e Godinho Filho (2010) o sistema DBR é um SCO híbrido, uma vez que o CCR é geralmente programado pelo PCP e o consumo do estoque pulmão “puxa” a produção por meio da Corda. Os autores afirmam ainda que esse método pode ser utilizado tanto em sistemas de produção repetitivos como em semi repetitivos.

4.5.3 O DBR e o Processo de Melhoria Contínua

Como vimos o DBR dentro da manufatura sincronizada tem a finalidade de sincronizar e balancear o fluxo de produção. Ele também faz parte do processo decisório de melhoria contínua da TOC agindo nos passos dois e três desse processo decisório apresentado na seção 4.3. A seguir, será apresentado um olhar mais detalhado em cada um dos três elementos do DBR, o Tambor, o Pulmão e a Corda e como eles interferem no processo de melhoria contínua, de acordo com Goldratt e Fox (1989).

4.5.3.1 A Batida do Tambor

O CCR limita o *Throughput*, ou seja, o ritmo das vendas e controla o desempenho do prazo de entrega. Sua programação, o Tambor, é o passo dois do processo de melhoria contínua da TOC, e tem como objetivo explorar ao máximo a restrição do sistema e deve, portanto, levar em consideração alguns pontos importantes:

- a) Não ser programado acima de sua capacidade;
- b) Maximizar sua utilização;
- c) Programar de forma que sua sequência resulte num bom desempenho de entrega

A sequência no CCR pode sempre ser determinada, preliminarmente, pelas datas de entrega de cada produto. Porém existem, 4 situações que aumentam a complexidade da determinação da sequência do Tambor, ou seja, da programação do CCR:

- a) *Lead times* diferentes para os produtos após o CCR;
- b) Um CCR que alimente outro CCR
- c) Tempo longo de preparação do CCR, causando mudança na sequência em função da otimização dos lotes de processamento
- d) Um CCR que fornece mais de uma peça para a montagem do mesmo produto.

Na seção 4.7.2, será descrito em detalhes o algoritmo de programação do Tambor, tornado público por Goldratt (1991).

4.5.3.2 Pulmão de Tempo - *Time Buffer*

O Pulmão de Tempo é um dos dois elementos do terceiro passo do processo decisório de melhoria contínua da TOC, que tem como objetivo subordinar todos os demais recursos à programação do CCR.

A TOC reconhece que a variabilidade, sob a forma de flutuações estatísticas, existe em cada sistema. Portanto, o Pulmão de Tempo, expressos em dias ou horas, é um intervalo de tempo que uma tarefa deve ser liberada antes do momento que ela seria liberada caso não houvesse tal variabilidade (GOLDRATT, 1991). Daí a importância dos pulmões de tempo para absorver tais flutuações que podem afetar o *Throughput* do sistema pela interrupção de um CCR, o Pulmão de Recurso, ou de uma operação de montagem que utiliza peças que tenham passado por um CCR, o Pulmão de Montagem.

É importante ressaltar que não é necessário proteger com um pulmão de tempo todas as operações de montagem. Os pulmões de tempo são necessários apenas nas operações de montagem que recebem material de um CCR e de um não CCR simultaneamente, e na frente do próprio CCR.

Dessa maneira, desde a matéria prima até o produto acabado, nenhum material passará por mais de um único pulmão de tempo.

Segundo Goldratt (1991) existe, porém, um terceiro tipo de pulmão de tempo que deve ser utilizado para proteger uma restrição de mercado, ou seja, para garantir que todas as entregas sejam feitas no prazo, protegendo as entregas ao mercado de possíveis oscilações do CCR. Para isso, necessita-se de um Pulmão de Mercado, ou de Expedição, posicionado nos armazéns de

produtos acabados. Esse pulmão se refere a um período de tempo em que o produto deverá estar pronto antes da data de entrega requerida pelo cliente para garantir as entregas no prazo. Quando esse pulmão é estabelecido, a programação do CCR, o Tambor, tem início a partir dele e não das datas finais de entrega ao cliente.

Além desses tipos de pulmão, é fundamental que todos os estoques em processo do sistema sejam eliminados, pois atrapalham em muito o sistema de produção atingir a sua meta (GOLDRATT e FOX, 1989).

4.5.3.3 A Corda

Segundo Fernandes e Godinho (2010) o sistema DBR é um SCO híbrido, uma vez que o CCR é geralmente programado pelo PCP e o consumo do estoque pulmão “puxa” a produção por meio da Corda.

A corda no DBR sinaliza às operações iniciais do roteiro de fabricação para que elas ajustem suas taxas de liberação de matérias primas ou componentes para o sistema produtivo ao ritmo estabelecido pelo Tambor, a programação do CCR. A Corda programa as liberações de material de modo que não seja ultrapassado o limite máximo de estoque, em período de tempo, no pulmão.

Portanto, a Corda funciona como a autorização para a liberação de material para a produção pelo consumo do pulmão de tempo em frente ao CCR, à operação de Montagem ou ao Pulmão de Mercado (produtos acabados).

Goldratt e Fox (1989) afirmam que, como os demais conceitos do DBR, o conceito da corda é simples e pode ser implementado sem o uso de um sistema informatizado, porém, devido à complexidade de alguns sistemas de produção, como a alta quantidade de dados a serem processados, constantes mudanças de demanda, necessidade de simulação, alta quantidade de CCRs, além das quatro condições que aumentam a complexidade de um sistema citadas anteriormente, como os *lead times* diferentes para os produtos após o CCR, um CCR que alimente outro CCR, tempo longo de preparação do CCR que causam mudança na sequência em função da otimização dos lotes de processamento e um CCR que fornece mais de uma peça para a

montagem do mesmo produto, a utilização de um sistema computadorizado para autorizar as liberações de material para o sistema torna-se quase obrigatória.

Para esses autores, no entanto, independente da complexidade do sistema que será utilizado, informatizado ou não, para fazer a liberação de material no início do processo, o padrão de comportamento de liberar o material no início do processo assim que esses recursos, não-restritivos, fiquem ociosos, é o conceito mais difícil de ser superado. Para isso, é tarefa da administração criar a mudança cultural necessária para a aceitação desses conceitos.

4.5.4 Gerenciamento do Pulmão e o Processo de Melhoria Contínua

Até aqui foram apresentadas a importância dos CCR no *Throughput* e no inventário dos sistemas de produção e a necessidade de serem protegidos contra muitas interrupções diárias que ocorrem na produção. Uma observação cuidadosa desses pulmões pode evidenciar muito as causas das flutuações inevitáveis no sistema de produção e no seu mercado.

Para Souza e Baptista (2010) o Gerenciamento do Pulmão (GP), apresentado por Goldratt e Fox (1989) é o mecanismo proposto pela TOC para controle e execução do plano “Tambor”, ou seja, é utilizado como um método para assegurar que a programação da restrição e a programação de montagem e entregas seja cumpridas, e concentrar os esforços de melhoria. Consiste na divisão do pulmão em três partes iguais cada uma delas correspondendo a uma categoria de prioridade. Durante a primeira parte do pulmão (passados um terço do pulmão de tempo), denominada região verde, não se espera que a ordem já tenha chegado ao seu destino (O CCR, a Montagem ou a expedição, dependendo do tipo de pulmão). Contudo, durante a segunda parte, ou região amarela, a expectativa é que a ordem já tenha chegado. Caso contrário, o gestor deve localizá-la e monitorá-la, porém, não há a necessidade de apressá-la. Entretanto, se mais de dois terços do pulmão se passarem, atingindo a região vermelha, a não chegada da ordem a seu destino deve levar o gestor a tomar uma atitude imediata. Fazer o que for possível para acelerar a ordem. Como uma das premissas desse mecanismo é que o tempo efetivo de processamento das ordens não seja maior do que 10% do *lead time* de produção, uma premissa válida para a grande maioria dos ambientes de manufatura, mesmo as ordens vermelhas têm ainda 33% do *lead time*

para ser concluída, um tempo maior que o tempo de processamento propriamente dito (SOUZA e BAPTISTA, 2010)

O entendimento de como gerir adequadamente os pulmões de tempo, sendo esses os únicos inventários do sistema, podem evidenciar as causas das flutuações da produção, permitindo atacá-las possibilitando a redução gradativa desses pulmões e a exposição ainda maior de certas flutuações.

O inventário contido em um pulmão leva em consideração o período seguinte de tempo da programação do CCR (ou da montagem) o que faz com que os produtos contidos nesse inventário variem conforme a programação futura desse recurso. Esse conceito de “inventário giratório” no pulmão é muito diferente do entendimento usual de estoque de segurança, como um nível constante de inventário de cada peça (GOLDRATT e FOX, 1989).

Como o propósito dos pulmões é proteger contra certas interrupções no fluxo, é natural que, caso elas ocorram, o conteúdo real do pulmão seja diferente do conteúdo planejado, conforme ilustrado na figura 4.11. O primeiro caso, mostra um pulmão planejado de três dias, em que todas as peças para os três dias estão disponíveis. O segundo caso apresenta uma situação onde todas as peças necessárias para o próximo dia estão presentes, porém, enquanto nem todas as peças necessárias para o segundo dia já chegaram ao pulmão, algumas para o terceiro já estão presentes nesse pulmão. Caso o pulmão esteja sempre cheio é um sinal claro de que não existem interrupções significativas afetando o fluxo planejado de material. Consequentemente, o pulmão não é necessário e esse inventário pode ser eliminado, ou reduzido, sem afetar negativamente o *Throughput* e a despesa operacional. Na realidade, espera-se de fato, uma redução da despesa operacional, conforme apresentado na seção 4.2.

Portanto o modelo desejado de pulmão é representado pelo perfil da figura 4.12. O material planejado para estar no primeiro terço do pulmão de tempo, aquele material que será consumido primeiro pelo CCR, deverá estar sempre presente. Por outro lado, deve-se descobrir que a maioria do material previsto para estar no último terço do pulmão esteja faltando. O conteúdo real versus o planejado do meio do pulmão deve estar em algum lugar entre esses dois extremos. Esse perfil do pulmão deve proteger as operações críticas de praticamente todas as flutuações, com exceção das mais extremas.

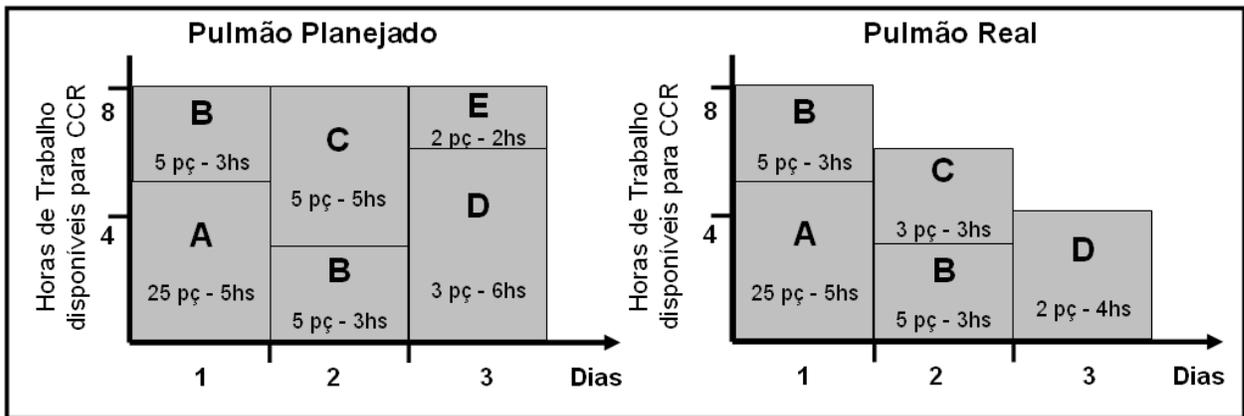


Figura 4.11 - Perfis do Pulmão
 Fonte: adaptado de Goldratt e Fox (1989)

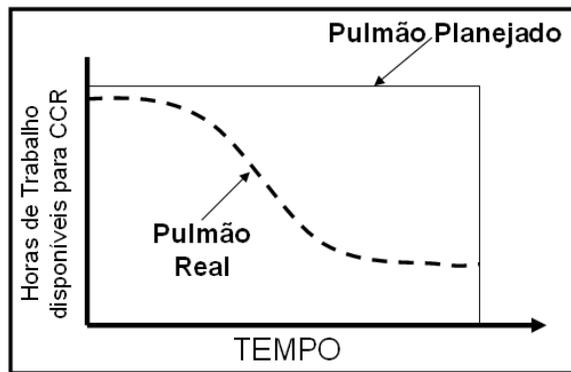


Figura 4.12 - Perfil do Pulmão
 Fonte: adaptado de Goldratt e Fox (1989)

Caso o pulmão se desvie desse perfil, e apresente constantemente um dos casos a seguir (figura 4.13), algumas ações devem ser tomadas com foco na melhoria de processo:

1. caso 1: Se o pulmão real se estender além do pulmão planejado, é uma indicação de que o material está sendo liberado antes de quando exigido no início do processo. Esse fato indica que a cultura de liberar material para manter os recursos não-restritivos trabalhando não foi mudada e será necessário intensificar o treinamento dos responsáveis por esses recursos.
2. caso 2: Se o pulmão estiver constantemente quase totalmente cheio, é uma indicação de que o pulmão é muito grande e o sistema está pagando um preço muito alto (inventário) por um excesso de segurança. O pulmão deve ser reduzido para a situação em que apenas o primeiro terço esteja totalmente cheio.

3. caso 3: De forma oposta, se a parte totalmente preenchida é constantemente menor do que o primeiro terço do pulmão, indica que o pulmão é muito pequeno e corre-se o risco de deixar o CCR sem peças e perder *Throughput*.

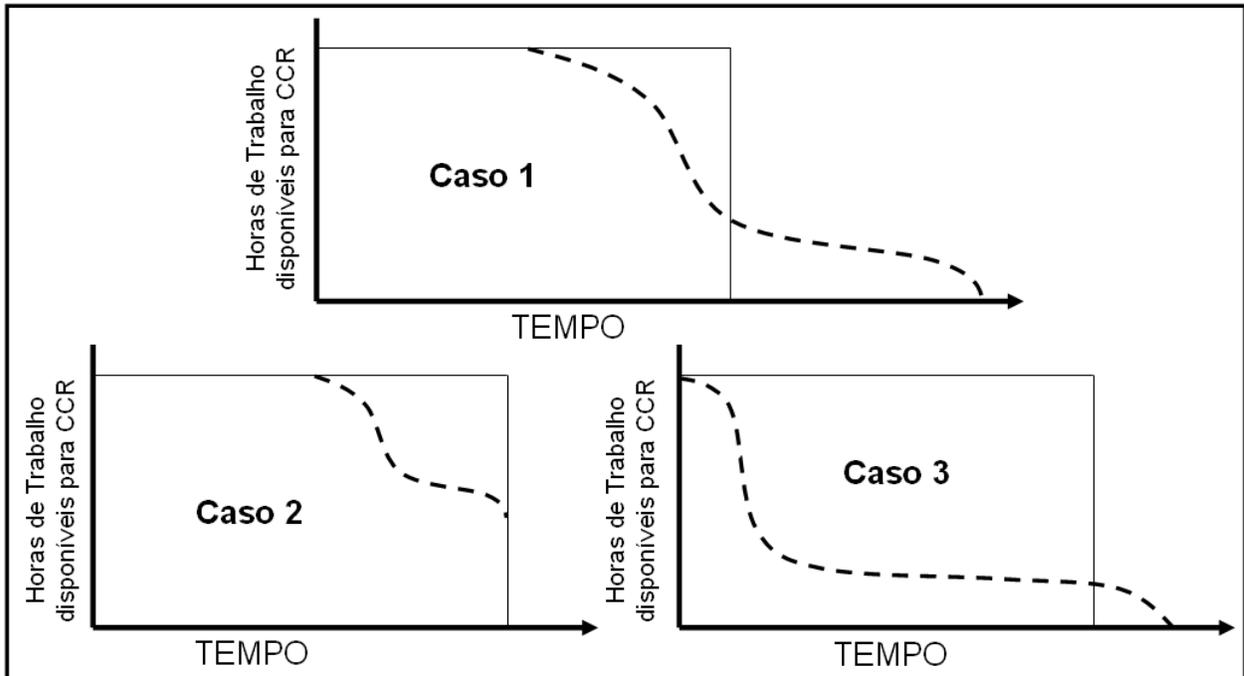


Figura 4.13 - Perfis do Pulmão - Correção
Fonte: adaptado de Goldratt e Fox (1989)

Uma outra atividade importante do Gerenciamento dos Pulmões é tomar medidas para eliminar os furos nos pulmões. Se for possível eliminar consistentemente esses furos, pode-se reduzir o pulmão sem afetar *Throughput*

A comparação dos pulmões planejados com os pulmões reais revelará as peças do pulmão que deveriam estar lá e não estão, formando os furos do pulmão. Esses furos são causados por interrupções no fluxo de material nos processos anteriores ou dos fornecedores. Ao reconhecer um furo no pulmão, é possível identificar o impacto que esse furo pode causar no CCR, em horas de produção do CCR, representada por Y na figura 4.14, e quanto tempo existe, representado por W na figura 4.14, para preencher esse furo sem que afete a programação do CCR, o Tambor.

Pode-se também verificar a localização (simplesmente indo e vendo, ou por meio do sistema de controle de inventário) das peças que estão faltando e a origem da interrupção que causaram essa falta. A importância de cada interrupção pode ser expressa em um fator de

interrupção pelos fatores Y e W descritos acima e de um terceiro fator P, que representa o tempo de processamento necessário para que as peças cheguem ao pulmão.

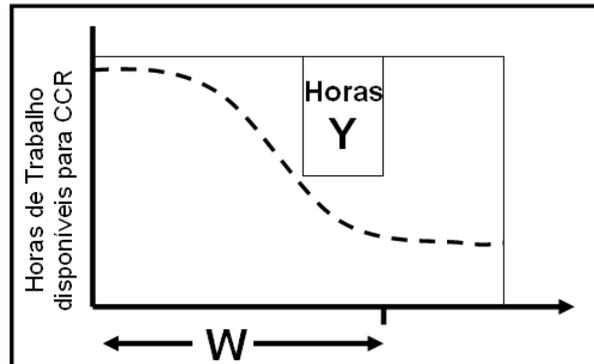


Figura 4.14 - Furo no Pulmão e Localização
 Fonte: adaptado de Goldratt e Fox (1989)

Por meio da avaliação e classificação por origem dos diversos fatores de interrupção, pode-se chegar a um fator de interrupção por recurso (ou fornecedor). Esses fatores, priorizados por grau de importância pelo princípio de Pareto, se tornam a lista de prioridade dos esforços de melhoria contínua.

Mediante essa priorização, pode-se direcionar os esforços de melhoria contínua com utilização das técnicas certas para a correção de cada uma das causas de interrupção, começando pelas mais críticas. Alguns exemplos podem ser a redução do tempo de *setup* no caso de interrupções causadas por longos tempos de preparação, TPM (*Total Productive Maintenance*) no caso de interrupções causadas por problemas de confiabilidade das máquinas, 6 sigma no caso de problemas de qualidade, treinamento no caso de problemas de comportamento e gestão dos recursos da produção entre outras.

Esse processo de priorização e a solução das principais causas das interrupções e furos no pulmão possibilitam a redução constante dos pulmões e, como eles contêm a maioria do estoque em processo do sistema, a vantagem competitiva do sistema aumenta, como apresentado na seção 4.2, pela redução dos *lead times* de produção, despesa operacional, investimento em inventário, simultaneamente com o aumento da qualidade, do desempenho no atendimento do prazo de entrega e da velocidade de introdução de novos produtos.

E como o mercado pode responder com uma demanda ainda maior, possibilita um aumento no *Throughput*, sem o aumento proporcional do Inventário e da Despesa Operacional.

Dessa forma, Lucro Líquido, Retorno sobre Investimento e Fluxo de Caixa aumentam, levando toda a organização em direção à Meta (GOLDRATT e FOX, 1989).

4.5.5 Manufatura Sincronizada e o Processo de Melhoria Contínua

Caso o processo descrito anteriormente ocorra e seja traduzido em mais demanda e, portanto, mais *Throughput*, o excesso de capacidade na fábrica diminui, mudando toda a relação atual de CCR, Pulmões e Recursos não-restritivos e dando início a um novo ciclo de melhoria.

Com mais demanda em todos os recursos, os CCR podem tornar-se gargalos reais sendo necessárias novas políticas para extrapolar a capacidade desses recursos, cuidando para que eles não parem nos intervalos da fábrica, garantindo que só trabalhem em peças boas, agir na melhoria dos processos posteriores para garantir que as peças que passaram por ele não sejam refugadas posteriormente e mesmo transferindo parte da carga desses recursos para os recursos não-restritivos. Com esse aumento de demanda, também esses recursos não-restritivos podem não ter tanta capacidade para recuperar o atraso causado por interrupções na mesma velocidade que antes. Portanto será necessário o aumento dos pulmões e posterior trabalho de redução desses pulmões.

Em suma, o processo descrito acima, revela como o processo de melhoria contínua da TOC pode ser realizado em uma situação de manufatura:

1. Identificando-se a restrição do sistema, o CCR;
2. Explorando essa restrição, pela programação Tambor;
3. Subordinando tudo a essa programação, pela programação da montagem em função da disponibilidade das peças do CCR, da definição dos pulmões de tempo e das cordas que programam os recursos não-restritivos antes dos Pulmões.
4. Elevar a restrição por meio de um processo constante de revisão do pulmão, o Gerenciamento do Pulmão, que tem o objetivo de tornar o processo mais robusto possibilitando a redução do Inventário do sistema, que possa representar uma vantagem competitiva e trazer novos pedidos para a empresa.

5. Esses novos pedidos podem mudar a restrição do sistema, sendo necessária uma nova análise e identificação das restrições do sistema e o início de um novo ciclo da melhoria contínua.

4.6. Outras Implicações da TOC

4.6.1. Tamanho dos Lotes

A forma como a TOC lida com o tamanho dos lotes, como já ficou claro, é diferente das abordagens tradicionais. Em primeiro lugar será necessário definir o conceito de tamanho dos lotes de acordo com as diferentes perspectivas do fluxo de materiais e dos recursos.

Por exemplo, uma linha de produção extremamente repetitiva com recursos dedicados produzindo apenas um tipo de produto, pode ser vista como tendo um tamanho de lote infinito, pois sob a perspectiva do recurso de produção, o lote é o mesmo, à medida que não houve nenhuma preparação para se iniciar a fabricação de um novo produto. Já do ponto de vista do fluxo de materiais, a mesma linha de produção pode ser vista como tendo um tamanho de lote unitário, já que cada unidade é passada uma a uma de estação em estação sem ter que esperar um lote ser formado para ser passado para a estação seguinte. Uma ilustração da diferença de lote de processamento e lote de transferência encontra-se na figura 4.15.

Portanto se torna necessário considerar a questão dos tamanhos dos lotes segundo essas duas perspectivas (Correa e Gianesi, 1996):

- a) **Perspectiva do Recurso:** Relacionada com o Lote de Processamento.
- b) **Perspectiva do Fluxo:** Relacionada com o Lote de Transferência

Ao analisar essas definições é necessário um entendimento maior das implicações de como a TOC determina o tamanho dos lotes de produção em comparação com as demais estratégias de gestão da produção e SCOs (Sistema de Coordenação de Ordens). Vamos analisar os princípios 7 e 8 em mais detalhes.

- a) **Princípio 7:** O lote de transferência não precisa ser, e muitas vezes não deveria ser, igual ao lote de processamento. Essa abordagem se assemelha com a idéia de fluxo

contínuo ou fluxo unitário de peça (lote unitário) da produção enxuta (veja seção 3.6.1) onde um produto deve ser transferido de uma estação para a seguinte tão logo seja finalizado, não aguardando o término do processamento de todo um lote de produção.

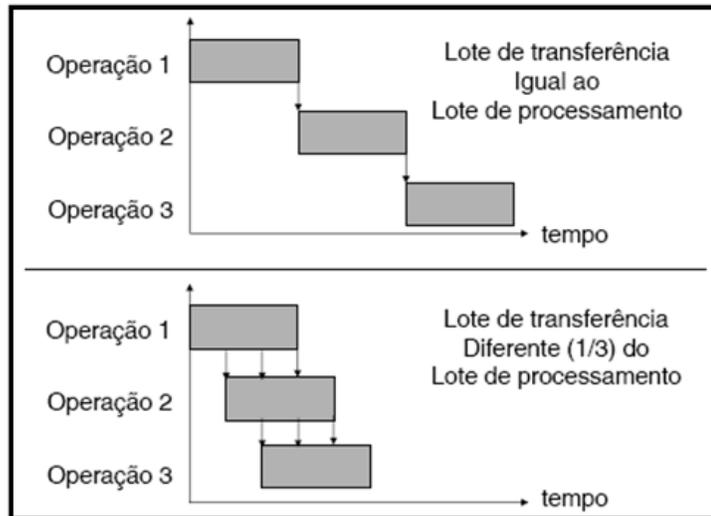


Figura 4.15 - Lotes de Transferência e Lotes de Processamento
Fonte: adaptado de Gianesi e Correa (1996)

- b) **Princípio 8:** O tamanho dos lotes de processamento deve ser variável, e não fixos. Os lotes de processamento podem e devem variar nos diferentes recursos do sistema, CCR e não-restritivos, e em momentos diferentes de carga do CCR.

Para a TOC, caso o CCR seja um gargalo real do sistema, e as economias de preparação liberarem capacidade para que o CCR possa atender um volume maior de pedidos dentro do mesmo intervalo de tempo, ou seja, representando um aumento real do *Throughput* da empresa, o aumento do tamanho do lote de processamento é permitido, e até recomendado, mesmo que aumentar o tamanho dos lotes implique em antecipar a realização de algumas tarefas e, portanto, no aumento no Inventário. Novamente, o aumento no *Throughput* deve ter prioridade sobre o aumento do Inventário. Outro ponto crítico é que ao aumentar o tamanho do lote, ao economizar no número de preparações para aumentar a utilização do CCR, alguns pedidos podem ser antecipados em detrimento de alguns que podem ficar atrasados. Esse fato pode representar uma perda de *Throughput* para a empresa. Portanto, deve-se economizar ao máximo com preparações nos CCR quando estes forem gargalos reais, porém, deve-se também evitar supostas economias com preparação que não implicam em vantagens reais quanto ao *Throughput* da empresa.

Nos recursos não-restritivos, o tamanho dos lotes de processamento pode ser, sempre que necessário, menor do que nos CCR pois esses recursos têm capacidade ociosa, por definição, permitindo utilizar esse tempo para a preparação de máquina.

Fica evidenciado também que a TOC não faz uso de nenhum método baseado nos conceitos de lotes econômicos no momento de decidir pelo dimensionamento de seus lotes de produção.

Uma conclusão necessária dessa análise, é que a utilização das técnicas de redução do tempo de preparação (SMED), tão disseminadas pelos entusiastas da produção enxuta, podem ser utilizadas, especificamente nos CCRs, para aumentar a disponibilidade desses recursos, sem a necessidade de se utilizar grandes lotes de processamento.

4.6.2. Capacidade Protetora

Um corolário da afirmação de que apenas algumas poucas restrições limitam o desempenho de todo o sistema de produção, é que haverá capacidade ociosa na maioria dos recursos de produção. Essa capacidade ociosa passa a ser não só aceitável como também desejável e será chamada de capacidade protetora (GOLDRATT e FOX, 1989; GOLDRATT, 1991; SOUZA, 2005; SOUZA e BAPTISTA, 2010) .

Essa capacidade protetora, portanto, deve ser intencionalmente mantida nesses recursos não-restritivos, evitando a tentação de balancear a capacidade de todos os recursos com a demanda, por meio da redução da mão de obra e equipamentos.

Os pulmões são estrategicamente colocados para proteger as poucas coisas que limitam a capacidade do sistema de aumentar o *Throughput* e cumprir as datas de entrega. Se tivermos um sistema em que a capacidade de cada recurso é teoricamente a mesma, então cada instância de variabilidade (por exemplo, quebra de máquinas, tempo de processamento lento, matérias primas defeituosas) pode resultar em algum grau de esgotamento do pulmão. Após algum período de tempo, o pulmão será consumido totalmente até que a restrição pare, o que significa “desligar” todo o sistema de produção. Portanto, a TOC recomenda que uma capacidade adicional seja intencionalmente mantida em recursos não-restritivos com o objetivo de superar as variações inevitáveis, antes que a restrição do sistema seja afetada.

Chakravorty (2001) afirma que com a utilização do sistema DBR, um certo nível de capacidade de protetora nos recursos não-restritivos é considerado necessário para garantir que o CCR seja utilizado conforme planejado, ao mesmo tempo em que permite manter o pulmão de recurso em um nível mínimo.

4.7. Sistemas Informatizados de Controle de Produção: OPT e DBR

Este tópico tem por objetivo apresentar o sistema OPT, criado nos anos 70 como uma ferramenta de controle de produção baseada nos gargalos e a proposta atual aceita pela TOC para sistemas informatizados de controle de produção.

4.7.1 O Sistema OPT

Esta seção apresentará uma visão geral do módulo OPT, figura 4.15, e uma breve explicação de seu funcionamento. Não é objetivo desta dissertação um detalhamento maior do funcionamento do OPT, visto que atualmente a TOC propõe um algoritmo mais simplificado para um sistema informatizado de controle de produção, apresentado na seção 4.7.2.

O programa consistia em quatro Módulos básicos principais: Buildnet, SERVE, SPLIT e OPT (chamado originalmente de BRAIN). Os módulos OPT e SERVE contem o algoritmo real usado para programação de produção, enquanto o módulo Buildnet coleta e organiza os dados no formato exigido e o SPLIT separa os recursos em gargalos e não-gargalos. A organização dos dados no módulo Buildnet permite o OPT gerar de forma eficiente a programação da produção para os recursos gargalo. Com base na programação da restrição, o módulo SERVE programa para trás a produção dos recursos não-gargalo e determina a liberação dos materiais. A figura 4.16 fornece uma visão geral do sistema OPT (FERNANDES e GODINHO FILHO, 2010).

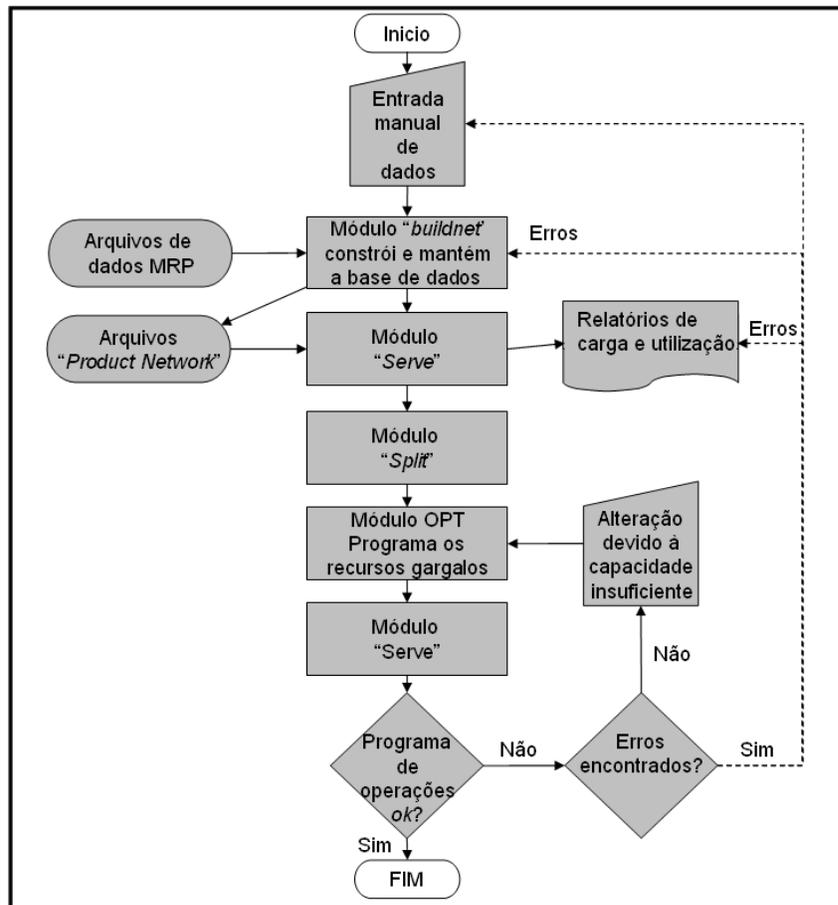


Figura 4.16 - Fluxograma de Funcionamento do Sistema OPT
 Fonte: Meleton (1986) *apud* Fernandes e Godinho Filho (2010)

4.7.2. O DBR no Âmbito de um Sistema Informatizado

Esta seção apresenta o algoritmo para o sistema DBR informatizado, a proposta atualmente aceita de um sistema informatizado de controle de produção baseado na TOC, que se torna necessário dependendo da complexidade de alguns sistemas de produção, como a alta quantidade de dados a serem processados, constantes mudanças de demanda, necessidade de simulação, alta quantidade de CCRs, entre outros. O método a seguir é apresentado por Goldratt no livro a Síndrome do Palheiro (GOLDRATT, 1991) e discutido também em Souza (2005).

1. Primeiramente, devem-se considerar todos os pedidos cujos prazos sejam anteriores ao horizonte de programação mais o pulmão de mercado e a quantidade de peças em cada pedido.

2. Conhecido o volume de pedidos a serem atendidos, verificar a quantidade de estoques em processo e de produtos acabados para cada item nesses pedidos e distribuir seu consumo conforme as datas requeridas dos pedidos
3. Calcular quantidade de peças que o CCR deve produzir para atender cada pedido que não tenha sido atendido.
4. Calcular a carga imposta ao CCR para processar cada pedido a partir do tempo requerido para processar uma unidade do produto e do tempo de preparação.
5. Determinar quando cada pedido deve ser processado pelo CCR, sem levar em consideração a própria capacidade, para atender a data de entrega somada ao intervalo de tempo correspondente ao Pulmão de Mercado/Expedição.
6. Repetir o mesmo cálculo para todos os pedidos e colocar as atividades do CCR, cada “bloco”, no eixo do tempo, onde o CCR deve completar sua tarefa no instante equivalente a um pulmão de expedição antes do prazo do pedido. Como cada bloco foi colocado na linha do tempo sem considerar a capacidade do CCR, tais blocos podem empilhar-se uns sobre os outros formando um cenário semelhante a ruínas, figura 4.17, um cenário totalmente fora da realidade.

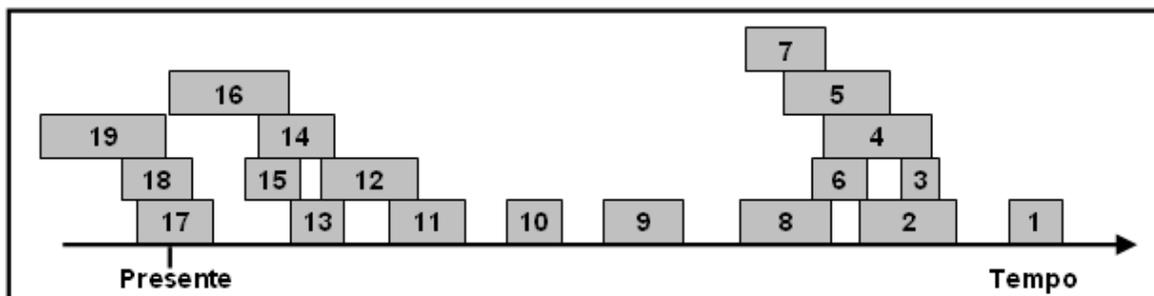


Figura 4.17 - As Ruínas
Fonte: Goldratt (1991)

7. A próxima etapa, portanto, será “nivelar as ruínas”, certificando-se que o número de blocos empilhados em cada momento nunca excederá a quantidade de recursos semelhantes disponíveis do CCR. Isso significa que quando se encontra um acúmulo de blocos maior que o número de recursos semelhantes do CCR deve-se deslocar os blocos superiores. Já que deslocar os blocos para a direita representaria postergar uma entrega, ou seja, postergar ou perder o ganho, será necessário nivelar as ruínas deslocando os blocos superiores para a esquerda, antecipando os prazos indicados nos

pedidos, mesmo que isso represente um aumento do inventário, pois é melhor do que perder o *Throughput*. Deve-se, porém, manter a ordem dos blocos, conforme a sequência indicada pelas datas de entrega de cada pedido, ou seja, os blocos que aparecem com a face direita mais tarde a de outros blocos, devem manter sua posição relativa na linha do tempo.

8. Neste momento o conflito será mudado de lugar. Como se pode estar lidando com um gargalo real, um recurso que não tem capacidade para executar todos os pedidos no horizonte de programação, é natural esperar que alguns blocos tenham sido deslocados para o passado e que alguns vazios tenham surgido à direita da linha do tempo (figura 4.18).

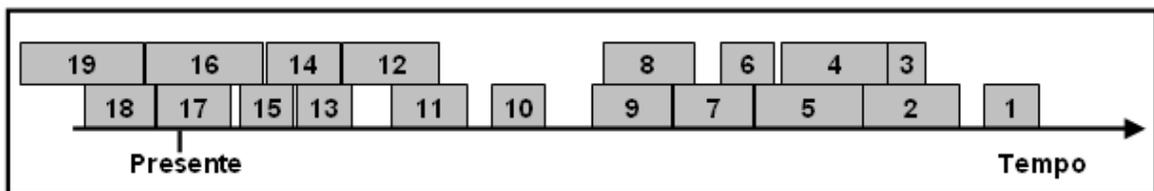


Figura 4.18 - Nivelamento de Ruínas com duas Unidades de CCR
Fonte: Goldratt (1991)

9. Deslocar toda a pilha de blocos para a direita, até o ponto onde nenhum pedido tenha que ser trabalhado no passado. Naturalmente, ao se deslocar os blocos para a direita, alguns pedidos deverão estar à direita de sua posição inicial. Isto significa que esses pedidos estão expostos, com suas datas em risco de não serem atendidas. Se o deslocamento resultante for maior que a metade do Pulmão, o bloco correspondente deverá ser destacado em vermelho (figura 4.19).

Segundo Goldratt (1991), o método descrito até o momento não é semelhante a nenhuma técnica convencional de programação para frente e para trás. Ele é uma derivação dos 5 passos de focalização, como uma dedução lógica direta da escolha de tornar o *Throughput* como o principal indicador da organização.

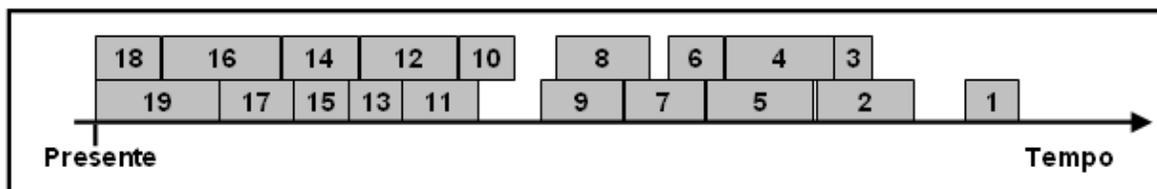


Figura 4.19 - Nivelamento de Ruínas sem Tarefas no Passado
Fonte: Goldratt (1991)

10. Resequenciar os blocos segundo a presença de material disponível antes da restrição para executá-los e identificar novos blocos vermelhos. Um material pode ser considerado como disponível para a realização da programação do CCR quando houver um tempo equivalente de dois terços do pulmão do CCR para trazê-lo do ponto onde se encontra até a origem do pulmão, ou seja, à frente do CCR. Se demandar um tempo maior que isso, os blocos devem ser rearranjados de forma a eliminar qualquer conflito com a disponibilidade de materiais.
11. Nesse momento deverão ser levados em consideração os tempos de preparação e a possibilidade de agrupar blocos iguais, pedidos com o mesmo material a ser entregue, para economizar em tempo de preparação, aumentando a disponibilidade do CCR. Quando tais blocos existem e sendo esse recurso com restrição de capacidade, tais economias de preparação liberam capacidade para que o CCR possa atender um volume maior de pedidos dentro do mesmo intervalo de tempo, aumentando o *Throughput* da empresa. Por outro lado, antecipar a realização de uma tarefa para se ganhar em preparação implica, também, em aumento no estoque. Novamente, o aumento no *Throughput* deve ter prioridade sobre a redução do Inventário. Porém, essa economia em tempo de preparação deve ser feita somente se houver algum bloco vermelho, ou seja, se esse aumento do Inventário realmente proporcionar um aumento no *Throughput* do sistema.

A decisão de agrupar os blocos iguais não pode ser tomada individualmente pelo sistema sem participação do usuário, pois pressupõem que alguns pedidos serão antecipados e outros postergados (os blocos que estavam entre os blocos que foram agrupados).
12. O próximo passo é fazer uso de horas-extras, com as regras previamente determinadas para tentar antecipar os blocos vermelhos. A permissão pelo uso de horas-extras em uma determinada data beneficia não apenas os blocos programados para o final desta data, mas também todos os outros blocos a serem executados depois, pois tudo poderá ser executado antes do planejado. Isso implica que as horas-extras devem ser usadas de preferência em uma data anterior ao primeiro bloco vermelho. Como o uso de hora-extra implica também em aumento de inventário, é conveniente que ela seja aplicada não apenas à esquerda do primeiro bloco vermelho,

mas o mais próximo possível dele e daí para trás até chegar à data presente. Uma vez que esse primeiro bloco tenha deixado de ser vermelho, passa-se ao próximo, caso ainda haja algum nessa situação, com o mesmo procedimento, iniciando a liberação de horas-extras o mais próximo possível desse bloco vermelho e daí para trás, e assim por diante.

13. O passo seguinte é considerar o descarregamento de um dos pedidos para outros recursos não-restrição, que deve ser executado apenas pelo usuário. Da mesma forma que a hora extra, a retirada de um pedido, não afeta apenas o bloco vermelho em questão, mas todos os demais após ele.
14. Para os blocos que permanecem vermelhos, mesmo depois de realizados os passos anteriores, devem-se definir novos prazos dos pedidos com os clientes. O prazo de cada pedido que criou um bloco vermelho deve ser adiado. Esse novo prazo deve ser igual ao prazo do bloco vermelho correspondente mais o pulmão de expedição. O que mais importa neste ponto, entretanto, é a possibilidade de o usuário poder identificar pedidos cuja probabilidade de atendimento no prazo é mínima e renegociar com o cliente com antecedência, antes que de fato aconteça.

Até aqui completou-se uma primeira tentativa do que é geralmente chamado de programa-mestre, que difere do conceito usual, por considerar não apenas as datas dos pedidos, mas também dados relativos à programação detalhada do CCR.

15. O próximo passo será determinar a subordinação de todos os demais recursos à decisão acima, ou seja, à programação do CCR (o Tambor). Essa subordinação deve levar em consideração as regras do DBR apresentadas na seção 4.5.2, ou seja, os recursos não-restritivos que alimentam um CCR devem realizar as tarefas de forma que estejam prontas um pulmão de tempo antes da necessidade no CCR. Os recursos que são alimentados por um CCR devem realizar as tarefas tão logo quanto apareçam. Já os recursos que processam produtos que serão utilizados na montagem com um produto que passou por um CCR, serão programados para executar a tarefa um pulmão de montagem antes da real necessidade desses produtos na montagem.

Dependendo da complexidade do sistema, essa subordinação pode implicar na existência de conflitos que, na impossibilidade de serem resolvidos, sugerem a existência de uma nova restrição no sistema.

