

Universidade Federal de São Carlos

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia

Departamento de Computação

Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

**“Proposta de um Procedimento de
Programação *On-Line* da Produção de
Sistemas Flexíveis de Manufatura baseado
em Lógica *Fuzzy*”**

Jean Carlos Domingos

**São Carlos – SP
Agosto/2004**

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

D671pp

Domingos, Jean Carlos.

Proposta de um procedimento de programação on-line da produção de sistemas flexíveis de manufatura baseado em lógica fuzzy / Jean Carlos Domingos. -- São Carlos : UFSCar, 2005.

137 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2004.

1. Sistemas especialistas (computação). 2. Programação de produção. 3. Lógica nebulosa. 4. Sistemas flexíveis de manufatura. I. Título.

CDD: 006.33 (20^a)

Universidade Federal de São Carlos

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

“Proposta de um Procedimento de Programação On-Line da Produção de Sistemas Flexíveis de Manufatura Baseado em Lógica Fuzzy”

JEAN CARLOS DOMINGOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

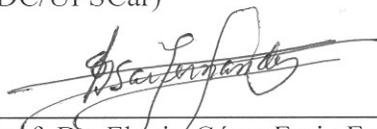
Membros da Banca:



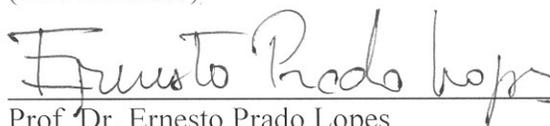
Prof. Dr. Paulo Rogério Politano
(Orientador - DC/UFSCar)



Prof. Dra. Heloisa de Arruda Camargo
(DC/UFSCar)



Prof. Dr. Flavio César Faria Fernandes
(DEP/UFSCar)



Prof. Dr. Ernesto Prado Lopes
(UFRJ)

São Carlos
Agosto/2004

Dedico este trabalho à minha esposa Ana Paula,
por todo amor e carinho.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Paulo Rogério Politano, amigo e orientador, pela oportunidade de desenvolver este trabalho no Laboratório de Inteligência Artificial e Automação do Departamento de Computação da UFSCar.

Ao Prof. Dr. Néocles pela colaboração e ajuda extra.

Ao engenheiro de produção Flávio Donizeti Bolsam, por ter colaborado como especialista neste trabalho.

Aos professores do departamento que de alguma forma contribuíram para este trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação pelo auxílio na realização deste estudo.

Ao Lucas e Matheus pela amizade de todos os dias.

Aos amigos de mestrado Pablo, Anderson, Moacir, Ricardo, Rodrigo e Tiago pelos momentos que passamos juntos nesse período.

Aos meus colegas de trabalho da empresa DMB, pelo apoio.

A minha companheira e esposa Ana Paula Batista Domingos, por ter me ajudado quando foi possível, e pelo seu companheirismo e amor durante todo o período, tanto nos momentos tranquilos como nos mais conturbados.

Aos meus irmãos Janderson, Tatiane e Jéssica, e ao meu cunhado Luciano, pelo incentivo.

Aos meus pais Sebastião Januário Domingos e Maria Ap. Gomes Domingos, pelo incentivo, desde o início.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2. JUSTIFICATIVA	2
1.3. OBJETIVO	3
1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	4
2. O SISTEMA FLEXÍVEL DE MANUFATURA (FMS)	5
2.1. INTRODUÇÃO.....	5
2.2. COMPONENTES DE UM FMS	7
2.2.1. Componentes de hardware	7
2.2.2. Software e funções de controle do FMS	10
2.2.3. Operários no ambiente do FMS	11
2.3. TIPOS DE “LAYOUT” DE FMS	12
2.4. APLICAÇÕES DO SISTEMA FLEXÍVEL DE MANUFATURA	14
3. PROGRAMAÇÃO DE OPERAÇÕES	17
3.1. INTRODUÇÃO.....	17
3.2. CARACTERÍSTICA DO AMBIENTE DE UM FMS	20
3.3. MEDIDAS DE DESEMPENHO PARA PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO	22
3.4. PROGRAMAÇÃO “ON-LINE” E “OFF-LINE”	26
3.5. MODELOS DE PROGRAMAÇÃO	28
4. LÓGICA FUZZY	41
4.1. INTRODUÇÃO.....	41
4.2. CONJUNTOS FUZZY	42
4.3. OPERAÇÃO COM CONJUNTOS FUZZY	44
4.4. VARIÁVEIS LINGÜÍSTICAS	45
4.5. RACIOCÍNIO APROXIMADO.....	46
4.5.1. Regras de Inferência.....	48
4.5.2. Inferência com Regras Fuzzy.....	49
4.6. SISTEMAS FUZZY	51

4.6.1. Modelos lingüísticos	52
4.6.1.1. Base de Regras	53
4.6.1.2. Modelo lingüístico tipo Mamdani	53
5. PROCEDIMENTO DE PROGRAMAÇÃO PROPOSTO.....	57
5.1. INTRODUÇÃO.....	57
5.2. DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO PROPOSTO	59
5.2.1. Base de Dados	62
5.2.2. Algoritmo de Controle	63
5.2.3. Modelo de Sistema Fuzzy	65
5.2.3.1. Variáveis de entrada e saída.....	67
5.2.3.2. Base de Regras	72
5.2.3.3. Fuzificação	75
5.2.3.4. Inferência.....	75
5.2.3.5. Desfuzificação.....	76
6. ANÁLISE DO PROCEDIMENTO PROPOSTO	77
6.1. INTRODUÇÃO.....	77
6.2. ESPECIFICAÇÃO DA SIMULAÇÃO.....	77
6.3. SIMULAÇÕES	83
6.3.1. Projeto de experimento fatorial 2^k	85
6.3.1.1. Análise do projeto de experimento fatorial.....	89
6.3.2. Comparando o procedimento de programação proposto	97
6.4. CONSIDERAÇÕES	104
7. CONCLUSÕES	106
REFÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108
APÊNDICE I	113
APÊNDICE II	121

Lista de Figuras

FIGURA 2.1 – ESTRUTURA DO SISTEMA DE SOFTWARE DE APLICAÇÃO DO FMS [GROOVER 1996].	12
FIGURA 2.2 – TIPO DE LAYOUT EM LINHA.	13
FIGURA 2.3 – TIPO DE LAYOUT EM <i>LOOP</i> .	13
FIGURA 2.4 – TIPO DE LAYOUT ESCADA.	13
FIGURA 2.5 – TIPO DE LAYOUT <i>OPEN-FIELD</i> .	14
FIGURA 2.6 – TIPO DE LAYOUT EM CÉLULA COM ROBÔ CENTRALIZADO.	14
FIGURA 2.7 – APLICAÇÕES CARACTERÍSTICAS DE SISTEMAS FLEXÍVEIS DE MANUFATURA E CÉLULAS RELATIVAS A OUTROS TIPOS DE SISTEMA DE PRODUÇÃO. FONTE: ADAPTADO DE SLACK <i>ET AL.</i> (2002).	15
FIGURA 3.1 – EFEITOS EXTERNOS E INTERNOS DOS OBJETIVOS DE DESEMPENHO. FONTE: SLACK <i>ET AL.</i> 2002.	26
FIGURA 4.1 – REPRESENTAÇÃO DE UMA FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA PARA UM CONJUNTO DA VARIÁVEL LINGÜÍSTICA “TEMPERATURA”.	43
FIGURA 4.2 – EXEMPLO DE UMA VARIÁVEL LINGÜÍSTICA. FONTE: ADAPTADO DE [KLIR E YUAN 1995].	46
FIGURA 4.3 – DIAGRAMA DE UM MODELO LINGÜÍSTICO TIPO MAMDANI.	54
FIGURA 4.4 – PROCESSO DE INFERÊNCIA UTILIZANDO O MÉTODO DE [MAMDANI 1977].	55
FIGURA 5.1 – ESQUEMA DO PROCEDIMENTO DE PROGRAMAÇÃO ON-LINE DA PRODUÇÃO DE FMS BASEADO EM LÓGICA FUZZY.	60
FIGURA 5.2 – DIAGRAMA DE FLUXO DO PROCEDIMENTO DE PROGRAMAÇÃO <i>ON-LINE</i> BASEADO EM LÓGICA FUZZY.	61
FIGURA 5.3 – REPRESENTAÇÃO DO PROCESSO REALIZADO PELO MSF.	67
FIGURA 5.4 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA VARIÁVEL LINGÜÍSTICA DE SAÍDA PRIORIDADE.	68
FIGURA 5.5 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS VARIÁVEIS LINGÜÍSTICAS DE ENTRADA DO MSF UTILIZADO NO PONTO DE DECISÃO “SELEÇÃO DE AGV”.	69
FIGURA 5.6 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS VARIÁVEIS LINGÜÍSTICAS DE ENTRADA DO MSF UTILIZADO NO PONTO DE DECISÃO “SELEÇÃO DE UMA MÁQUINA POR UMA PEÇA”.	71
FIGURA 5.7 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS VARIÁVEIS LINGÜÍSTICAS DE ENTRADA DO MSF UTILIZADO NO PONTO DE DECISÃO “SELEÇÃO DE UMA PEÇA DO <i>BUFFER</i> DE ENTRADA PELA MÁQUINA”.	72
FIGURA 6.1 – MODELO DE FMS CONSTRUÍDO NA FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO AUTOMOD.	78
FIGURA 6.2 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS VARIÁVEIS LINGÜÍSTICAS DE ENTRADA UTILIZADA NA SIMULAÇÃO.	82
FIGURA 6.3 – GRÁFICO DAS MÉDIAS DA MEDIDA DE DESEMPENHO “PERCENTUAL DE ATRASO”.	94
FIGURA 6.4 – GRÁFICO DAS MÉDIAS DA MEDIDA DE DESEMPENHO “TEMPO MÉDIO DE ATRASO”.	95
FIGURA 6.5 – GRÁFICO DAS MÉDIAS DA MEDIDA DE DESEMPENHO “TEMPO MÉDIO DE FLUXO”.	96
FIGURA 6.6 – GRÁFICO DAS MÉDIAS DA MEDIDA DE DESEMPENHO “ESTOQUE DE PEÇAS EM PROCESSO”.	97