Essa nova restrição, segundo Goldratt (1991), não apresenta um conflito de carga versus capacidade, já que se trata de um recurso não-restritivo, e sim, um conflito de tempo, pois todo o processo de subordinação está baseado na subtração de diversos pulmões das datas estabelecidas no Tambor, não levando em consideração a capacidade desses recursos não-restritivos. Portanto, a aparição desses novos conflitos se refere à “disponibilidade não imediata de um recurso não-restritivo”, ou seja, um tempo de fila que um determinado material deve aguardar em frente a um recurso não-restritivo enquanto ele realiza uma outra tarefa. Portanto, apesar desses recursos terem capacidade acima da carga média necessária, possuem picos de carga acima de sua capacidade.

16. Para os recursos anteriores ao CCR, esses picos devem ser entendidos e tratados da mesma forma que as “ruínas” do CCR, ou seja, deve-se tentar movê-los para os vales à esquerda, o que pode acarretar uma nova programação dos demais recursos não-restritivos e nova solução de conflitos, caso esse deslocamento à esquerda alcance a data atual ou mesmo que encontre mais picos de carga em outros recursos não-restritivos. Essa antecipação das tarefas nos recursos não-restritivos que alimentam um CCR acarreta em um aumento do pulmão de tempo determinado anteriormente. O pulmão de recurso, portanto, é um pulmão dinâmico que possui uma parte fixa, determinada pelo usuário, e uma parte variável, determinada pela programação dos demais recursos para lidar com a disponibilidade não imediata de um recurso não-restritivo.

17. Para os recursos após o CCR, deve-se permitir que os picos sejam movidos à direita, já que qualquer movimento à esquerda causaria uma reprogramação do CCR, ou seja, uma mudança do Tambor, o que não é o objetivo da fase de subordinação.

Vale lembrar que neste momento, etapas 16 e 17, todos os métodos utilizados para determinar o Tambor, podem ser utilizados para os recursos não-restritivos, como o uso de horas extras, a determinação de lotes maiores ou o descarregamento de determinadas tarefas para outros recursos, desde que garanta o aumento do *Throughput* do sistema.

18. Monitorar a capacidade protetora dos recursos não-restritivos. A programação para lidar com os conflitos anteriores pode provocar um aumento na utilização dos

recursos não-restritivos por um longo período de tempo, perto de sua capacidade total, o que torna o sistema vulnerável à medida que podem aparecer novas restrições.

Nesse momento a etapa de subordinação foi concluída e podem-se ter dois resultados:

- a) Nenhuma outra restrição foi encontrada e, portanto, a programação pode ser liberada. A partir desse momento, pode-se partir para a quarta etapa do processo de melhoria contínua, de elevação da restrição, o que não está dentro do sistema DBR.
- b) Caso a etapa de subordinação tenha identificado uma nova restrição, um novo CCR, deve-se gerar uma nova programação Tambor para o sistema. Nesse caso, surge a situação em que um CCR alimenta outro CCR que sugere que o segundo CCR também deve ser protegido por um pulmão de tempo, já que se trata de uma restrição. Entretanto, incluir um pulmão de tempo nesse local, também sugere que um produto que já passou por um CCR será atrasado por um intervalo de tempo igual ao pulmão do segundo CCR.

Nesse caso, é necessário introduzir o conceito de hastes de tempo. A haste deve ser considerada nos blocos correspondentes aos produtos que passarão por dois CCRs ou duas vezes pelo mesmo CCR, e corresponde a um intervalo de tempo, igual à metade do pulmão, apontada para frente no caso do primeiro bloco e para trás no caso do último bloco (figura 4.20). Considerar a disponibilidade da nova restrição pode revelar conflitos com a data fixada para a primeira restrição e as hastes de tempo ajudarão a esclarecer tais conflitos.

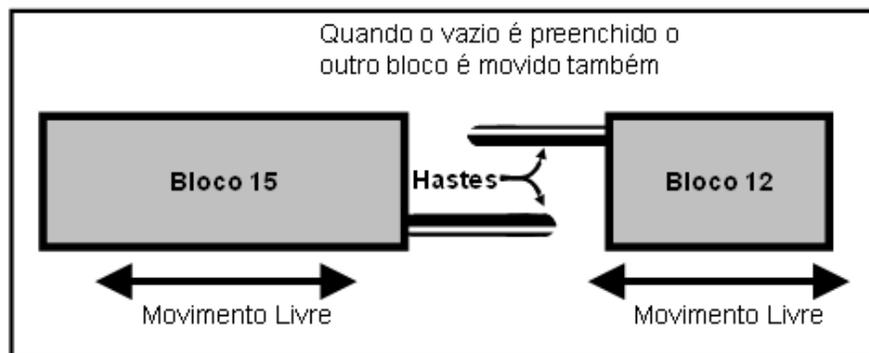


Figura 4.20 - O Conceito de Hastes
Fonte: Goldratt (1991)

O segundo CCR deverá passar pelo mesmo nivelamento das ruínas realizado para o primeiro, no entanto, os blocos com hastes apontadas para o primeiro CCR deverão ser nivelados primeiro. Se houver algum conflito com o Tambor inicial ou se algum bloco for movido para o

passado, pode-se apenas descarregar essa tarefa do novo CCR ou postergar esse pedido. Caso não ocorra conflito com o Tambor inicial, o nivelamento é realizado da mesma forma que na etapa de exploração do primeiro CCR.

O sistema deve repetir esse processo até que todas as sobrecargas estejam resolvidas, sem deixar nenhum conflito para ser resolvido no chão-de-fábrica.

4.8 A TOC e Produção Enxuta: Possibilidade de Aplicação Conjunta

Embora existam diversos estudos que comprovem a aplicação da teoria das restrições e de seu sistema de coordenação de ordens, o DBR, em ambiente de produção sob encomenda, de alta variedade e baixos volumes de produção (GUPTA *et al*, 2002; CHAKRAVORTY, 2001; LEE *et al*, 20010), são poucos os que mostram como a TOC e o DBR podem ser aplicados em conjunto com os princípios da produção enxuta nesse ambiente (GUAN *et al*, 2008), uma das hipóteses deste trabalho de pesquisa.

Esta seção, portanto, busca auxiliar na resposta à terceira questão desta pesquisa sobre a aplicabilidade da teoria das restrições e do DBR como suporte aos princípios da produção enxuta no ambiente de produção de bens de capital sob encomenda, com baixos volumes e alta variedade de produtos produzidos sob encomenda.

Para Guan *et al* (2008), não é possível a aplicação da abordagem tradicional da produção enxuta em sistemas de produção sob encomenda com alta variedade de produtos e baixo volume de produção dada a diversidade da demanda dos clientes e as dificuldades em projetar células de produção totalmente dedicadas a cada família de produtos e de balancear a capacidade de produção para todas as famílias de produtos no longo prazo. Para resolver tais problemas, os autores propõem a operação e o controle do fluxo de produção por meio da gestão das restrições com objetivo de atingir a produção enxuta pela utilização tanto dos princípios da produção enxuta quanto da teoria das restrições. Nesse sentido, os autores propõem a utilização do DBR da teoria das restrições, como forma de suportar a produção enxuta nesse ambiente.

Os autores defendem inicialmente a separação de todos os produtos em famílias de produtos específicas e a criação de diferentes sistemas de produção para cada família, com linhas e células de produção reais ou virtuais, e a adoção de sistemas de controle de produção coerentes

com o grau de variedade de produtos de cada família. Para os autores, mesmo em ambientes de produção sob encomenda com alta variedade de produtos e baixos volume de produção, os produtos devem ser separados em famílias de produtos e parte dessas famílias podem representar um volume considerável que possam ser produzidos de forma repetitiva e justifiquem criação de linhas ou células reais de produção. Nesses fluxos de valor mais estáveis e repetitivos, o sistema CONWIP é mais recomendado para o controle de produção (GUAN *et al*, 2008).

Já, para as demais famílias de produtos, com fluxos de produção menos uniformes, com maior grau de variedade e menores volumes de produção, a mudança de *layout* não se sustenta, e células ou linhas de produção virtuais devem ser organizadas. Essas células ou linhas virtuais são denominadas *flow paths* ou linhas de fluxo. Para os autores, nesses fluxos de valor mais dinâmicos, com mais variedade de produtos e maiores flutuações de demanda, o DBR é mais recomendado.

Nesse sentido, Guan *et al* (2008) propõe um método denominado de *flow path management*, ou gestão das linhas de fluxo, baseado na gestão das restrições do sistema, para utilização da teoria das restrições, com o sistema DBR, como suporte na implementação da produção enxuta nesse ambiente de alta variedade e baixo volumes de produção. Esse método, tem por objetivo definir o número apropriado de linhas de fluxo mediante associação adequada de recursos a cada uma dessas linhas e associar a elas cada uma das famílias de produtos e, nos casos mais dinâmicos, permitir, mas minimizar, o compartilhamento de recursos entre as famílias, já que tal compartilhamento aumenta a complexidade da operação de todo o sistema.

Inicialmente, como pré-requisito, deve-se realizar a separação das famílias de produtos, que devido a seu grau de variedade e volume, serão produzidas em linhas ou células de produção reais, e controlados com o sistema CONWIP. Após tal separação, os seguintes passos são propostos pelos autores:

1. Revisão e Liberação de Ordens: os autores sugerem dois procedimentos para aceitar e liberar as ordens e alcançar um desempenho ideal do sistema de produção, com baixos estoque em processo, fluxo regular de materiais e gestão eficiente e transparente do chã de fábrica
 - 1.1 Considerar a carga (*workload*) atual do sistema de produção para definir a data de entrega de novas ordens.

1.2 Liberar ordens de produção gradualmente para o chão de fábrica com base na capacidade e programação do CCR.

2. Formação das Famílias de Produtos e Projeto das Linhas de Fluxo: A formação de famílias de produtos deve ser realizada de acordo com a similaridade de processos baseada na tecnologia de grupo utilizando a matriz de produtos e processos e gráfico de Pareto. O projeto das linhas de fluxo é realizado por meio da análise do fluxo de valor, do *layout* do chão de fábrica e da capacidades dos recursos de produção, de forma a organizar dinamicamente as linhas ou células de produção virtuais com pouca ou nenhuma mudança de *layout*. Um fator importante, ressaltado pelos autores, que diferencia esse método do planejamento tradicional de células virtuais, é que cada uma dessas linha de fluxo já planejadas devem ser dinâmicas, flexíveis, de forma a poderem ser modificadas, ou ajustadas, devido a uma mudança na variedade de produtos, volume ou *mix* de produção, quebra de máquina, deslocamento do CCR ou entrada de novos pedidos urgentes.

3. Utilização do sistema DBR de controle de produção das linhas de fluxo: Conforme afirmado anteriormente, de acordo com as características específicas de cada linha de fluxo, diferentes sistemas de controle de produção podem ser utilizados. Para tais linhas de fluxo mais dinâmicas, com mais variedade de produtos e maiores flutuações de demanda o mecanismo de controle do DBR é mais recomendado para redução dos estoque em processo e do *lead time* de produção e aumento do *Throughput*.

O planejamento de produção de toda a linha de fluxo será um desdobramento da programação do CCR, e a operação e controle dos demais recursos deve ser realizada de acordo com o *Takt Time* do CCR. Nessa fase, a identificação e monitoramento do CCR é uma etapa crítica, à medida que o *mix* de produção de cada linha de fluxo pode variar, causando o aparecimento de novos CCRs ou de CCRs flutuantes. Deve-se considerar também que podem haver diferentes CCR em níveis diferentes dos produtos (componentes ou montagens).

Como em qualquer sistema que utiliza o DBR, determinar o tamanho correto dos pulmões é crucial para garantir a estabilidade do sistema e manter o estoque em processo em níveis aceitáveis para manter o *lead time* reduzido.

4. Simulação e Controle em tempo real do chão de fábrica: Os autores sugerem a utilização de simulação computacional e de sistemas de controle em tempo real do chão de fábrica como forma de verificar se o fluxo de materiais está ocorrendo conforme o planejado.
5. Avaliação de Desempenho e Melhoria Continua: Os autores sugerem também a utilização e monitoramento das medidas de desempenho, tais como nível de WIP, situação de finalização das ordens, tempo de espera, carga e utilização dos recursos e *lead time* de produção, como forma de controlar a eficiência do sistema e a criação de um mecanismo de balanceamento de fluxo de materiais e melhoria contínua.

A partir desta discussão e da seção 3.10, o próximo capítulo apresenta o método proposto para implementação dos princípios da produção enxuta suportado pela teoria das restrições em ambiente de produção de bens de capital de grande porte sob encomenda.

5 PROPOSTA DO MÉTODO

5.1 Introdução

Nos capítulos anteriores foram discutidos o ambiente de produção de bens de capital de grande porte sob encomenda, seus desafios para melhorar o fluxo de produção e minimizar os desafios inerentes desses sistemas de produção, como a alta variedade de produtos customizados e baixos volumes de produção, e duas das principais estratégias na busca da melhoria contínua dos fluxos de materiais e informações, sincronização das atividades de manufatura, simplificação das atividades de planejamento e controle de produção e redução dos estoques, a produção enxuta e a TOC.

Este capítulo apresenta um método que propõe uma forma de aplicação dos princípios da produção enxuta no ambiente de produção de bens de capital de grande porte sob encomenda suportado pela teoria das restrições, com os objetivos de redução dos *lead times* de produção, melhoria da pontualidade de entrega ao cliente, redução dos custos de produção e simplificação do processo de planejamento e controle de produção.

Em síntese, o método busca definir o valor do ponto de vista do cliente, na forma de objetivos estratégicos de velocidade e pontualidade de entrega, minimizar as atividades que não agregam valor em um fluxo de valor bem definido e dedicado a uma família de produtos, reorganizar as atividades que agregam valor de forma que os produtos fluam com o mínimo de interrupções, quando possível em fluxo contínuo e uniforme, controlado por um sistema puxado-híbrido de controle de produção e, nivelado com base no comportamento da restrição do sistema, de forma a manter baixos os níveis de estoques em processo para expor e minimizar os problemas, na forma de variabilidades e desperdícios, do sistema de produção, permitindo um processo de melhoria contínua.

Segundo Fernandes e Godinho Filho (2010), o nível de repetição de um sistema de produção tem forte impacto na escolha e complexidade do seu sistema de controle de produção. Portanto, o método também tem por objetivo classificar e aumentar o nível de repetição de um sistema de produção e definir os Sistemas de Coordenação de Ordens (SCO) que devem ser utilizados em cada situação de acordo com o nível de repetição de cada sub-sistema.

O método aqui proposto compreende as seguintes etapas, as quais serão descritas nas seções seguintes:

- Explicitar o Valor, ou seja, os fatores competitivos que devem ser melhorados;
- Definir a estrutura de projeto orientado a produto - PWBS
- Definir as famílias de produto;
- Definir o Mapeamento do Fluxo de Valor (MFV) e analisar seu nível de repetição;
- Criar o Fluxo Contínuo onde for possível;
- Nivelar a Produção;
- Puxar a produção utilizando Sistemas de Coordenação de Ordens Híbridos;
- Definir e implementar um processo de melhoria contínua visando reduzir a variabilidade do sistema.

Tais etapas podem ser subdivididas e não são, necessariamente, sequenciais, ou seja, algumas delas devem ser realizadas em conjunto com outras etapas do método ou mesmo serem realizadas de forma cíclica. A figura 5.1 apresenta de forma esquemática as etapas deste método.

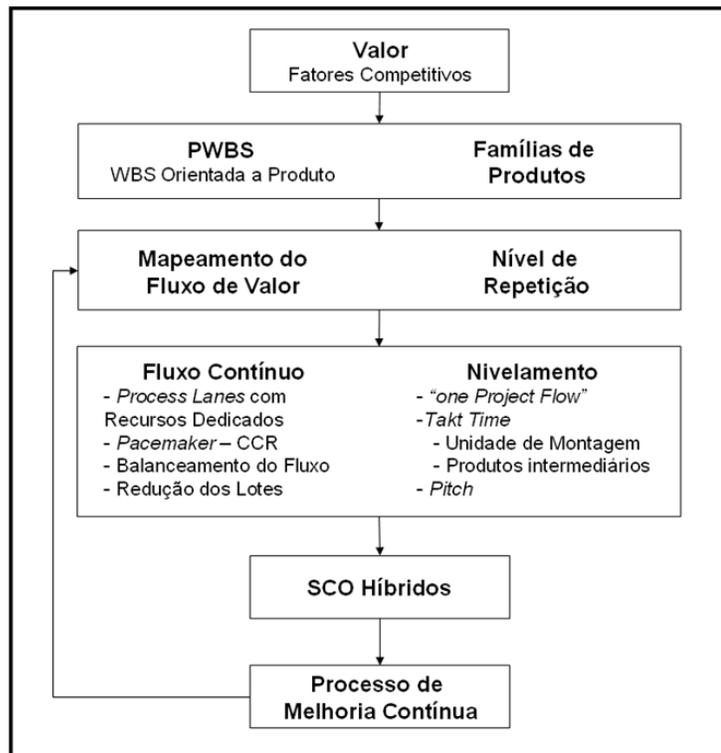


Figura 5.1 - Método de Aplicação Conjunta da Produção Enxuta e da Teoria das Restrições no Ambiente de Produção de Bens de Capital de Grande Porte sob Encomenda.

O método proposto nesta dissertação pode ser utilizado por diversas empresas do setor de bens de capital de grande porte sob encomenda, também conhecido como sistemas de produção de Grandes Montagens, como é o caso da indústria naval, a de máquinas e equipamentos para mineração, óleo e gás, papel e celulose, hidrelétrica, etc. Durante este capítulo será utilizado o termo genérico “Equipamento” para se referir ao produto final deste tipo de indústria, embora, possa se tratar de um produto mais específico como uma Escavadeira, um Navio, uma Plataforma de Petróleo, etc.

5.2 Explicitar o Valor

Os objetivos estratégicos podem variar de empresa para empresa dentro de um mesmo setor, e não é diferente para as indústrias de bens de capital de grande porte sob encomenda. Porém, como vimos no capítulo dois, as empresas deste setor estão expostas a condições mercado muito adversas e a redução dos *lead time* e a pontualidade de entrega são valores reconhecidos pelos clientes deste segmento, pois uma entrega mais rápida e pontual permite ao cliente uma melhor estruturação do fluxo de caixa do projeto, o que torna possível:

- a) Postergar o Investimento: Partindo de uma data fixa final, onde se deseja iniciar a operação do novo equipamento, *lead times* mais curtos de entrega permitem ao cliente iniciar o projeto mais tarde, postergando o desembolso sem adiar o início de operação.
- b) Antecipar o Início de Operação: Partindo da data corrente, um *lead times* mais curtos de entrega, permitem ao cliente antecipar o início da operação do novo equipamento e, conseqüentemente, antecipar o *payback* do projeto.

Portanto, as demais etapas deste método, focam a redução dos *lead times* de fabricação e entrega e a pontualidade de entrega enquanto buscam a redução dos custos de produção pela manutenção dos baixos níveis de estoque, redução das variabilidades do processo e simplificação do processo de planejamento e controle de produção (PCP).

5.3 Definir a Estrutura de Projeto Orientada a Produto - PWBS

Geralmente, não faz sentido tratar um Equipamento como uma única unidade de produção. Tal Equipamento é composto de muitos módulos ou produtos intermediários, que precisam ser fabricados, e sucessivamente agrupados formando produtos maiores até serem finalmente montados na Montagem Final (em inglês, este processo é chamado de “*Erection*”). Pelo tamanho desses Equipamentos, esta montagem final muitas vezes, só é possível de ser realizada na planta do próprio cliente ou em uma área fora da empresa (uma doca, por exemplo).

Assim, um pré-requisito para possibilitar que este tipo de sistema de produção tire proveito dos princípios da produção enxuta, é dividir o projeto do equipamento em partes menores, módulos, que serão chamados de **Unidades de Montagem**, projetados para serem pré-montados e entregues individualmente para a montagem final. A esta estrutura de projeto, dá-se o nome de Estrutura de Projeto Orientada a Produto (PWBS), ao contrário de uma Estrutura de Projeto Orientada a Processos (STORCH e LIM, 1999).

Dependendo da característica da empresa e do tamanho do Equipamento, este pode ser dividido em mais ou menos níveis de fabricação e montagem, porém, deve-se procurar definir um nível, que possa ser entregue individualmente, formando um módulo para a montagem final. Este é o nível que será chamado de Unidade de Montagem. A seguir, serão então definidos os três níveis básicos de produção no ambiente de produção de grandes equipamentos sob encomenda (ver figura 5.2).

- a) **“Equipamento”**: É o produto final da empresa. Não pode ser transportado de forma única e geralmente sua Montagem Final, ou *Erection*, é realizada fora da planta de produção, podendo ser feita na planta onde este equipamento será definitivamente instalado, no caso de máquinas, ou em alguma área temporária como docas secas, no caso da indústria naval, por exemplo.
- b) **Unidade de Montagem** (Módulo de Montagem): É uma subdivisão do equipamento que pode ser considerada um produto final para a planta de produção. É a maior parte que possa ser vendida, montada e/ou entregue individualmente. A estrutura de projeto deve ser feita de forma que esta unidade seja pré-montada da forma mais completa possível, agrupando, geralmente, muitos produtos intermediários fabricados internamente e componentes comprados de sub-fornecedores. Dependendo da

característica do sistema de produção, uma unidade de montagem pode ter uma demanda dependente, ou seja, depende da montagem de um equipamento específico, e uma demanda independente, ou seja, ela pode ser vendida individualmente para reformas de equipamentos ou como peça de reposição.

- c) **Produtos Intermediários:** São produtos fabricados que compõe uma unidade de montagem. Sua demanda é sempre dependente, ou seja, está ligada com a montagem/entrega das unidades de montagem. Dependendo da característica do sistema de produção, este nível pode ser decomposto em mais níveis.

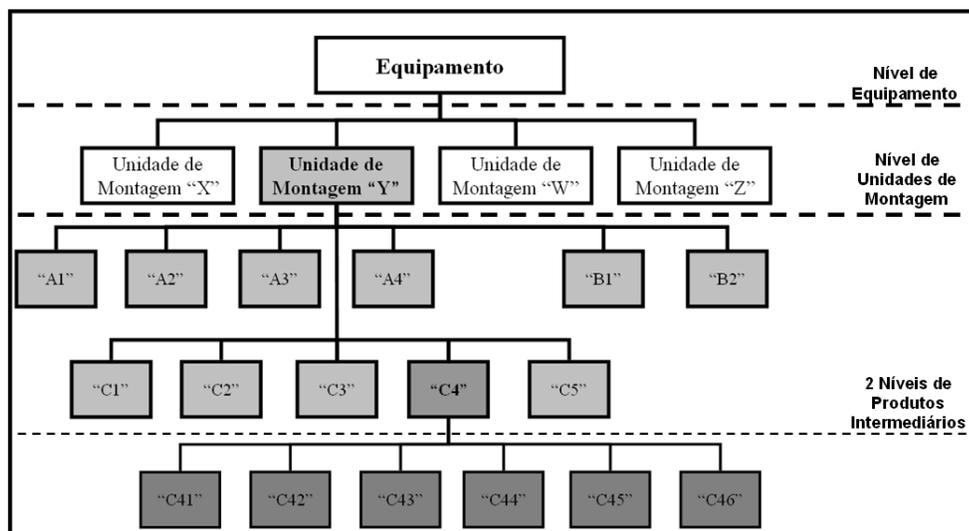


Figura 5.2 - Diferentes Níveis de Produção em um Processo de Produção de Grandes Equipamentos

5.4 Definir as Famílias de Produtos

Na seção 3.6 foram apresentados os critérios para a formação das famílias de produtos. No entanto, existe um ponto adicional a ser levado em consideração ao tratar da formação das famílias de produtos na produção de Grandes Equipamentos, com uma estrutura de projeto orientada a produto, que é a necessidade de considerar os produtos intermediários que compõem uma “unidade de montagem” como uma macro-família de produtos.

Portanto, a formação de famílias de produtos na produção de grandes equipamentos deve levar em consideração a estrutura do produto, a similaridade dos processos dos produtos intermediários e o padrão de tempos de ciclo de cada produto intermediário. Os objetivos buscados na formação das famílias de produtos nesse ambiente são:

- a) Manter uma visão de fluxo do produto/projeto (unidade de montagem)
- b) Aumentar o nível de repetição nas fases de fabricação dos produtos intermediários.

As etapas para a divisão das famílias de produtos nesse ambiente serão:

1. Divisão da planta em Macro-Famílias de produtos baseada na estrutura de produto. Essas Macro-Famílias são formadas por todos os produtos intermediários que compõem cada tipo de unidade de montagem.
2. Subdivisão dessas Macro-Famílias em famílias de produtos intermediários, para aumentar o nível de repetição. Três critérios podem ser utilizados em conjunto:
 - i) Divisão por similaridade de processos de fabricação;
 - ii) Divisão por tempos de ciclo de fabricação, quando necessária;
 - iii) Pode-se ainda, de acordo com a necessidade, dividir de acordo com a matéria-prima utilizada, a forma geométrica e o tamanho dos produtos.

5.5 Mapear Fluxo de Valor e Analisar o Nível de Repetição

5.5.1 Definir o Mapeamento do Fluxo de Valor

Como vimos na seção 3.6, mapear o chão de fábrica completo, desenhando todo o fluxo de produtos de uma planta industrial em único mapa pode ser muito complexo e contra-produtivo. Portanto, nesse ambiente, como um “Equipamento” é formado por diferentes produtos intermediários, que serão pré-montados e expedidos em unidades de montagem, o mapeamento pode ser feito para cada família de produtos. O ponto de partida deve ser o produto final da família de produtos, ou seja, a unidade de montagem, e daí para trás, decompondo o fluxo de fabricação dos produtos intermediários que formam essa unidade, até chegar à matéria-prima. Este procedimento traz também o benefício de permitir iniciar a implementação por uma família piloto de produtos. Caso o objetivo fosse focar e mapear o “Equipamento” como um todo, seria necessário, desde o início, mapear a empresa completa.

Utilizando os procedimentos descritos na seção 3.6, o objetivo desta etapa será compreender os pontos críticos para a implementação das próximas etapas do método, como a

criação fluxo contínuo e uniforme na fabricação dos produtos intermediários, o nivelamento de produção e a utilização de um sistema híbrido de coordenação de ordens. Para isso, serão necessários, durante este mapeamento:

- a) Verificar a porcentagem de utilização de cada recurso, ou grupo de recursos similares, para cada família de produtos;
- b) Identificar o relacionamento com clientes e como é o padrão de demanda dessa família de produtos em termos de demanda dependente e independente.
- c) Identificar o relacionamento com fornecedores e como são realizadas as colocações de pedidos para matéria prima.

5.5.2 Analisar o Nível de Repetição do Fluxo de Valor

Como foi apresentado na seção 2.5, o nível de repetição de um sistema de produção tem forte influência na escolha do seu sistema de controle de produção. Para determinar esse nível, teremos que determinar o grau de variedade de cada família de produtos.

Essa classificação deverá ser feita de acordo com a subdivisão apresentada na seção 2.5 de distinção e diversificação, e as variáveis que serão utilizadas para classificar a variedade da família de produtos, além da similaridade de processos, serão os tempos de ciclo e tempos de *setup*, já que produtos que apresentam apenas distinção tendem a apresentar tempos de ciclo aproximados e tempos de *setup* curtos entre si, enquanto que produtos que apresentam alta diversificação apresentam tempos de ciclo muito diferentes e altos tempos de *setup*.

Como já foi apresentado, um dos objetivos da separação em famílias de produtos é o de aumentar o nível de repetição nas fases de fabricação dos produtos intermediários.

O resultado esperado após essa avaliação é que mesmo que o fluxo de valor de uma família de produtos (produtos que compõem uma unidade de montagem) possa ser não repetitiva, ela possa ser sub-dividida de forma a permitir que a fabricação dos produtos intermediários seja feita de forma repetitiva.

Espera-se aqui alcançar diferentes níveis de repetição ao longo de todo o sistema de produção, surgindo linhas mais repetitivas e linhas menos repetitivas, que terão impacto em algumas questões analisadas mais a frente

5.6 Criar Fluxo Contínuo Onde Possível

5.6.1 Criar as *Process Lanes*

A criação das *Process Lanes* (STORCH e LIM, 1999) está fortemente ligada ao conceito de células de manufatura e mini-fábricas apresentado na seção 3.4.1, contendo os recursos necessários para a fabricação de uma família completa de produtos, e que complementa o conceito de tecnologia de grupo, com objetivo de obter uma eficiência maior que o dos antigos *Job Shop* e uma flexibilidade maior que o das rígidas linhas de produção tradicionais.

O objetivo em criar *Process Lanes* separadas para cada família de produtos também está ligado ao conceito de fábrica focalizadas apresentado por Skinner (1974) que defende a separação organizacional e física da manufatura para atender diferentes requisitos de produtos e mercados, de forma a aumentar o nível de repetição pela concentração de cada área da manufatura em certas tarefas e acelerar a curva de aprendizado e a eficiência dessas fábricas focalizadas. Nesse caso, a separação busca segregar famílias de produtos com processos e níveis de repetição diferentes, e utilizar os sistemas de controle adequados para cada fluxo de valor de acordo com tal nível de repetição conforme proposto por Guan *et al* (2008) e apresentado na seção 4.8.

Portanto, quando se fala em *Process Lanes*, nesse ambiente, significa ter um conjunto de processos dedicados, por onde passa uma família de peças similares, com roteiros similares e padronizados, que possibilita aumentar o nível de repetição na fabricação dos produtos intermediários.

Nesse ambiente, de acordo com o grau de variedade encontrado em cada família de produtos na etapa 5.2.2, uma *Process Lane* pode representar:

- a) Linha de Produção: No caso de um fluxo extremamente repetitivo;
- b) Célula de Produção: No caso de fluxos mais repetitivos;
- c) Mini-Fábrica: No caso de um fluxo menos repetitivo.

5.6.2 Definir os Recursos Dedicados

Para a formação de uma *Process Lane*, será necessário classificar e quantificar os recursos semelhantes nos atuais *Job Shop* e avaliar quais poderiam passar a ser exclusivamente alocados (dedicados) a uma das famílias de produtos.

A dedicação de recursos a uma família de produtos pode causar problemas de alocação da carga de trabalho e conseqüente ocupação dos recursos, uma vez que “perturba” um equilíbrio existente. De fato, como foi apresentado na seção 3.4.1, alguns dos efeitos “colaterais” esperados com essa dedicação de recursos são:

- a) Sobrecarga de alguns recursos quando alocados a uma família de produtos, podendo transformar um recurso não-restritivo em um CCR.
- b) Sub-utilização de outros recursos (possivelmente da mesma característica de recurso) quando dedicados a outra família.

Como vimos no capítulo 2, o ambiente de produção de grandes equipamentos sob encomenda tem algumas características que devem ser levadas em consideração na tomada de decisão de dedicação de recursos ao se formar as linhas de produtos. O processo de fabricação desse tipo de empresa é intensivo de mão-de-obra e pouco automatizado, o que permite a reorganização de alguns dos antigos *Job Shop* apenas dividindo a força de trabalho em pequenos centros de trabalho dedicados que podem ser facilmente alocados nas células ou mini-fábricas. Esse procedimento pode ser utilizado nos processos fundamentalmente manuais (Pintura, Montagem, Solda, etc).

Por outro lado, as máquinas, quando existem, são, geralmente, de grande porte, de uso universal o que, além de não permitirem que sejam movimentadas tão facilmente, exigem uma decisão de investimento importante quanto à sua dedicação. Se por um lado, a dedicação desses recursos, máquinas, traz a simplificação dos fluxos de materiais e do processo de planejamento, por outro, acarreta um custo de movimentação ou mesmo de compra de um novo equipamento.

Essa decisão deve ser analisada para cada caso específico, pois algumas considerações para essa tomada de decisão são:

- a) Localização do recurso compartilhado nos fluxos de valor:

1. Nos casos em que um recurso compartilhado está no início do processo, pode-se utilizar um sistema puxado-híbrido, etapa 5.5 deste método, para fazer essa sincronização.
 2. Para os casos em que esses recursos se encontram no meio do fluxo pode ser necessário um sistema mais complexo de coordenação de ordens.
- b) Identificar se o recurso compartilhado é um CCR de algum dos fluxos de valor.

Por essas razões, pode-se dividir a formação das *Process Lanes* em duas etapas:

1. Criação de *Process Lanes* “Virtuais”: *Job Shop* inicial com recursos dedicados, sendo planejados como uma *Process Lanes*, com roteiros padronizados e recursos (homens e máquinas) dedicados.
2. Mudança de *Layout*: Criação das *Process Lanes* reais com redução do transporte, balanceamento da carga entre os trabalhadores, movimentação dos trabalhadores, etc

Uma vantagem de realizar essa transformação em duas etapas é realmente obter os primeiros resultados em redução de *lead time* e estoque em processo e verificar os impactos na dedicação dos recursos antes de se investir na mudança de *layout* e/ou compra de máquinas e equipamentos pesados para a formação das *Process Lanes*. A desvantagem é que durante a primeira etapa, não se obtém os benefícios da cooperação entre os trabalhadores dos diferentes centros de trabalho e o melhor balanceamento de capacidade entre estes centros de trabalho bem como a redução dos desperdícios de transporte e movimentação.

Alguns resultados esperados pela formação das *Process Lanes* com recursos dedicados, como a padronização dos tempos de *setup* e a redução e padronização dos tempos de ciclo conseguidos pela aceleração da curva de aprendizagem, aumenta o nível de repetição da *Process Lanes*, uma vez que esses dois fatores estão ligados ao grau de variedade da família de produtos e, portanto, ao nível de repetição das *Process Lanes*.

Uma consequência desses resultados, decorrente da afirmação de MacCarthy e Fernandes (2000) de que o nível de repetição do sistema determina o seu sistema de controle de produção, é que, com o aumento da repetição do processo, pode-se buscar uma simplificação do sistema de controle de produção de cada uma das famílias de produtos.

5.6.3 Identificar O *Pacemaker* - Processo Cadenciador

Como foi apresentado nos capítulos anteriores tanto a produção enxuta quanto a teoria das restrições, com seus SCOs híbridos, focam a programação de poucos recursos críticos dentro de um fluxo de valor que irão determinar o ritmo de toda um fluxo de valor. No método proposto aqui, o ponto de controle do fluxo de materiais de uma *Process Lane* será o CCR, que é a restrição interna de um sistema de produção. Porém, ele será chamado de Processo Cadenciador, pois definirá o ritmo (cadência) com que todos os recursos da *Process Lane* devem produzir.

Dessa forma, quando a *Process Lane* estiver operando cadenciada pelo ritmo estabelecido pela capacidade do CCR, teremos:

- a) O ritmo do CCR será o ritmo da *Process Lane*
- b) A sequência definida para o CCR será a sequência da *Process Lane*;
- c) O nivelamento do CCR será o nivelamento da *Process Lane* (será visto em mais detalhes na seção “nivelamento”)

O CCR, em uma *Process Lane* de produtos intermediários, fabricados sob encomenda pode aparecer por dois fenômenos:

- a) Maior tempo de ciclo de um recurso para processar os produtos intermediários que compõem a família de produtos que passa por aquela linha.
- b) Menor capacidade disponível desse recurso.

Um ponto crítico nessa análise é a existência de restrições interativas, ou ainda de flutuação do CCR. Quanto maior a variedade da família de produtos, ou seja, menor a repetição do *Process Lane*, maiores serão as chances de haver restrições que mudem de lugar de acordo com o *mix* de produtos fabricados.

Os procedimentos anteriores visaram aumentar a repetição do fluxo, reduzindo a variedade de produtos que passam por uma mesma *Process Lane*, mas ainda podem existir algumas onde a restrição não está claramente definida ou, pior, onde a restrição varia de lugar de acordo com o *mix* de produtos.

Para se obter as vantagens de simplificação de programação proposta por este método, onde toda a programação da *Process Lane* deverá ser feita de acordo com o processo cadenciador, o CCR, deverão ser empregados alguns procedimentos para fixar o CCR de uma *Process Lane*:

- a) localizar todas as possíveis restrições, ou “candidatos a restrição” e;
- b) aumentar a capacidade disponível de um ou mais recursos, tornando-o um recurso não-restritivo ou;
- c) reduzir a capacidade disponível de um recurso, para torná-lo um CCR fixo.

Como será visto nas próximas etapas, o objetivo não é elevar a restrição de cada uma das *Process Lanes* de forma a ter o fluxo mais rápido, como sugere o quarto passo do processo decisório da TOC, pois o objetivo de todo método é ter cada uma das *Process Lanes* operando a uma velocidade constante, em fluxo contínuo e uniforme de forma a ter a chegada das peças de forma sincronizada para a montagem das unidades de montagem e dessas para a montagem final do “Equipamento”.

5.6.4 Reduzir o Tamanho dos Lotes

Conforme apresentado nas seções 3.6.1.2, 3.6.1.4 e 4.6.1, tanto a produção enxuta quanto a teoria das restrições fazem uma clara distinção entre lote de processamento e lote de transferência e priorizam, inicialmente, a redução dos lotes de transferência, com o objetivo de reduzir as esperas dos lotes e acelerar o fluxo de materiais. A produção enxuta coloca que o lote de transferência ideal é o unitário para que seja atingido o princípio do fluxo contínuo.

Empresas de bens de capital sob encomenda, que geralmente trabalham em *Job Shops*, também tendem a utilizar grandes lotes de processamento e tamanho de lotes de transferência iguais aos lotes de processamento. Severino *et al* (2010) concordam e afirmam que os grandes tamanhos dos lotes são causados por problemas de políticas de PCP e são uma das causas dos altos *lead times* das indústrias de bens de capital.

Portanto, para se atingir o fluxo contínuo na produção dos produtos intermediários será necessária a redução dos lotes de transferência entre os processos de uma *Process Lane*. Um resultado esperado dessa redução dos lotes de transferência é a drástica redução do *lead time* total dos produtos intermediários nas *Process Lanes*.

Os lotes de processamento também devem ser reduzidos, mas o tamanho ideal do lote de processamento depende de uma análise mais detalhada de cada *Process Lane*. De acordo com o nível de repetição de cada *Process Lane* e da carga imposta ao seu CCR, deverá ser determinado

o lote de processamento que permita ao CCR trabalhar conforme o *Takt Time*. Para se reduzir o tamanho dos lotes de processamento, e permitir que o CCR trabalhe conforme o *Takt Time* pode ser necessário a utilização da troca rápida de ferramentas, SMED, apresentado brevemente na seção 3.6.1.4.

5.6.5 Balancear a *Process Lane*

O balanceamento do fluxo na produção de bens de capital de grande porte significa o balanceamento das cargas de trabalho em todos os centros de trabalho na fabricação dos produtos intermediários, em termos de duração da atividade, ou seja, tempo de ciclo de cada processo, não em termos de quantidade de horas-homem. Isso significa que com a adequada alocação de recursos necessários, pessoas e máquinas, pode se obter uma alocação equilibrada do conteúdo de trabalho por centro de trabalho de forma que a *Process Lane* seja a mais balanceada possível, ou seja, que a duração, tempo de ciclo, de todos os centro de trabalho sejam aproximadas para que possam produzir ao mesmo ritmo.

As características do processo de fabricação de grandes equipamentos sob encomenda, tais como os longos tempos de ciclo, alguns podendo passar de dias ou até semanas e, o processo intensivo de mão de obra, com muitos trabalhos manuais, torna fundamental considerar separadamente a capacidade das máquinas e das pessoas, pois o tempo de ciclo pode variar de diversas formas de acordo com a quantidade de recursos humanos alocados em cada centro de trabalho. Dessa forma, existem alguns procedimentos para balancear os tempos de ciclo dos diferentes centros de trabalho em uma *Process Lane*:

- a) **Máquinas:** Ativar capacidades diferentes em cada máquina da linha, levando em consideração a necessidade daquela família de produtos. Por exemplo, enquanto uma máquina pode ser ativada em três turnos, outras podem ser ativadas em dois ou mesmo em um turno. O mesmo vale para os dias da semana (máquinas ativadas em 5, 6 ou 7 dias, por exemplo) ou mesmo para o número de horas em um turno, já que pode ser feito um rodízio na equipe de trabalho, em que algumas máquinas, o CCR por exemplo, possam trabalhar sem intervalos durante todo um turno, enquanto outras podem ficar paradas mais tempo em função desse rodízio. Nesses centros de trabalho,

a restrição fica sendo a capacidade instalada do CCR, ou seja, 24 horas por dia, 7 dias por semana, menos as paradas programadas para manutenção.

- b) **Centros de trabalho manuais:** Nesses centros de trabalho, onde apenas os recursos humanos determinam a capacidade do centro, além da flexibilidade de variar a quantidade de horas, turnos ou dias na semana, a quantidade de pessoas alocadas a uma mesma atividade e a divisão de trabalho adequada definem a duração dessa atividade.

Para realizar esse balanceamento da capacidade será necessária a formação de uma força de trabalho flexível e multi-funcional, com trabalhadores que possam desenvolver tarefas em diferentes centros de trabalho para obter uma estreita cooperação ao longo de toda a *Process Lane*.

Outra decisão importante quanto ao balanceamento da *Process Lane* será o nível de capacidade protetora que deve ser planejado nos recursos não-restritivos. Como vimos nas seções 3.7 e na 4.6 algum nível de capacidade ociosa deve ser planejado para lidar com a variabilidade causada entre outros fatores, pela variedade de produtos em uma família.

Portanto, a decisão de quanto manter de capacidade protetora nos recursos não-restritivos, deverá ser feita de acordo com o nível de repetição da *Process Lane*, ou seja, do grau de variedade (distinção ou diversificação) da família de produtos que por ela passa. Ou seja, *Process Lanes* mais repetitivas poderão trabalhar com menor capacidade protetora nos recursos não-restritivos, com ocupação próxima da ocupação do gargalo. Já as *Process Lanes* menos repetitivas deverão manter uma maior capacidade ociosa planejada nesses recursos para lidar com as variações de carga de trabalho causadas pela variedade de seus produtos.

O ponto a ressaltar é a importância de não permitir que a restrição mude de lugar de tempos em tempos, o que pode prejudicar toda a eficiência deste método.

5.7 Nivelar a Produção

5.7.1 *Takt Time* - Definir o Ritmo

O *Takt Time* representa a frequência com que se deve produzir uma peça ou produto, para atender à demanda dos clientes. Neste método, a definição do *Takt Time* está dentro da etapa do nivelamento, pois como veremos, o *Takt Time* para cada uma das *Process Lanes* de produtos intermediário dependerá de como a demanda para as unidades de montagem for nivelada.

A utilização do *Takt Time* como um elemento de controle do fluxo de materiais na produção de grandes equipamentos sob encomenda não é tão trivial quando comparada a processos mais repetitivos. Em primeiro lugar porque o *Takt Time* é muito grande em comparação com outras indústrias, podendo ser de semanas, meses e até passar de um ano. O *Takt Time* de alguns meses é muito longo e difícil de usar como um meio de dividir as tarefas para definir o ritmo de produção (LIKER e LAMB, 2001).

Outro ponto importante é a variação que o *Takt Time* pode ter, pois ele pode variar consideravelmente de um “Equipamento” para outro, dependendo de seu tamanho, complexidade e quantidade de produtos intermediários que compõem cada “Equipamento”.

Pensar sobre o *Takt Time* faz mais sentido quando o equipamento for entendido como um conjunto de partes menores, as unidades de montagem, que por sua vez, são compostas por partes ainda menores, os demais produtos intermediários. Portanto, o processo realizado para definir o *Takt Time* de cada *Process Lane* será:

1. Começar analisando a carteira de pedidos e o cronograma de montagem final (*erection*) de cada “Equipamento”, e identificar as unidades de montagem necessárias para a montagem desses “Equipamentos”. Essas unidades de montagem serão separadas em cada uma das *Process Lanes* da empresa, de acordo com as famílias de produtos definidas. Como vimos anteriormente, as unidades de montagem são os maiores produtos que são montados e entregues dentro da planta. Elas também podem ser, em muitos casos, vendidas individualmente, para alguma reforma ou como peça de reposição.