FIGURA 6.7 – GRÁFICO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA A MEDIDA DE DESEMPENHO “PERCENTUAL DE ATRASO”.....	101
FIGURA 6.8 – GRÁFICO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA A MEDIDA DE DESEMPENHO “TEMPO MÉDIO DE ATRASO”.....	102
FIGURA 6.9 – GRÁFICO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA A MEDIDA DE DESEMPENHO “TEMPO MÉDIO DE FLUXO”.....	103
FIGURA 6.10 – GRÁFICO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA A MEDIDA DE DESEMPENHO “ESTOQUE DE PEÇAS EM PROCESSO - WIP”.....	104

Lista de Tabelas

TABELA 3.1 – ALGUMAS MEDIDAS DE DESEMPENHO UTILIZADAS NA PRODUÇÃO. FONTE: SLACK <i>ET AL</i> (2002)	25
TABELA 3.2 – RESUMO DE MODELOS DE PROGRAMAÇÃO PARA FMS.....	39
TABELA 5.1 – BASE DE REGRAS DEFINIDA PARA O MSF UTILIZADO NO PONTO DE DECISÃO “SELEÇÃO DE AGV”.....	73
TABELA 5.2 – BASE DE REGRAS DEFINIDA PARA O MSF UTILIZADO NO PONTO DE DECISÃO “SELEÇÃO DE UMA MÁQUINA POR UMA PEÇA”.....	74
TABELA 5.3 – BASE DE REGRAS DEFINIDA PARA O MSF UTILIZADO NO PONTO DE DECISÃO “SELEÇÃO DE UMA PEÇA DO <i>BUFFER</i> DE ENTRADA PELA MÁQUINA”.....	74
TABELA 6.1 – TEMPOS DE PROCESSAMENTO E ROTEIROS ALTERNATIVOS DAS PEÇAS PRODUZIDAS PELO MODELO DE FMS.....	79
TABELA 6.2 – FATORES E NÍVEIS DO PROJETO DE EXPERIMENTO FATORIAL 2^k	86
TABELA 6.3 – TRATAMENTOS GERADOS PARA O PROJETO DE EXPERIMENTO FATORIAL 2^k	87
TABELA 6.4 – RESULTADOS DAS MEDIDAS DE DESEMPENHO OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES REALIZADAS COM CADA TRATAMENTO DO EXPERIMENTO FATORIAL.	90
TABELA 6.5 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS DADOS DA MEDIDA DE DESEMPENHO “PERCENTUAL DE ATRASO”.....	90
TABELA 6.6 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS DADOS DA MEDIDA DE DESEMPENHO “TEMPO MÉDIO DE ATRASO”.....	90
TABELA 6.7 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS DADOS DA MEDIDA DE DESEMPENHO “TEMPO MÉDIO DE FLUXO”.	90
TABELA 6.8 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS DADOS DA MEDIDA DE DESEMPENHO “WIP”.....	91
TABELA 6.9 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DESDOBRADA PARA A MEDIDA DE DESEMPENHO “PERCENTUAL DE ATRASO”.....	91
TABELA 6.10 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DESDOBRADA PARA A MEDIDA DE DESEMPENHO “TEMPO MÉDIO DE ATRASO”.....	92
TABELA 6.11 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DESDOBRADA PARA A MEDIDA DE DESEMPENHO “TEMPO MÉDIO DE FLUXO”.....	92
TABELA 6.12 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DESDOBRADA PARA A MEDIDA DE DESEMPENHO “W.I.P.”.	92
TABELA 6.13 – COMPARAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE PROGRAMAÇÃO EM RELAÇÃO À MEDIDA DE DESEMPENHO “PERCENTUAL DE ATRASO”.	100
TABELA 6.14 – COMPARAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE PROGRAMAÇÃO EM RELAÇÃO À MEDIDA DE DESEMPENHO “TEMPO MÉDIO DE ATRASO”.....	101
TABELA 6.15 – COMPARAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE PROGRAMAÇÃO EM RELAÇÃO À MEDIDA DE DESEMPENHO “TEMPO MÉDIO DE FLUXO”.	103
TABELA 6.16 – COMPARAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE PROGRAMAÇÃO EM RELAÇÃO À MEDIDA DE DESEMPENHO “ESTOQUE DE PEÇAS EM PROCESSO - WIP”.	104