2. Elaborar um cronograma de entregas compassadas, um *pipeline*, para cada *Process Lane*, com as datas de entregas necessárias das unidades de montagem para atender aos cronogramas de montagem de todos os “Equipamentos”, estabelecendo o ritmo de entrega necessário (demanda) para cada uma das *Process Lanes*. Esse ritmo será o *Takt Time* da *Process Lane*. Para garantir o menor *lead time* de produção e montagem, esse *pipeline* deve prever que cada unidade de montagem seja produzida e montada individualmente, sem simultaneidade com outra unidade de montagem, mantendo dessa forma um fluxo unitário de projetos/unidade de montagem (***one project flow***) em cada *Process Lane*. As montagens das unidades de montagem deverão ser planejadas de forma compassada de acordo com esse *Takt Time*, sejam entregas individuais ou de forma sincronizada com montagem final dos “Equipamentos”.
3. Identificar o volume e o *mix* de produtos individuais que compõem cada unidade de montagem e quando cada um desses produtos precisam ser concluídos para a montagem dessas unidades de montagem. Separar tais produtos nas suas *Process Lanes* secundárias (caso exista essa subdivisão) e verificar o ritmo necessário de fabricação dos produtos intermediários para atender ao ritmo de montagem e entrega das unidades de montagem.

Esse nivelamento de montagem das unidades de montagem deve prever uma pequena antecipação das entregas em relação à data de entrega prometida o que corresponde a um pulmão de expedição, utilizado pela TOC para garantir as datas de entrega. No entanto, o nivelamento e o sequenciamento sem simultaneidade pode acarretar em alguma antecipação ainda maior das entregas em relação à data de entrega prometida (veja ilustração na figura 5.3). Tal antecipação, mesmo sendo contra o senso comum do *Just-in-Time*, deve ser mantida, pois, da mesma forma que um pulmão de inventário na indústria repetitiva, na forma de um supermercado de produtos acabados, os benefícios trazidos por uma programação nivelada, como minimização das sobrecargas e das flutuações nos volumes e variedade de produtos (*Muri* e *Mura*) superam os problemas causados por sua manutenção.

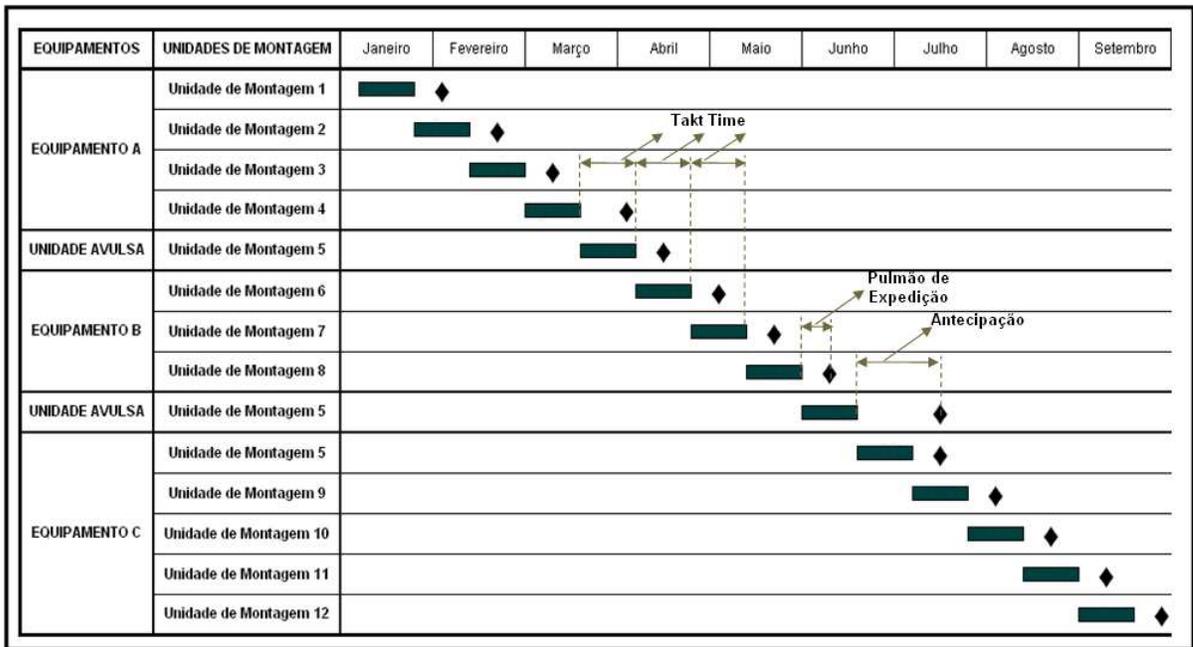


Figura 5.3 - Exemplo de *Pipeline* de Montagem e Entrega de uma *Process Lane*

5.7.1.1 *Takt Time*: Exemplo

Em um exemplo hipotético, para entregar um tipo de equipamento, a empresa dividiu sua fabricação em três linhas de produtos (X, Y, W), cada uma fabricando um tipo de unidade de montagem. Uma das linhas deve entregar 26 unidades de montagem ao longo do próximo ano para atender a montagem dos equipamentos vendidos pela empresa, portanto pode-se dizer que, grosso modo, o *Takt Time* dessa linha é de duas semanas e, portanto, o ritmo de montagem e entrega deve ser o de uma unidade de montagem a cada duas semanas.

Neste exemplo da figura 5.4, a linha de produto que monta e entrega uma unidade de montagem a cada duas semanas (Linha X), com *Takt Time* de duas semanas, cada unidade de montagem é composta por aproximadamente 15 produtos intermediários divididos em duas famílias de produtos (A e B), sendo 10 da família A e 5 da família B. Portanto para atender o ritmo de montagem da unidade de montagem o ritmo de fabricação da linha A será de produto por um dia, *Takt Time* de um dia, e de um produto a cada dois dias da linha B, para atender o *Takt Time* de dois dias.

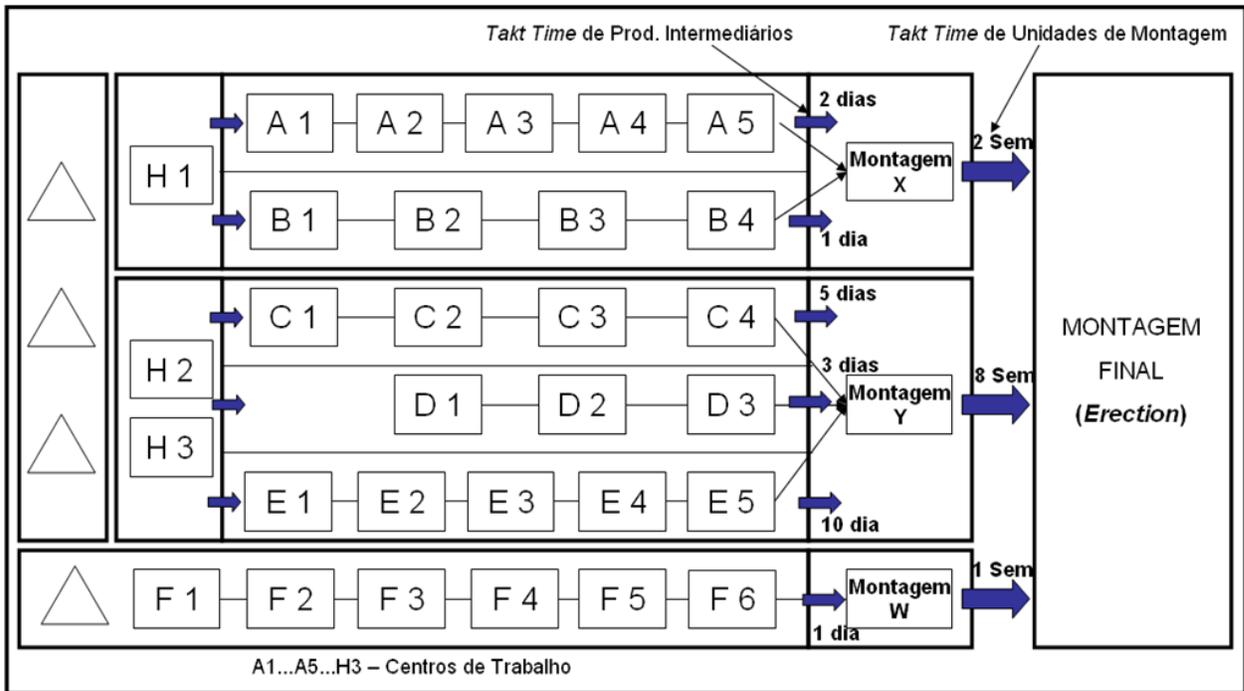


Figura 5.4 - Exemplo de Divisão de uma Planta em *Process Lanes* com Definição do *Takt Time* para Unidades de Montagem e Produtos Intermediários

5.7.2 *Pitch* - Incremento de Trabalho Constante

Como vimos na seção 4.3.4, no ambiente sob encomenda, a liberação de trabalho para o fluxo de valor, as *Process Lanes*, não deve ser feita de acordo com cada ordem do cliente, pois cada ordem pode conter um volume muito diferente das demais. A liberação deverá ser feita em incremento de tempo padronizado, chamado *PITCH*, definido de acordo com a capacidade do CCR da linha. Esse *PITCH* será a unidade básica de programação de produção para uma determinada família de produtos.

Portanto, a idéia central desta etapa será a de liberar pequenos e constantes incrementos de trabalho, baseado em incrementos de tempo e na capacidade do CCR, para cada *Process Lane*, estabelecendo um ritmo de trabalho nivelado, garantindo um fluxo contínuo e uniforme em todas as etapas de geração do valor. Dessa forma, o CCR, o Processo Cadenciador, cadencia o ritmo para toda a *Process Lane*.

Em linhas de produtos mais repetitivas, o incremento de tempo pode ser o próprio *Takt Time*, à medida que nesse ambiente de produção de grandes equipamentos sob encomenda, uma

unidade de uma família repetitiva de produtos intermediários já pode representar um incremento de trabalho uniforme para a *Process Lane*, onde o incremento de tempo igual ao *Takt Time* é suficiente para controlar a linha e detectar possíveis problemas no fluxo. Ou seja:

$$\text{Pitch (linha repetitiva)} = \text{Takt Time} \approx \text{TC CCR}$$

Isso significa que a cada *Takt Time*, uma ordem de fabricação deve ser liberada no início da linha, e essa ordem de fabricação conterá exatamente o volume de trabalho de um *Takt Time* no CCR.

Por exemplo, uma linha de produtos que tenha um *Takt Time* de dois dias, ou seja, para atender à demanda ela precisa fabricar um produto intermediário a cada dois dias, deverá liberar uma ordem de produção para o início do processo a cada dois dias, e essa ordem de fabricação deve conter dois dias de volume de trabalho para o CCR da *Process Lane*, nesse caso, a usinagem (figura 5.5).

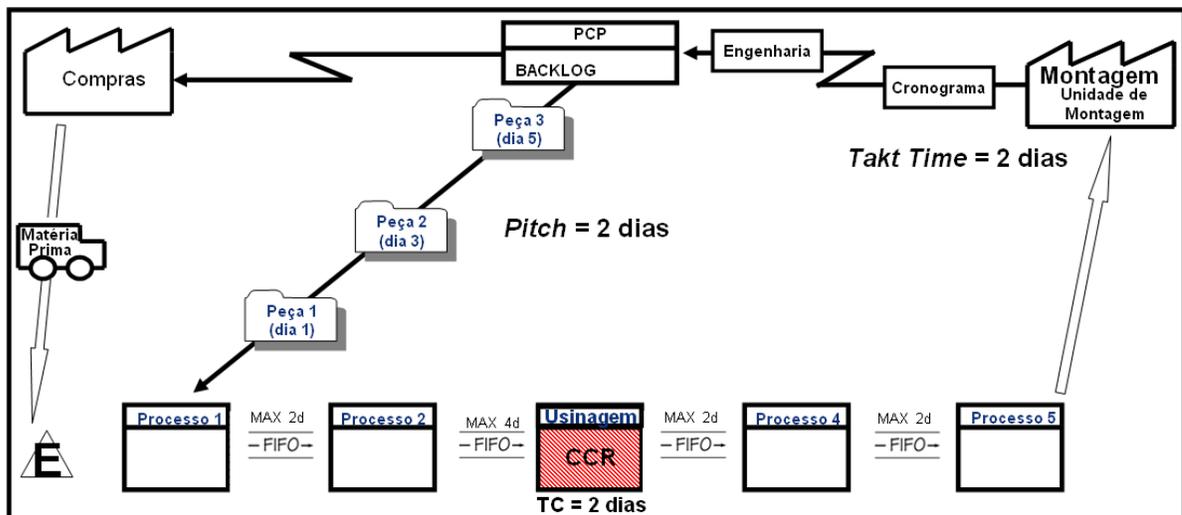


Figura 5.5 - Liberação de Trabalho em Incremento $\text{Pitch} = \text{Takt Time} = \text{TC CCR}$

Já, para *Process Lanes* menos repetitivas, por onde passam famílias de produtos com maior grau de variedade, será necessário estabelecer procedimentos para determinar esse incremento de trabalho constante, já que nesse ambiente de alta diversificação, cada produto pode representar um volume de trabalho muito diferente dos demais, sendo muito difícil estabelecer um ritmo constante de produtos finalizados que possa ser controlado em cada etapa do processo.

Para esses casos, o incremento de tempo deverá ser definido de acordo com as características de cada linha de produto. Esse incremento deverá levar em consideração os volumes de trabalho e os tempos de ciclo de todos os produtos daquela família de produtos,

devendo ser possível fabricar qualquer produto dessa família dentro de incremento *PITCH*, ou seja.

***Pitch* (linha não repetitiva) \geq Maior TC do CCR**

Deve-se lembrar que o tempo de ciclo (TC) pode variar de acordo com a alocação de recursos humanos de cada centro de trabalho e, portanto, um mesmo volume de trabalho pode representar um TC diferente de acordo com a quantidade de recursos alocados.

Para facilitar a definição do *PITCH*, será necessária a introdução do conceito de unidade padrão conforme Spearman (1989), apresentado na seção 3.8.2:

- a) Unidade Padrão (UP): Uma unidade padrão será o volume de trabalho do CCR contido em um produto de referência da família de produtos.

Esse produto de referência pode ser, por exemplo, o menor produto da família, ou seja, aquele com o menor volume de trabalho no CCR ou o produto mais repetitivo dessa família. Todos os demais produtos dessa família deverão ser classificados de acordo com essa unidade e irão representar um múltiplo dessa UP.

Dessa forma, o *PITCH* representará uma quantidade de UPs possíveis de serem produzidas no CCR nesse incremento de tempo definido, podendo representar quantidade diferentes de produtos intermediários.

No exemplo da figura 5.6, uma linha não repetitiva, tem o mesmo *Takt Time* de dois dias, ou seja, ela tem que produzir em média um produto intermediário a cada dois dias para atender à demanda de sua montagem. Porém, pela variedade de produtos que a linha fabrica, decidiu-se por liberar as ordens de fabricação em um *PITCH* de 6 dias, o que significa que a cada 6 dias, são liberadas as ordens de fabricação para 6 dias de trabalho do CCR. Esse *PITCH* de 6 dias pode representar, nesse exemplo hipotético, fabricar de dois a 4 produtos no mesmo intervalo de tempo, porém, representa sempre a mesma quantidade de unidades padrão (UP), nesse caso, 6 UPs.

Um dos resultados esperados desse procedimento é diminuir a variação de carga de trabalho em todo o fluxo de valor. Porém, quanto menos repetitiva for a linha, menos se conseguirá obter o mesmo nivelamento para todos os processos.

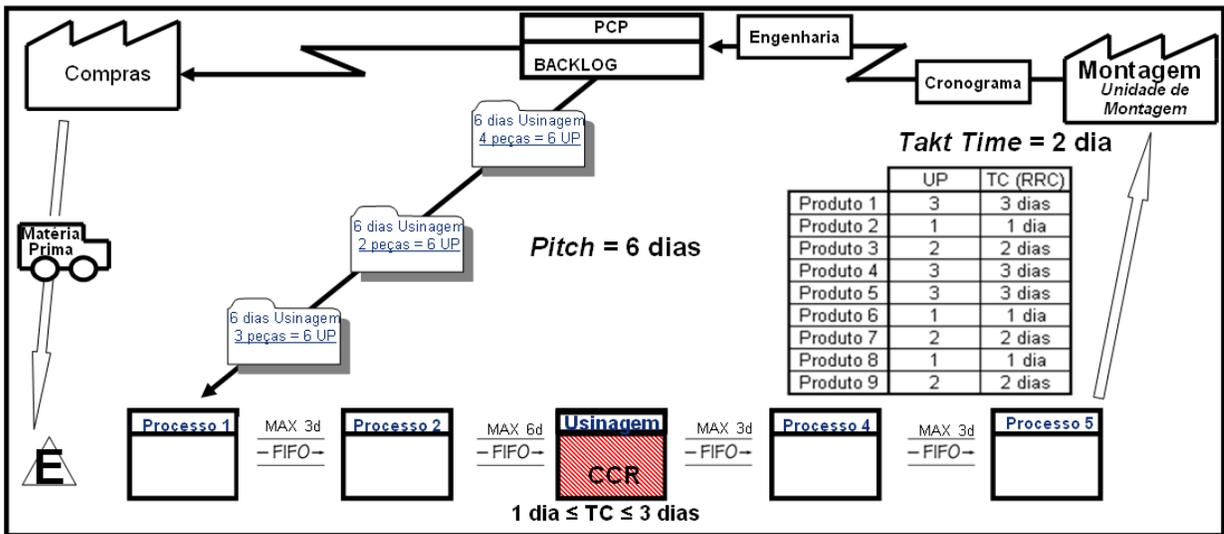


Figura 5.6 - Liberação de Trabalho em Incremento *Pitch* do CCR

A figura 5.7 ilustra a variação das cargas de trabalho em uma linha de fabricação de produtos intermediários sem nivelamento. Nota-se nessa ilustração, que a variação do volume de trabalho causado pela liberação das ordens de fabricação sem considerar o incremento constante de trabalho, pode fazer com que o CCR flutue entre os processos do fluxo de valor.

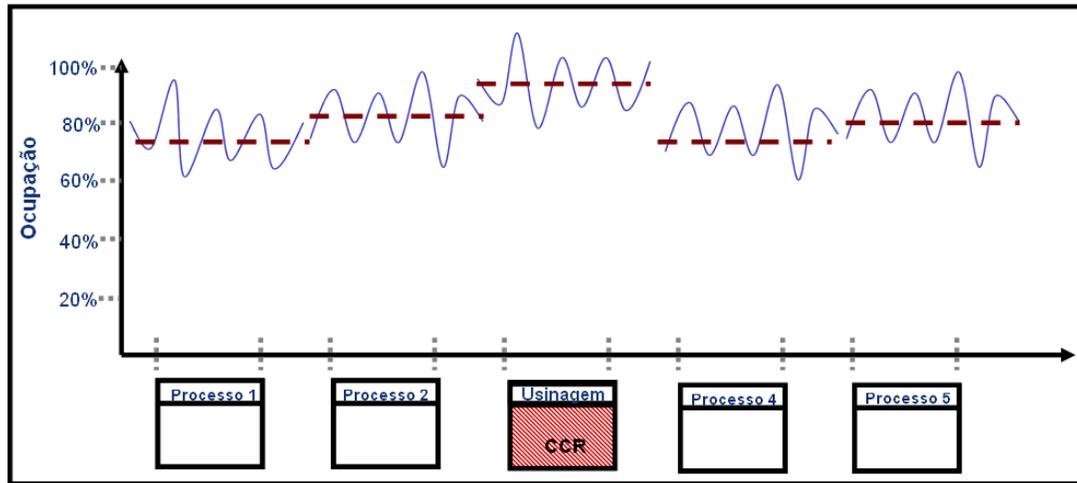


Figura 5.7 - Ocupação dos Recursos Antes do Nivelamento: CCR Flutuante

Já, a figura 5.8, ilustra variação das cargas de trabalho da mesma linha de fabricação nivelada conforme o *PITCH* do CCR. O resultado esperado é que, pela variedade de produtos, não se consiga o mesmo resultado de nivelamento em todos os recursos, porém, o nivelamento do CCR e a menor variação nos demais recursos, pode ser suficiente para fixar o CCR.

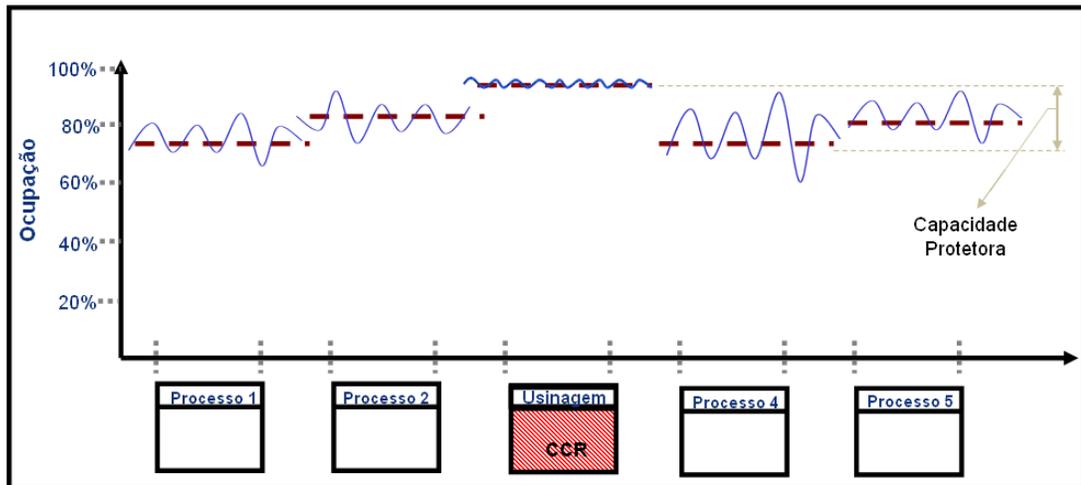


Figura 5.8 - Ocupação dos Recursos Depois do Nivelamento: CCR Fixo (linha menos repetitiva)

Ao nivelar e fixar o CCR podem-se esperar dois resultados decorrentes da TOC:

- b) Pela definição de CCR, apresentado anteriormente, o nivelamento atingido para o CCR será o nivelamento de toda a linha de fabricação.
- c) Dependendo do nível de repetição da linha, deverá ser mantido maior ou menor nível de capacidade protetora nos recursos não-restritivos.

Como ilustração desse segundo resultado, a figura 5.9 mostra o resultado do nivelamento em uma linha repetitiva e sua menor capacidade protetora necessária para lidar com a variabilidade da linha.

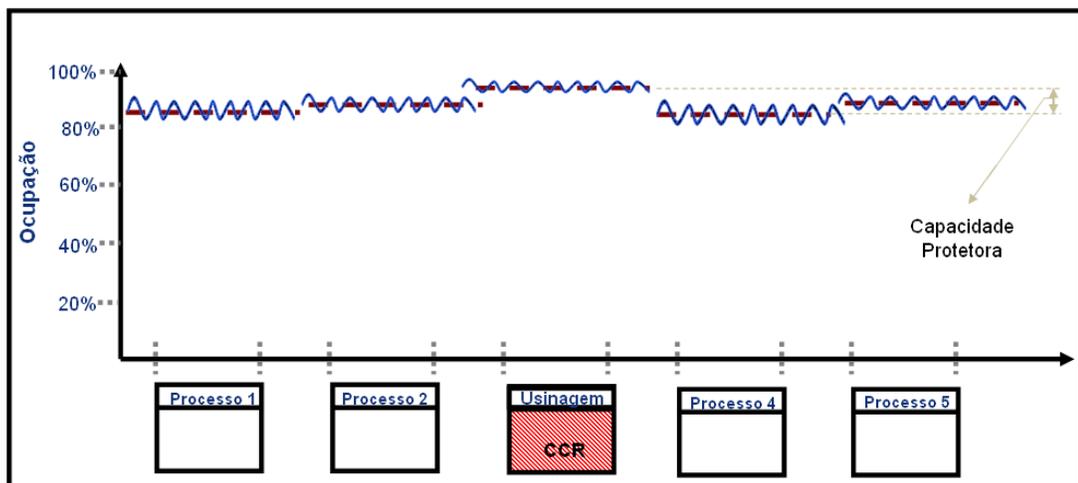


Figura 5.9 - Ocupação dos Recursos Depois do Nivelamento: CCR Fixo (linha repetitiva)

5.8 Implementar Sistemas de Coordenação de Ordens Híbridos

Em uma empresa de produção de grandes equipamentos sob encomenda, o princípio de puxar a produção, que controla os níveis de WIP, evitando a superprodução, autoriza a fabricação de cada parte de acordo o estado da linha e interliga os processos que não estão no fluxo contínuo deve ser realizado por meio de um sistema híbrido de controle de produção e deverá ser utilizado nas seguintes situações:

- a) autorizar a liberação de trabalhos no início do processo;
- b) onde o fluxo contínuo não for possível:
 - processos compartilhados com tempos de ciclo muito lentos ou muito rápidos para atender diferentes famílias de produtos;
 - processos muito distantes em que o transporte unitário não é realista;
 - *lead time* do processo muito elevado ou pouco confiável.

Existe uma grande variedade de sistemas de coordenação de ordens, SCOs, híbridos que podem ser utilizados em diversas situações. Dois desses sistemas híbridos que se adaptam bem a esse ambiente e suportam o método proposto, dependendo das características de cada família são o CONWIP H e o DBR apresentados respectivamente nas seções 3.5.2 e 4.5.2. Portanto, o SCO híbrido adequado para atingir o princípio da produção puxada deverá ser escolhido de acordo com as características de cada linha de produtos, podendo inclusive ser utilizados em conjunto. Observe-se que se o CONWIP for utilizado entre o processo inicial e o CCR, ele pode funcionar como a *corda* do DBR.

5.8.1 CONWIP H

A partir da revisão apresentada na 3.5.2, podemos afirmar que o sistema CONWIP é aderente a este método, pois:

- a) Pode ser utilizado para famílias de produtos com um certo grau de variedade, tanto diversificação quanto distinção, de produtos e lida bem com situações onde as demanda são flutuantes e os tempos de *setup* longos, condição comum nesse ambiente;

- b) O conceito de contenedores atravessando uma linha, cada um com uma mesma quantidade de volume de trabalho (quantidade padrão), garantido que os tempos de ciclo de cada centro de trabalho, incluindo o CCR, sejam constantes, remete ao conceito de *PITCH*, apresentado anteriormente;
- c) O estoque em processo vai se acumular naturalmente em frente ao CCR, exatamente onde é necessário para garantir que a linha mantenha a sua taxa de produção. Portanto, pode-se afirmar que um sistema CONWIP será regulado pela taxa de produção do CCR, exatamente o que se espera nas etapas anteriores do método.
- d) Permite a redução gradativa dos estoques em processo por meio da redução do número de cartões à medida que o fluxo de valor se estabilize.

Esse sistema poderá ser utilizado nas linhas mais repetitivas.

5.8.2 DBR

A partir da revisão apresentada na 3.5.2, podemos afirmar que esse sistema é aderente a este método, pois:

- a) Todo o ritmo de produção está sendo definido em função da capacidade e da programação do CCR (*Drum - Tambor*), que será o processo cadenciador.
- b) Trabalha com lotes de transferência pequenos, podendo ser unitário, o que está de acordo com o princípio de fluxo contínuo;
- c) Mantém o princípio da produção puxada, pois é um sistema híbrido, uma vez que o estoque pulmão (*buffer*) puxa a produção por meio do *feedback* de informação da corda (*rope*), enquanto que o CCR é programado pelo PCP central;
- d) Busca a redução gradativa dos estoques em processo (pulmão de tempo) por meio do processo de melhoria contínua trazido pelo método de Gerenciamento do Pulmão.

Esse sistema poderá ser utilizado nas linhas menos repetitivas.

5.9 Definir e Implantar um Processo de Melhoria Contínua para Reduzir a Variabilidade do Sistema

Até aqui, o método apresentado propôs a transformação de um sistema de produção, inicialmente organizado em departamentos funcionais, *Job Shops*, operando em lotes, onde os materiais são empurrados de um processo ao outro e ficam parados, aguardando em filas de estoque em processo para serem processados. As etapas anteriores apresentaram uma forma de criar um fluxo de valor contínuo e uniforme, controlado por um sistema híbrido, e nivelado pelo comportamento da restrição do sistema com objetivo de redução dos *lead times* de produção, atendimento às datas de entregas, redução dos custos de inventário entre outros por meio da consistente eliminação de desperdícios como inventário, superprodução, movimentação, transporte, etc.

Essa transformação, porém, não acontece de forma rápida e para cada passo será necessário a estabilização do processo de transformação e a manutenção do fluxo de valor criado por meio de um processo de melhoria contínua que expõe as vulnerabilidades do sistema, possibilitando rápidas ações corretivas e de melhoria que tornem o sistema mais robusto. Esta seção, portanto, propõe um processo de melhoria incremental para sustentar as etapas anteriores deste método.

Alguns pontos desse processo gradual já foram citados nas etapas anteriores, como a escolha de uma linha piloto para o mapeamento e a formação das *Process Lanes* em duas etapas, uma primeira apenas com a dedicação dos recursos para só então, na segunda etapa, realizar a mudança de *layout*. O objetivo neste momento é definir uma forma de identificar, lidar e reduzir as fontes de variabilidade do novo sistema criado.

Como vimos, tanto a produção enxuta como a TOC buscam formas de identificar e reduzir a variabilidade (desperdícios ou *murphy*) do sistema pois sempre que existir alguma forma de variabilidade, algum dos tipos abaixo de *buffers*, ou pulmão, serão criados natural ou propositalmente, para proteger o sistema dessa variabilidade.

- a) Pulmão de inventário
- b) Pulmão de capacidade
- c) Pulmão de tempo

Portanto, um processo de melhoria continua deve identificar uma fonte de variabilidade do sistema, criar um pulmão para absorver tal variabilidade, estabilizar o sistema, implementar alguma ferramenta para reduzir ou eliminar tal variabilidade e reduzir o pulmão. Essa redução do pulmão, fará com que uma nova fonte de variabilidade seja identificada e para isso, um novo pulmão deverá ser criado.

A produção enxuta propõe a utilização do pulmão de inventário, supermercado, para lidar com a flutuação na demanda ou onde o fluxo contínuo não for possível. Já a TOC, propõe tanto a utilização dos pulmões de tempo, de recurso, montagem e expedição, e o pulmão de capacidade nos recursos não-restritivos em vez do pulmão de inventário. O pulmão de inventário é físico e, portanto, mais fácil de quantificar, controlar e estabilizar, para então poder ser reduzido. Entretanto é um pulmão caro que pode esconder diversas outras variabilidades e deve, sempre que possível, ser substituído por algum outro tipo de pulmão.

1. **Eliminar os desperdícios mais óbvios:** Esta categoria de desperdício são atacadas pelos princípios e ferramentas apresentadas nas etapas anteriores deste método como a formação das *Process Lanes* e a implementação de um sistema híbrido de controle de produção.
2. **Delimitar o pulmão de inventário:** Com a implementação de um SCO híbrido, como o CONWIP, o estoque em processo ficará limitado ao número de cartões no sistema. Em um primeiro momento, pode ser necessário manter um número maior de cartões para lidar com as variabilidades existentes nas *Process Lanes* recém criadas.

Outra forma necessária de limitar o estoque em processo é delimitar o tamanho dos FIFO. Como nesse ambiente, mesmo com a aproximação dos processos, pode ser difícil, num primeiro momento, estabelecer o fluxo contínuo, pode ser estabelecido um controle FIFO entre cada processo com um limite baixo e controlado de peças, que pode funcionar de forma muito semelhante a uma linha em fluxo contínuo, uma vez que mantém uma sequência de trabalhos da forma em que foi liberada em todo o fluxo de valor e interrompe a linha tão logo um problema ocorra destacando as anormalidades do fluxo para que sejam rapidamente resolvidas.

O objetivo de permitir que, num primeiro momento, haja algum estoque em processo entre cada recurso é lidar com a variabilidade dos tempos de ciclo de cada recurso causada pelo grau de variedade da família de produtos sem, contudo, que cada recurso

trabalhe de forma independente do *status* da linha. A quantidade de trabalhos permitida em cada FIFO vai depender do nível de repetição de cada *Process Lane* e das características de seus processos. Linhas mais repetitivas podem manter um menor volume de trabalho no FIFO, uma peça, por exemplo, já linhas menos repetitivas devem permitir um volume um pouco maior de trabalho em cada FIFO. Esse limite deve ser rigidamente controlado e estar bem evidenciado entre cada processo desse fluxo, de forma que, quando estiver cheio, não haja espaço para o recurso fornecedor alocar mais nenhum produto, fazendo dessa forma com que esse recurso pare.

Nas próximas etapas, o estoque em processo representado pelo número de cartões e pelo FIFO deverá ser reduzido.

3. **Determinar o pulmão de capacidade:** o estoque em processo (pulmão de inventário) será drasticamente reduzido pela implementação do fluxo contínuo, do controle FIFO e de um sistema híbrido de coordenação de ordens. Porém, ao reduzir e controlar o pulmão de inventário deve-se manter o pulmão de capacidade para lidar com a variabilidade existente no processo e garantir o atendimento das datas de entrega.

A manutenção de um pulmão de capacidade, na forma de capacidade protetora nos recursos não-restritivos, também é uma exigência da TOC para manter o CCR trabalhando apesar das variabilidades existentes no sistema.

Pelas características desse ambiente, isso pode ser feito de mais de uma forma:

- a) Mantendo uma ou duas horas por turno sem programação para que sejam realizadas manutenções preventivas. Problemas ocorridos durante o turno podem ser resolvidos nesse intervalo, em horas extras, sem que sejam passados para o turno seguinte.
- b) Devido aos longos tempos de ciclo de cada processo nesse ambiente, isto pode ser feito também, mantendo um dia da semana sem programação e utilizá-lo como pulmão de capacidade. Problemas ocorridos durante a semana podem ser resolvidos nesse intervalo, em horas extras, sem que sejam passados para a semana seguinte.
- c) Pode-se manter uma pequena quantidade de trabalhadores multifuncionais sem programação, com intuito de treinar os demais trabalhadores para se tornarem

multifuncionais. Como esse processo é intensivo de mão de obra, e o acréscimo de força de trabalho pode reduzir o tempo de ciclo de produção, em caso de problemas, esses trabalhadores podem ser utilizados durante o mesmo turno de trabalho, para que tais problemas não sejam passados para o turno seguinte.

4. **Determinar um pulmão de tempo para lidar com a flutuação da demanda:** Como vimos, nesse ambiente, um supermercado de produtos acabados para lidar com a variabilidade da demanda não é realista, porém, um pulmão de tempo entre as datas de entrega pode fornecer estabilidade necessária para nivelar as entregas das unidades de montagem.
5. **Reduzir a variabilidade gradativamente:** Aplicar as práticas e ferramentas da produção enxuta para atacar os desperdícios que forem expostos pela redução dos estoques. O objetivo desta dissertação não é detalhar cada uma delas, porém é importante ressaltar que a necessidade de aplicação de cada uma dessas práticas e ferramentas deve ser identificada nas etapas de mapeamento do fluxo de valor. Alguns exemplos de técnicas e ferramentas que devem ser utilizadas são:
 - a) **TPM (*Total Productive Maintenance*):** Com intuito de reduzir a variabilidade decorrente da baixa confiabilidade de máquinas;
 - b) **SMED (*Single Minute Exchange of Dies and Tools*):** Em processos mecanizados onde o tempo de *setup* interno varia demasiadamente entre os produtos de uma mesma Família de Produtos;
 - c) **Trabalho Padronizado:** Principalmente em *Process Lanes* mais repetitivas, para reduzir a variabilidade do tempo de ciclo.
6. **Reduzir o pulmão de inventário:** Por meio da redução do número de cartões CONWIP e da redução ou eliminação do FIFO permitido entre cada processo à medida que o fluxo contínuo é atingido e estabilizado. Ao se reduzir o pulmão de inventário pode ser necessário reavaliar e aumentar o pulmão de capacidade.
7. **Reavaliar o pulmão de tempo (Gerenciamento do Pulmão):** Para as linhas em que o DBR estiver sendo utilizado, o método do GP apresentado na seção 4.5.3 deve ser utilizado para avaliar os furos do pulmão por meio do fator de interrupção, bem como controlar o tamanho do pulmão.

O pulmão de tempo da expedição, para garantir as datas de entrega, deve ser mantido, porém uma maior estabilidade da linha permite a redução gradativa dos tempo entre as datas programadas de conclusão das unidades de montagem e sua expedição.

8. **Reduzir o Pulmão de Capacidade:** À medida que as variabilidades aparecem e são reduzidas, e o processo torna-se mais robusto, pode-se reduzir gradativamente a capacidade protetora dos recursos não-restritivos.
9. **Reiniciar o processo:** À medida que ocorram as melhorias no processo, com a redução dos estoques (pulmão de inventário), que evidenciam as variabilidades e desperdícios do processo produtivo, que podem ser atacadas com as práticas da produção enxuta e da teoria das restrições, o que possibilitam reduzir os pulmões de tempo e capacidade, podem ocorrer mudanças nas características das linhas, como por exemplo a mudança do CCR de local ou a possibilidade de aumentar o fluxo contínuo. Nesse momento, é necessário reiniciar o processo.

6 PESQUISA-AÇÃO - APLICAÇÃO DO MÉTODO

6.1 Introdução e Apresentação da Empresa

O método proposto no capítulo anterior foi, aplicado e estudado ao longo de 6 anos em uma empresa de bens de capital do setor metal-mecânico, multinacional alemã, fabricante de máquinas e equipamentos para o segmento de papel e celulose, instalada no Brasil há mais de 40 anos. A empresa possui plantas produtivas na Europa, Ásia, America do Norte e America da Sul (figura 6.1) e é líder global no fornecimento de máquinas de papel embalagem, gráfico e *tissue*. A empresa pertence a um grupo de mais de 40.000 funcionários ao redor do mundo. Na divisão global de máquinas e equipamentos de papel e celulose são 9.350 funcionários e entrada de pedidos de aproximadamente €1,723 bilhões ao ano (ano fiscal 2008-2009).

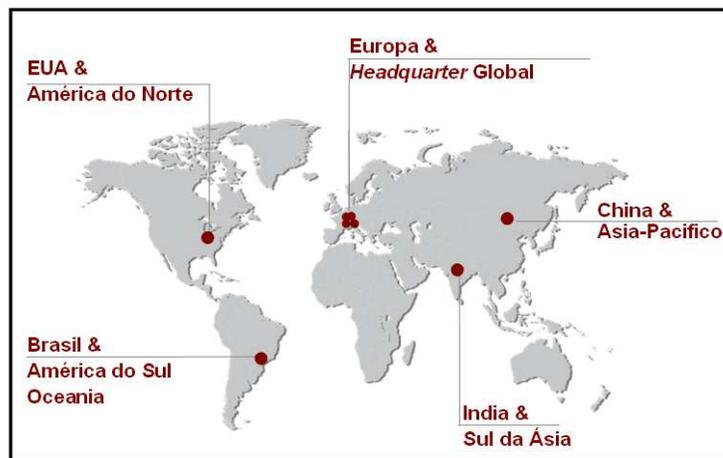


Figura 6.1 - Unidades Produtivas da Empresa

A planta estudada está instalada na cidade de São Paulo e é, atualmente, o segundo maior parque industrial da companhia e o maior fora da Alemanha. A figura 6.2 apresenta uma foto aérea do parque industrial da empresa localizado no bairro do Jaraguá, em São Paulo, em um terreno de 300.000 m² com mais de 145.000 m² de área construída e um total de 4.000 colaboradores nas 4 divisões do grupo, sendo 1.000 deles da divisão de máquinas e equipamentos de papel e celulose, a qual responde por vendas anuais em torno de R\$ 500 milhões.

Nessa planta, fundada em 1964, estão alocadas não apenas a divisão de máquinas e equipamentos de papel e celulose, mas também as divisões de fornecimento de equipamentos

para hidrogenação de energia, de equipamentos de transmissão mecânica de potência para os mercados automotivo, industrial, ferroviário e marítima e a divisão de serviços do grupo.



Figura 6.2 - Foto Aérea da Empresa

No mercado nacional de papel e celulose, a empresa é líder no fornecimento de máquinas e equipamentos e cerca de 85% dos papéis para imprimir e escrever e 80% da celulose nacionais são produzidos por máquinas da empresa.

6.1.1 Processos de Negócio da Empresa - ETO

A empresa vende máquinas e equipamentos sob encomenda para o mercado de papel e celulose e, portanto, trabalha com a estratégia de atendimento à demanda *Engineering to Order* (ETO) em que o projeto do produto é realizado apenas após a venda.

Vale ressaltar que o projeto de produto realizado após a venda não é um trabalho de pesquisa e desenvolvimento (P&D), em que novos produtos são desenvolvidos. Os processos de desenvolvimento de produtos da empresa são realizados de forma independente das vendas, ao longo de muitos anos, por meio de pesquisa, implementação e testes em máquinas pilotos, e são concentrados, de acordo com o tipo de papel (de papel gráfico, papel embalagem, papéis

especiais, papel *tissue* e celulose) nos centros de competência do grupo. A etapa final desse processo é o lançamento de um novo padrão de produto que serve de referência e pode ser customizado, configurado, de diversas formas para atender as necessidades de diferentes mercados e clientes.

Em uma primeira fase do processo de negócio da empresa, quando uma oportunidade é reconhecida pelo departamento de vendas, a engenharia de aplicação é acionada para realizar um pré-projeto e a configuração do produto que será ofertado ao cliente. Mais especificamente, a engenharia de aplicação é responsável por traduzir as necessidades de um cliente específico em especificações que servirão de base para a configuração dos produtos que serão ofertados.

Essas configurações são passadas para um processo de orçamentação, baseado em modelos de custo previamente definidos para cada produto individual de cada seção da máquina existente no portfólio da empresa. Esses modelos de custos são desenvolvidos com base em referencial histórico e atualizados periodicamente e variam de acordo com diversos fatores como o tipo de papel, velocidade e largura da máquina, número e diâmetro de rolos e cilindros secadores, entre outros.

Essas configurações juntamente com um projeto preliminar, chamado de *layout* de máquina, desenvolvido pela engenharia de aplicação, são também enviadas a um departamento de planejamento, que a partir de tais informações, faz a avaliação da capacidade e utilização (*workload* atual) de engenharia, manufatura e montagem, bem como do caminho crítico de componentes comprados, para definir uma data de entrega a ser incluída na oferta.

Essa oferta é então encaminhada pelo departamento de vendas ao cliente para a futura negociação. Esse processo de negociação pode ter um *lead time* longo, de vários meses, com mudanças constantes de escopo que podem causar revisões de orçamento e prazo do projeto.

Esse processo descrito até aqui é chamando na empresa de *Opportunity to Order*, OTO (da oportunidade à venda), e sua última fase é a venda do projeto ao cliente e a passagem desse para a fase de execução, chamada de *Order to Cash*, OTC (da venda ao faturamento).

Essa fase OTC tem início com um trabalho de confirmação da configuração do produto vendido e um detalhamento do pré-projeto de vendas, que muitas vezes necessitam de levantamentos de campo e definições prévias de alguns fornecedores de grandes equipamentos auxiliares. Apenas depois dessa fase é que tem início a engenharia de produto.