Resumo

Domingos, J. C. *Proposta de um Procedimento de Programação On-line da Produção de Sistemas Flexíveis de Manufatura baseado em Lógica Fuzzy*. São Carlos, 2004, 128 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos – Departamento de Computação.

Os sistemas flexíveis de manufatura (FMS) têm sido projetados para atender as necessidades do mercado, que demandam por produtos que apresentam qualidade e prazos de entrega pequenos. Para atender as necessidades do mercado, as metodologias usadas na programação de operações de FMS devem considerar um ambiente altamente dinâmico, onde é frequentemente necessário atender ou reagir a demandas incertas e fazer o melhor uso de seus recursos. Um procedimento de programação *on-line* baseado em lógica *fuzzy* é proposto neste trabalho, cuja característica principal é programar as tarefas do chão de fábrica utilizando regras *fuzzy* construídas com o apoio de um especialista para atender a várias medidas de desempenho simultaneamente. Um estudo por meio de simulação foi realizado com o objetivo de verificar a aplicabilidade da abordagem proposta, utilizando uma ferramenta de simulação integrada ao procedimento de programação *on-line* baseado em lógica *fuzzy*.

Palavras chaves: Programação *on-line*, Programação da produção, Sistemas Flexíveis de Manufatura, Sistemas Fuzzy, Simulação.

Abstract

Domingos, J. C. *Proposal of a Production On-line Scheduling Procedure of Flexible Manufacturing Systems based on Fuzzy Logic*. São Carlos, 2004, 128 p. Master's Degree Dissertation. Federal University of São Carlos – Computer Department.

Flexible manufacturing systems (FMS) have been designed to meet market requirements that demand products that are quality and ready to deliver. In order to meet the market requirements, the methodologies used in the FMS scheduling must consider a highly dynamic environment, where it is often necessary to meet or to react to uncertain demands and to get better use of its resources. An on-line scheduling procedure based on fuzzy logic is proposed in this work, whose main characteristic is shop floor tasks scheduling using fuzzy rules building with the support of an expert to meet several measures of performance. A simulation study was carried out with the objective to verify the applicability of the proposed approach, using a simulation tool integrated with the on-line scheduling procedure based on fuzzy logic.

Keywords: On-line scheduling, Production Scheduling, Flexible Manufacturing Systems, Fuzzy Systems, Simulation.

1. Introdução

1.1. Contextualização

No contexto industrial atual, as empresas têm experimentado influências generalizadas oriundas de seu ambiente competitivo. Isso tem gerado em muitas delas a necessidade de estarem continuamente considerando e respondendo à dinâmica dos mercados nos quais estão inseridas. Diversas solicitações externas e internas ao ambiente produtivo dessas empresas, tais como variações de demanda, progresso tecnológico dos concorrentes, variedade de produtos demandada pelos clientes, necessidade de redução nos tempos de *setup*, entre outros, têm provocado uma busca por capacitações que possibilitem um melhor condicionamento competitivo, para que se mantenham a frente de seus concorrentes, ou mesmo garantam a sua própria sobrevivência.