O trabalho de engenharia de produto, chamado internamente de engenharia de construção, realizado após a venda é, portanto, o de customizar o produto referencial, já desenvolvido em P&D, definido pela engenharia de aplicação durante a oferta e validado pela engenharia de *layout* após a venda, segundo as necessidades do cliente específico, e detalhar cada parte desse produto até o ponto que pode ser liberado para fabricação e compras. O *lead time* desse processo de engenharia de produto pode variar, de acordo com o produto vendido, de poucas semanas, no caso de produtos individuais mais padronizados, até 12 meses nos casos de máquinas de papel novas ou grandes reformas.

Em paralelo ao processo de engenharia de construção, ocorre um processo de engenharia básica e de processos. Essa engenharia é responsável por, a partir das definições da máquina de papel, definir o projeto básico da obra civil, o prédio que será construído em torno da máquina de papel, que será posteriormente detalhado pela engenharia civil e realizado por uma construtora contratada pelo cliente ou pela empresa. Além disso, essa engenharia é responsável pelas definições básicas de todos os equipamentos auxiliares, tubulação, bombas, tanques, etc, que fazem interface da máquina de papel com os processos auxiliares como alimentação da fibra de celulose, fornecimento de ar e água, vapor e condensado, efluentes, etc.

Nos casos em que a venda é em regime EPC (*Engineering, Procurement and Construction*) ou PLP (*Process Line Package*) a empresa pode ficar responsável pelo escopo de fornecimento parcial (PLP) ou total destes equipamentos auxiliares e até mesmo da obra civil (EPC). Como tais equipamentos são basicamente comprados, fornecidos e instalados diretamente na planta do cliente, sem uma fase de fabricação interna, esse processo não será detalhado nesta dissertação.

Todo o trabalho de engenharia é planejado e controlado com base em um cronograma geral do projeto, que tem como ponto de partida a montagem de campo e o início de operação da máquina. O trabalho da engenharia de construção é mais detalhado e controlado com base nesse cronograma que, como veremos nas próximas seções, leva em consideração uma WBS orientada a produto, dividida em unidades de montagem.

Portanto, essa fase de planejamento é realizada para cada unidade de montagem que é expedida para a montagem de campo, e esse cronograma leva em consideração as datas de expedição, pré-montagem, fabricação e compras de tais unidades de montagem para definir as datas de liberação das listas de materiais pela engenharia de construção. Desta forma, temos que

o produto final expedido, o item e demanda independente do MPS, está diretamente ligado à WBS do projeto.

Após a liberação das listas de materiais pela engenharia de construção e a transferência dessas listas para o diagrama de rede (cronograma) de cada unidade de montagem, o MRP, suportado por esse diagrama de rede (que funciona como o módulo de planejamento das necessidades do projeto descrito na seção 2.6.4 e 2.7) gera as necessidades e ordens de compra de itens que serão pré-montados. Os itens fabricados internamente são planejados por sistemas de coordenação de ordens (SCOs) diferentes dependendo da família de produtos a que pertencem. Os processos de planejamento das necessidades de projeto, com base nos *pipelines* de cada família de produtos, e os SCOs que controlam a fabricação serão melhor descritos ao longo das próximas seções deste capítulo.

A expedição de cada unidade de montagem é realizada em fluxo com a montagem de campo. Essa montagem de campo é, portanto, realizada em simultaneidade com os processos de fabricação e pré-montagem. Enquanto algumas unidades de montagem já estão sendo montadas no *site* do cliente, outras podem ainda estar sendo fabricadas ou pré-montadas e devem ser entregues apenas no momento necessário na obra. Como veremos mais a frente também, um pulmão entre a data de conclusão da pré-montagem e a data de expedição deve ser planejado.

Ao término da montagem de campo ocorre um processo de comissionamento, que tem por finalidade a interligação final e testes dos equipamentos, o início dos processo de alimentação de energia, água, óleo, ar, vapor, etc e, por fim, o início de operação da máquina.

Após a inicialização da máquina, *start-up*, embora esta já passe para o controle do cliente, é realizado, ao longo dos primeiros meses de funcionamento, um processo de acompanhamento e otimização dos equipamentos até a máquina ser definitivamente entregue ao cliente.

A figura 6.3 ilustra os processo de negócio da empresa descrito acima, baseado no processo de negócio de bens de capital sob encomenda apresentado na seção 2.7, com a inclusão das fases de engenharia de *layout*, engenharia básica e processos e construção civil, que não foram contemplados naquele modelo genérico.

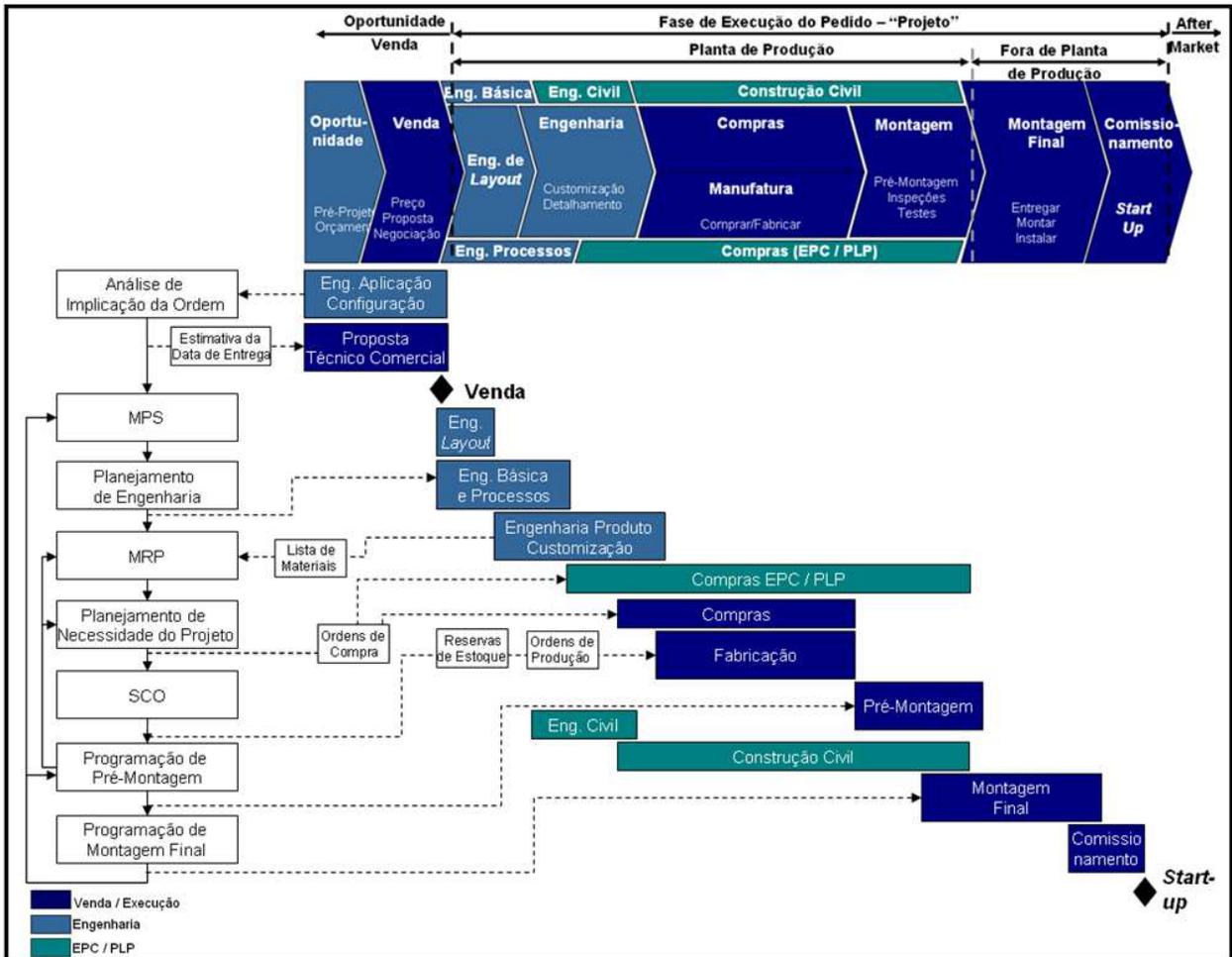


Figura 6.3 - Processos de Negócio da Empresa

6.2 A Máquina de Papel

A máquina para fabricação de papel tem a função básica de remover a água contida na polpa de celulose (suspensão de fibras de madeira em água), desde um teor seco de 0,5 % até a consistência final em torno de 90% de teor seco.

Para cumprir essa função e garantir os parâmetros de qualidade requeridos para o produto final, a máquina para fabricação de papel é composta de diferentes “seções”, as quais possuem características distintas empregadas na remoção da água da polpa de celulose, sendo assim responsáveis por diferentes funções na produção e na garantia da qualidade do papel.



Figura 6.4 - Foto de uma Máquina de Papel

A figura 6.4 apresenta uma foto de uma máquina de papel embalagem e a figura 6.5 apresenta uma ilustração de uma máquina com suas diferentes seções.



Figura 6.5 - Máquina de Papel e suas Seções

A seguir serão apresentadas de forma sucinta, cada uma dessas seções da máquina de papel e sua função na formação e secagem da folha de papel de acordo com Pepe (2000) e Holik (2010).

6.2.1 Formação

A primeira seção da máquina é chamada de seção da tela ou de formação, pois é responsável pela formação da folha de papel. A formação da folha consiste, essencialmente, na deposição das fibras da suspensão fibrosa fornecida pela caixa de entrada sobre uma tela fina, onde ocorre o seu desaguamento.

A função da caixa de entrada é transformar a suspensão fibrosa em um fluxo uniforme e de velocidade constante sobre a tela formadora. Considerando que a formação e uniformidade do

papel dependem grandemente da perfeita dispersão de fibras e cargas, o desenho e operação do sistema da caixa de entrada são fatores altamente críticos para o sucesso de toda a operação da máquina de papel. A figura 6.6 apresenta uma foto e o esquema de uma caixa de entrada produzida pela empresa.

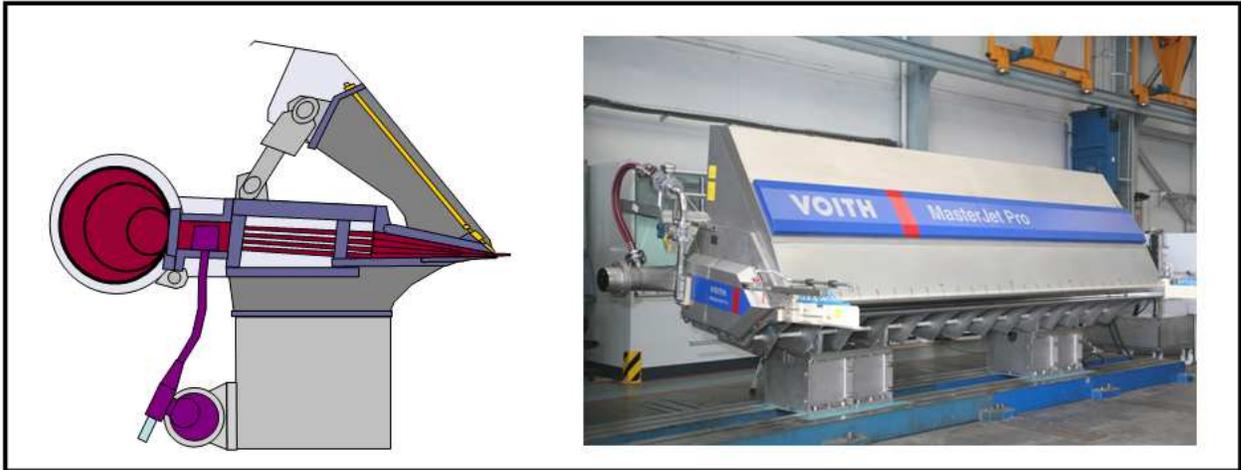


Figura 6.6 - Foto e Esquema da Caixas de Entrada

Os principais objetivos da caixa de entrada podem ser descritos como:

- Distribuir a massa uniformemente em toda a largura da máquina;
- Eliminar correntes cruzadas e variações da consistência.
- Nivelar variações setoriais de velocidade na direção da máquina
- Aplicar um fluxo uniforme de massa sobre a tela, no ponto apropriado e com ângulo desejado mediante o ajuste da posição dos lábios.

Portanto, cabe à caixa de entrada distribuir o fluxo da suspensão fibrosa em toda a largura da máquina de papel e produzir jato da suspensão com alta uniformidade na seção da tela à velocidade aproximadamente igual à da máquina. Com isso, a seção transversal do fluxo da suspensão tem de ser mudada de circular, vinda dos tanques e tubulação de *approach* (tubulação que traz a suspensão fibrosa da área de preparação de massa até a máquina de papel) para uma lâmina de, por exemplo, 10 m de largura e uma abertura de menos de 10 mm na saída do lábio, com desvios aceitáveis na distribuição da massa no sentido transversal da máquina da ordem de 1%.

Essa transformação do fluxo ocorre quando a suspensão fibrosa passar por um distribuidor tubular, ou turbilhão, que obedece às mais importantes regras da dinâmica de fluidos. A

suspensão é passada através de um tubo distribuidor “cônico” situado na parte traseira da caixa de entrada que mantém velocidade aproximadamente constante, e aproxima-se do banco de tubos com ângulo também (aproximadamente) constante. O turbilhão é dotado de grande número de pequenos tubos. Assim é produzido grande número de fluxos idênticos, que são reunificados após o turbilhão para formar uma corrente única e uniforme no tubo e em sua saída.

A suspensão sobre a tela é drenada, inicialmente, pela gravidade. Com o progredir da drenagem da água da massa, as fibras se entrelaçam e se sobrepõem, formando uma fina camada que vai aumentando na sua espessura. Com isso a drenagem natural da água se faz cada vez mais lenta tornando necessário efeito de aspiração, sucção, cada vez mais intensos. Portanto, em uma seção de tela clássica a folha é formada, a partir da suspensão suprida pela caixa de entrada, por drenagem, ao mesmo tempo que são induzidas forças de cisalhamento e turbulência. A drenagem é realizada por ação da gravidade e de vácuo, por uma série de elementos desaguadores como caixas *foils*, caixas de sucção planas e úmidas, entre outras, e a ação dos rolos de sucção.

A tela circula em circuito fechado por toda a seção de formação, passa pelos diferentes elementos desaguadores e, após a transferência da folha de papel já formada para a seção das prensas, retorna ao início do processo pela ação de diversos rolos guia e sistema de limpeza por meio de chuveiros de alta e baixa pressão.

Muitas das características importantes do papel como a distribuição das fibras, isotropia de resistência mecânica, distribuição de finos e de cargas minerais na seção da folha entre outras são determinadas nessa fase inicial do processo. Ao término da seção de formação a folha deverá estar em torno dos 20% de teor seco (cada 1% representa 1 kg de água/kg de fibras).

A figura 6.7 apresenta a seção de formação de uma máquina de papel embalagem com três caixas de entrada, 4 telas, rolo de sucção, os rolos guias, além de toda parte mecânica composta das caixas de sucção, das calhas para retirada de água e raspadores dos rolos guia e das estruturas de sustentação e elevação das mesas planas. Essas estruturas, como o ambiente da seção de formação é muito agressivo pela quantidade de água presente no papel, são produzidas em aço carbono revestidos de aço inox.

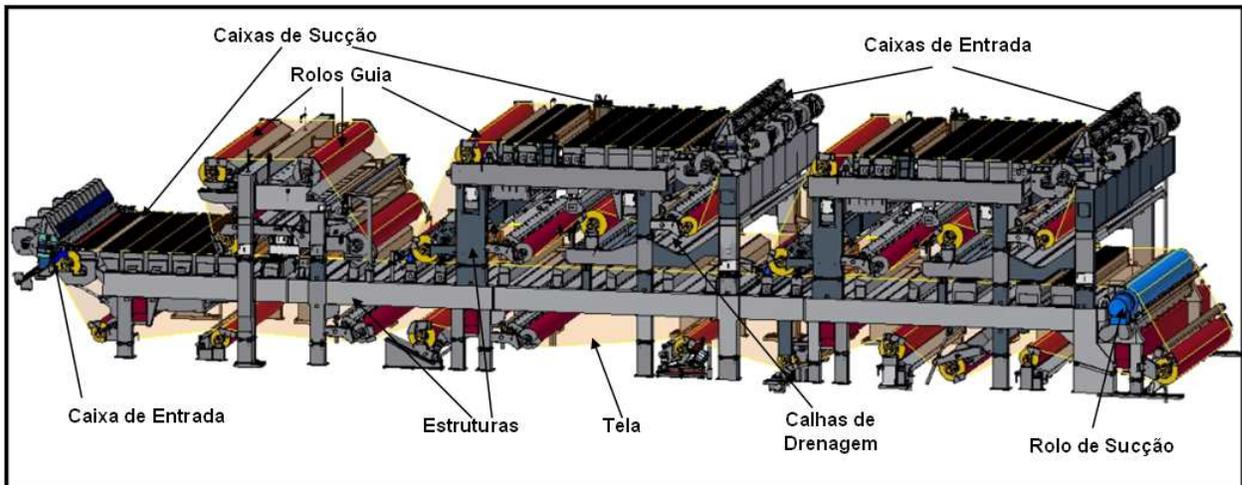


Figura 6.7 - Seção de Formação

6.2.2 Prensas

A finalidade da seção das prensas é remover água e consolidar a folha de papel mediante compressão mecânica. A consolidação é uma fase crítica no processo de fabricação visto que promove contato íntimo entre as fibras, ampliando assim as ligações de hidrogênio que caracterizam a resistência do papel. A etapa de prensagem influi significativamente nos custos do processo pois define o teor seco na entrada dos cilindros secadores, onde a secagem é feita por evaporação. Portanto, quanto maior o teor seco na saída das prensas, menor o custo de secagem por evaporação que é a fase mais cara do processo de fabricação do papel.

A prensagem é realizada quando o papel, empacotado por dois feltros, é comprimido entre dois rolos. Nessa compressão, a água saturada da folha é transferida para os feltros, insaturados e depois, dos feltros para fora deles. Essa linha ou faixa de contato entre os dois rolos é definida como “nip”.

O aumento das velocidades de operação das máquinas implicou em volumes crescentes de água a serem removidos, motivo pelo qual se fizeram necessárias pressões mecânicas sempre maiores e, finalmente, faixas de nip mais largas para que, com mais tempo de permanência da folha sob compressão, fosse possível mais desaguamento. A forma de alargamento do nip passou pelo o aumento do diâmetro dos rolos até o desenvolvimento do conceito atual de prensas de sapata. A evolução na configuração das prensas permitiu um aumento do teor seco no final dessa

seção de 33% para aproximadamente 50%, o que reduz significativamente os custos e consumo de vapor e energia na seção de secagem.

Assim como a tela da seção de formação, os feltros das prensas circulam em circuito fechado, sendo sempre conduzidos por uma série de rolos guia e passando por um forte sistema de limpeza por meio de chuveiros de alta e baixa pressão e tubos de sucção.

A figura 6.8 ilustra uma seção de prensas com as duas prensas de sapatas, rolos de sucção, os rolos guias, além de toda parte mecânica composta das estruturas de sustentação e elevação das prensas, das calhas para retirada de água e raspadores dos rolos guia.

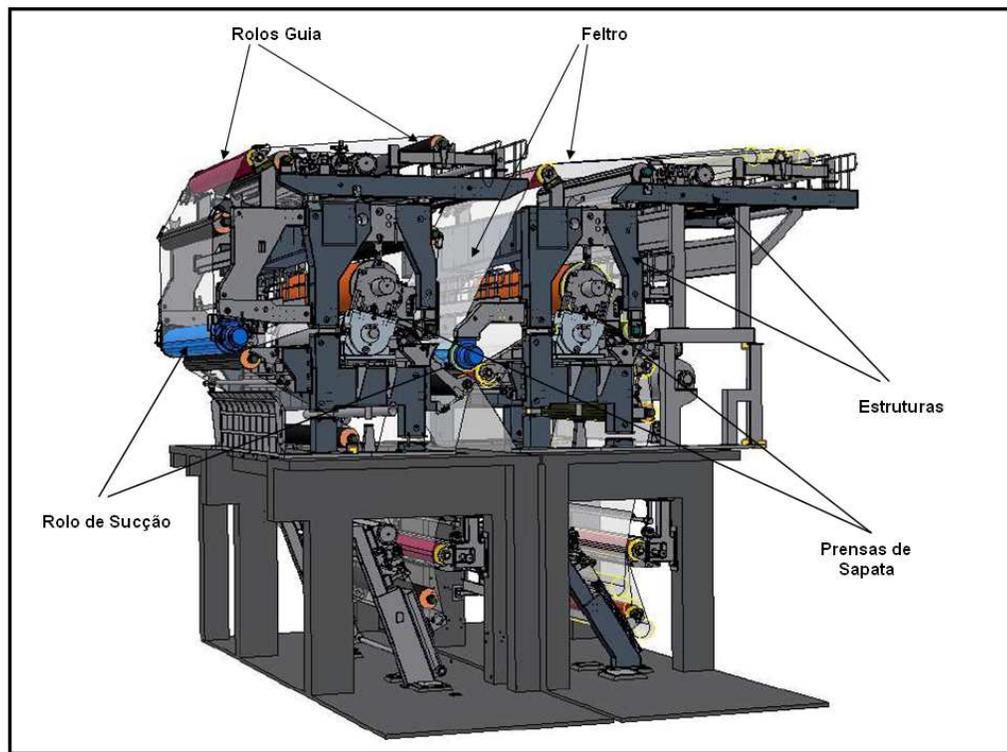


Figura 6.8 - Seção das Prensas

6.2.3 Secagem

Depois da seção das prensas, o excesso de água ainda contido na folha terá que ser removido por evaporação. Um processo que requer uma grande quantidade de energia térmica, normalmente suprida na forma de vapor, e para que haja essa transferência de energia do vapor para a folha de papel, é também necessária uma grande superfície de transferência. Essa condição

faz com que a secagem seja muitas vezes a maior seção da máquina, sendo também a maior consumidora de energia de todo o conjunto.

O método mais comum de secagem utiliza uma série de cilindros secadores, atualmente com medidas padronizadas de 1,5 a 1,8 m de diâmetro, aquecidos por vapor sobre os quais a folha úmida passa em estreito contato assegurado por uma vestimenta altamente porosa, a tela secadora, que corre sobreposta à folha de papel, pressionando-a contra os cilindros.

A transferência de calor do vapor para o papel ocorre por meio da condução ocorrida do contato do papel com o cilindro secador. Após essa transferência, ocorre a evaporação da água do papel para o ar ambiente seco ou seja, uma transferência por difusão de massa de vapor de água da folha para o ar. Um sistema de ventilação renova o ar ambiente, insuflando ar seco novo e prevenindo a saturação do sistema. A seção de secagem é coberta por uma “capota” que garante que todas essas trocas de calor e transferência de massas, além do processo de ventilação para troca de ar, ocorram em um sistema controlado, praticamente fechado, que garante economia térmica e domínio sobre volume, higroscopia e temperatura do ar insuflado e exausto.

Como a folha entra na seção de secagem a uma temperatura mais baixa do que a necessária para evaporação, a fase inicial da secagem, aquecimento, será para elevar a massa envolvida até a temperatura de evaporação. Por essa razão, os primeiros cilindros secadores trabalham a temperaturas de aproximadamente 70 a 80 °C. Tão logo a folha de papel esteja aquecida, a temperatura dos cilindros é aumentada rapidamente, podendo chegar ao redor dos 180 °C para alguns tipos de papéis. Ainda assim a folha não irá além da temperatura de evaporação, nunca se igualando à temperatura dos cilindros e essa fase é chamada de zona de evaporação constante. Na última fase, taxa de secagem decrescente, já não haverá mais água livre no papel e alguns poros já estarão vazios reduzindo a área para transferência de massa. Ao término da seção de secagem o teor seco da folha de papel é aumentado para mais de 90%.

A seção de secagem é dividida em grupos de secagem, cada um sendo envolvido por uma ou duas telas secadoras. As telas secadoras, da mesma forma que as telas da formação ou os feltros da prensa, circulam em circuito fechado e são transportadas por um sistema de rolos guias. A figura 6.9 apresenta uma seção de secagem dividida em alguns grupos de secagem com as telas secadoras, a capota, os cilindros secadores, os rolos guias além de toda parte mecânica formada pelas estruturas de sustentação da seção de secagem e a figura 6.10 apresenta um desses grupos de secagem em detalhe. As estruturas de sustentação da secagem, diferentemente das seções de

formação e das prensas são fabricadas em aço carbono pintado pois o ambiente já não é tão agressivo.

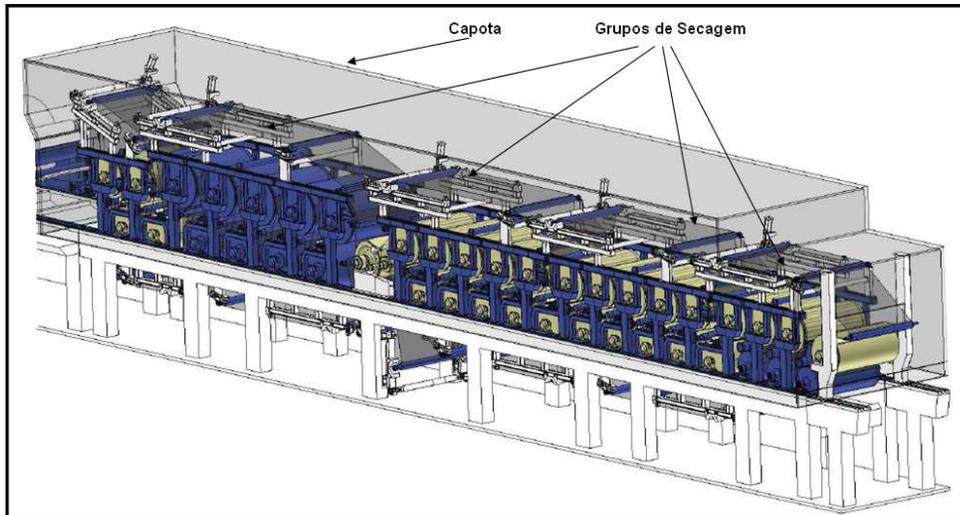


Figura 6.9- Seção de Secagem Dividida em Grupo

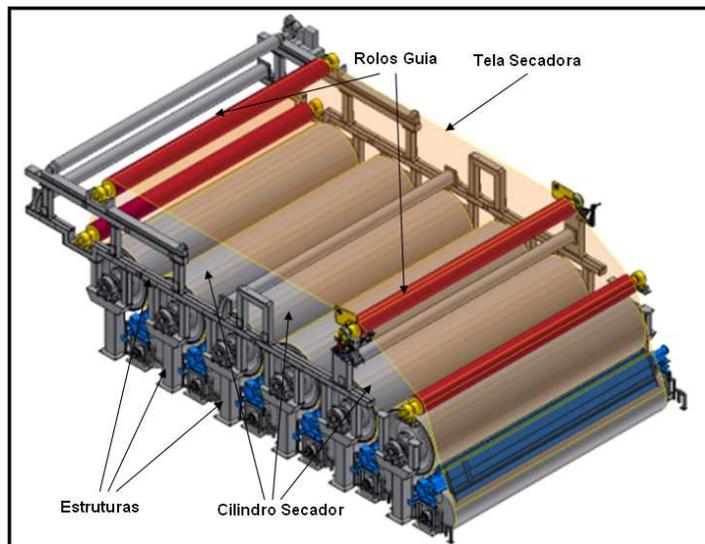


Figura 6.10- Grupo de Secagem

6.2.4 Acabamento e Parte Final

As próximas seções da máquina de papel são chamadas de acabamento e parte final, pois nela o papel recebe, quando necessário, as características finais de cor, brilho e lisura, além de serem enrolados e ficarem prontos para transporte ou conversão.

Ao deixar a secagem, a folha apresenta-se áspera e desuniforme na espessura, cabendo à calandra alisar as superfícies e uniformizar a espessura, dando-lhe condições para o bobinamento e mesmo viabilizar a própria aplicação final. Portanto, os objetivos básicos da calandragem são de modificar a estrutura do papel, reduzindo a espessura da folha para o desejado, eliminando as variações de espessura de modo a permitir bobinas uniformes e dar boas condições superficiais de lisura, densidade e brilho. Embora haja variados tipos de calandras o mais comum consiste em rolos sobrepostos, cuja configuração alterna de dois a dez rolos duros e revestidos, aquecidos ou não, operando com pressão controlada entre si e portanto sobre o papel.

Os próximos processos são o enrolamento dos jumbos de papel e o rebobinamento, que consiste em converter o rolo jumbo em bobinas com qualidade apropriada, para as conversões subsequentes. Esses processos são realizados respectivamente na enroladeira e rebobinadeira.

A figura 6.11 apresenta uma seção de acabamento e parte final de uma máquina de papel.



Figura 6.11 - Seção de Acabamento e Final

As próximas seções deste capítulo apresentam a aplicação do método proposto no capítulo anterior na empresa estudada.

6.3 Condições de Mercado e Fatores Competitivos: Valor

O objeto desta pesquisa-ação é uma empresa de bens de capital e, como tal, está sujeita as condições de mercado apresentadas no capítulo dois. No entanto, trata-se de uma empresa multinacional e, portanto, é necessário conhecer os padrões de mercado global em que está inserida, bem como as condições do mercado brasileiro por seus produtos.

O mercado global de máquinas de papel e celulose é segmentado em poucas grandes empresas multinacionais, geralmente européias, que concorrem entre si quando trata-se de máquinas de grande porte, alta velocidade e alta tecnologia. A demanda por esse tipo de equipamento está hoje concentrada na Ásia, com atenção especial à China, onde é esperada o aumento expressivo de demanda por todos os tipos de papel, em especial, o papel embalagem.

Os atuais produtores desses equipamentos instalados no Brasil são controlados por tais empresas multinacionais, e são delas dependentes em relação à tecnologia (BNDES, 2001). Entretanto, existe um maior número de grandes e médias empresas nacionais, que concorrem por venda de máquinas de papel *tissue*, de componentes individuais, reforma e modernização de máquinas existentes e mesmo máquinas de papel de menor porte e mais baixa tecnologia. A demanda por esse tipo de equipamento ocorre de forma mais uniforme ao redor do mundo e principalmente no Brasil onde, segundo BNDES (1999), a indústria de papel, com algumas exceções, apresenta plantas de pequena escala produtiva e tecnologicamente defasadas.

No segmento de celulose a situação é diferente, devido à liderança do Brasil como 4º maior produtor mundial e maior produtor e exportador de celulose de eucalipto (BRACELPA, 2011 e BNDES, 1999). O país apresenta uma grande expectativa de crescimento nesse segmento ao longo dos próximos 20 anos o que trará também uma maior demanda por máquinas de desaguamento (ou secagem) de celulose, que transformam a celulose líquida em placas e fardos permitindo o transporte e exportação desse produto.

Para lidar com a diversidade de demanda ao redor do mundo a empresa adotou uma série de políticas ao longo dos últimos anos para se posicionar frente a seus principais competidores, tais como:

- Centros de Pesquisa e Desenvolvimento - Centros de Competência: cada unidade da empresa é responsável pela pesquisa e desenvolvimento de determinados produtos finais da empresa (máquinas de papel gráfico, embalagem, *tissue*, celulose, etc);
- Mercado Regional de Vendas: Cada unidade é responsável pelas vendas de todos os equipamentos em sua região de atuação, sendo elas: América do Norte, América do Sul, Oceania, Europa Ocidental, Europa Oriental, Ásia e China (que, pelo seu porte, é considerado um mercado independente do asiático);
- Centros de Produção Globais: Para determinados equipamentos, o fornecimento, engenharia, fabricação e pré-montagem, é feito de forma centralizada, isto é, uma

determinada unidade do grupo fornece esses equipamentos independente de qual unidade realizou a venda. Essa política, traz uma maior estabilidade de demanda para cada centro de produção e aumento do nível de repetição das plantas de produção.

- **Padronização dos Produtos:** A empresa caminha cada vez mais na modularização de seus equipamentos e, recentemente, realizou a padronização na estrutura de todos os seus produtos de forma que todas as unidades do grupo utilizam atualmente a mesma estrutura de produto.

Dentro desse contexto a unidade de São Paulo é responsável por vendas para todo o mercado da América Latina e Oceania além de ser Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de papéis *tissue* e máquinas de desaguamento de celulose, dado o potencial brasileiro e regional de demanda por tais equipamentos.

Na área de operações, a unidade continua a ser responsável pela produção dos principais equipamentos (Seção das Prensas, Tela, Secagem, Enroladeiras, Máquinas *Tissue*, etc) vendidos no mercado local, atendendo sua própria demanda por tais equipamentos.

Além disso, nos últimos anos, a empresa passou a buscar a condição de Centro de Produção Global de alguns componentes e equipamentos, passando a atender a demanda de todas as unidades do grupo por esses produtos.

Para tanto, a unidade sofreu uma grande pressão por redução dos *lead times* e melhoria na pontualidade de entrega, uma vez que apenas o tempo de transporte marítimo desses equipamentos para as demais unidades ou clientes na Ásia, Europa, América do Norte e Oceania, já acrescenta um fator crítico no prazo de entrega.

Portanto, tanto no fornecimento de máquinas completas quanto no fornecimento de componentes e equipamentos individuais para as demais unidades, a empresa percebe a redução do *lead time* e a pontualidade de entrega como fatores críticos de sucesso para a área de operações e uma forma de aumentar o valor para seus clientes.

6.4 A PWBS: Estrutura de Projeto Orientada a Produto

Conforme apresentado na seção 5.3, dependendo do porte e da complexidade do Equipamento, esse deverá ser dividido em três ou mais níveis de produção sendo o primeiro nível, o Equipamento completo, o segundo, a unidade de montagem, que é o módulo do equipamento que pode ser entregue (ou mesmo vendido) separadamente e o terceiro nível, serão os produtos intermediários que podem ser subdivididos em mais níveis.

Para que o método apresentado seja aplicado, é pré-requisito que a estrutura de projeto (WBS) seja dividida de forma orientada ao produto, ou seja, a estrutura de projeto deve ser dividida de forma que cada uma das unidades de montagem contenham todos os subsistemas do projeto (mecânica, elétrica, automação, hidráulica, etc). Dessa forma temos que a unidade de montagem, o item de demanda independente do Plano Mestre de Produção, esteja nos primeiros níveis da WBS.

A máquina de papel, como um todo, será completamente montada apenas na planta em que irá operar, ou seja, no *site* do cliente. Essa montagem ocorre em conjunto com um fase de construção civil pois, após a pré construção do prédio, a máquina é instalada, seção por seção, para só então o prédio ser totalmente concluído.

Cada uma das seções de máquina apresentadas também será completamente montada apenas na fase de montagem de campo. Na planta de produção ocorrem as pré-montagens e testes das diversas unidades de montagem que compõem cada seção. Cada unidade de montagem é composta dos produtos intermediários que são fabricados pela empresa e diversos subsistemas (hidráulico, pneumático, automação, instrumentação, tubulação, etc) e componentes que são comprados e montados durante a pré-montagem dessas unidades. Algumas dessas unidades de montagem, de acordo com seu porte, são parcialmente desmontadas para transporte após os testes. Em uma WBS orientada a sistemas apenas na montagem de campo cada um desses subsistemas seriam montados em conjunto, já em uma PWBS, cada unidade de montagem constitui um módulo completo, pronto para a montagem de campo. Dessa forma, a montagem de campo, onde os recursos são escassos e caros, tem seu *lead time* reduzido.

Essas unidades de montagem apresentam dois tipos de demanda. Uma demanda dependente, da montagem final de cada seção da máquina na obra, e uma demanda independente, quando são vendidas separadamente, para atender a demanda de outra unidade do grupo ou

quando é vendida como peça de reposição. Entretanto, como explicado anteriormente, como esse é o produto final para a planta de produção, um módulo que é entregue montado e testado, deverá ser sempre o item de demanda independente que estará ligado ao plano mestre de produção.

Os produtos intermediários que compõem essas unidades de montagem são, fundamentalmente, itens de demanda dependente e precisam ser programados para atender a montagem de cada unidade. Algumas exceções são peças de desgaste, que são produtos intermediários que podem ser vendidos separadamente como peças de reposição.

A figura 6.12 ilustra a PWBS de uma máquina de papel. A máquina de papel e cada uma das seções estão no nível “equipamento”, uma vez que cada seção só é completamente montada na obra e, em muitas modernizações de máquinas, o produto final é a instalação de uma única seção.

Cada seção é, então, dividida em unidades de montagem, sendo as principais a caixa de entrada, *speed sizer*, rebobinadeira, enroladeira, prensa de sapata, os rolos guia, rolos de sucção, cilindros secadores e os módulos principais de cada seção. Algumas dessas unidades de montagem são comuns a diferentes seções como os rolos guias.

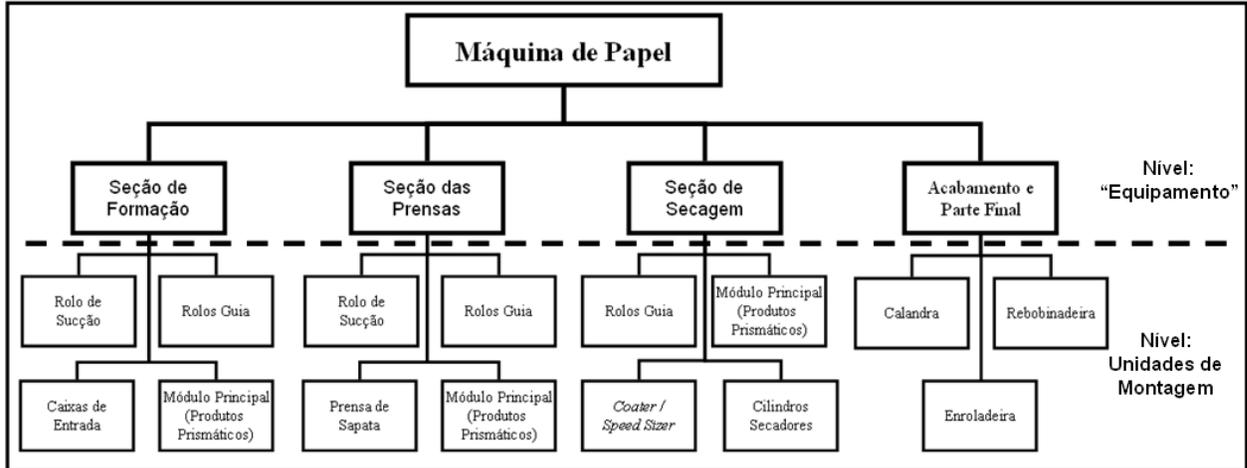


Figura 6.12 - PWBS de uma Máquina de Papel - Unidades de Montagem

Cada uma dessas unidades de montagem são módulos completos compostos de produtos intermediários fabricados internamente, além de todos os subsistemas hidráulicos, elétricos, de automação que são pré-montados e testados na planta de produção e entregues individualmente para serem rapidamente instalados na fase de montagem de campo.

Para ilustrar essa separação, na figura 6.13 a seção de formação apresentada anteriormente é dividida em suas unidades de montagem. Pode-se perceber que cada uma das caixas de entrada,

os rolos guias e o rolo de sucção são itens que são entregues separadamente ao chamado “módulo principal”, constituindo unidades de montagem independentes.

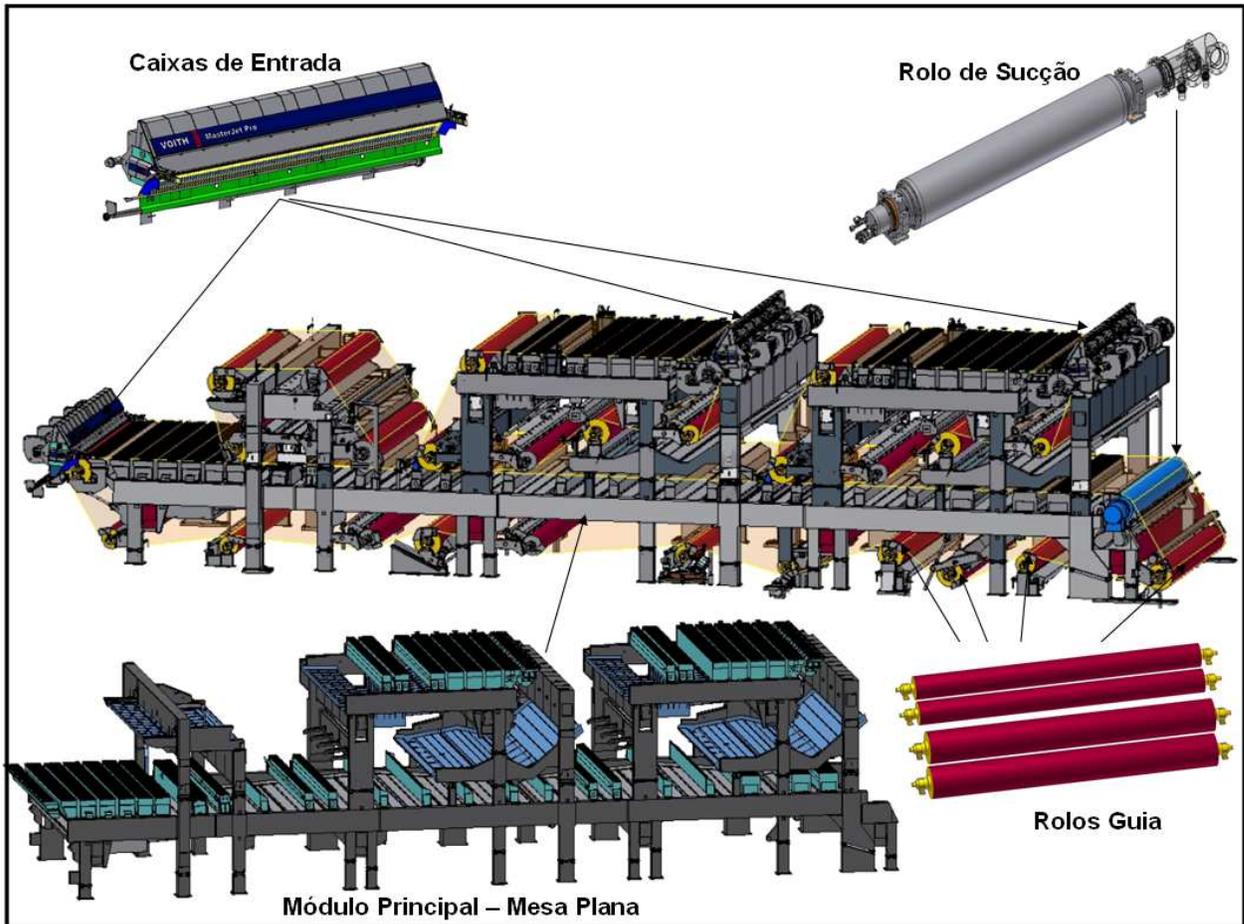


Figura 6.13 - Seção de Formação e suas Unidades de Montagem

Como veremos, algumas dessas unidades de montagem (como os rolos e cilindros secadores da secagem) são produtos individuais que após a montagem dos seus componentes ainda passam por processos de fabricação como usinagem e balanceamento, mas não passam por nenhuma pré-montagem em uma unidade de montagem maior na planta de produção. Portanto, apesar de poder ser um produto intermediário, será considerado uma unidade montagem, uma vez que é o produto final da planta de produção que é expedido para a montagem de campo e apresentar, assim como as demais unidades de montagem, demanda dependente da venda de uma máquina, e ainda uma demanda independente, oriunda das vendas das demais unidades do grupo ou como peça de reposição.

Como será apresentado nas próximas seções, cada uma dessas unidades de montagem é então dividida em seus produtos intermediários que são fabricados internamente. A figura 6.14 traz a PWBS com o detalhamento do nível de produtos intermediários para três tipos de unidade de montagem que serão tratadas nas próximas seções: a caixa de entrada, os cilindros secadores e os módulos principais da parte úmida (formação e prensa).

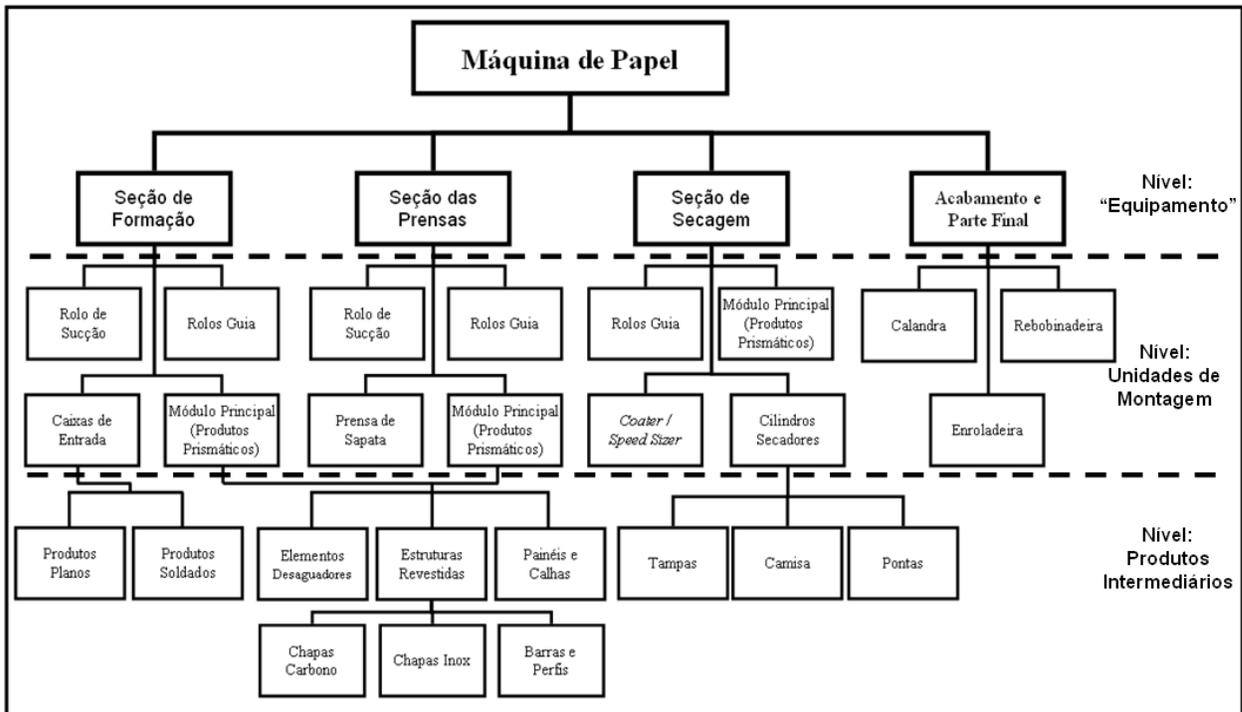


Figura 6.14 - PWBS de uma Máquina de Papel - Produtos Intermediários

6.5 Famílias de Produtos

De acordo com a PWBS apresentada acima e com os critérios apresentados na seção 5.4, a formação das famílias de produtos se deu pela divisão dos produtos da empresa em macro-famílias de produtos que constituem cada unidade de montagem e sua subdivisão de acordo com a similaridade de processos de fabricação e matérias primas dos produtos intermediários de cada unidade de montagem. A tabela apresenta a matriz de produtos da empresa e a separação das famílias de produtos de acordo com a similaridade de processos de fabricação de cada unidade de montagem.

Tabela 6.1 - Matriz de Produtos e Família de Produtos

Família	Unidade de Montagem	Corte Carbono	Corte Inox	Calandra	Montar/ Soldar	Arco Submerso	Rev. Inox	Funilaria	Plana	Fresadora	Torno Vertical	Torno Horizontal	Teste de Pressão	Eletro-polimento	Decapagem	Pintura	Montagem
A	Caixa de Entrada		X		X			X	X	X				X	x		X
B	Formação (Produtos Prismáticos)	X	X		X		X	X		X					x		X
	Prensa (Produtos Prismáticos)	X	X		X		X	X		X					x		X
C	Secagem (Produtos Prismáticos)	X			X					X							X
	Enroladeira (Produtos Prismáticos)	X			X					X							X
D	Rebobinadeira (Produtos Prismáticos)	X			X					X							X
	Rolos Guia	X		X		X						X					X
E	Tambores	X		X		X						X					X
	Estangas	X		X		X						X					X
E	Cilindros Secadores										X	X	X				X
	Rols DSR										X	X	X				X

Ao final da separação, as famílias de produtos da empresa são:

- A) Caixa de Entrada;
 - Produtos Soldados
 - Produtos Planos
- B) Parte Úmida - Formação e Prensas - Produtos Prismáticos (Aço Carbono/Inox)
 - Elementos Desaguadores e Raspadores
 - Estruturas Revestidas - aço carbono revestido de inox
 - Produtos de Chaparia Fina
- C) Parte Seca/Parte Final - Produtos Prismáticos (Aço Carbono)
- D) Cilindros Secadores e Rolos DSR
- E) Rolos;

6.6 Layout Inicial e Transformação do Chão de Fábrica

Até aqui a aplicação do método foi apresentada para a empresa como um todo. A partir do ponto “A” da figura 6.15, a aplicação do método foi realizada para cada família de produtos individualmente, partindo-se de um projeto piloto e, posteriormente, expandido para as demais famílias.

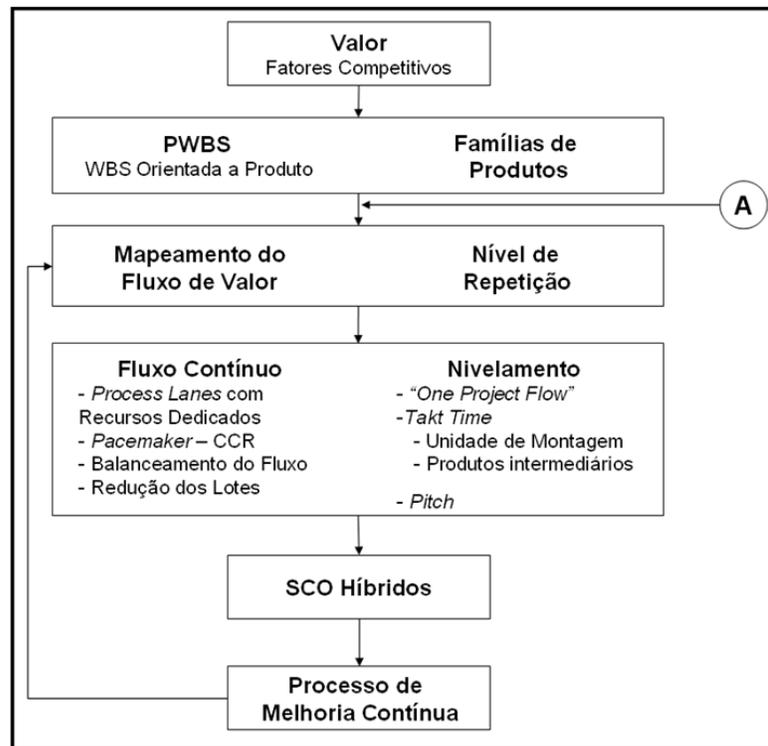


Figura 6.15 - Etapas Realizadas para cada Família de Produtos (A)

O ponto “A” da figura 6.15 também representa o momento em que o chão de fábrica começa a ser transformado por essa implementação. Portanto, antes de continuar com as demais etapas, será apresentado o *layout* original da empresa e a divisão final desse *layout* nas *Process Lanes*

O *layout* original da empresa, como da maioria das empresas de bens de capital, conforme apresentado no capítulo dois, era um *Job Shop* clássico, com a divisão dos processos de corte, construção metálica (também chamado de caldeiraria), usinagem e montagem, cada processo em um departamento separado, planejado e gerenciado de forma individual. A figura 6.16 apresenta *layout* industrial da empresa em São Paulo, dividido em 4 galpões, e sua estrutura até 2004, quando teve início esta pesquisa-ação.

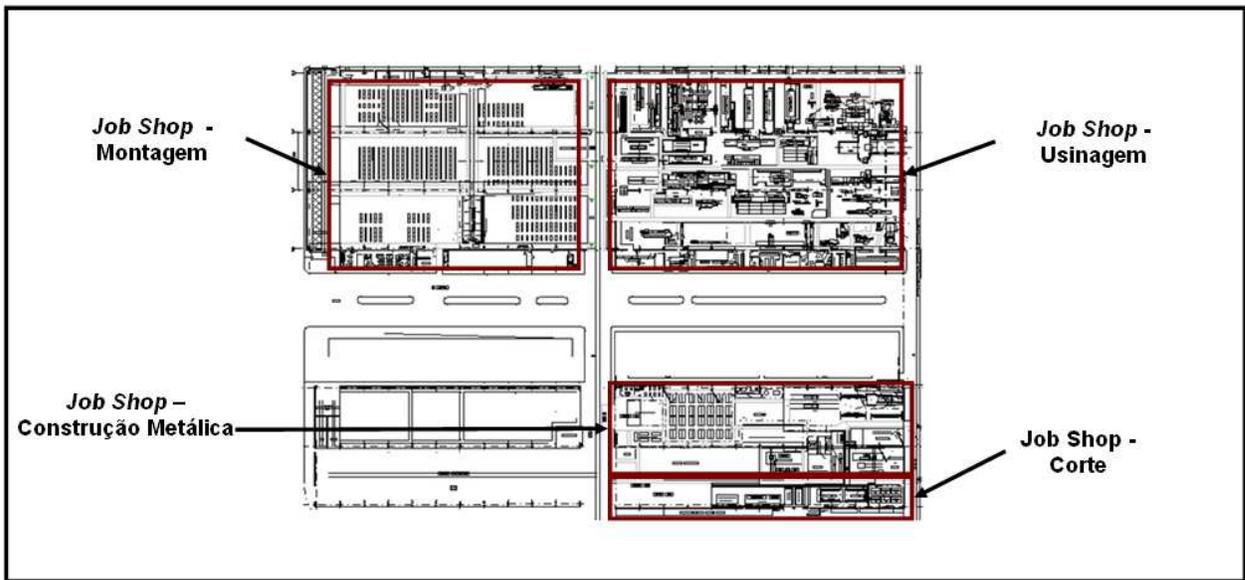


Figura 6.16 - Layout Original da Empresa - Job Shop

Como um *Job Shop* tradicional, não havia recursos dedicados a um tipo de produto, sendo a mão de obra, altamente especializada nas tarefas de cada departamento, compartilhada para a produção de todos os tipos de produtos intermediários da empresa. Uma única separação havia na usinagem dos “produtos prismáticos” (incluído todos os produtos usinados em máquinas de usinagem plana, como fresadoras, mandriladoras, centros de usinagem, plainas, etc) e “produtos cilíndricos” como os rolos e cilindros secadores (usinados geralmente em tornos, retificas cilíndricas, balanceadeiras, etc).

A transformação do *layout* foi um processo gradativo, iniciando com uma família de produtos, com criação de *Process Lanes* “virtuais”, ou seja, dedicando os recursos nos *Job Shops* originais e, numa segunda etapa, quando possível, criando realmente uma mini-fábrica ou, para os casos mais repetitivos, linhas de produção.

Atualmente, quase 7 anos após o início da implementação, 4 famílias de produtos já são produzidas em *Process Lanes* que passaram por mudança de *layout*. A última família de produtos (família B), de fabricação dos produtos prismáticos das seções de formação e prensas, ainda é produzida nos *Job Shops* originais, no entanto, todos os recursos remanescentes desses *Job Shops* estão, atualmente dedicados a essa família de produtos (figura 6.17).

- A) *Process Lane* de Caixa de Entrada: mini-fábrica;
- B) *Process Lane* de Seção das Prensas/Seção da Tela (Produtos Prismáticos): *Job Shop* dedicados

- C) *Process Lane* de Seção de Secagem/Parte Final (Produtos Prismáticos em aço carbono): mini-fábrica
- D) *Process Lane* de Cilindros Secadores e Rolos DSR: Linha de produção;
- E) *Process Lane* de Rolos Guia: linha de produção;

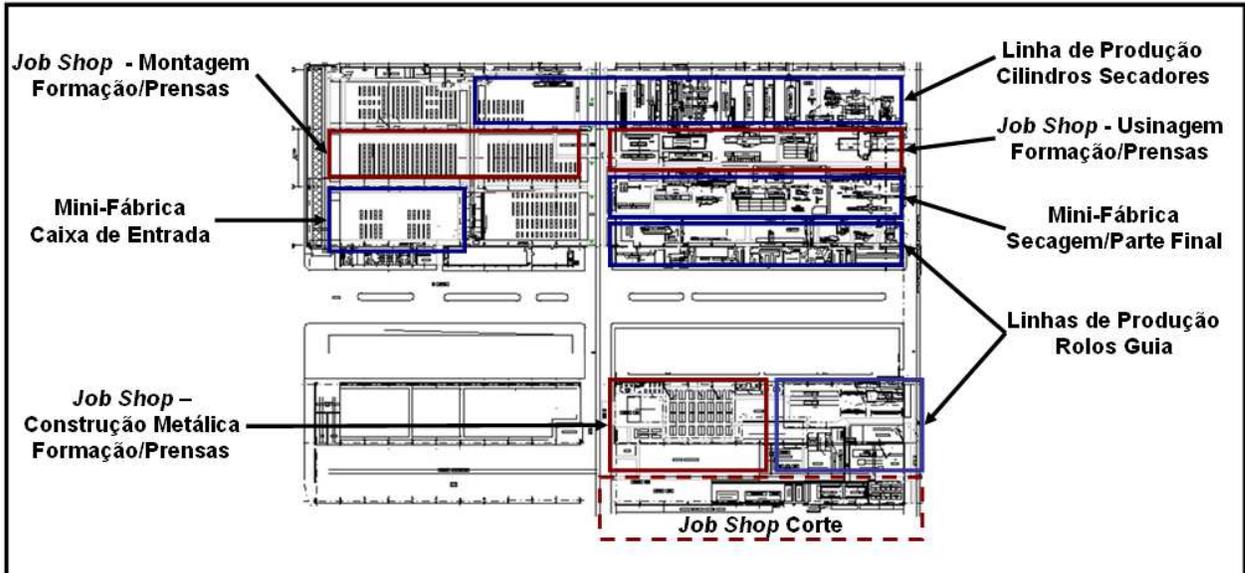


Figura 6.17 - Layout Atual: Process Lanes Dedicadas

Algumas dessas *Process Lanes* e seus *layouts*, bem como o nível de repetição de cada *Process Lane*, serão mais detalhadas nas próximas etapas da implementação, que serão apresentadas para cada uma de três famílias de produtos (famílias D, B e A), que ilustram todos os tipos de processos da empresa, desde *Process Lanes* altamente repetitivas até *Process Lanes* não repetitivas. A última etapa, no entanto, a implementação de um processo de melhoria contínua, aparece diversas vezes ao longo das demais etapas que serão apresentadas para cada família de produto. Entretanto, na última seção deste capítulo, será apresentado um resumo das ações de melhoria e como esse processo ocorre de forma cíclica.

6.7 Cilindros Secadores - Família D

Como vimos na seção 6.2.3, o cilindro secador faz parte da seção de secagem e é o responsável pela secagem do papel por evaporação. Trata-se de um vaso de pressão cilíndrico, em ferro fundido, de diâmetro variando entre 1500 e 1800mm. Por injeção de vapor, esses

cilindros são aquecidos a temperaturas entre 80 a 180 °C, e o papel, ao entrar em contato com eles, tem sua água evaporada para um ambiente isolado (a capota), onde ocorre a troca do ar umedecido pela evaporação por ar novo seco. Um cilindro secador pode pesar até 20 toneladas.

A quantidade de cilindros em uma máquina varia bastante dependendo do tipo e gramatura do papel e velocidade da máquina podendo variar de 30 a mais de 100 cilindros em uma única máquina.

Trata-se de um produto modular, que passa apenas por um processo de customização após a venda, ou seja, um projeto padrão é customizado para atender as características de cada máquina, de velocidade, largura, entre outras.

Dentro do grupo, existem dois centros de produção para esse produto, a unidade chinesa que atende os mercados chinês e asiático, e a unidade brasileira, que atende as demais unidades e regiões, o que garante um alto nível de demanda por esse produto.

O cilindro secador não passa por nenhuma pré-montagem em uma unidade de montagem maior na planta de produção sendo, portanto, um produto final da empresa que é vendido e entregue individualmente. Portanto, apesar de ser um produto intermediário, que após a montagem dos seus componentes passa por processos de fabricação como usinagem e balanceamento, será considerado uma unidade de montagem, uma vez que é o produto final da planta de produção que é expedido para a montagem de campo. Assim como as demais unidades de montagem, possui demanda dependente da venda de uma máquina ou de uma modernização com a troca ou ampliação da seção da secagem, e ainda uma demanda independente, oriunda das vendas das demais unidades do grupo ou como peça de reposição.

A figura 6.18 ilustra o cilindro secador e seus produtos intermediários: camisa, tampa direita e esquerda e pontas direita e esquerda. Além desses produtos intermediários, produzidos internamente, existe uma série de componentes que são comprados e montados durante a pré-montagem do cilindro (figura 6.19).

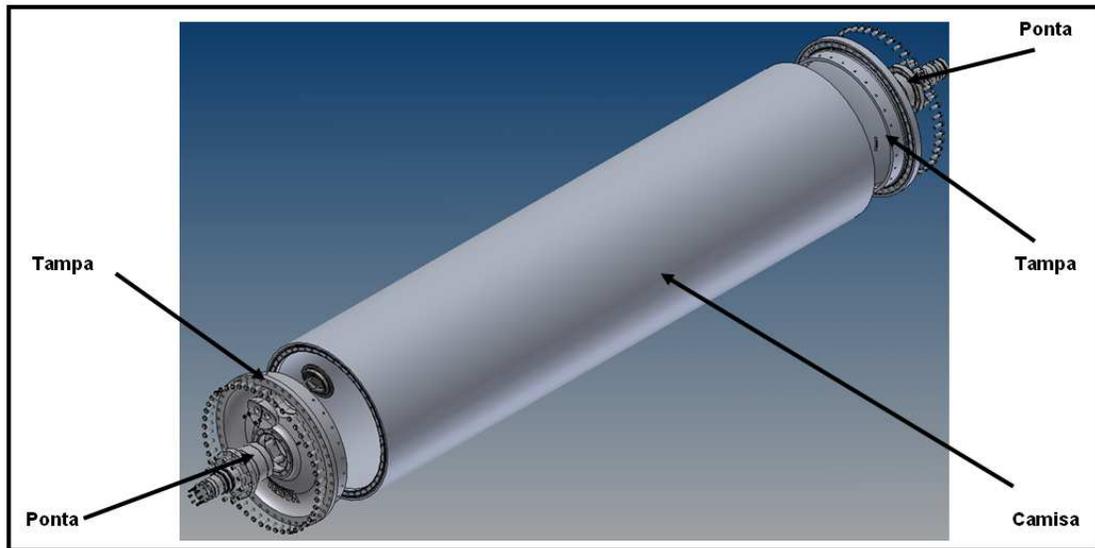


Figura 6.18- Cilindro Secador: Produtos Intermediários

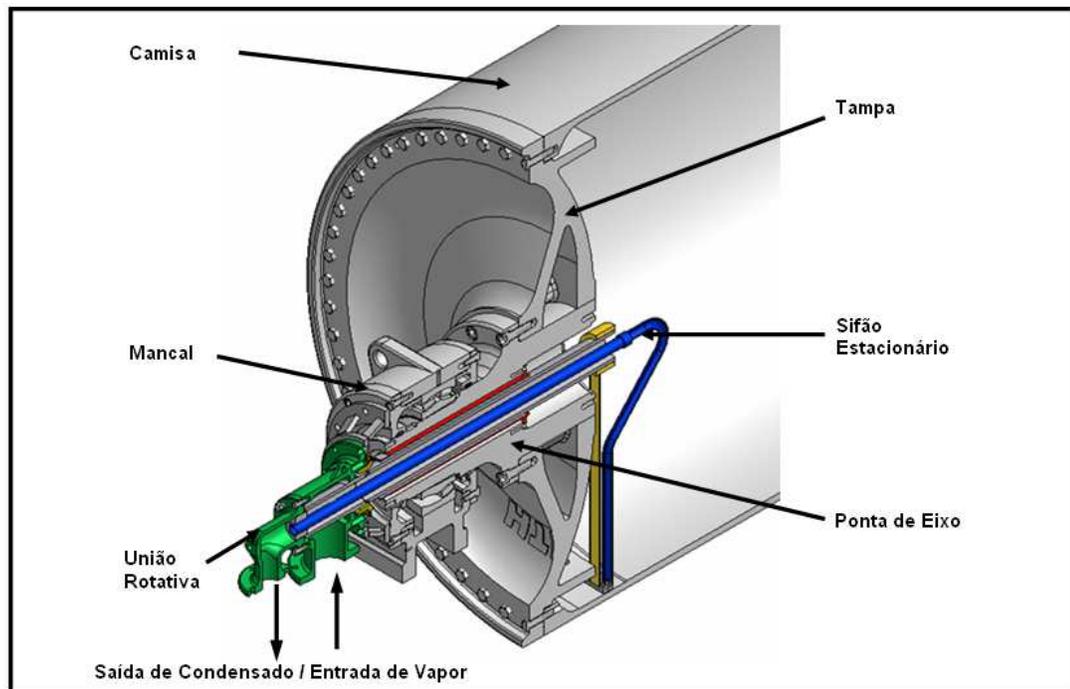


Figura 6.19- Cilindro Secador: Componentes

6.7.1 Mapear Fluxo de Valor e Analisar o Nível de Repetição

O processo de produção do cilindro pode ser dividido em três etapas. A fundição dos produtos intermediários, camisa, tampas e pontas, a usinagem de cada um desses e na montagem e usinagem final do cilindro. A fundição pertence a uma outra unidade de grupo e, portanto, será tratada como um fornecedor normal e não será incluída no mapeamento aqui descrito. O caminho crítico da fabricação dos produtos intermediários é a usinagem da camisa fundida, realizada em duas etapas de usinagem, externa e interna, realizadas em dois tornos horizontais diferentes além de três etapas manuais de preparação e inspeção. A usinagem das tampas direita e esquerda é realizada em um torno vertical e em uma furadeira. Já as pontas, são usinadas em um pequeno torno vertical CNC em duas fases cada uma. Após a inspeção de cada um desses componentes, é realizada a montagem e prensagem das pontas de eixo em suas respectivas tampas.

Paralelamente é realizada a montagem da camisa com seus componentes internos (termo-anéis). A próxima etapa é a montagem das tampas na camisa formando o cilindro secador. Por se tratar de uma vaso de pressão, devem ser realizados o teste de pressão e a inspeção de vasos de pressão por um inspetor externo. Após a certificação do cilindro, é realizada a usinagem final do cilindro, retífica, balanceamento e, por fim, a pintura do cilindro, a montagem final dos demais componentes comprados (mancais, sifão, tubo isolante, polias, etc), nova inspeção e acabamento de pintura final e embalagem.

A figura 6.20 ilustra o Mapeamento de Fluxo de Valor simplificado desse produto, realizado em 2004. Como o tempo de ciclo de alguns processos podem variar de acordo com o tamanho do cilindro, foi utilizado um cilindro de dimensões médias de acordo com uma faixa de larguras e diâmetros que a empresa mais vende. Na situação inicial, as máquinas eram compartilhadas com outras famílias de produtos e todas as máquinas da empresa trabalhavam em dois turnos.

Um departamento de PCP centralizado passava as ordens de produção para o setor de usinagem que fazia a programação de cada máquina em função da disponibilidade de cada máquina e da data de montagem/expedição dos cilindros. Muitas vezes, muitos projetos eram fabricados ao mesmo tempo, causando longos tempos de *setup* e variação nos tempos de ciclo entre uma peça e a seguinte.

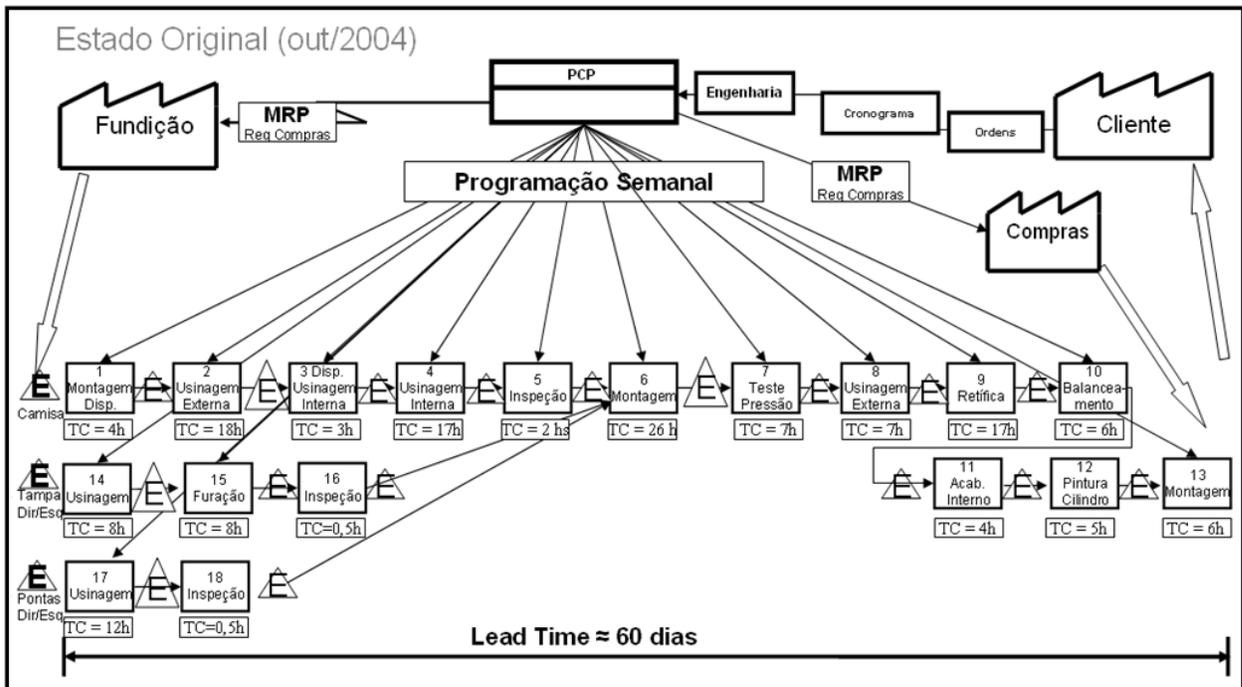


Figura 6.20 - Mapeamento do Fluxo de Valor do Cilindro Secador - Estado Original

As principais características que causavam os longos *lead times* de fabricação identificadas foram:

- Falta de sincronização entre a fabricação de cada produto intermediário;
- Altos tempos de *setup*, justificando os grandes lotes de fabricação (tampas direitas/esquerda e pontas direitas/esquerdas)
- Alto nível de estoque entre cada processo;

Além dos longos *lead times* de fabricação, em torno de 60 dias entre início de usinagem e embalagem do cilindro na expedição, trazidos pelos altos estoques em processo, o mapeamento mostrou que a falta de sincronização entre a fabricação de cada componente fazia com que os primeiros cilindros de um projeto fossem montados após mais de 30 dias do início de fabricação desse projeto. A figura 6.21 ilustra uma situação normal na fabricação em 2003, em que todas as camisas de um projeto já estão total ou parcialmente usinadas, enquanto os demais componentes ainda não estão disponíveis para montagem.



Figura 6.21 - Estoque em Processo de Cilindros Secadores: Estado Original

Outra consequência da situação inicial era que, devido aos longos *lead times* de fabricação, muitos produtos “urgentes”, *hot jobs*, eram liberados e não podiam aguardar nas filas de cada máquina. Esses produtos recebiam prioridade e, ao “furar” as filas, eram rapidamente finalizados, apresentando um *lead times* em torno de 12 dias úteis, ou um quinto do *lead time* original da família de produtos. Toda vez que um produto recebia tal priorização, os demais precisavam ser reprogramados uma vez que ficavam cada vez mais atrasados em relação à programação original.

O processo de fabricação dos Cilindros Secadores é repetitivo pois cada produto passa pelos mesmos processos de fabricação, variando apenas o tempo de ciclo de três processos principais de usinagem de acordo com a largura dos cilindros (que depende da largura da máquina vendida). No entanto, uma vez iniciada a fabricação dos cilindros de uma máquina, todos terão o mesmo tempo de ciclo, tornando a *Process Lane* altamente repetitiva.

6.7.2 Criação da *Process Lanes* com Recursos Dedicados

Devido à demanda estável trazida pelas vendas próprias e das demais unidades do grupo, foi tomada a decisão de dedicar todas as máquinas necessárias a essa família de produtos. As máquinas antes compartilhadas com a família de produtos E (rolos), como as balanceadeiras,

foram separadas e cada máquina passou a trabalhar mais ou menos turnos de acordo com a necessidade de cada *Process Lane*.

Em um primeiro momento, não houve uma mudança de *layout*, mas cada máquina do *Job Shop* de usinagem passou a ser dedicada a uma das famílias de produtos formando uma *Process Lane* “virtual”. Após os dois primeiros anos da implementação, a empresa aproveitou a necessidade de troca de uma das máquinas e realizou a mudança de *layout*. Por ser altamente repetitiva a *Process Lane* foi desenhada com um *layout* em linha. A figura 6.22 mostra a localização da linha de cilindros secadores no *layout* da empresa, a figura 6.23 um esquema do *layout* final e a figura 6.24, uma foto atual da *Process Lane*.

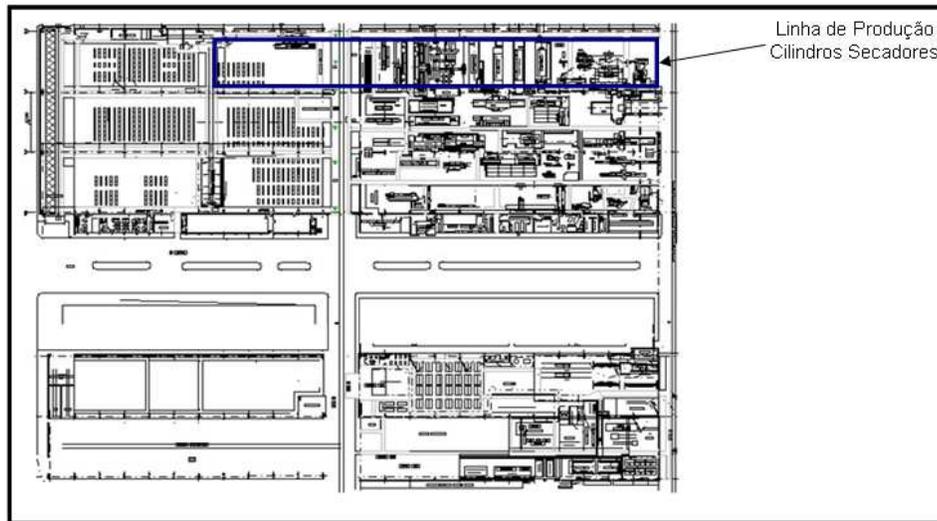


Figura 6.22 - Localização da Linha de Cilindros Secadores

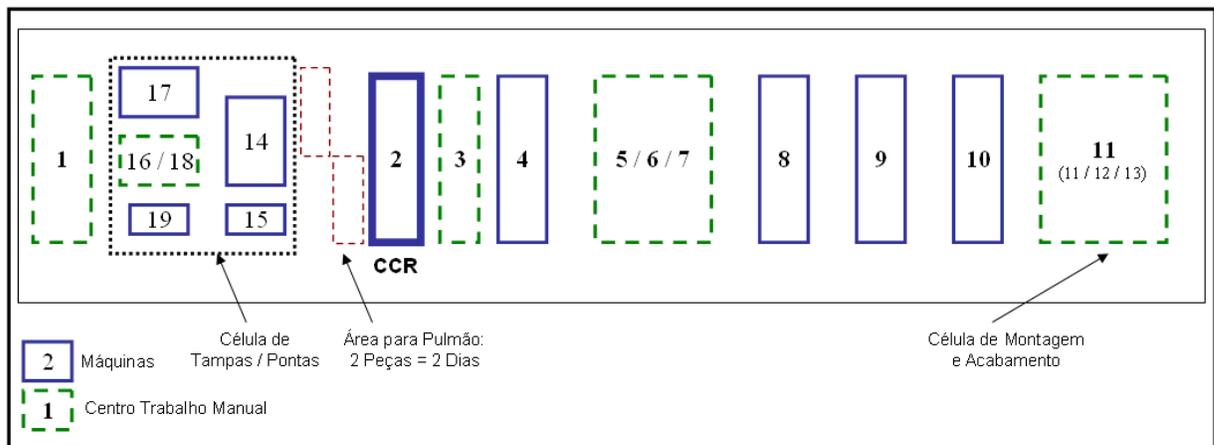


Figura 6.23 - *Layout* Atual - Linha de Secadores



Figura 6.24 - Foto da Linha de Secadores

6.7.3 Identificar o *Pacemaker* - Processo Cadenciador

Durante o mapeamento, o processo que apresentou maior tempo de ciclo em toda a *Process Lane* foi a usinagem externa da camisa, processo 2. Esse processo, o CCR, portanto foi definido como o *Pacemaker* e toda a programação passou a ser feita em função de sua capacidade. No entanto, dois processos apresentam tempos de ciclo muito próximos ao do CCR (menos de 10% a menos), a usinagem interna da camisa e a retífica do cilindro e são pontos de atenção pois qualquer variabilidade do tempo de ciclo desses processos podem torná-los restritivos temporariamente.

6.7.4 Nivelar a Produção - *Takt Time*

A quantidade de cilindros secadores em uma máquina de papel pode variar muito, pois depende de uma série de parâmetros como a velocidade da máquina, qualidade, gramatura e secagem do papel. Por esse motivo, não faz sentido pensar no *Takt Time* para cada máquina ou seção vendida pois, produzindo um projeto por vez, a duração de cada projeto irá depender da quantidade de cilindros necessários em cada projeto.

O primeiro passo, no entanto, foi definir a fabricação de um projeto por vez, “*one project flow*”, assim como nas demais famílias de produtos e, dessa forma, reduzir o *lead time* de fabricação de cada projeto individualmente.

Como definido na seção 5.7.1, uma vez que o cilindro secador é o produto final da planta de produção, o *Takt Time* deve ser determinado para esse produto. Analisando a demanda anual por máquinas novas e modernizações e considerando a estratégia da empresa de passar a produzir nessa planta todos os cilindros secadores vendidos fora da Ásia, a demanda estimada para esse produto seria entre 220 e 250 cilindros ao ano. Como o *Takt Time* não deve ser alterado com muita frequência, a empresa definiu um ritmo de um cilindro por dia para essa *Process Lane*. Isto representa um *Takt Time* de um dia.

Os tempos de ciclo, no entanto, podem variar de acordo com o tipo de cilindro que a *Process Lane* irá produzir. Como o tamanho dos cilindros dependem da largura da máquina, os tempos de ciclo de alguns processos de usinagem da camisa e do cilindro montado podem variar de acordo com a largura da mesma. Entretanto, todos os cilindros de uma mesma máquina possuem as mesmas dimensões, variando apenas alguns detalhes técnicos que não influem no tempo de ciclo dos principais processos de usinagem. Portanto, ao iniciar a fabricação dos cilindros de uma determinada máquina, os tempos de ciclo serão constantes garantindo o alto grau de repetição à *Process Lane*.

Por se tratar de um produto mais padronizado, composto sempre do mesmo número de produtos intermediários, o *Takt Time* de um dia garante um incremento de trabalho constante para todos os processos, não sendo necessário definir o *pitch* diferente do *Takt Time* para essa *Process Lane*.

As figuras 6.25 e 6.26 apresentam duas versões do *pipeline* dessa *Process Lane*. Na figura 6.25, mais detalhada, cada cilindro é apresentado individualmente, onde a data do CCR é apresentada em destaque, sendo o restante do período dedicado aos demais processos e tempos de espera na linha. O *lead time* total do cilindro é representado pela barra completa.

6.7.5 Reduzir o Tamanho dos Lotes

Com a nova configuração e produzindo um único projeto por vez, o lote de processamento se torna igual ao número de cilindros de cada projeto. Também com o novo *layout*, a dedicação das máquinas e a redução do estoque em processo entre cada uma das máquinas, o lote de transferência unitário na fabricação da camisa, montagem e usinagem final do cilindro passou a ser naturalmente utilizado, possibilitando a criação do fluxo contínuo de peças desde a usinagem da camisa até a montagem final e acabamento.

Entretanto, a usinagem das tampas e pontas de eixo direita e esquerda continuou a ser realizado em grandes lotes de processamento e transferência, com a fabricação de muitas tampas direitas antes de realizar o *setup* e iniciar a usinagem das tampas esquerdas. Como na montagem do cilindro, é necessário uma tampa direita, uma esquerda, além de cada uma das pontas e da camisa, o estoque em processo antes da montagem ainda era muito elevado. Na fase de mapeamento verificou-se que o tempo de *setup* para mudar a produção da tampa direita para a esquerda era elevado (em torno de três horas). Foi realizado um treinamento com os operadores e um trabalho de redução do tempo de *setup* para a usinagem das tampas (em torno de uma hora). Com essa mudança verificou-se que, trabalhando em apenas um turno e com um lote de duas tampas antes de realizar a troca de ferramenta, era suficiente para atender o ritmo da *Process Lane* e reduzir o estoque em processo antes da montagem do cilindro. O mesmo procedimento foi realizado com a usinagem das pontas de eixo.

6.7.6 Balancear a *Process Lane*

Conforme definição da seção 5.6.5, o balanceamento foi realizado com a alocação adequada de recursos, mão de obra e máquinas, de forma que todos os centros de trabalho possam produzir ao mesmo ritmo, o *Takt Time*, mantendo o fluxo contínuo, unitário de peças.

Como vimos, na situação inicial, com todos os recursos compartilhados, todas as máquinas estavam ativadas com a mesma capacidade, trabalhando em dois turnos diários, 5 dias por semana, com um operador dedicado a cada máquina em cada turno. Com a formação da *Process Lane* dedicada, o objetivo foi ativar cada máquina para trabalhar conforme o *Takt Time*

da *Process Lane*, ou seja, produzir um cilindro por dia. No entanto, como os tempos de ciclo de alguns processos podem variar de acordo com o tamanho dos cilindros, esse balanceamento precisou levar em consideração a possibilidade de variar os turnos e dias de trabalho em função do *mix* e tamanho dos produtos que a *Process Lane* irá produzir.

O balanceamento foi realizado considerando o mesmo cilindro padrão, de dimensões médias, utilizado no mapeamento original, e a variação dos tempos de ciclo de cada processo para os demais tipos de cilindro em função desse cilindro padrão.

Para isso, foi necessário um estudo detalhado das atividades realizadas por cada operador em cada máquina, com a identificação dos tempos manuais e automáticos de cada operação, bem como o treinamento dos colaboradores para que pudessem operar os diversos processos dessa *Process Lane*. Dessa forma, cada posto de trabalho passou a ser ativado apenas a quantidade de turnos, ou horas por turno, necessária para atender o *Takt Time*. Da mesma forma, alguns processos com tempos de ciclo curtos, podem ser agrupados em um mesmo posto de trabalho (postos de trabalho 11, 12 e 13, por exemplo) de forma que o tempo de ciclo total desse posto fosse próximo ao *Takt Time*. De forma oposta, a montagem do cilindro, processo 6, foi dividida em duas etapas, uma com a montagem das tampas com as pontas de eixo (processo 20), formando dois sub-conjuntos prontos para serem montados com a camisa. Com tal divisão, com a padronização dessa atividade e a inclusão de um segundo montador, o tempo ciclo da montagem diminuiu para menos de um turno.

A figura 6.27 apresenta o balanceamento dos postos de trabalho dessa *Process Lane*, realizado no mapeamento do estado original e a situação proposta considerando os tempos de ciclo do cilindro descrito anteriormente. Pode-se verificar que, enquanto alguns postos de trabalho precisam trabalhar dois turnos para atender o *Takt Time* de um dia (*Takt Time* = um dia = 17horas) outros apenas um turno para manter o mesmo ritmo de produção de um cilindro por dia (*Takt Time* = um dia = 8,5 horas). Já o CCR apresenta tempo de ciclo maior que 17 horas. Para esse posto, foi definido um regime de até 21 horas por dia para manter o *Takt Time* de um dia e lidar com a variação de tamanho dos cilindros. O mesmo regime foi proposto para os postos críticos 4 e 9, pois apresentam tempos de ciclo muito próximos ao do CCR e, como vimos na seção 5.6.5, é necessário estabelecer uma capacidade protetora para esses recursos não-restritivos. Esse regime de até 21hs ao dia pode tanto ser realizado com três turnos quanto com rodízio de operadores nos períodos de intervalo.

De acordo com cada projeto e tamanho do cilindro secador a ser produzido, o balanceamento pode ser modificado, com a diminuição das horas em cada turno do CCR e dos processos mais críticos, no caso de cilindros menores, e com horas extras ou aumento do número de operadores na linha para realizar o rodízio de períodos de intervalo, no caso de cilindros maiores.

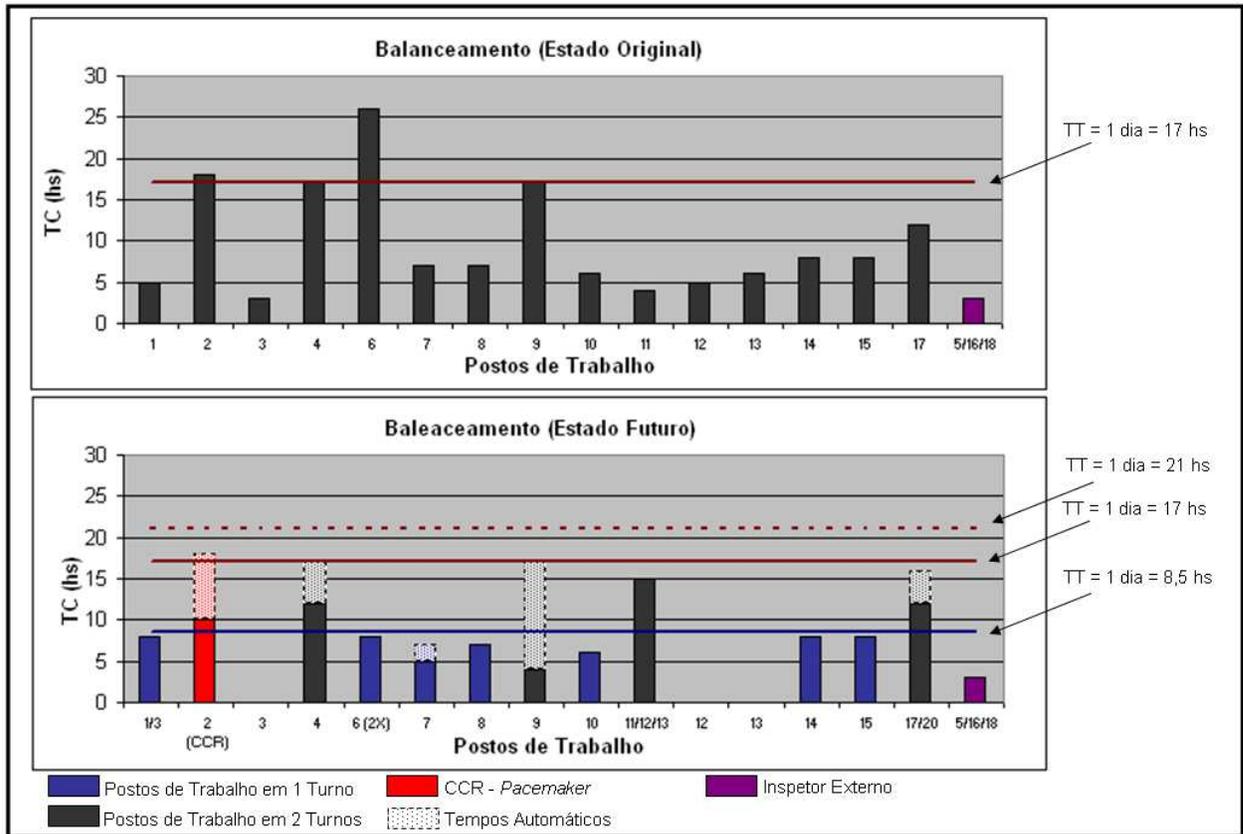


Figura 6.27 - Balanceamento da *Process Lane* de Cilindro Secadores

6.7.7 Sistemas de Coordenação de Ordens Híbridos

O sistema de coordenação de ordens híbrido proposto para essa *Process Lane* foi o CONWIP.