Diante disso, nos últimos anos, as indústrias de manufatura têm sofrido uma enorme transformação devido à utilização crescente de novas tecnologias de processo, tais como máquinas ferramentas de controle numérico computadorizadas, robôs industriais, sistemas de manipulação e transporte de materiais, etc.

A união dessas tecnologias resulta em sistemas integrados com alto grau de automação e flexibilidade, conhecidos como sistemas flexíveis de manufatura (FMS). Nesses sistemas, as flexibilidades de cada uma das tecnologias individuais combinam-se para fazer de um FMS uma tecnologia de manufatura muito versátil [Slack *et al.* 2002], podendo fabricar mais de um tipo de peça, como também alterar rapidamente o tipo de peça a ser produzido, ou mesmo fabricar simultaneamente diferentes tipos de peças.

A programação e controle desses sistemas é complexa devido à flexibilidade das máquinas e das operações. Além disso são considerados os usos de plano de processos e roteiros flexíveis, a entrada aleatória de peças, o cumprimento das datas de entrega e o atendimento às múltiplas medidas de desempenho.

1.2. Justificativa

A programação da produção envolve a determinação da seqüência e os instantes de início e fim de operação de cada máquina, de forma que um dado número de medidas de desempenho sejam maximizadas ou minimizadas. Para solucionar o problema existem $(n!)^m$ maneiras possíveis de seqüenciamento das operações, considerando n como o número de operações que devem ser realizadas em m máquinas. Os roteiros de fabricação são distintos para cada peça, podendo gerar um roteamento bastante complexo. Isso significa que o esforço computacional para encontrar a solução ótima cresce exponencialmente com o número de operações e o número de máquinas consideradas. Uma verdadeira otimização torna-se difícil, mesmo para sistemas muito pequenos [Engell *et al.* 1994].

O problema de programação de um FMS é considerado ser um programa detalhado minuto a minuto, baseado na mudança de estado das máquinas, dos sistemas de manipulação de materiais e de outros equipamentos de suporte [Sabuncuoglu e Hommertzheim 1992]. Dessa forma, a programação das tarefas das máquinas CNC está inter-relacionada com a programação dos sistemas de manipulação de materiais, onde, usualmente estão presentes AGVs.

As metodologias empregadas na programação de FMS devem levar em consideração um ambiente altamente dinâmico e as características de incerteza deste ambiente, pela necessidade de atender ou reagir a demandas não previstas e ainda obter o melhor uso dos seus recursos.

Algumas metodologias da Inteligência Computacional, tais como Lógica Fuzzy, Redes Neurais e Algoritmo Genético [Holter *et al.* 1995; Sun e Xue 2001], estão sendo usadas para planejamento e programação dos FMS.

A teoria da lógica fuzzy, desenvolvida a partir da década de 60 [Zadeh 1965], tem ganhado importância nos últimos anos. Ela permite o tratamento da incerteza e da falta de exatidão através do modelamento do processo de raciocínio impreciso e do conhecimento do especialista. Dentro da indústria, esta teoria vem sendo empregada para simplificar o modelamento de sistemas, inclusive em controladores fuzzy (nebulosos) industriais para controle de sistemas em tempo real, tais como: aparelhos eletrodomésticos e sistemas de controle de frenagem de trens japoneses [Pedrycz 1993].

A lógica fuzzy oferece uma alternativa formal para a representação do conhecimento do especialista e para métodos de inferência em sistemas baseados em conhecimento, permitindo o tratamento das imprecisões e incertezas. Como resultado da fusão entre esquemas típicos de sistemas baseados em conhecimento e lógica fuzzy, o conhecimento passa a ser representado por um conjunto de regras fuzzy que conectam antecedentes com conseqüentes, ou condições com ações.

A teoria da lógica fuzzy apresenta-se como uma alternativa para uso na programação de FMS, devido as seguintes vantagens:

- Ser tolerante à imprecisão da informação, ou seja, permite a representação de conceitos vagos;
- Permitir que a tomada de decisão seja realizada em tempo muito rápido;
- Permitir a modelagem do conhecimento do especialista de forma simples, visto que isto permitirá a representação do conhecimento na forma de regras fuzzy que são muito próximas da linguagem natural;
- Simplificar o desenvolvimento, manutenção e experimentação da programação, visto que é muito mais fácil mudar as regras em vez de alterar programas de computador;
- Permitir a agregação de regras de prioridade, de modo a obter um compromisso entre várias medidas de desempenho;

1.3. Objetivo

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma proposta de um Procedimento de Programação *On-line* da Produção de um FMS baseado em Lógica Fuzzy. O procedimento deve atender as características de operação do chão de fábrica de um FMS e realizar a programação simultânea das operações de transporte e de processamento das peças nas máquinas em função do estado corrente do FMS, de forma a atender, simultaneamente, várias medidas de desempenho da produção.