Um *backlog list* com a sequência e as ordens de produção dos cilindros secadores é enviado ao primeiro processo de cada produto intermediário, camisas, tampas e pontas. A autorização para iniciar a fabricação de cada componente é dada pela disponibilidade de cartões que é constante na linha. Cada ponta de eixo e tampa é acompanhado de um cartão que é liberado

quando o componente é utilizado na montagem, das tampas ou do cilindro. O cartão que acompanha a camisa segue com o cilindro até o final do processo e só é liberado quando o cilindro é entregue para a expedição. Um pulmão é planejado para existir entre a montagem das tampas e a montagem do cilindro para garantir que a camisa que passou pelo CCR da linha não fique parada aguardando componentes dessa outra ramificação.

Toda a programação da linha é feita para o CCR, que é planejado de acordo com a sequência de expedição e do *Takt-Time* definido de um dia. A figura 6.28 apresenta o mapa do estado futuro simplificado, de dezembro de 2010, com a representação do CONWIP sugerido na *Process Lane* e a redução do *lead time* proposto. Para manter o *lead time* de 15 dias, é necessário manter o estoque em processo em no máximo 15 camisas/cilindros na linha. Para isto, o número de cartões circulando na ramificação principal da *Process Lane* deve ser igual a 15.

Atualmente, no entanto, essa ainda não é a realidade dessa *Process Lane*. Como veremos na seção 6.10, o processo de redução do *lead time* é gradativo. Portanto, embora o estoque em processo venha caindo gradativamente ao longo dos anos, devido a diversas instabilidades da linha e para evitar paradas frequentes, o estoque em processo permitido atualmente é de até 20 peças na linha e, portanto, o *lead time* atual é de 20 dias, o que já representa um terço do *lead time* inicial do primeiro mapeamento.

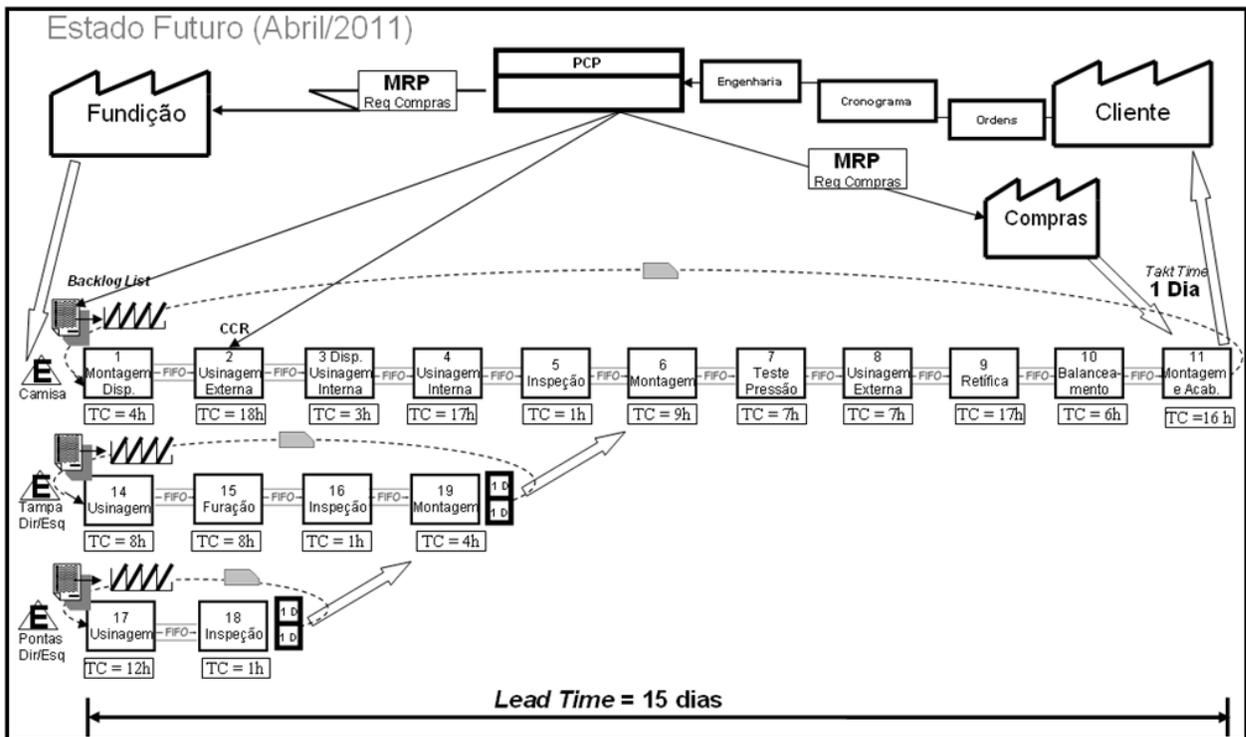


Figura 6.28 - Mapeamento do Estado Futuro: Cilindros Secadores

6.8 Produtos Prismáticos da Parte Úmida - Família B

Como vimos na seção 6.2, tanto a seção de formação quanto a das prensas são formadas por uma série de elementos mecânicos prismáticos constituídos das caixas e tubos de sucção, das calhas, dos raspadores, fabricados em aço inox, e uma série de elementos estruturais de sustentação e elevação dessas seções, fabricados em aço carbono revestido de inox. Todos esses elementos prismáticos precisam ser pré-montados na planta de produção, fase em que, além desses produtos intermediários fabricados internamente, são montados uma série de componentes comprados como os passadiços por onde circulam os operadores da máquina, cilindros hidráulicos que movimentam sistemas de alavancas, chuveiros de limpeza das telas e feltros e outros periféricos que incluem todo o sistema de automação, hidráulico, elétrico e pneumático.

Portanto, o que chamamos de módulo principal de cada uma dessas seções, sem os rolos guias, rolos de sucção, caixas de entrada, prensas de sapata (que são unidades de montagem independentes), formam uma ou mais unidades de montagem. Elas são totalmente pré-montadas e testadas na planta de produção e precisam ser parcialmente desmontadas para transporte. No

entanto, a desmontagem e transporte ocorre em grandes módulos que saem com todos os seus periféricos montados prontos para serem instalados na montagem de campo, reduzindo assim o tempo dessa fase do processo.

A figura 6.29 apresenta a seção de formação apresentada anteriormente, sem as demais unidades de montagem (caixas de entrada, rolos guias e de sucção) e sem as telas que não precisam ser testadas.

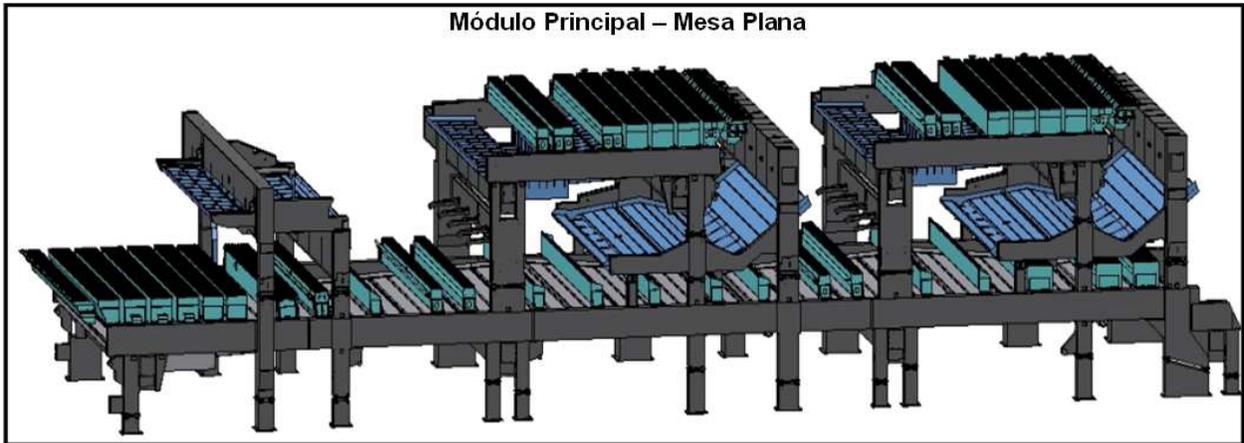


Figura 6.29 - Módulo Principal de uma Seção de Formação - Mesa Plana

6.8.1 Mapear Fluxo de Valor e Analisar o Nível de Repetição

Essa é a família de produtos com maior diversidade de produtos. Dentro da mesma família estão inseridos os diversos tipos de seção de formação e prensas, para os diversos tipos de máquinas de papel de diversas larguras. Portanto as unidades de montagem, produto final da planta, são muito distintas umas das outras, cada uma sendo formada por um número e variedade diferente de produtos intermediários.

Inicialmente todos os produtos intermediários eram fabricados pelos mesmos recursos compartilhados com outras famílias de acordo com os *Job Shops* originais. Entretanto, mesmo após a separação das demais famílias de produtos em suas *Process Lanes* dedicadas, o fluxo de valor permaneceu altamente não repetitivo, em função da diversidade de produtos que compõe essa família e dos recursos compartilhados que produziam todos os produtos intermediários dessa família.

A figura 6.30 apresenta o mapeamento de fluxo de valor realizado em agosto de 2004 de uma seção de formação fabricada naquele ano.

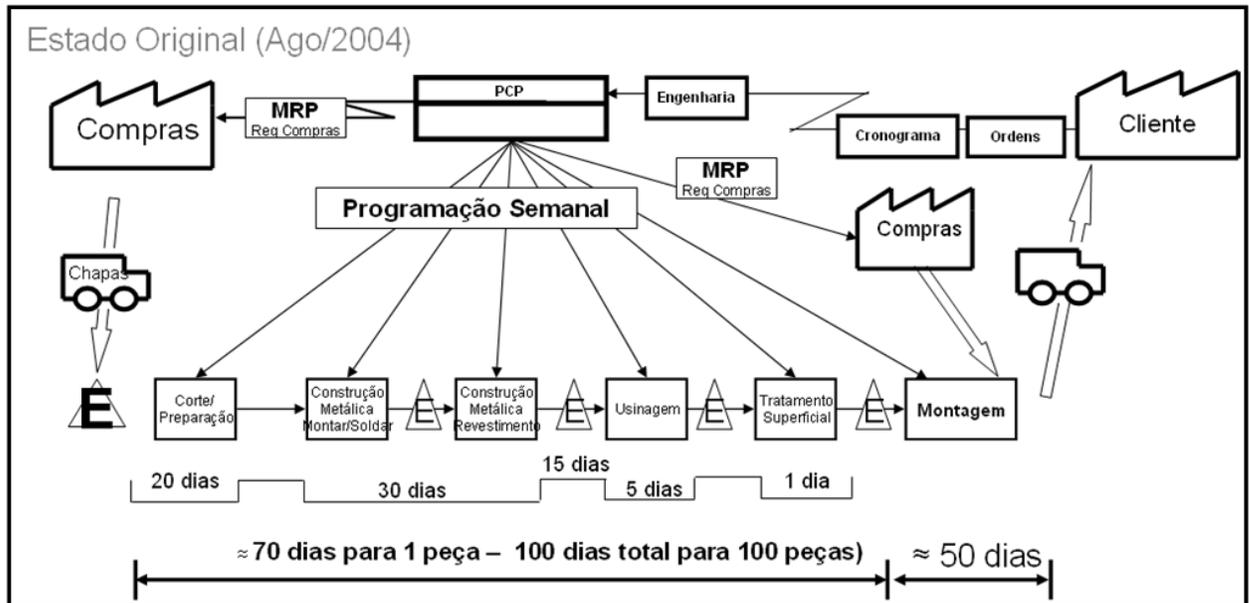


Figura 6.30 - Mapeamento do Fluxo de Valor: Produtos Prismáticos

Em geral os processos de fabricação desses produtos intermediários são corte, dobra, construção metálica, incluindo montagem e solda (processos realizados com solda MIG), revestimento e funilaria (processos com chaparia fina realizado com solda TIG), usinagem em fresadoras convencionais, furação e centros de usinagem CNC, tratamento superficial e, finalmente, a pré-montagem da unidade de montagem.

Uma característica identificada nesse mapeamento é que os diversos tipos de produtos intermediários eram produzidos por qualquer dos recursos dentro dos *Job Shops*, o que gerava a necessidade de programar cada um dos recursos. Outro fator identificado, como nas demais famílias de produtos, é que diversos projetos passavam pelos *Job Shops* ao mesmo tempo, gerando uma necessidade de priorização constante entre os produtos intermediários de projetos diferentes.

A figura 6.31 apresenta um cronograma simplificado de fabricação da seção de formação (projeto “X”) produzida em 2004, durante a fase de mapeamento do fluxo de valor dessa família de produtos, em que mais de um projeto passava pela engenharia e manufatura em simultaneidade. À época, uma seção de prensas de uma outra máquina (projeto “W”) estava sendo produzida em simultaneidade parcial com a seção mapeada. Pode-se visualizar no destaque

da figura 6.31 a simultaneidade na entre os dois projetos na construção metálica, o CCR desse fluxo. O *lead time* total de fabricação dessa seção foi em torno de 6 meses.

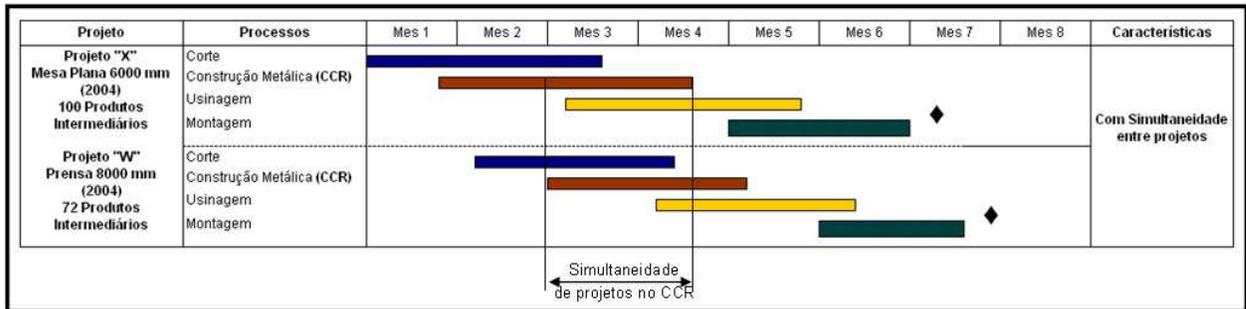


Figura 6.31 - Simultaneidade entre Projetos

Outro fator crítico identificado foram os grandes estoques em processo tanto entre cada um dos *Job Shops*, quanto dentro dos processos. Isto acontecia no corte e, principalmente, na construção metálica, uma vez que cada colaborador trabalhava individualmente em cada produto e muitas vezes em diversos produtos similares ao mesmo tempo, o que representava grandes lotes de fabricação que, após certo tempo, eram transferidos para o processo seguinte, usinagem, em grandes lotes de transferência.

Para aumentar o nível de repetição desse fluxo de valor, foi necessário dividir os produtos intermediários em três famílias, cada uma com produtos intermediários com roteiros similares, ou seja, que apresentam a mesma sequência de processos de fabricação. A divisão realizada segue o mesmo processo apresentado na seção 6.5 de similaridade de processos (tabela 6.2).

Tabela 6.2 - Subdivisão das Famílias de Produtos

Família	Produtos Intermediários	Corte Carbono	Corte Inox	Montar/ Soldar	Rev Inox Funilaria	CHC	Fresadora Convencional	Furação	Decapagem	Montagem
B1	Estruturas Revestidas	X	X	X	X	X	X	X	X	X
B2	Elementos Desaguadores		X	X		X	X	X	X	X
	Raspadores		X	X		X	X	X	X	X
B3	Calhas		X		X				X	X

Os produtos intermediários fabricados internamente foram divididos em três famílias. O primeiro grupos são as estruturas fabricadas em aço carbono e revestidas com chapas finas de inox. Esses produtos passam pelo corte de aço carbono e de aço inox (que são processos distintos), por dois processos de construção metálica que são a montagem e solda dos produtos (realizados com solda MIG) e pelo revestimento (realizado com solda TIG), pela usinagem que

tanto pode ser feita em centros de usinagem CNC ou em máquinas convencionais e furação, tratamento superficial e montagem.

A segunda família engloba os elementos desaguadores e os raspadores, fabricados em chapas grossas de aço inox. Esses produtos passam apenas pelo corte de aço inox, pela montagem e solda da construção metálica (realizada com solda MIG), pela usinagem que também tanto pode ser feita em centros de usinagem CNC ou em máquinas convencionais e furação, tratamento superficial e montagem.

A última família são as calhas, fabricadas em chapas finas de aço inox. Esses produtos raramente passam por usinagem e, portanto, passam apenas pelo corte de aço inox, por um processo chamado de funilaria, similar ao processo de revestimento (realizado com solda TIG), tratamento superficial e montagem.

A figura 6.32 apresenta um exemplo de uma seção de formação, fabricada em 2011, com a divisão dos produtos intermediários que constituem essa unidade de montagem nas três famílias de produtos.

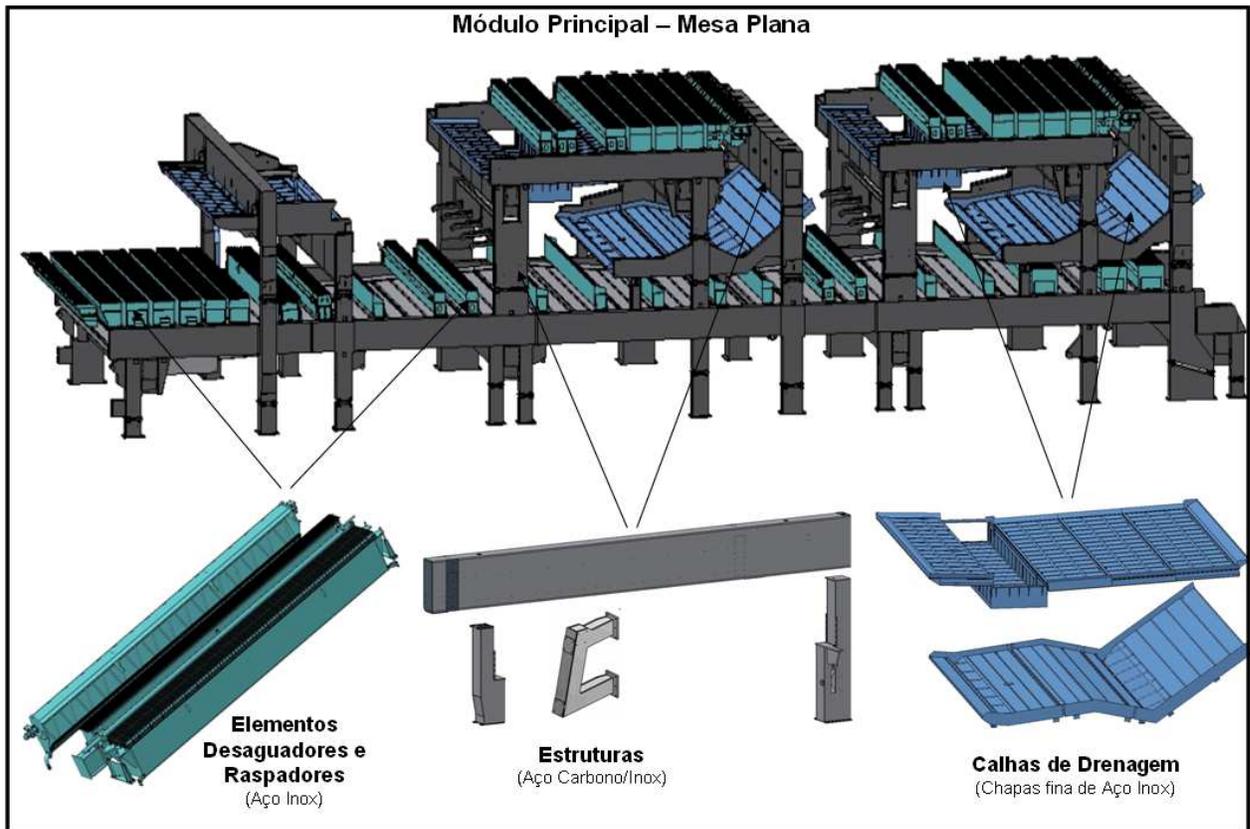


Figura 6.32 - Família de Produtos Intermediários da *Process Lane*

Dessa forma, o nível de repetição dos fluxos de valor por onde passam cada uma dessas famílias, se dedicados, podem ser consideravelmente mais repetitivos do que a *Process Lane* inicial, uma vez que os produtos que compõem cada família passam sempre pelos mesmos processos de fabricação.

6.8.2 Criação da *Process Lanes* com Recursos Dedicados

Essa foi a última família a ter seus processos mapeados e recursos dedicados e continuam trabalhando nos *Job Shops* originais (figura 6.33), embora agora todos os recursos estejam dedicados a esta família de produtos e sejam divididos entre as *Process Lanes* secundárias. As *Process Lanes* secundárias foram divididas de acordo com as famílias de produtos apresentadas na seção anterior. A princípio, essas *Process Lanes* secundárias foram definidas apenas no processo de construção metálica, deixando a usinagem compartilhada a duas famílias de produtos, B1 e B2. Na etapa seguinte, os recursos de usinagem também passaram a ser dedicados a cada uma das *Process Lanes* secundárias.

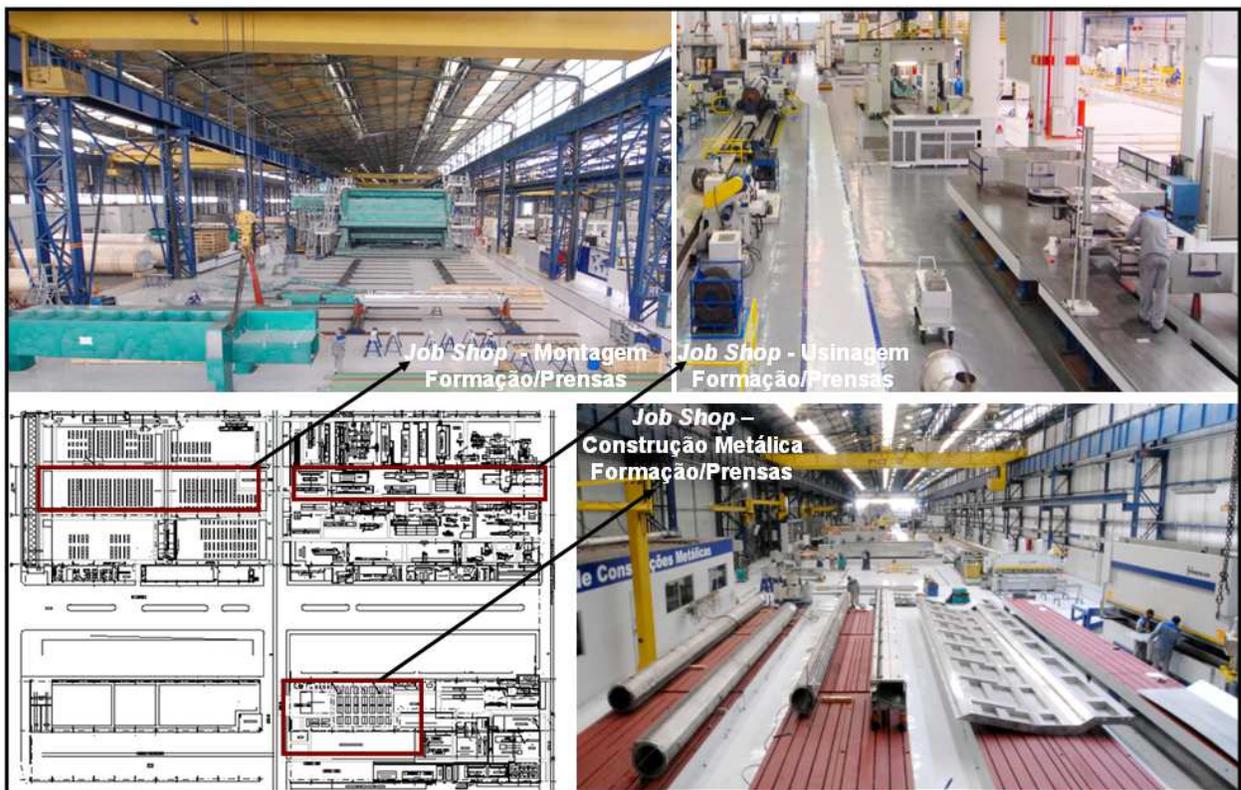


Figura 6.33 - Job Shops Dedicados

Como será apresentado na seção de balanceamento, o número de recursos dedicados a cada uma das *Process Lanes* secundárias varia de acordo com o *mix* de produtos ao longo de um determinado horizonte de tempo, ou seja, de acordo com o tipo de seção que será fabricada.

6.8.3 Identificar o *Pacemaker* - Processo Cadenciador

Antes da dedicação dos recursos, não era possível identificar claramente se havia apenas um CCR no fluxo de valor. O que se percebia era uma grande “onda” que iniciava no corte, com uma grande quantidade de chapas precisando ser cortada antes que um primeiro produto pudesse ser iniciado no processo de construção metálica, tornando esse processo um recurso restritivo, com a demanda maior que a própria capacidade. Logo após, a construção metálica se transformava no recurso restritivo, com uma grande quantidade de produtos sendo fabricada ao mesmo tempo e tempos de ciclo muito longos devido a cada colaborador fabricar mais de um produto por vez. Em seguida a onda passava para a usinagem, com a entrega de muitos produtos ao mesmo tempo da construção metálica e, portanto, a usinagem se tornava a restrição do fluxo. Esse processo em lotes representa exatamente um CCR flutuante.

À medida que o fluxo contínuo começou a ser criado, com a dedicação de recursos para essa e as demais *Process Lanes* e com as mudanças de processo que serão apresentadas nas seções seguintes, a construção metálica passou a ser claramente o CCR dessa *Process Lane*, por apresentar uma capacidade menor que todos os demais recursos. Esse processo passou então a ser o *Pacemaker* do fluxo de valor e toda a programação é realizada em função de sua capacidade.

6.8.4 Nivelar a Produção - *Takt Time* e *Pitch*

Como se trata de uma *Process Lane* não repetitiva o *Takt Time* pode variar consideravelmente de uma seção para outra, dependendo de seu tamanho, complexidade e quantidade de produtos intermediários que a compõem.

Entretanto, da mesma forma como apresentado para as demais famílias de produtos, o primeiro passo foi reduzir a simultaneidade entre os projetos, mantendo o conceito de “one project flow”, ou seja, fazer um projeto por vez.

A figura 6.34 apresenta a comparação entre o cronograma simplificado de fabricação da seção de formação (projeto “X”) produzida em 2004 em simultaneidade com uma seção de prensas (projeto “W”) produzida no mesmo período e uma simulação feita das mesmas duas seções sendo produzidas sem simultaneidade ente os projetos. Pode-se verificar que, sem nenhuma outra melhoria, o *lead time* do CCR para fabricar os dois projetos não se alteraria, já que o número de recursos e o número de produtos intermediários nas duas situações seriam os mesmos. No entanto, com todos os recursos de cada departamento dedicados a apenas um projeto por vez, sem nenhuma outra melhoria, seria possível reduzir o *lead time* do CCR de cada projeto resultando em uma redução do *lead time* total de cada projeto em mais de um mês.

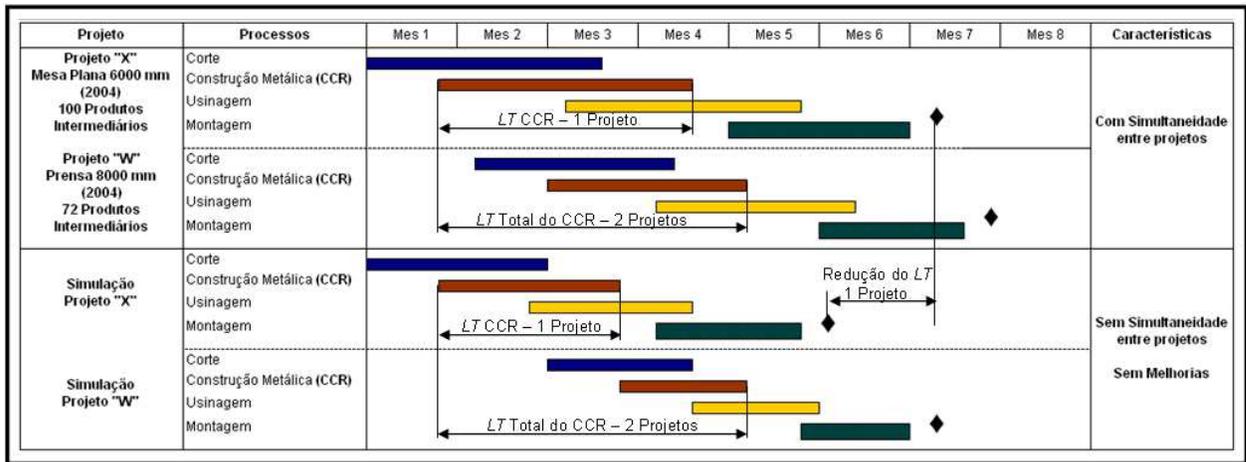


Figura 6.34 - Redução da Simultaneidade entre Projetos

O próximo passo foi o nivelamento da montagem das unidades de montagem e como cada uma delas difere em tamanho e complexidade, os períodos de montagem são diferentes (figura 6.35). Para fazer esse nivelamento cada montagem é planejada para ocorrer o mais próximo possível da data de entrega, levando em consideração o pulmão de tempo antes da expedição e sem concorrer com outra montagem. Como apresentado na seção 5.7.1, a consequência desse nivelamento é que algumas montagens estarão planejadas de forma antecipada.

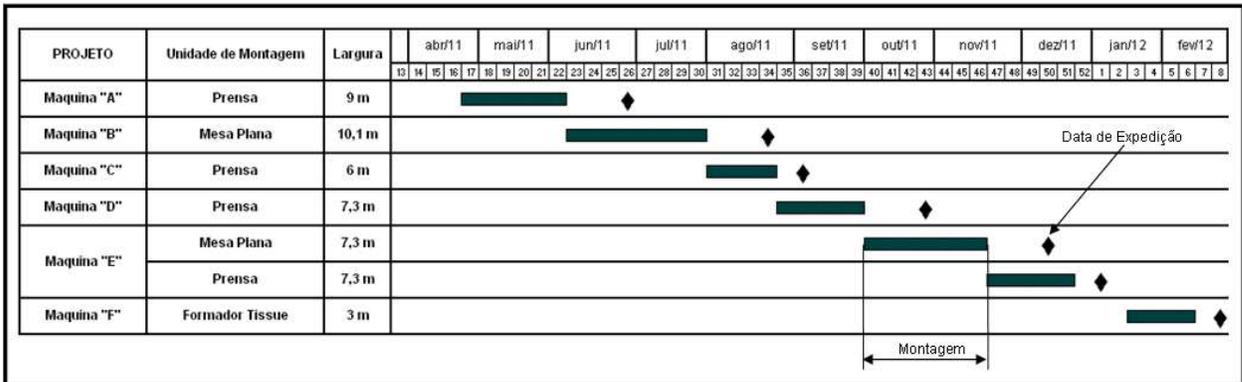


Figura 6.35 - Nivelamento da Montagem: Produtos Prismáticos da Parte Úmida

O próximo passo é definir o período que o CCR irá produzir os produtos intermediários de cada unidade de montagem e a quantidade de produtos intermediários que serão fabricados internamente. Uma característica dessa família de produtos é que alguns produtos intermediários, de mais baixa tecnologia, podem ser comprados ou fabricados internamente. Essa flexibilidade sempre foi utilizada para manter a utilização dos *Job Shops* o mais próximo da capacidade possível. Entretanto, antes da implementação, essa decisão de fabricar internamente ou comprar (*make-or-buy*) era tomada baseada apenas em fatores como custo de se fabricar internamente ou comprar e na capacidade em horas total de cada *Job Shop*. A partir dessa implementação, essa decisão passou a ser tomada em função da capacidade do CCR. Na figura 6.36, foi acrescentado o período de fabricação do CCR dos produtos intermediários de cada unidade de montagem, considerando o mesmo conceito de “*one project flow*”, em que não haverá simultaneidade de projetos no CCR.

O passo seguinte, então, é identificar a demanda para cada CCR. Para isso, é necessário identificar a quantidade, tipo e classificação dos produtos intermediários que compõe cada unidade de montagem. Como vimos na seção 5.7.2, por se tratar de uma *Process Lane* não repetitiva com alta diversidade de produtos, cada produto intermediário deve ser classificado, além da família de produtos, em quantidade de unidades padrão. A unidade padrão adotada foi o volume de trabalho no CCR do menor produto produzido pelo CCR dessa *Process Lane*. Todos os demais produtos são classificados como múltiplos desse produto, portanto a demanda que cada unidade de montagem gera para o CCR será dado por um número de unidades padrão.

Nesse caso, a família B1, de estruturas revestidas, cada produto intermediário representa, em média, 5 Unidades Padrão ($150 / 30 = 5$). Entretanto, de acordo com a classificação realizada, cada produto dessa família estão classificados entre três e 6 UPs por peça. Para a família B2, a média é de 3,84 UPs mas varia apenas em torno de três e 4 UPs. Já nas calhas, família B3, a média de cada produto é 6 UPs e variam de 4 a 9 UPs por peça. Como se pode perceber, algumas *Process Lanes* são mais repetitivas que as outras quando se compara o volume de trabalho em cada produto.

O *pitch* para esse período e *mix* de produtos foi definido em cinco dias, ou seja, a cada cinco dias um volume de trabalho para o CCR de cinco dias deveria ser liberado no processo inicial, a menos que o CCR apresentasse atraso e o *buffer* estivesse cheio.

Conforme apresentado na seção 5.7.2, um *pitch* de 5 dias em uma linha menos repetitiva, pode representar mais ou menos produtos intermediários, mas o volume de trabalho para o CCR é sempre o mesmo. A tabela 6.4 apresenta o volume de trabalho em um *pitch* para o CCR de cada *Process Lane*. Para a família de produtos B1, por exemplo, um volume de trabalho constante de 15 UPs para 5 dias de trabalho do CCR podem representar de três a 5 produtos intermediários. Essa liberação de trabalho em função do *pitch* e não em função das ordens de produção individuais, garante um volume de trabalho constante para o CCR.

Tabela 6.4 - Volume de Trabalho Constante no CCR - *Pitch*

Família	Produtos Intermediários	Qtde	UP	Construção Metálica		
				Ups/dia	UP/Pitch Pitch = 5 dias	Peças/Pitch
B1	Estruturas Revestidas	30	150	3	15	3 - 5
B2	Desaguadores/Raspadores	65	250	5	25	6 - 7
B3	Calhas	15	90	1,8	9	1 - 2
TOTAL (calculado)		110	490	9,8	49	10 - 14

Adicionalmente, como vimos na seção 5.7.2, um mesmo volume de unidades padrão para o CCR, pode representar, nessa linha menos repetitiva, mais ou menos volume de trabalho nos processos anteriores (corte) ou seguintes (usinagem e tratamento superficial). Por esse motivo, como veremos na seção de balanceamento, os demais recursos, não-restritivos, devem contar com uma capacidade protetora para lidar com tal variação.

6.8.5 Reduzir o Tamanho dos Lotes

Como vimos nas seções anteriores, na situação original, os processos não dedicados eram programados de forma que se formavam grandes lotes de fabricação e transferência nos processos iniciais de corte e construção metálica, causando alto nível de estoque em processo em todo o fluxo de valor e, conseqüentemente, longos *lead times* de fabricação.

Esses grandes lotes de fabricação e transferência eram formados, primeiramente, no processo de corte, uma vez que para cortar totalmente um único produto intermediário era necessário cortar até 10 espessuras diferentes de chapas e, de uma mesma chapa de aço, poderiam ser cortadas peças individuais de mesma espessura para diversos produtos intermediários. Nesse cenário, e com intuito de aumentar o aproveitamento de chapas (isto é, conseguir planejar que a chapa fosse cortada sobrando o mínimo de material não aproveitado que se transforma em sucata) muitos produtos intermediários eram planejados para serem cortados ao mesmo tempo, com suas peças individuais de mesma espessura sendo cortadas da mesma chapa, formando grandes lotes de produção. Dessa forma, ao colocar uma chapa no processo de corte, ela precisava ser totalmente cortada para só então iniciar o corte da espessura de chapa seguinte, sendo necessário um longo período de tempo até que o primeiro produto intermediário fosse totalmente cortado para iniciar o processo de construção metálica. Entretanto, muitos produtos intermediários eram concluídos quase que simultaneamente, formando os grandes lotes de transferência para o processo de construção metálica.

Já, no processo de construção metálica, os grandes lotes de produção eram formados a medida que um único colaborador ficava responsável pela montagem das peças individuais de diversos produtos intermediários completos. Após a montagem, um segundo colaborador era alocado para realizar a solda desses diversos produtos intermediários e, em seguida, o mesmo ocorria com a montagem e solda das chapas de revestimento. Dessa forma, sem alocar mais de um colaborador por vez em um único produto, e com cada um sendo responsável por uma fase do processo, o time de aproximadamente 40 colaboradores, trabalhando em um único turno, podia ter em torno de 60 a 70 produtos intermediários sendo fabricados ao mesmo tempo. Da mesma maneira, muitos produtos eram concluídos nesse processo quase que simultaneamente, formando grandes lotes de transferência para o processo de usinagem.

Para reduzir o tamanho dos lotes no processo de corte foram necessárias ações em duas áreas diferentes da empresa. A primeira, passou por uma mudança no processo de engenharia de produto para reduzir a quantidade de espessuras de chapas em um mesmo produto intermediário, o que não significa reduzir as espessuras, mas sim a quantidade de espessuras. No processo de engenharia de produto, as espessuras eram definidas para serem as menores possíveis e atender os cálculos estruturais e de vibração de cada produto intermediário e da máquina como um todo. O problema era que, ao tentar reduzir ao máximo as espessuras de chapas, para reduzir custo de matéria prima, uma grande gama de espessuras de chapas era utilizada em cada produto intermediário. Por exemplo, se o cálculo apontava a necessidade de uma chapa de 20 mm de espessura em uma determinada área do corpo da peça, uma de 22 mm em outra área do corpo além de uma de 25 mm de reforço, uma de 27 mm e outra de 30 mm nas cabeceiras do corpo dessa mesma peça, o produto era projetado dessa forma, com a necessidade de corte de 5 espessuras diferente apenas para formar o corpo da peça. Em um mesmo projeto, muitas vezes mais de 40 espessuras de chapas diferentes podiam ser utilizadas. Esse tipo de projeto causava, além dos grandes *lead times* de fabricação e grandes lotes de produção e transferência, uma maior quantidade de chapas que eram sucateadas por falta de aproveitamento. Portanto, no intuito de reduzir cada vez mais as espessuras, para reduzir custo, o que realmente ocorria era o aumento do custo de produção.

Após um trabalho conjunto entre as engenharia de produto e engenharia de manufatura, aquele mesmo produto descrito acima pôde ser projetado utilizando apenas três espessuras de chapas diferentes, 20 mm, 25 mm e 30 mm, e os projetos atuais passaram a utilizar em torno de 25 a 30 espessuras diferentes de chapas. Dessa forma, ao mesmo tempo que se necessita menos espessuras de chapas para formar um único produto, reduzindo o tempo de ciclo do corte, uma mesma chapa pode ser totalmente cortada com um menor número de produtos intermediários, reduzindo o lote de produção e o desperdício de retalhos que se transformam em sucata.

A segunda mudança para reduzir os lotes no processo de corte foi a utilização de um *software* de detalhamento de chapa e controle de retalhos no estoque que permite ao mesmo tempo, planejar o melhor aproveitamento de chapas, com o número de produtos intermediários necessários, mas cortar apenas as peças necessárias para formar um ou dois produtos intermediários. Dessa forma, a mesma chapa deveria entrar e sair do recurso de corte mais de uma vez, ao contrário do que ocorria antes, aumentando o número de *setups*, porém reduzindo o

tamanho dos lotes de produção e transferência. Obviamente, um trabalho de redução do tempo de *setup* dessa máquina precisou ser realizado para que esse processo não se tornasse uma nova restrição no fluxo pelo aumento do número de *setups*.

Já na construção metálica, as mudanças necessárias para redução dos tamanhos dos lotes passaram tanto pela formação dos colaboradores, com uma parcela deles precisando ser treinada para executar todas as atividades da construção metálica (montar, soldar, montar revestimento e soldar revestimento), quanto pelo processo de divisão de turnos e do trabalho em si. O objetivo foi o de utilizar o maior número de colaboradores em um único produto do início ao fim do processo de construção metálica, reduzindo o tempo de ciclo de cada produto e, ao mesmo tempo, o tamanho do lote de produção e de transferência.

Com esses trabalhadores multifuncionais, e com a divisão da força de trabalho em dois turnos iguais, já foi possível reduzir pela metade o número de produtos intermediários em processo, uma vez que o produto que um colaborador iniciava de dia, podia ser trabalhado por outro colaborador no turno da noite. O passo seguinte foi alocar mais de um montador do mesmo turno em um mesmo produto, cada um montando uma parte das peças individuais, principalmente com produtos maiores e mais complexos. O mesmo foi realizado com os soldadores, chegando a ter até 4 soldadores soldando um único produto. Para balancear essas duas atividades foi necessário, também, que uma parte dos soldadores passassem a montar e uma parte dos montadores passassem a soldar.

Dessa forma, saiu-se de uma situação em que cada colaborador trabalhava em mais de um produto para outra em que um time de colaboradores trabalha no mesmo produto. Aquele estoque em processo de até 70 produtos sendo produzidos ao mesmo tempo foi reduzido para entre 10 e 15 produtos intermediários produzidos simultaneamente, dependendo do *mix* de produtos de cada projeto, com o mesmo time de colaboradores.

Para ilustrar a consequência dessa redução do tamanho dos lotes, a figura 6.37 apresenta uma comparação do cronograma simplificado de fabricação da seção de formação fabricada em 2004 (projeto “X”), da simulação da mesma seção realizada sem simultaneidade de projetos e da seção de formação (similar à primeira, embora com mais produtos intermediários) fabricada em 2006 (projeto “Y”).

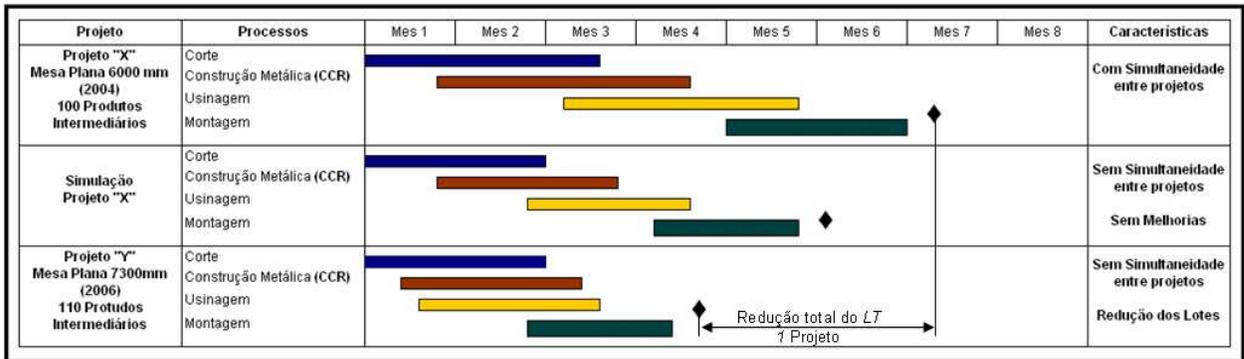


Figura 6.37 - Redução da Simultaneidade entre Projetos e do Tamanho dos Lotes

Com essas mudanças, embora o *lead time* de cada processo não seja reduzido em comparação à simulação realizada anteriormente, para um projeto realizado sem simultaneidade, a redução dos lotes de transferência permite que cada processo seja iniciado mais rapidamente para um pequeno número de produtos, aumentando assim a simultaneidade de cada etapa do processo (corte, construção metálica e usinagem) e reduzindo o *lead time* total do projeto.

6.8.6 Balancear a *Process Lane*

Como vimos nas seções anteriores, como essa é uma linha não repetitiva, cujo *mix* de produtos varia de projeto para projeto, o balanceamento tanto do CCR quanto dos demais processos também é realizado de projeto para projeto.

Um ponto importante a ressaltar, como já vimos na seção anterior, é que esse balanceamento depende de possuir um parcela da mão de obra multifuncional, altamente flexível, de forma a poder movimentar tais colaboradores de *Process Lane* para *Process Lane* ou mesmo dentro da *Process Lane* de processo para processo. Esse treinamento, no início, foi realizado com um total de 20% dos colaboradores da construção metálica e usinagem, mas ao longo dos últimos três anos, alguns colaboradores de um processo já foram treinados para conseguirem desempenhar atividades em diferentes processos dentro da *Process Lane*, principalmente entre montagem e construção metálica.

Para apresentar o balanceamento dessa linha, vamos continuar analisando o caso prático apresentado nas seções anteriores. Para esse *mix* e classificação de produtos intermediários apresentado na tabela 6.5, os recursos da construção metálica foram definidos conforme a tabela

6.5. Nessa divisão, 12 colaboradores foram alocados para a *Process Lane* de estruturas revestidas, 20 para a *Process Lanes* de elementos desaguadores e raspadores que tem a maior demanda e apenas 8 colaboradores para a de calhas. Como vimos na seção anterior, todos eles divididos em dois turnos.

Tabela 6.5 - Balanceamento do CCR de acordo com a Demanda da *Process Lane*

Familia	Produtos Intermediários	Otdc	UP	Construção Metálica			Colaboradores
				Ups/dia	UP/Pitch Pitch = 5 dias	Peças/Pitch	
B1	Estruturas Revestidas	30	150	3	15	3 - 5	12
B2	Desaguadores/Raspadores	65	250	5	25	6 - 7	20
B3	Calhas	15	90	1,8	9	1 - 2	8
TOTAL (calculado)		110	490	9,8	49	10 - 14	40

Como explicado na seção anterior, o mesmo volume de unidades padrão representa nessa linha, mais ou menos volume de trabalho nos processos anteriores (corte) ou seguintes (usinagem e tratamento superficial). Na usinagem, por exemplo, para manter o fluxo contínuo após o CCR, o balanceamento de capacidade se dá dependendo do *mix* de produção, não apenas na dedicação das máquinas para cada *Process Lane*, mas também na variação dos turnos e períodos de trabalho de cada máquina. Essas definições são tomadas de modo a manter uma capacidade protetora em cada máquina, ou seja, uma capacidade acima da demanda média do período, de forma a poder absorver a flutuação de demanda trazida pelo nivelamento do CCR.

Nesse caso, as máquinas de usinagem foram separadas para cada uma das *Process Lanes*, ficando uma máquina CNC dedicada para os elementos desaguadores/raspadores, trabalhando em três turnos e uma furadeira em dois turnos. Para as estruturas revestidas foi dedicada uma máquina CNC, em dois turnos e uma fresadora convencional em apenas um turno. A tabela 6.6 apresenta essa distribuição.

Tabela 6.6 - Balanceamento dos Recursos de Usinagem

Familia	Produtos Intermediários	Otdc	UP	Construção Metálica			Usinagem		
				Ups/dia	UP/Pitch Pitch = 5 dias	Peças/Pitch	Colaboradores	CNC	Furadeira
B1	Estruturas Revestidas	30	150	3	15	3 - 5	12	1 (2 turnos)	1 (1 turno)
B2	Desaguadores/Raspadores	65	250	5	25	6 - 7	20	1 (3 turnos)	1 (2 turnos)
B3	Calhas	15	90	1,8	9	1 - 2	8		
TOTAL (calculado)		110	490	9,8	49	10 - 14	40		

Já o processo de tratamento superficial, por ser um processo com tempos de ciclo muito curtos, menores que um dia, e compartilhado entre as *Process Lane*, passou apenas a ser realizado em dois turnos, com a divisão da força de trabalho nesses dois turnos, para reduzir os estoques em processo que se formavam durante o dia.

6.8.7 Sistemas de Coordenação de Ordens Híbridos

O sistema híbrido de coordenação de ordens proposto para essa *Process Lane* utiliza os princípios do DBR apresentado na seção 4.5.2

Como vimos anteriormente, o CCR, a construção metálica, trabalha com recursos dedicados para cada *Process Lane* secundária e a programação é feita em função da capacidade desse recurso e da sequência definida pela montagem. Daí para frente, com a redução dos lotes de transferência da construção metálica para a usinagem apresentados anteriormente, o fluxo é contínuo, unitário, para os recursos de usinagem e tratamento superficial. Para trás, a liberação de trabalho é realizada de acordo com o *pitch* do CCR, ou seja, a cada 5 dias, um volume de trabalho de 5 dias do CCR deve ser liberado. Entretanto, os recursos do corte atendem às três *Process Lanes* secundárias, ou seja, embora seja dedicada a essa *Process Lane*, é compartilhada para as três famílias de produtos que a compõe. O corte precisa, então, atender o *pitch* dos três CCRs, que pode fazer o volume de trabalho variar muito. Foi então definido um pulmão de 5 dias (um *pitch*) entre o corte e cada um dos CCR, de forma que, conforme o consumo de cada CCR, o *mix* de produção do corte pode ser ajustado. A figura 6.38 apresenta um mapeamento do fluxo de valor realizado em 2006, para fabricar a Mesa Plana ilustrada na seção anterior.

Apesar desse pulmão de 5 dias ser significativo no *lead time* dos produtos intermediários, ele foi fundamental para trazer estabilidade para o CCR e lidar com a variabilidade do processo de corte, uma vez que por se tratar de *Process Lanes* menos repetitivas, a quantidade e espessura de chapas a serem cortadas para um mesmo volume de trabalho para o CCR, pode variar consideravelmente, fazendo o tempo de ciclo desse processo variar. No início da implementação o pulmão foi definido em 10 dias, mas após a estabilização da *Process Lane* foi, então, reduzido para os 5 dias atuais.

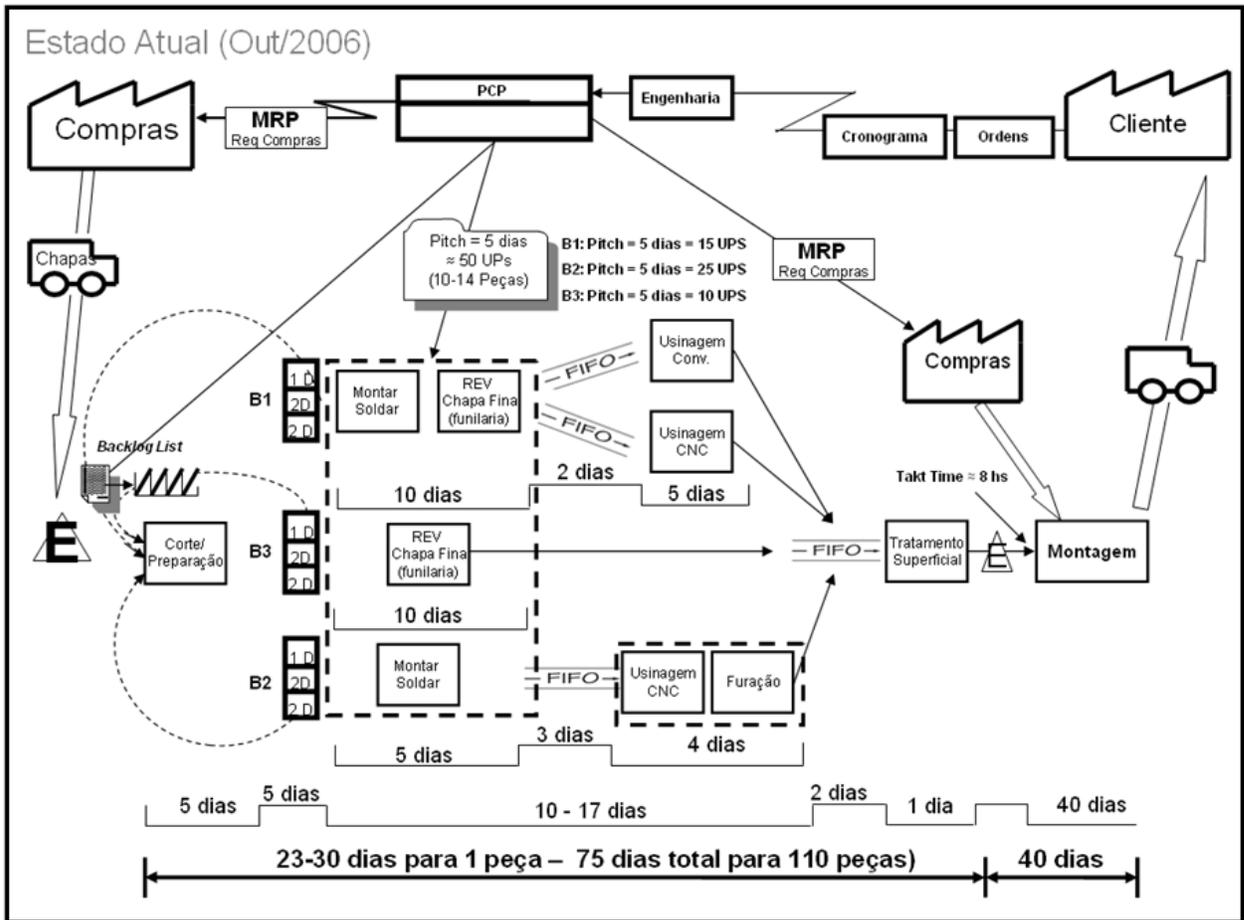


Figura 6.38 - Mapeamento do Fluxo de Valor - Projeto “Y”

Nesse caso, o *lead time* de fabricação de um produto desde o início até chegar na pré-montagem, pode variar de 23 a 30 dias, dependendo da *Process Lane*. Para a fabricação de todos os 110 produtos são necessários mais 45 dias após o término dos primeiros produtos, pois o ritmo é, em média, 11 produtos a cada 5 dias (*pitch*). Portanto, o *lead time* de fabricação dos produtos intermediários dessa seção é de aproximadamente 75 dias. Já a pré-montagem, nesse caso, ocorre também em simultaneidade com o final da fabricação.

Como se pode perceber, para cada novo projeto, de acordo com a unidade de montagem que será entregue, um novo mapeamento é realizado com as definições de demanda, balanceamento, nivelamento, apresentados anteriormente.

6.9 Caixa de Entrada - Família A

Como foi apresentado na seção 6.2.1, a caixa de entrada é o primeiro processo da máquina de papel e está localizada na seção de formação ou seção da tela. A função da caixa de entrada é distribuir uniformemente a massa fibrosa em suspensão, ao longo de toda a largura da máquina, a um fluxo com volume constante, na zona de formação da folha. A polpa de celulose é conduzida para dentro da caixa de entrada através de um tubo transversal à mesma, chamado tubo cônico. A partir do tubo cônico, a polpa passa através de um banco de tubos, chamado turbilhão. O turbilhão é responsável pela homogeneização da polpa, para que a mesma seja transportada para a seção de formação (seção da tela) em forma de um jato inteiriço com espessura calibrada e perfil transversal uniforme de velocidade. É dimensionada hidraulicamente conforme a produção especificada e calculada mecanicamente para a pressão e largura de projeto, atendendo as exigências específicas dos vários produtos produzidos na máquina de papel. Mais que um simples equipamento hidráulico de distribuição, a caixa de entrada possui características de performance que resultam diretamente na qualidade final do produto e na produtividade da máquina.

A caixa de entrada é uma unidade de montagem completa, que pode ser vendida, montada e entregue individualmente, completamente testada e pronta para ser instalada em campo.

A figura 6.39 mostra uma representação esquemática da caixa de entrada e uma foto do produto final pronto para ser expedido.

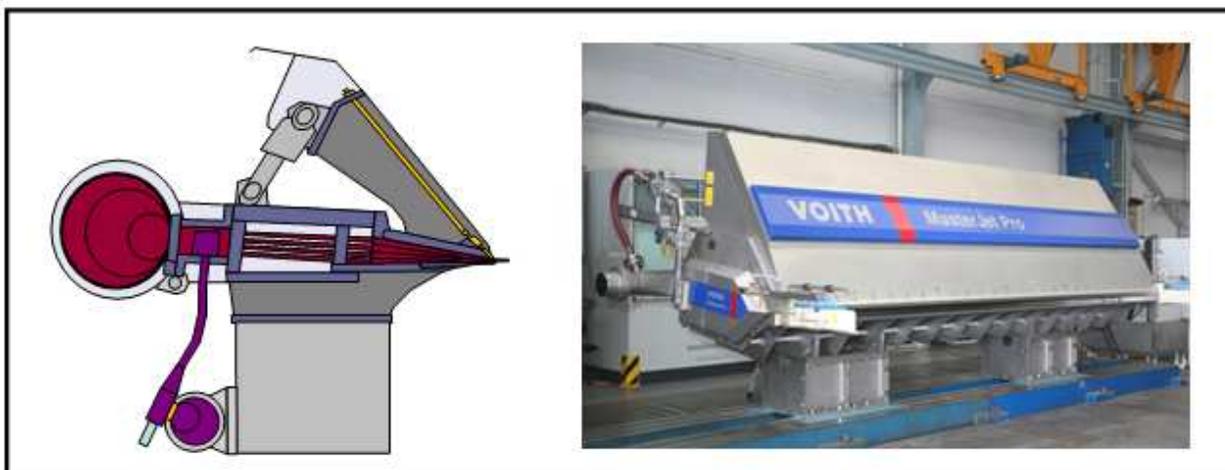


Figura 6.39 - Caixa de Entrada

6.9.1 Mapear Fluxo de Valor e Analisar o Nível de Repetição

Existe uma variedade de modelos de caixa de entrada que são utilizados de acordo com o papel a ser fabricado, largura da máquina e velocidade de trabalho. Entretanto, de acordo com divisão realizada pela matriz, apenas três modelos de caixa de entrada, de até 7 metros de largura, podem ser produzidas no Brasil, o que diminui muito a diversidade de produtos dessa *Process Lane*. Dessa forma, os produtos intermediários fabricados internamente são basicamente os mesmos, com alguma variação de quantidade de alguns componentes, dependendo do tipo da caixa de entrada, e os processos de fabricação são muito similares, tendo seu tempo de ciclo variando em função da largura e velocidade da máquina.

O processo de manufatura desse produto passam pelos processos de corte, dobra, construção metálica (montagem e solda ou funilaria), usinagem em plainas e centros de usinagem CNC, acabamento com polimento e eletro-polimento, tratamento superficial e, finalmente, a pré-montagem do produto final.

Inicialmente, os produtos intermediários que compõem a caixa de entrada eram produzidos nos *Job Shops* em conjunto com os demais produtos prismáticos das famílias B e C. Como consequência dessa situação inicial, além dos longos *lead time* de fabricação, uma vez que os produtos competiam nos *Job Shops* com muitos produtos distintos, ficando parado nas filas das máquinas, não havia sincronização na fabricação e chegada dos produtos intermediários para a montagem. Dessa forma, a montagem também apresentava longo *lead time* pela constante falta dos produtos de fabricação interna.

A figura 6.40 apresenta o mapeamento do fluxo de valor simplificado com o processo de fabricação e montagem da caixa de entrada considerando os *Job Shops* iniciais, realizado em agosto de 2004. A princípio, consideraram-se todos os componentes que compõem a caixa de entrada como sendo uma única família de produtos. Como o processo ocorria sem foco em um único produto, algumas etapas do mapa do estado atual não puderam ser representadas como, por exemplo a determinação do estoque entre cada processo. Entretanto foi possível determinar o *lead time* total de uma caixa de entrada em produção no momento do mapeamento.

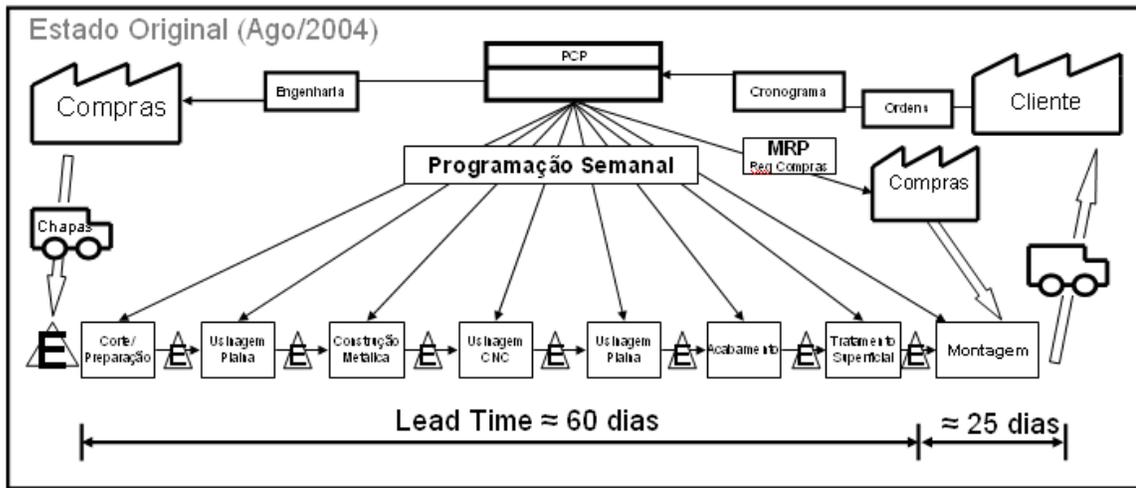


Figura 6.40 - Mapeamento do Fluxo de Valor: Mapa do Estado Original Caixa de Entrada

Para aumentar o nível de repetição desse fluxo de valor, foi necessário dividir os produtos intermediários em duas famílias, cada uma com produtos intermediários com roteiros similares, ou seja, que apresentam a mesma sequência de processos de fabricação. A divisão realizada segue o mesmo processo apresentado na seção 6.5 de similaridade de processos.

Os produtos intermediários fabricados internamente foram então divididos em duas famílias, conforme tabela 6.7, sendo todos os produtos fabricados em aço inox. Os componentes soldados, que passam pelo processo de corte, construção metálica (montagem e solda), usinagem em fresadora CNC, polimento, eletro-polimento e tratamento superficial. Esses são os itens de maior *lead time* e entre eles estão a mesa, a viga do lábio superior, o turbilhão e o tubo cônico. O segundo grupo são produtos planos, composto de chapas cortadas em jato d'água que passam, depois do corte, pelos processo de plaina, fresadora CNC, polimento e eletro-polimento e tratamento superficial. A figura 6.41 apresenta uma ilustração dos principais produtos intermediários da Caixa de Entrada.

Tabela 6.7 - Subdivisão das Famílias de Produtos

Família	Produtos Intermediários	Corte Inox	Montar/Soldar	Plaina 1	CNC	Plaina 2	Decapagem	Eletro-polimento	Acabamento	Montagem
A1	Produtos Soldados	X	X		X	X	X	X	X	X
A2	Produtos Planos	X		X	X	X	X	X	X	X

No processo de pré-montagem, uma série de componentes mecânicos, eletrônicos, hidráulicos e de automação são recebidos para serem montados em conjuntos com os produtos

intermediários fabricados internamente. Durante essa pré-montagem alguns testes são realizados e o produto final entregue está pronto para ser instalado na máquina.

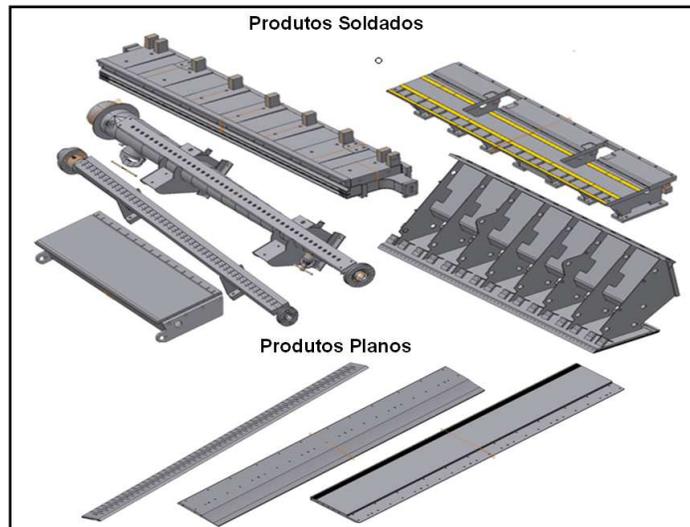


Figura 6.41 - Principais Produtos Intermediários para Caixa de Entrada

Considerando os tipos de caixa de entrada e a faixa de larguras fabricada na unidade brasileira, esse fluxo de valor pode ser considerado semi repetitivo pois os componentes apresentam alto nível de distinção porém baixa diversificação (apenas três dos nove produtos intermediários apresentam maior diversificação de acordo com o tipo de caixa de entrada).

Por se tratar de um caso semi repetitivo, ou seja, intermediário entre o caso repetitivo (família D) e o caso não repetitivo (família B), essa família de produtos traz semelhanças com os casos anteriores, tendendo mais ao caso da Família de produtos B, por maior similaridade de alguns processos, já que esses produtos eram, inicialmente, fabricados no mesmo *Job Shop*. Para evitar algumas repetições com partes das seções anteriores, alguns detalhes foram omitidos nesta seção e reportados apenas a semelhança com um dos outros casos.

6.9.2 Criação da *Process Lanes* com Recursos Dedicados

Essa família de produtos foi um dos projetos pilotos da implementação e se encontra em fase avançada de consolidação da *Process Lane*. No entanto, como nos demais casos, a criação da *Process Lane* se deu em duas etapas, a primeira, com dedicação de recursos nos *Job Shops*

originais, sem mudança no *layout*, em uma *Process Lane* “virtual” e a segunda, com a mudança definitiva do *layout*.

As figuras 6.42 a 6.44 ilustram como se deu a dedicação dos recursos no *layout* original. A princípio, o processo de corte e preparação não foi dedicado. O processo de construção metálica foi separado em uma pequena área do próprio *Job Shop* e um número de colaboradores foram dedicados. Na usinagem, duas máquinas de cada tipo, Centro de Usinagem CNC e Plaina, foram dedicadas à fabricação da caixa de entrada. A montagem seguiu o mesmo processo da construção metálica, com a separação de um número de colaboradores dedicados. Os processos de acabamento e tratamento superficial foram integrados ao processo de montagem. A figura 6.42 apresenta o *layout* original da empresa com os recursos e áreas dedicados a fabricação dessa família de produtos na formação de uma *Process Lane* “virtual”.

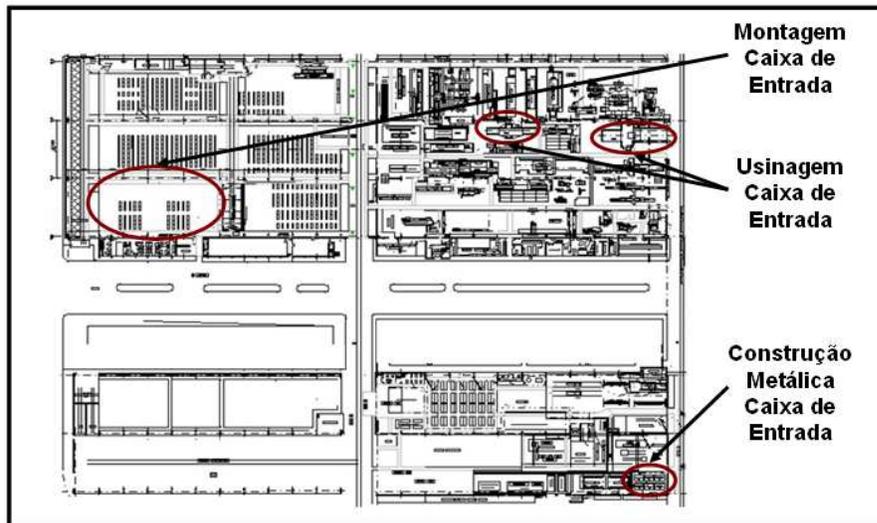


Figura 6.42 - *Process Lane* Virtual - Recursos Dedicados nos *Job Shops* Originais

Em um segundo momento, três anos após o início da implementação, a empresa também se aproveitou da compra de uma máquina e realizou uma mudança de *layout*, criando a *Process Lane* para esse produto. Em função do nível de repetição, semi repetitivo, a opção de *layout* foi por uma mini-fábrica, mais flexível que uma linha e uma célula de produção.

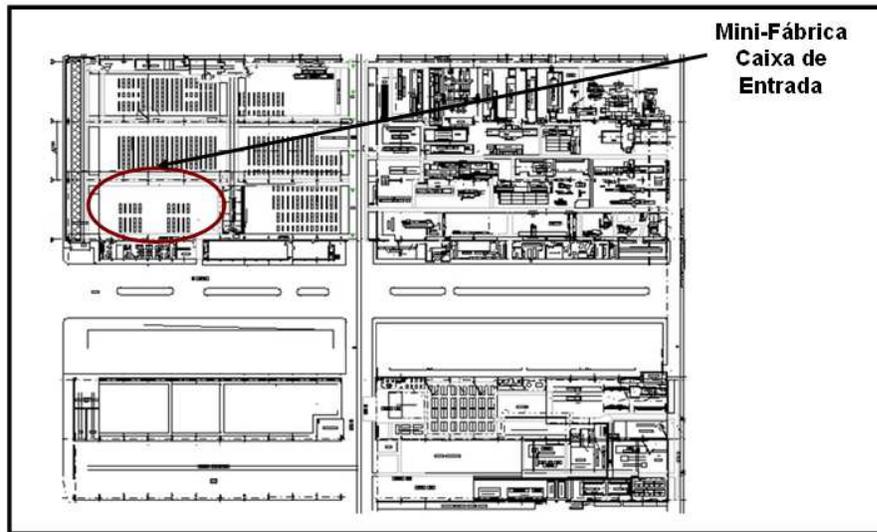


Figura 6.43 - Local Definido para Instalação da Mini-Fábrica de Caixa de Entrada

O local escolhido para essa *Process Lane*, foi a área inicialmente dedicada para montagem desse produto. As figuras 6.43 e 6.44 ilustram a posição da mini-fábrica no *layout* inicial da empresa e o projeto da mini-fábrica. Já a figura 6.45 traz uma foto da mini-fábrica atualmente.

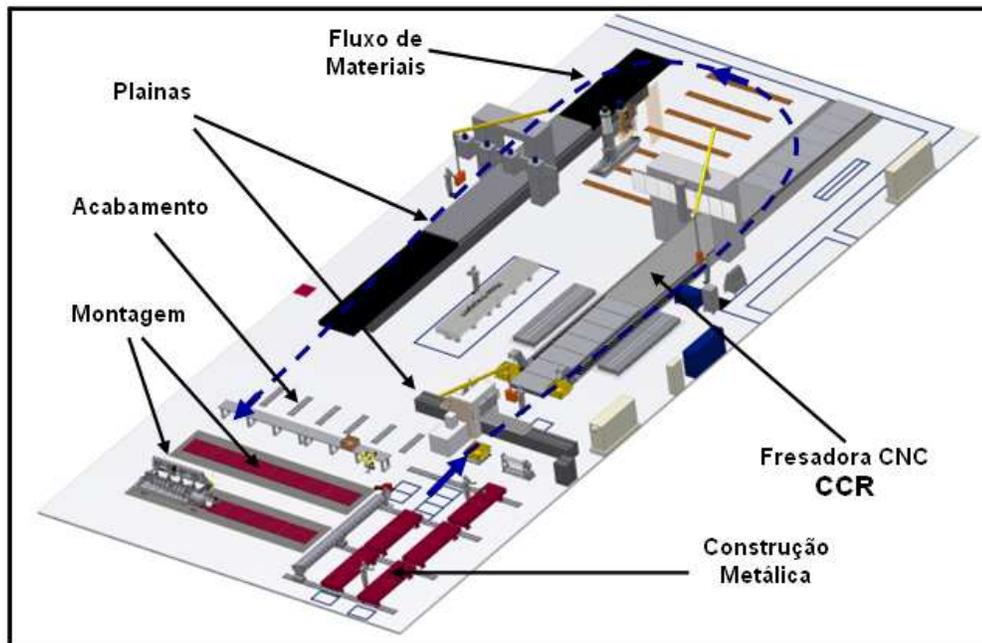


Figura 6.44 - Projeto da Mini-fábrica de Caixa de Entrada



Figura 6.45 - Foto da Mini-Fábrica de Caixa de Entrada

6.9.3 Identificar o *Pacemaker* - Processo Cadenciador

Durante o mapeamento e dedicação dos recursos, tanto a plaina quanto a máquina CNC foram candidatas a CCR, pois apresentavam tempos de ciclo muito próximos. Na primeira fase, com a *Process Lane* virtual, havia duas máquinas de cada dedicadas a esse produto. No entanto, na segunda fase da criação da *Process Lane*, apenas uma máquina CNC foi alocada na mini-fábrica, enquanto que as duas plainas continuaram dedicadas a esse produto. Essa máquina, portanto, passou a ser o CCR da *Process Lane*, o único processo a ser programado e foco da maioria das ações de melhoria.

6.9.4 Nivelar a Produção - *Takt Time*

Um dos motivos para a escolha do produto caixa de entrada para ser o piloto dessa implementação foi a demanda existente a época por esse produto.

Essa unidade de montagem apresenta tanto demanda dependente, com a venda de novas máquinas de papel ou modernização da seção de formação, quanto independente, oriunda das vendas das demais unidades do grupo ou troca de uma caixa de entrada obsoleta. Uma máquina

de papel, dependendo de sua aplicação, pode ter mais que uma caixa de entrada podendo chegar a ter no máximo 4 caixas em uma única máquina. Já nas modernizações, a caixa de entrada é um dos principais itens a serem substituídos, por se tratar de um gargalo da máquina de papel que deve ser trocado para que se possa aumentar a velocidade ou mudar o tipo de papel fabricado pela máquina.

Outro motivo para a alta demanda desse produto é que apenas duas unidades da companhia são centros de produção, ou seja, além da matriz, apenas a planta de São Paulo produz essa unidade de montagem, independente da unidade que tenha realizado a venda. Esse fato garante uma certa estabilidade de demanda e maior nível de repetição da *Process Lane*, uma vez que a matriz tem fabricado as caixas de entrada mais complexas e para máquinas mais largas, mantendo a demanda da planta brasileira com apenas três modelos e uma determinada faixa de larguras.

Conforme apresentado na seção 5.7.1, o primeiro passo é verificar o *Takt Time* para a unidade de montagem para, a seguir, determinar o *Takt Time* para os produtos intermediários que a compõe.

À época, outubro de 2004, havia uma expectativa de vendas globais de caixa de entrada de aproximadamente 50 caixas de entrada por ano pela empresa, e que um terço delas poderia ser fabricado na planta do Brasil, caso a unidade tivesse capacidade para isso. Nesse momento ficou decidido que um *Takt Time* de três semanas seria uma meta para essa *Process Lane*.

Assim como todos os produtos da empresa, até aquele momento, quando havia dois ou três projetos em carteira, todos passavam pela engenharia e pela manufatura em simultaneidade. Era comum que ao mesmo tempo houvesse até três caixas de entrada sendo fabricadas e montadas ao mesmo tempo. Dessa forma, sem foco em um único projeto por vez, os *lead time* de engenharia e fabricação eram muito longos, podendo chegar a 9 meses no total, sendo a fabricação responsável por metade desse tempo.

O primeiro passo para atingir o nivelamento então, da mesma forma como apresentado para as demais famílias de produtos, foi reduzir a simultaneidade entre os projetos, mantendo o conceito de “*one project flow*”, ou seja, fazer um projeto por vez. Na montagem, por exemplo, cada caixa de entrada seria montada individualmente, só iniciando a próxima após o término da primeira.

A figura 6.46 apresenta um *pipeline* real de montagem do ano de 2011/2012 com 14 caixas de entrada de diversos modelos a serem fabricadas. Pode-se verificar que a demanda prevista de 17 caixas por ano não é a realidade desse período, mas que a empresa procura manter um ritmo constante de fabricação, evitando alterar o *Takt Time* com frequência. O intervalo de tempo entre o término da montagem e a expedição (pontos pretos na figura), equivale ao pulmão de expedição, apresentado pela teoria das restrições. Muitas vezes, no entanto, para atingir o nivelamento e manter o ritmo, como não é possível produzir esse produto para estoque, a empresa precisa antecipar ainda mais a conclusão de alguns projetos, fazendo com que fiquem prontos antes do momento necessário. Como apresentado na seção 5.7.1, o benefício de ter uma linha nivelada, supera em muito, o prejuízo dessa antecipação.

Pode-se notar, também, que como se trata de uma linha semi repetitiva, existem modelos e larguras diferentes de caixas de entrada. A empresa, no entanto, procura sempre que possível manter o ritmo de três semanas, sendo necessário, nos casos de produtos menores, trabalhar menos dias por semana ou menos horas por dia e no caso de produtos maiores ou mais complexos, trabalhar em regime de horas extras aos sábados e domingos para manter o ritmo constante de três semanas. Entretanto, mesmo utilizando esses recursos, alguns modelos e larguras de caixa de entrada precisam de um tempo de ciclo maior, como é o caso das máquinas *tissue* de dupla largura. Nessa situação, a empresa poderia até aumentar os recursos de montagem, reduzindo o tempo de ciclo e mantendo o mesmo ritmo. No entanto, como se trata de um período onde a demanda é menor que a capacidade ativada da mini-fábrica, é possível lidar com essa variabilidade.

De acordo com o método apresentado no capítulo anterior, o próximo passo é definir o *Takt Time* para os produtos intermediários que compõe a unidade de montagem. Cada caixa de entrada é composta de 7 a 9 produtos intermediários fabricados internamente pela empresa, dependendo do tipo de caixa de entrada vendida. Considerando também a demanda por peças de reposição, principalmente dos produtos planos, decidiu-se considerar a demanda de 9 produtos intermediários para cada período de três semanas, que é o *Takt Time* da unidade de montagem. Isso representa um *Takt Time* de dois dias para essa *Process Lane* que trabalha até 6 dias por semana no CCR.

6.9.7 Sistema de Coordenação de Ordens Híbrido

O sistema híbrido de coordenação de ordens proposto para essa *Process Lane* utiliza os princípios do DBR apresentado na seção 4.5.2 e já utilizado na *Process Lane* da família de produtos B.

Como foi apresentado anteriormente, no primeiro momento, com a *Process Lane* virtual, cada família de produtos intermediários, produtos planos e os produtos soldados, passavam por máquinas distintas, formando duas *Process Lanes* separadas. Com a formação da mini-fábrica com apenas uma Máquina CNC, todos os produtos intermediários precisam passar pelo CCR, aumentando a complexidade para a programação da linha, já que cada família de produto é proveniente de processos diferentes.

O CCR recebe a programação de forma a atender a necessidade de montagem de cada caixa de entrada. Um pulmão de três dias foi estabelecido em frente a essa máquina. Como os tempos de ciclo entre cada produto pode variar, esse pulmão de três dias pode representar uma, duas ou três peças. O consumo desse pulmão é a autorização, o gatilho, para iniciar ou parar a produção nos processos iniciais, a corda.

Do CCR para frente, os produtos seguem em fluxo contínuo, com um roteiro similar, passando pelo processo de plaina, acabamento e tratamento superficial, com uma exceção que não necessita passar pela plaina, indo diretamente para o acabamento.

A figura 6.47 apresenta o Mapeamento do Fluxo de Valor atual e ilustra o funcionamento do DBR na *Process Lane* de Caixa de Entrada.

Como vimos anteriormente, essa família foi um dos projetos pilotos dessa implementação e está hoje mais consolidada. O *lead time* de fabricação foi reduzido em aproximadamente 50% e a *Process Lane* está hoje preparada para a demanda de 17 caixas de entrada por ano.

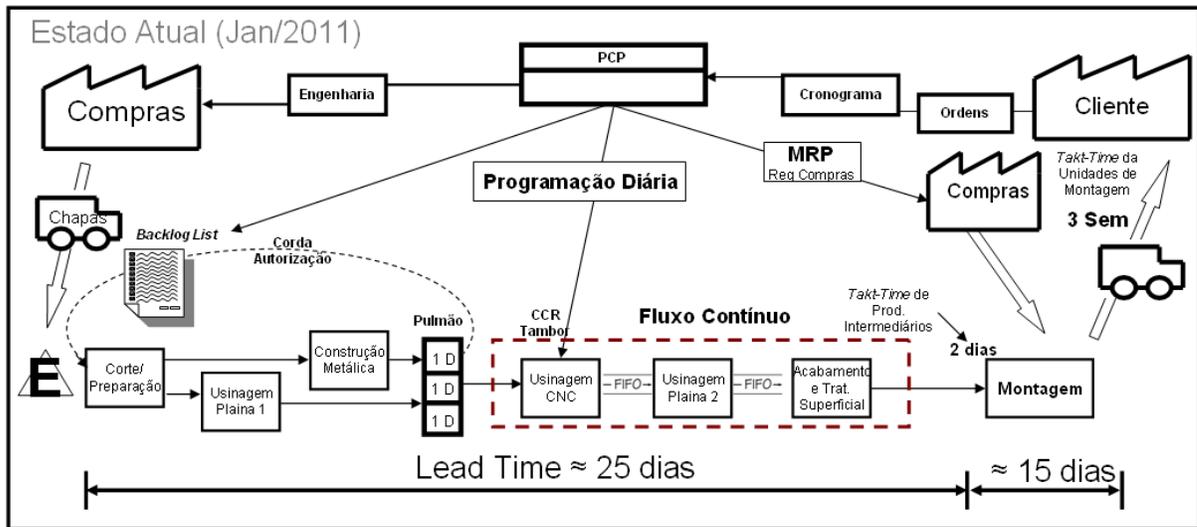


Figura 6.47 - Mapeamento do Fluxo de Valor da Caixa de Entrada

6.10 Melhoria Contínua

Os resultados apresentados nas seções anteriores de redução de do estoque em processo e redução de *lead time* não ocorreram em uma única etapa. Um processo de melhoria incremental foi desenvolvido gradativamente seguindo os passos apresentados na seção 5.9. Muitas dessas ações foram apresentadas nas seções anteriores durante explanação das etapas em cada *Process Lane*. Nesta seção será feito um resumo das principais ações, seguindo os passos do processo apresentado na seção 5.9.

1. **Eliminar os desperdícios mais óbvios:** Com a formação da *Process Lanes* com recursos dedicados e a utilização dos SCOs híbridos, alguns desperdícios foram sendo gradativamente eliminados.
 - 1.1 Espera e transporte: com a formação das linhas e mini-fábricas com recursos dedicados houve uma redução do tempo de transporte entre os diversos *Job Shops*, do tempo e área de armazenagem entre os processos e do tempo de espera nas filas das máquinas que antes eram compartilhadas e atualmente estão dedicadas a cada uma das *Process Lanes*.
 - 1.2 Superprodução: a implementação dos SCO híbridos controla os níveis de WIP, evitando a superprodução, autoriza a fabricação de cada parte de acordo o estado da linha e interliga os processos que não estão no fluxo contínuo fazendo com que os

produtos intermediários de cada *Process Lane* sejam produzidos apenas no momento em que são necessários no processo seguinte.

- 1.3 **Qualidade:** Em especial na família de cilindros secadores, a redução do tamanho dos lotes de transferência e o fluxo unitário de peças fez com que os produtos intermediários fossem utilizados mais rapidamente nos processos seguintes, fazendo com que um problema de qualidade fosse identificado mais rapidamente, corrigindo o processo e evitando que mais produtos fossem produzidos com o mesmo defeito.
- 1.4 **Processos:** Os mapeamentos apresentados também fizeram com que os processos fossem repensados com a separação de algumas etapas, o agrupamento de outras e até a eliminação de algumas etapas. Por exemplo, nas *Process Lanes* da família de produtos B e A, na situação inicial, como muitos produtos ficavam parados entre os processos de construção metálica e usinagem, era necessário um processo de tratamento superficial que, após a formação das *Process Lanes*, foi simplesmente eliminado, já que os produtos não ficavam mais parados entre os dois processos.
- 1.5 **Movimentação:** Com a criação das *Process Lanes*, as ferramentas de trabalho para cada operação foram organizadas próximas aos postos de trabalho dedicados reduzindo o tempo de movimentação e localização da ferramentas nos *Shop Jobs* flexíveis iniciais. Com a dedicação de recursos dessas *Process Lanes* também os materiais chegam dos processos anteriores nos locais exatos que serão utilizados, evitando a movimentação de buscar o material necessário.
2. **Delimitar o pulmão de inventário:** Como vimos, durante a implementação de cada SCO híbrido, um determinado pulmão de inventário foi determinado para cada *Process Lane*. Esse pulmão foi definido pelo volume de produtos aceito em cada FIFO ou pelo número de cartões do sistema CONWIP. No início da implementação, um volume maior de estoque em processo foi aceito, uma vez que havia a preocupação de parada frequente das *Process Lanes*. Por exemplo, na linha de cilindros secadores, inicialmente o sistema CONWIP não foi utilizado, e o estoque em processo foi controlado por meio de áreas demarcadas para o FIFO em frente de cada máquina. O pulmão de inventário, na forma de estoque em processo, permitido era de até 30 produtos intermediários em toda a *Process Lane* o que gerava um *lead time* de 30 dias.

3. **Determinar o pulmão de capacidade:** Como apresentado nas seções 6.7.6 e 6.8.6, durante o processo de balanceamento da *Process Lane* de cilindros secadores, um determinado nível de capacidade protetora foi estabelecido para os recursos não-restritivos, de forma a poder absorver as variabilidades do processo. Nas linhas menos repetitivas, mesmo no CCR precisou ser mantido um certo nível de capacidade protetora, seja no intervalo dos turnos ou finais de semana, para lidar com a própria variedade de produtos, dada a maior diversidade dos produtos intermediários dessas famílias.
4. **Determinar um pulmão de tempo:** Como apresentado nas seções 6.7.5, 6.8.5 e 6.9.5, durante o nivelamento e a criação dos *pipelines* de cada unidade de montagem, uma certa antecipação do prazo de entrega é planejada para garantir a pontualidade de entrega, fator competitivo nesse negócio, e para lidar com a variabilidade de demanda, uma vez que não é possível fabricar para estoque. Nas *Process Lanes* em que o DBR foi utilizado, o pulmão de tempo antes do CCR e antes da montagem também foi estabelecido de forma a dar estabilidade ao CCR e ao processo de pré-montagem das unidades de montagem.
5. **Reduzir a variabilidade gradativamente:** À medida que as *Process Lanes* e os SCOs híbridos foram implementados, algumas variabilidades que estavam “escondidas” no processo, se tornaram mais evidentes, como a quebra frequente de máquinas, a falta de treinamento de alguns operadores que faziam variar demasiadamente o tempo de ciclo de alguns processos, os altos tempos de *setup* de alguns recursos e a falta ou perda de ferramentas que geravam grande tempo de movimentação e procura para localizá-las. Nesse sentido algumas técnicas e ferramentas foram implementadas:
 - 5.1 5S: Apesar de ser uma técnica que já vinha sendo implementada antes mesmo do início da criação das *Process Lanes*, foi intensificado após a criação de cada *Process Lane*, com a consolidação do 4º e 5º SS de forma que além da limpeza e organização do local de trabalho, fosse monitorada a padronização dos locais das ferramentas e dispositivos.
 - 5.2 TPM: Também iniciado antes do início desta pesquisa-ação, foi direcionado inicialmente para os CCRs de cada *Process Lanes* e para os recursos com tempo de

ciclo muito próximo aos do CCR de forma a evitar que esses recursos de tornassem restrições temporárias por quebras.

- 5.3 Trabalho Padronizado: principalmente nas linhas mais repetitivas, como a de cilindros secadores, a ferramenta de trabalho padronizado é utilizada e revisada a cada projeto de forma que o trabalho de cada operador é detalhado, com a separação dos tempos manuais e automáticos, definição do estoque padrão em processo, definição do gráfico de balanceamento dos operadores, GBO, e definição do diagrama de trabalho padronizado. Dessa forma, juntamente com o treinamento de cada colaborador, conseguiu-se uma maior estabilidade dos tempos de ciclo de cada processo, garantindo uma maior confiabilidade do balanceamento de cada recurso.
- 5.4 SMED: Essa ferramenta, até o momento, foi utilizada apenas pontualmente nos recursos em que o mapeamento apontava o tempo de *setup* como causa para a geração de grandes lotes de transferência ou mesmo de processamento, como no caso da máquina de corte das famílias A, B e C, na máquina de usinagem de pontas de eixo e tampas de cilindro secadores e na máquina CNC (CCR) da caixa de entrada.
6. **Reduzir o pulmão de inventário:** Após a estabilização de cada *Process Lane* é realizado uma reavaliação dos estoque em processo aceito entre cada processo e no fluxo de valor como um todo. Na linha de cilindro secadores, utilizado como exemplo no item 2, o estoque em processo atual é de 20 cilindros secadores na *Process Lane*, o que representa uma redução de 66% em relação ao primeiro mapeamento (60 dias) e de 33% em relação aos primeiros resultados da implementação (30 dias). No mapa do estado futuro proposto atualmente com a implementação do CONWIP o objetivo é alcançar 15 peças no fluxo de valor completo o que representaria um *lead time* de 15 dias nessa linha.
7. **Reavaliar o pulmão de tempo:** Apesar do pulmão de tempo utilizado no final dos projetos ainda não ter sido reduzido para nenhuma das famílias de produtos, em função da variabilidade muito grande da demanda, o pulmão de tempo antes do CCR de cada *Process Lane* e antes da montagem é reavaliado com frequência. O pulmão da *Process Lane* da família de produtos B, antes do processo de construção metálica foi definido inicialmente com 10 dias em função do compartilhamento e da grande

variabilidade existente no processo de corte. Atualmente, conforme apresentado no mapeamento da seção 6.8.7, esse pulmão é definido em 5 dias.

8. **Reduzir o Pulmão de Capacidade:** Esse pulmão de capacidade, embora monitorado frequentemente, não foi reduzido em praticamente nenhum recurso.
9. **Reiniciar o processo:** Toda vez que ocorre alguma melhoria no fluxo de valor em função das etapas anteriores do método ou do próprio processo de melhoria contínua, um novo mapeamento é realizado de forma a identificar se surgiram novos recursos restritivos, novas variabilidades ou mesmo novas oportunidades como o desligamento de uma máquina, a alocação de um recurso para a fabricação de um novo produto, etc.

Alguns outros resultados importantes alcançados nesse processo de melhoria contínua foram:

- a) **Redução dos *hot jobs*** ou trabalhos urgentes: Um dos maiores problemas do ambiente de produção de grandes equipamentos sob encomenda enfrentado pela empresa eram os trabalhos urgentes e imprevistos, geralmente causados por um novo pedido de peças de reposição, uma mudança de projeto por solicitação do cliente entre outros fatores. Esses *hot jobs* precisam ser entregues com rapidez e não podiam esperar e seguir o processo e sequência normais de fabricação dos *Job Shop* iniciais. Como os *lead times* de produção eram longos, com frequentes paradas em filas de estoque em processo ao longo de todo o fluxo de valor era necessário uma mudança de sequência das partes a serem produzidas em cada recurso, fazendo esse trabalho urgente “furar as filas” dos trabalhos que foram liberados antes dele.

O método proposto, com a manutenção de um fluxo mais próximo do fluxo contínuo e uniforme, a drástica redução dos estoques em processo, o nivelamento de produção e a liberação dos trabalhos apenas quando são necessários, trouxe o benefício de minimizar a quantidade de *hot jobs* do sistema de produção. A razão é que os *lead times* passaram a ser mais curtos, geralmente curtos o suficiente, para que esses supostos *hot jobs* possam ser liberados normalmente no início do processo (o primeiro da *backlog list*) e serem processados normalmente como qualquer outro trabalho, atendendo a data de entrega do produto sem causar distúrbios no fluxo e

mudança na sequência de produção, mantendo o FIFO e o nivelamento da *Process Lane*.

- b) **Redução das Modificações de Engenharia:** Outro problema constante enfrentado pela empresa e típico do ambiente de produção de grandes equipamentos sob encomenda eram as modificações de projeto pela engenharia, que causavam grande volume de retrabalho e contra-fluxo de produção. Essas modificações são causadas pelo processo de engenharia simultânea com a manufatura, onde alguns produtos começam a ser produzidos enquanto outros, que compõe o mesmo equipamento ainda estão sendo projetados (customizados). Novamente, a redução dos estoque em processos, reduziu o risco dessas modificações causarem problemas, mais variabilidade, para as *Process Lanes*. A razão é que os curtos *lead times* de produção alcançados possibilitaram iniciar a produção de cada produto intermediário no momento mais tarde possível, permitindo que no momento que os trabalhos sejam liberados o projeto do equipamento esteja mais avançado e consolidado.

7 CONCLUSÕES E DISCUSSÃO FINAL

Com base na revisão bibliográfica, no método proposto no capítulo 5 e na pesquisa-ação apresentada no 6, esta seção retoma os objetivos e as questões de pesquisa e indica as conclusões que podem ser formuladas a partir deste estudo, suas limitações e generalizações bem como propostas para estudos futuros.

As questões apresentadas no início da pesquisa são apresentadas a seguir:

- a) Os princípios e técnicas da produção enxuta são aderentes ao ambiente de produção de bens de capital sob encomenda?
- b) Quais são as características do ambiente de produção de bens de capital sob encomenda que dificultam a aplicação dos princípios e técnicas da produção enxuta?
- c) A teoria das restrições pode ser adotada para suportar os princípios da produção enxuta nesse ambiente?
- d) Que Sistemas de Coordenação de Ordens (SCO) podem ser utilizados para sustentar os princípios da produção enxuta e da teoria das restrições nesse ambiente?

Em resposta à primeira questão, verifica-se pela análise efetuada na seção 3.10 que nem todas as ferramentas e técnicas da produção enxuta são igualmente aderentes ao ambiente de produção estudado.

As características desse ambiente que dificultam a implementação de tais técnicas e ferramentas (segunda questão de pesquisa), conforme apresentado no capítulo dois e discutido na seção 3.10, advêm da diversidade da demanda dos clientes com a alta variedade de produtos, tanto distinção quanto diversificação, que implicam na variação do tempo de ciclos e altos tempos de *setup*, baixo volume de produção, *layout* funcional (*Job Shops*), longos *lead times* de cada projeto além da própria produção sob encomenda, que não permite a manutenção de estoques de produtos finais e, muitas vezes, nem de produtos intermediários, o que dificulta o nivelamento de produção. Além disto, o tamanho e porte do produto final dessas empresas, cuja montagem final muitas vezes só é possível de ser realizada na planta do próprio cliente ou em uma área externa à empresa (uma doca, por exemplo), dificulta a conexão entre a estrutura do projeto (WBS) e o plano mestre de produção da empresa.

Para superar tais desafios e atingir a produção enxuta nesse ambiente, o método apresentado propõe a divisão do projeto em uma estrutura de projeto orientada a produto, a

PWBS, conforme sugerido por Storch e Lim (1999), com a definição de um módulo chamado de unidade de montagem que é o produto final da planta de produção; a separação dos produtos intermediários que compõem tal módulo em famílias de produtos fabricados em fluxos de valor dedicados a cada uma dessas famílias, as *Process Lanes*; desenvolver e manter um fluxo contínuo e uniforme na fabricação desses produtos intermediários; nivelar a produção programando a fabricação de um único projeto por vez em cada *Process Lane, one project flow*; e controlar o chão de fábrica por meio de sistemas de coordenação de ordens híbridos.

Portanto, para atingir o fluxo contínuo na fabricação dos produtos intermediários, os recursos do *Job Shop* original devem ser dedicados a cada uma das famílias de produtos formando *Process Lanes*, “virtuais” ou reais, que devem ser organizadas e controladas de acordo com grau de variedade dos produtos intermediários que produzem. Ou seja, mesmo com essa divisão em *Process Lanes*, pode-se obter fluxos de valor com menor ou maior nível de repetição de acordo com o grau de variedade, distinção ou diversificação, dos produtos intermediários que compõem a família de produtos. À medida que se aumenta o grau de diversificação dos produtos e, portanto, se reduz o nível de repetição da *Process Lane*, maiores são as variabilidades, de tempo de ciclo, tempos de *setup*, etc, impostas a cada recurso e ao fluxo como um todo, o que dificulta a manutenção de um fluxo contínuo e estável em todo o fluxo de valor.

Para superar tal desafio, este trabalho propôs e comprovou a utilização da TOC com foco na gestão das restrições do sistema, a definição e gestão dos pulmões para lidar com a variabilidades do sistema, o balanceamento do fluxo e não da capacidade, a separação entre lote de processamento e lote de transferência e o sistema de coordenação de ordens DBR como suporte aos princípios da produção enxuta nesse ambiente e ao planejamento e controle das *Process Lanes*, o que responde a terceira questão de pesquisa.

Nesse sentido, o método propõe definir o CCR como o *pacemaker* (processo cadenciador) do fluxo de valor, por meio de programação desse recursos de forma a atender o *Takt Time* da *Process Lane* e da subordinação dos demais recursos a essa programação. Propõe ainda a manutenção de pulmões de tempo (de recurso, montagem e expedição) e de capacidade (nos recursos não-restritivos) para lidar com a variabilidade dos fluxos de valor, e um processo de melhoria contínua baseado na gestão de tais pulmões de forma a manter uma boa utilização de cada recursos além de, e principalmente, o estoque em processo controlado, conseqüentemente o *lead time* reduzido e estável, e o cumprimento das datas de entregas assumidas.

Em resposta à quarta questão de pesquisa, este trabalho sugere que cada *Process Lane* seja controlada por um sistema de coordenação de ordens (SCO) híbrido coerente com o nível de repetição de seu fluxo de valor. Para isso o método propõe a utilização do CONWIP, proposto por Spearman *et al* (1990), para *Process Lanes* mais repetitivas, e do DBR, da TOC, para *Process Lanes* menos repetitivas. Vale ressaltar, no entanto, que esses não são os únicos sistemas de coordenação de ordens aderentes a tal ambiente. Outros SCOs já foram comprovados nesse ambiente como o POLCA (*paired cell overlapping loops of cards with authorization*), proposto por Suri, (1998), o LOOR (*load-oriented order-release*) criado por Bechte (1980 *apud* Fernandes e Godinho Filho, 2011) e o PBC, (*period batch control*) criado por R. J. Gigli e apresentado por Burbidge (1994). Entretanto, tais sistemas sustentam outras estratégias de produção, como a manufatura responsiva no caso do POLCA e o *workload control* (WLC) no caso do LOOR, ou não é um sistemas híbrido, no caso do PBC, e portanto, não foram testados em conjunto com o método proposto.

Portanto, de volta à primeira questão da pesquisa, este trabalho comprova que apesar da necessidade da escolha correta e de certas adaptações em suas práticas e ferramentas, da necessidade do emprego da TOC para superar a variabilidade trazida pela alta variedade de produtos e do emprego do correto SCO para cada situação específica, os princípios da produção enxuta são aplicáveis a sistemas de produção de bens de capital de grande porte sob encomenda. A figura 7.1 ilustra como os princípios da produção enxuta, apresentados na seção 3.4 (valor, fluxo de valor, fluxo contínuo, produção puxada e perfeição), estão presentes em cada etapa de implementação do método proposto. A produção “puxada” neste caso, é realizada com sistemas de coordenação de ordens (SCOs) híbridos.

Este método e sua aplicação a partir da pesquisa-ação cujos resultados foram apresentados no capítulo 6, cumprem o objetivo deste trabalho de pesquisa de desenvolver e aplicar um método para a implementação dos princípios da produção enxuta suportados pela teoria das restrições no ambiente de produção de bens de capital sob encomenda, com intuito de reduzir os *lead times* de produção, melhorar a pontualidade de entrega ao cliente, reduzir custos de produção por meio da eliminação dos desperdícios e simplificação do processo de planejamento e controle de produção (PCP).

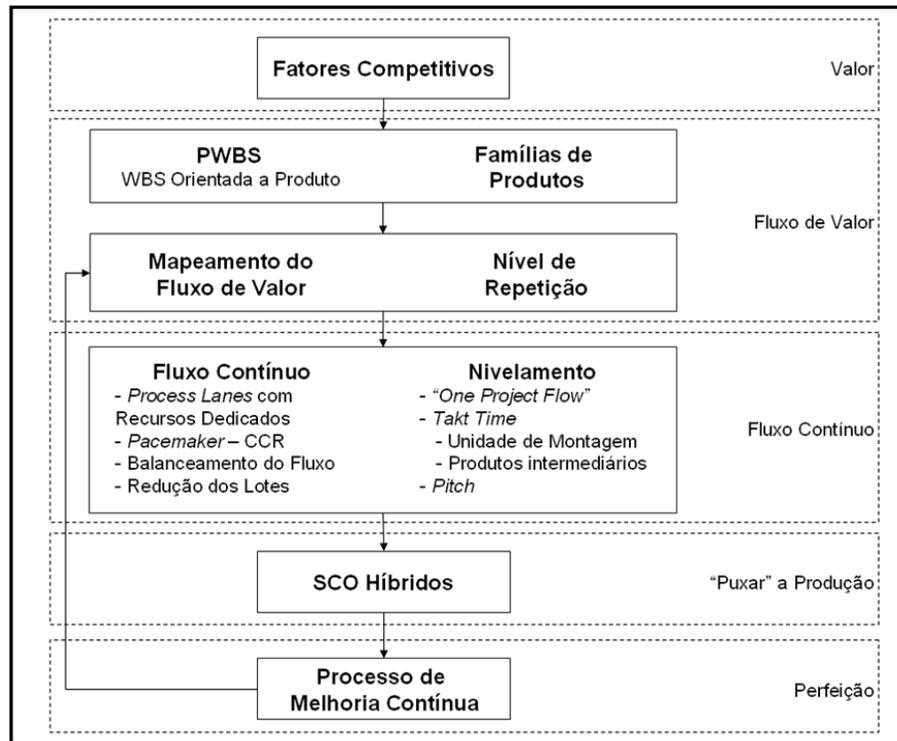


Figura 7.1 -Princípios da Produção Enxuta e Método de Aplicação da Produção Enxuta e da TOC no Ambiente de Produção de Bens de Capital de Grande Porte sob Encomenda.

O método proposto foi estruturado para ser utilizado por empresas do setor de bens de capital de grande porte sob encomenda, também conhecido como sistemas de produção de Grandes Montagens, como é o caso da indústria naval, a de máquinas e equipamentos para mineração, óleo e gás, papel e celulose, hidrelétrica, etc, em que o produto final da empresa só é completamente montado na planta do cliente ou em uma grande área externa e o produto final da planta de produção são módulos para essa montagem final, aqui chamados de unidades de montagem.

Embora, em um primeiro momento, a separação dos produtos em famílias de produtos e a dedicação de recursos possa parecer complexa ou incompatível com esse ambiente, verifica-se pelos resultados apresentados nas seções 2.4, 3.10 e 4.8, que mesmo em um ambiente ETO, em que os produtos passam por um, muitas vezes longo, processo de engenharia de produto após a venda para atenderem as necessidades de cada cliente específico, provavelmente existirão um grande número de produtos semelhantes que passam por processos de produção similares e, portanto, podem ser adequadamente divididos em famílias de produtos, e serem produzidos de forma mais repetitiva em *Process Lanes* dedicadas. Essa característica se dá pois a maioria das empresas que trabalham com processos ETO não utilizam o nível de customização pura, em que

cada produto pode ser concebido a partir do zero a partir das especificações do cliente. Conforme apresentado na seção 2.4, nesse ambiente são mais comuns os níveis de customização da padronização customizada, em que o cliente escolhe entre as opções pré-definidas de produtos que utilizam componentes padronizados, ou a customização adaptada (*tailored customization*), em que um protótipo genérico é alterado de acordo com as necessidades do cliente.

Uma limitação ao método proposto, portanto, se dá em processos de produção com nenhum nível de repetição, em que cada produto é um novo protótipo, “criado a partir do zero”, que passem por processos totalmente independentes e não repetitivos como empresas que trabalham apenas com pesquisa e desenvolvimento para indústria militar ou espacial, por exemplo. Conforme apresentado, esta não é a realidade da maioria das empresas de bens de capital, que geralmente fabricam uma certa gama de produtos, previamente desenvolvidos, que são customizados para cada cliente específico mantendo, portanto, suas características e processo de manufatura padronizados.

Uma generalização do método apresentado é possível para segmentos de bens de capital de menor porte sob encomenda, ETO ou MTO, cujos produtos sejam completamente finalizados dentro da planta de produção e entregues montados e testados para a empresa que irá utilizá-lo. Nesse caso, o produto final da empresa, o equipamento, equivale à unidade de montagem proposta no método, mas apresentará apenas uma demanda independente, e a etapa de montagem final externa deixa de existir. Dessa forma, a divisão do projeto em uma PWBS, a divisão do produto final em Unidades de Montagens completas e independente não será realizado além do nivelamento de produção não precisar se preocupar com entregas para atender um processo posterior, de montagem final, apenas a demanda, independente, do cliente final. As demais etapas do método podem ser aplicadas da forma como foram apresentadas o que torna o método proposto aderente também a esse ambiente.

Conforme apresentado no capítulo 6, o método foi aplicado ao longo dos 6 anos desta pesquisa-ação em uma empresa de bens de capital sob encomenda produtora de máquinas e equipamentos para o mercado de papel e celulose. Embora o método tenha buscado uma generalização para os demais setores de bens de capital sob encomenda e esteja embasado em revisões da literatura de aplicações dos princípios e técnicas apresentados em diversos setores que utilizam processos similares (alta variedade de produtos e baixos volumes de produção, forma de atendimento à demanda ETO, grandes montagens, etc), algumas etapas e premissas foram

testadas apenas na empresa estudada e carecem de novas aplicações para comprovar sua aderência em outras situações desse segmento.

Uma conclusão deste trabalho é que a divisão e dedicação de todos os recursos dos *Job Shops* em *Process Lanes* pode não ser factível em todas as empresas como sugerido na seção 5.6.1 do método, o que pode acarretar a necessidade de manter um *Job Shop* flexível ao final da implementação, com alguns recursos que não possam ser dedicados a uma determinada família de produtos. Pode-se afirmar também, que pelo menos dois fatores podem dificultar ou impedir a formação das *Process Lanes* reais, como máquinas muito grandes e pesadas de difícil remanejamento ou a necessidade de grande investimento para mudança de *layout* ou aquisições de novos equipamentos caros que possam ficar muito subutilizados se dedicados a uma família de produtos. No entanto, a medida que parte dos recursos são dedicados a determinadas famílias de produtos e passem a ser gerenciados como *Process Lane* dedicadas, conforme proposto pelo método apresentado, os *Job Shops* remanescentes serão certamente menos complexos que a situação inicial, cabendo portanto duas soluções para torná-los mais eficazes e eficientes:

- A) Criar *Process Lanes* virtuais, conforme sugerido por Guan *et al* (2008), em que cada recurso fica dedicado a uma família de produto mas fisicamente alocados em um *Job Shop*.
- B) Investir na melhoria do controle do chão de fábrica do *Job Shop* remanescente por meio de SCOs mais complexos, por meio da melhoria das atividades de SFC (*Shop Floor Control*) que segundo Fernandes e Godinho Filho (2010) são a liberação das ordens de produção (com a verificação antecipada de disponibilidade de capacidade e materiais); o *scheduling* (programação finita dos recursos de produção); e o apontamento da produção, com monitoramento e acompanhamento com coleta automatizada de dados, medição de desempenho e feedback.

A avaliação dos benefícios e custos de cada solução só pode ser realizada para cada situação específica, de acordo com a realidade de cada empresa, podendo muitas vezes a opção “B” ser mais vantajosa com a adoção de SCOs mais complexos para controlar de forma eficaz e eficiente o *Job Shop* remanescente e a opção “A” ser utilizada como uma etapa preliminar para a formação definitiva de uma *Process Lane*. No entanto, conforme discutido anteriormente, o ponto que este trabalho enfatiza é a necessidade de cada *Process Lane*, real ou virtual, e o *Job Shop*

remanescente serem controlado de acordo com os níveis de repetição de seu fluxo de valor imposto pelo grau de variedade de produtos que precisam produzir.

Outra conclusão importante deste trabalho é que apesar de diversas iniciativas de se definir um *framework* para a aplicação de cada estratégia de produção, não existe uma única forma de se aplicar os princípios e técnicas de cada uma das estratégias de produção aqui apresentadas. Partindo dos princípios bem definidos, as empresas podem buscar formas de aplicação da produção enxuta e da teoria das restrições que melhor se adéquem à sua realidade. Conforme apresentado na introdução do capítulo três, o Sistema Toyota de Produção que deu origem ao que hoje chamamos de produção enxuta surgiu de uma necessidade em adaptar os conceitos, desenvolvidos por Ford e consagrados à época, de produção em massa, à realidade do mercado japonês de produção em menor escala de uma alta distinção de modelos padronizados de veículos. Tal sistema não foi desenvolvido da noite para o dia, mas ao longo de décadas de hipóteses e aplicações em uma determinada realidade. Da mesma forma, conforme apresentado na introdução do capítulo 4, a teoria das restrições nasceu a partir de um sistema de programação do chão de fábrica e evoluiu mediante pesquisas e aplicações para um conjunto de ferramentas de gestão integrada hoje adaptadas a diversas condições de mercado.

No entanto, a estruturação de um método, um *framework*, para tal implementação visa auxiliar as empresas na jornada de transformação que essas implementações trazem e apresentar experiências de implementações já testadas. Nesse sentido, este trabalho traz contribuições à gestão da produção, de forma geral, e ao planejamento e controle da produção, de forma específica, à medida que apresenta e discute uma forma estruturada de aplicação no ambiente específico de produção de bens de capital sob encomenda da produção enxuta e da teoria das restrições, duas das estratégias de produção modernas mais importantes na busca da melhoria contínua, otimização dos fluxos de materiais e informações, sincronização das atividades de manufatura, simplificação das atividades de planejamento e controle de produção e redução dos estoques.

Outra contribuição desta pesquisa foi apresentar em detalhes o sistema de produção de bens de capital de grande porte sob encomenda, pouco estudado na literatura, e suas características de alta variedade e baixos volumes de produção, formas de atendimento à demanda ETO e o próprio mercado de bens de capital e suas particularidades no mercado brasileiro.

Para finalizar, o método aqui apresentado constitui um ponto de partida para futuros trabalhos de pesquisa, tais como:

- Estudo de múltiplos casos no ambiente de bens de capital para comprovação do método apresentado em outras empresas desse segmento;
- Estudo da aplicação de outros SCOs como o POLCA, o LOOR e o PBC em conjunto com o método apresentado para situações mais complexas;
- Aplicação dos Processos de Raciocínio da teoria das restrições como forma de auxiliar a tomada de decisões ao longo do processo de implementação do método.

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, R. R.; ANTUNES Jr., J. A. V. **Takt Time: contexto e contextualização dentro do Sistema Toyota de Produção**. Revista Gestão & Produção, v. 8, n. 1, p. 01-18, abr. 2001.
- ANDRADE, R. C. **Brasil: A Economia do Capitalismo Selvagem**. Lua Nova. n. 57, p. 05-32, 2002.
- BAMBER, L.; DALE, G. **Lean production: a study of application in a traditional manufacturing environment**. Production Planning & Control, v. 11, n. 3, p. 291-298, 2000.
- BNDES. **A Reestruturação do Setor de Papel e Celulose**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 10, p. 253-268, 09/1999.
- _____. **A Indústria de Máquinas e Equipamentos para o Setor de Celulose e Papel**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 14, p. 93-110, 09/2001.
- _____. **O Setor de Bens de Capital e o Desenvolvimento Econômico: quais são os desafios?** BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 22, p. 71-88, 09/2005.
- _____. **A Indústria de Implementos Rodoviários e Sua Importância para o Aumento da Eficiência do Transporte de Cargas no Brasil**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 24, p. 241-260, 09/2006.
- BRACELPA. **Dados do Setor**. Associação Brasileira de Celulose e Papel. 03/2011 Disponível em: <<http://www.bracelpa.org.br/bra/estatisticas/pdf/booklet/booklet.pdf>> (acesso em 30/08/2011)
- BOKHORST, J. A. C.; SLOMP, J. **Lean Production Control at a High-Variety, Low-Volume Parts Manufacturer** Interfaces - Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS), Linthicum, Maryland, USA V 40, n 4, p 303-312, 2010
- _____. **Towards Takt Time Controlled Production Units in Low Volume High Variety Environments**. University of Groningen. 2007. Disponível em <http://www.bdk.rug.nl/organisatie/clusters/PSD/pdf/Euroma2008BokhorstEtAl.pdf> (Acesso 30/04/2011)
- _____; GERMS, R. **A Lean Production Control System for High-Variety/Low Volume Environment: A Case Study Implementation**. Production Planning & Control, v.20, n.7, p 586-596, 2009.
- BURBIDGE, J. L. **The Use of Period Batch Control (PBC) in the Implosive Industries**. Production Planning and Control, v. 5, n. 1, p. 97-102, 1994.
- CHAKRAVORTY, S. S. **An Evaluation of the DBR Control Mechanism in a Job Shop Environment**. The International Journal of Management Science. V. 29, p 29 335-342, 2001

COUGHALAN, P.; COGHLAN, D. **Action research for operation management**. International Journal of Operations and Production Management, v. 22, n. 2, p. 220-240, 2002.

CORRÊA, H. L.; GIANESI, I. G. N. **Just in Time, MRP II e OPT: um enfoque estratégico**. 2 ed, São Paulo: Editora Atlas, 1996.

COX III, J. F.; SPENCER, M. S. **Manual da Teoria das Restrições**. Porto Alegre: Bookman, 2002.

CRUTE, V.; WARD, Y.; BROWN, S. & GRAVES, A. **Implementing lean in aerospace – challenging the assumptions and understanding the challenges**. Technovation, , v.23, n.12, p.917-928, Amsterdam, 2003.

CUSUMANO, M. A. **The Limits of Lean**. Sloan Management Review. v. 35, n. 4, p.27-32, 1994.

DUDLEY, A.N **The Application of Lean Manufacturing Principles in a High Mix Low Volume Environment** Tese (M.B.A) Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, EUA, 2005. Disponível em <<http://hdl.handle.net/1721.1/34828>> (Acesso 29/03/2010)

ESWARAMOORTHY, M.; Kathiresan, G.R.; Mohanram, P. V. **A Survey on lean practices in Indian machine tool industries**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, London. 2010 DOI 10.1007/s00170-010-2788-y. Disponível em <<http://www.springerlink.com/content/p06w447860n3q71q/fulltext.pdf> > (Acesso em 03/06/2011)

FERNANDES, F. C. F.; GODINHO FILHO, M. **Planejamento e Controle da Produção: dos fundamentos ao essencial**. 1ª ed. São Paulo: Editora Atlas S/A., 2010.

_____. **Production Control Systems: Literature Review, Classification, and Insights Regarding Practical Application**. African Journal of Business Management v.5. n. 14, p.5573-5582, July, 2011

FOX, R. **The Theory of Constraints: fad or future?** TOC Center, Inc, disponível em <<http://www.tocc.com/Articles.htm>>. Acesso em 30.Set.2010.

GAMBI, L. N. **Recomendações para Implementação de Conceitos e Técnicas de Produção Enxuta em Empresas, Fabricantes de Produtos sob Encomenda, do Aglomerado Industrial de Sertãozinho**. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.

_____.; CARPINETTI, L. C. R.; BEZERRA, D. K. **Estudo da Aplicação da Produção Enxuta em Empresa Fabricante de Produtos sob Encomenda**. Simpósio de Administração da Produção, Logística e Operações Internacionais. Anais. 2011.

GHINATO, P. **Sistema Toyota de Produção: Mais do que Simplesmente *Just in Time***. Revista Produção, v. 5, n. 2, p. 169-189, 1995.

_____. **Produção e Competitividade: aplicações e inovações**. Cap 2, UFPE, Recife, 2000.

GOLDRATT, E. M. **A Síndrome do Palheiro: garimpendo informação num oceano de dados**. São Paulo: IMAM, 1991.

_____.; COX, J. **A Meta: um processo de melhoria contínua**. 2 ed, São Paulo: Nobel, 2003.

_____.; FOX, R.E. **A Corrida pela Vantagem Competitiva**, São Paulo: IMAN, 1989.

GUAN, Z.; PENG, Y.; MA, L.; ZHANG, C.; LI, P. **Operation and control of flow manufacturing based on constraints management for high-mix/low volume production**. Frontiers of Mechanical Engineering in China, Berlin, v.3, n.4, p.454-461, Dec., 2008.

GUPTA, M.; KO, H-J.; MIN, H. **TOC-Based Performance Measures and Five Focusing Steps in a Job-Shop Manufacturing Environment**. International Journal of Production Research, v.40, n.4, p.907-930, 2002.

HAQUE, B. **Lean Engineering in the Aerospace Industry**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture October 1, v. 217, p. 1409-1420, 2003.

HENDRY, L.C. **Applying world class manufacturing to make to order companies: problems and solutions**. International Journal of Operations and Production Management, Bradford, v.18, n.11, p.1086, 1998.

HERROELEN, W.; LEUS, R. **On the Merit and Pitfalls of Critical Chain Scheduling**. Journal of Operation Management, n. 19, p. 559-577, 2001.

HINES, P.; TAYLOR, D. **Going Lean: a guide to implementation**. Cardiff, UK: Lean Enterprise Research Center, 2000.

HOLIK, H. **Mais Rápidas, Mais Largas, Melhores – Progresso em Máquinas de Papel nos Últimos 100 anos**. Revista O Papel, Artigo Técnico, vol. 71, n. 8, p. 66-93, Set/2010

HOPP, W.; M. L. SPEARMAN. **Factory Physics: foundations of manufacturing management**. 2 ed. Boston: Irwin, 2001.

HOPP, W.J.; SPEARMAN, M.L. **To Pull or Not to Pull: what is the question?** Manufacturing and Service Operations Management, v.6, n.2, p.133-148, 2004.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA. **IPEADATA**. Base de dados macroeconômicos. Disponível em <www.ipeadata.gov.br> (Acesso em 15/08/2011).

IRANI, S.A. **Value Stream Mapping in Custom Manufacturing and Assembly Facilities**. Department of Industrial, Welding and Systems Engineering, The Ohio State University, Columbus, OH (2001),

JINA, J.; BHATTACHARYA, A. K. WALTON, A. D. **Applying Lean Principles for High Product Variety and Low Volumes: Some Issues and Propositions**. Logistics Information Management, v. 10, n.1, p.5-13, 1997

LAGE JR, M.; GODINHO FILHO, M. **A Utilização do Sistema Kanban Frente às Novas Condições do Ambiente Competitivo**. In. Simpósio de Engenharia de Produção, XIII SIMPEP, Bauru: Anais, 2006.

LEAN INSTITUTE. **Léxico Lean: Glossário Ilustrado para Praticantes do Pensamento Lean**. São Paulo: Lean Institute Brasil, 2003

LEE, J. H.; CHANG, J. G.; TSAI, C.H; LI, R.K. **Research on Enhancements of TOC Simplified Drum-Buffer-Rope System Using Novel Generic Procedures**. Expert Systems with Applications, v.37, p. 3747-3754, 2010.

LIKER, J. **O Modelo Toyota: 14 princípios de gestão do maior fabricante do mundo**. Porto Alegre: Bookman, 2005.

LIKER, J.; LAMB, T. **Lean Shipbuilding. Lean Manufacturing Principles Guide. Develop and Implement a ‘World Class’ Manufacturing. A Guide to Lean Shipbuilding**. Maritech ASE Project, Michigan, EUA, 2001

LINCK, J.; COCHRAN, D. **The Importance of Takt Time in Manufacturing System Design**. Proceedings SAE-IAM Conference, Detroit, Michigan, EUA. 1999

LITTLE, D., ROLLINS, R., PECK, M.; PORTER, J.K. **Integrated planning and scheduling in the engineering-to-order sector**. International Journal of Integrated Manufacturing, v. 13, n. 6, p.545–554, 2000

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 & Control, v. 11, n. 5, p. 481-496, 2000.

MEGLIORINI, E. **Análise Crítica dos Conceitos de Mensuração Utilizados por Empresas Brasileiras Produtoras de Bens de Capital sob Encomenda**. Tese (doutorado), São Paulo: Universidade de São Paulo, 2003.

MONDEN, Y. **Sistema Toyota de Produção**. São Paulo: IMAM, 1984.

NARASIMHAN, S.; McLEAVEY, D. W.; BILLINGTON, P. **Production Panning and Inventory Control**. 2. ed. Englewood Cliffs (New Jersey): Prentice Hall, 1995.

- NASSIF, A. **Estrutura e Competitividade da Indústria Brasileira de Bens de Capital**. Texto para discussão n. 109, BNDES, Rio de Janeiro, ago/2007.
- NAZARENO, R.R. **Desenvolvimento e Aplicação de um Método para Implementação de Sistemas de Produção Enxuta**. Dissertação (Mestrado). São Carlos: EESC/USP, 2003.
- OHNO, T. **O Sistema Toyota de Produção: além da produção em larga escala**. Porto Alegre: Bookman, 1997.
- PEPE, L. **Introdução à Fabricação do Papel**. Curso ABTCP. Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. Mar/2000
- RAHMAN, S. **Theory of Constraints: A Review of the Philosophy and its Applications**. International Journal of Operations & Production Management. Vol. 18, n. 4, p. 336-355, 1998.
- Rand, G.K. **Critical chain: The Theory of Constraints Applied to Project Management**. International Journal of Production Management, v.18, p.173 - 177. 2000.
- REYNAL, V. A. **Production System Design and its Implementation in the Automotive and Aircraft Industry**. Dissertação (Mestrado), Massachusetts: MIT, 1998.
- RESENDE, M. F.; ANDERSON, P. **Mudanças Estruturais na Indústria Brasileira de Bens de Capital**. Texto para discussão n°. 658. IPEA, Brasília, jul/1999.
- ROTHER, M. **Value-Stream Mapping in a Make-to-Order Environment**. Disponível em [http://www.lean.org/Library/Value- Stream Mapping in a Make to Order Environment.pdf](http://www.lean.org/Library/Value-Stream-Mapping-in-a-Make-to-Order-Environment.pdf) Acesso 31/08/2005.
- _____.; HARRIS, H. **Criando Fluxo Contínuo: um guia de ação para gerentes, engenheiros e associados da produção**. São Paulo: Lean Institute Brasil, 2002.
- _____.; SHOOK, J. **Aprendendo a Enxergar: mapeando o fluxo de valor para agregar valor e eliminar o desperdício**. 3 ed. São Paulo: Lean Institute Brasil, 2003.
- ROZENFELD, H.; FORCELLINI, F. A. ; AMARAL, D. C.; TOLEDO, J. C.; SILVA, S. L., ALLIPRANDINI, D. H.; E SCALICE, R. K. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: uma referência para a melhoria dos processos**. São Paulo: Saraiva, 2006.
- SEVERINO, M. R.; LAGE JUNIOR, M.; CAMPANINI, L.; GUIMARÃES, A. A.; GODINHO FILHO, M.; AGUILERA, M. **Proposta de Utilização do Sistema Period Batch Control para Redução de Lead Time em uma Empresa de Bens de Capital**. Revista Produção, v. 20, n. 4, p. 612-625. Out/dez. 2010.
- SHINGO, S. **O Sistema Toyota de Produção: do ponto de vista de engenharia de produção**. Porto Alegre: Bookman, 1996.

SIEVÄNEN, M. **The Effects of Customization on Capital Goods Manufacturing Business.** Tese (doutorado), Tampere (Finlândia): Tampere University of Technology, 2004.

SILVA, A. L. **Desenvolvimento de um Modelo de Análise e Projeto de Layout Industrial, em Ambientes de Alta Variedade de Peças, Orientado para a Produção Enxuta.** Tese (doutorado), São Carlos: EESC/USP, 2009.

_____.; RENTES, A. F. **Tornando o Layout Enxuto com Base no Conceito de Mini-Fábricas num Ambiente de Multi-Produtos: um estudo de caso.** In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, XXII ENEGEP, Curitiba: Anais, 2002.

SIPPER, D.; BULFIN, R. **Production: planning, control, and integration.** New York: McGraw-Hill, 1997.

SKINNER, W. **The Focused Factory.** Harvard Business Review, May-Jun, p. 113-121, 1974.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; HARLAND, C.; HARRISON, A.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção: edição compacta.** 1 ed. São Paulo: Atlas, 2002.

SOUZA, F. B. **Do OPT à Teoria das Restrições: avanços e mitos.** Revista Produção, v. 15, n. 2, p. 184-197, 2005.

_____.; Baptista, H. R. **Proposta de Avanço para o Método Tambor-Pulmão-Corda Simplificado Aplicado em Ambientes de Produção sob Encomenda.** Gestão e Produção., São Carlos, v. 17, n. 4, p. 735-746, 2010

SPEARMAN, M.L., HOPP, W.J., WOODRUFF, D. **A Hierarchical Control Architecture for Constant Work-in-Process (CONWIP) Production Systems.** Journal of Manufacturing and Operations Management v. 2, 147–171, 1989.

SPEARMAN, M. L.; WOODRUFF, D. L.; HOPP, W. J. **CONWIP: A Pull Alternative to Kanban.** International Journal of Production Research, v 28, n 5, p. 879–894, 1990.

STEFANELLI, P. **Modelo de Programação da Produção Nivelada para Produção Enxuta em Ambiente ETO com Alta Variedade de Produtos e Alta Variação de Tempos de Ciclo.** Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2010.

STORCH, R. L.; LIM, S. **Improving flow to Achieve Lean Manufacturing in Shipbuilding.** Production Planning & Control, v. 10, n. 2, p. 127-137, 1999.

SURI, R. **Quick Response Manufacturing: A Companywide Approach to Reducing Lead Times.** Portland: Productivity Press, 1998.

TARDIN, G. G. **O Sistema Puxado e o Nivelamento da Produção**. Dissertação (mestrado). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2001.

THIOLLENT, M. **Pesquisa-Ação nas Organizações**. São Paulo: Editora Atlas, 1997.

THOMPSON, C. G. **Uma avaliação do Potencial de aplicação da Mentalidade Enxuta (Lean Thinking) na Construção Naval: Estudo de Casos Múltiplos**. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, 2009.

VERGARA, S. **Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração**. 3. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2000.

VERMULM, R. **O Setor de Bens de Capital**. In: SCHWARTZMAN. **Ciência e Tecnologia no Brasil: política industrial, mercado de trabalho e instituições de apoio**. Fundação Getúlio Vargas,. v.2, Rio de Janeiro, 1995.

VERMULM, R. **A indústria de bens de capital seriados**. CEPAL (Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe – Escritório do Brasil), 2003. Disponível em: <http://www.eclac.org/publicaciones/xml/4/21524/LCBRS147RobertoVermulm.pdf>. Acesso em 14 Nov. 2010.

WATSON, K. J.; BLACKSTONE, J. H.; GARDINER, S. **The Evolution of a Management Philosophy: the theory of constraints**. Journal of Operations Management, v. 25, n. 3, p.387-402, 2007.

WHITE, R. E.; PRYBUTOK, V. **The Relationship Between JIT practices and Type of Production System**. Omega. The International Journal of Management Science, v. 29, n. 2, p. 113-124, 2001.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T.; ROOS, D. **A Máquina que Mudou o Mundo**. 17. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1992.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T. **A Mentalidade Enxuta nas Empresas: elimine o desperdício e crie riqueza**. 8. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1998.

ZACARELLI, S. B. **Programação e Controle da Produção**. ed.8, São Paulo: Pioneira, 1987

REFERÊNCIAS CITADAS POR MEIO DE APUD

BECHTE, W. **Steuerung der Durchlaufzeit durch Belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung.** Dissertation. Universitat Hannover. VDI-Z, Reihe 3, 70, 1980 (in German)

BNDES. **Questões Relativas à Competitividade da Indústria de Bens de Capital: Bens de Capital sob Encomenda e Máquina-Ferramenta.** Estudos BNDES/DEEST, Rio de Janeiro, 1988

DURAY, R.; WARD, P. T.; MILLIGAN, G.W.; BERRY, W. L. **Approaches to Mass Customization: configurations and empirical validation.** Journal of Operations Management, v. 18, n. 6, p. 605-625, 2000.

LAMPEL, J. and H. MINTZBERG **Customizing Customization.** Sloan Management Review. V. 38 N.1, p. 21-30, 1996.

MELETON, M. P. **OPT - Fantasy or Breakthrough?** Production and Inventory Management. v. 27, n. 2, p.12-21, 1986

TOYOTA MOTOR COMPANY: **Toyota Production System Handbook** (em japonês). Nagoya, Japão, 1998.

GOLDRATT, E. M. **Computadorized Shop Floor Scheduling.** International Journal of Production Research, vol. 26, nº 3, pp. 443-455, 1988.