Com o propósito de permitir os testes e avaliação do procedimento proposto, um FMS típico foi modelado e simulado com o auxílio de uma ferramenta de

simulação para manufatura, e os resultados obtidos serão comparados com procedimentos de programação que utilizam regras de prioridade.

1.4. Organização do Trabalho

Para contextualizar o problema, as técnicas e a contribuição deste trabalho, esta dissertação está estruturada em capítulos, como descrito a seguir:

- No capítulo 2 é introduzido o conceito de Sistemas Flexíveis de Manufatura e as justificativas para a sua aplicação no ambiente da manufatura automatizada. Também são descritos seus principais componentes.
- O capítulo 3 aborda o estado da arte dos procedimentos empregados para a realização da programação da produção de Sistemas Flexíveis de Manufatura
- O capítulo 4 descreve os conceitos da lógica fuzzy utilizados no procedimento proposto.
- No capítulo 5 o procedimento proposto por este trabalho é apresentado.
- No capítulo 6 são apresentadas as simulações que foram realizadas para analisar o desempenho do procedimento de programação proposto.
- O capítulo 7 apresenta conclusões da pesquisa realizada e propõe trabalhos futuros nessa área de conhecimento.

2. O Sistema Flexível de Manufatura (FMS)

2.1. Introdução

A situação dos sistemas de manufatura, nos últimos anos, tem sido caracterizada pelo aumento da variedade de produtos com pequenos e médios volumes de demanda, diminuição do ciclo de vida dos produtos e aumento da complexidade dos mesmos aliados à demanda às vezes não prevista e tempos de entrega cada vez mais curtos. Além disso, o mercado atual exige sistemas de manufatura com mais eficiência, maior flexibilidade e melhor qualidade nos produtos. Estes novos padrões e atributos de competitividade sinalizam de forma inequívoca que os sistemas de manufatura devem produzir de acordo com as conformidades e exigências do cliente. Dentro deste conceito surgem os sistemas flexíveis de manufatura (FMS – *Flexible Manufacturing System*), que têm apresentado uma resposta adequada a estas necessidades.

O sistema flexível de manufatura consiste de um grupo de estações de processamento, normalmente máquinas ferramentas CNC (Controle Numérico por Computador), interconectadas por um sistema de armazenamento e manipulação de material automatizado e controlado por um sistema computacional integrado [Chan *et al.* 2003]. Foram introduzidos por volta de 1970, exigem alto investimento e trazem um aumento substancial da produtividade na fabricação em pequenos e médios lotes [Groover e Zimmers Jr 1984]. Um FMS é capaz de fornecer uma rápida resposta às mudanças de mercado, aumentar a utilização das máquinas, reduzir o inventário dos produtos em processo, aumentar a produtividade, reduzir o número de máquinas ferramentas, reduzir lead times, reduzir espaço físico, e reduzir custos de setup [Kazerooni *et al.* 1997; Balic e Pahole 2002].

O FMS utiliza os princípios da tecnologia de grupo, no qual peças com formas semelhantes ou com processos de fabricação semelhantes são identificadas e agrupadas em famílias de peças para tirar proveito de suas semelhanças no projeto e na produção dessas peças [Groover 1996]. Nenhum sistema de manufatura pode ser completamente flexível, pois ele não pode produzir uma extensão infinita de produtos. Há limites para o grau de flexibilidade que pode ser incorporado em um FMS.

Conseqüentemente, um sistema flexível de manufatura é projetado para produzir peças (ou produtos) dentro de um conjunto de estilos, tamanhos, e processos. Em outras palavras, um FMS é capaz de produzir uma única família de peças ou um conjunto limitado de famílias de peças [Groover 1996].

É notório que no fundo um FMS pode ser visto como uma célula de manufatura provida com alto grau de automação flexível [Fernandes 1991]. A diferença principal entre um FMS e uma célula convencional é que as funções humanas são automatizadas no FMS. Além disso, por causa de sua natureza integrada, uma tarefa de programação para um FMS requer considerações adicionais de ferramentas, veículos auto-guiados (AGVs), pallets, etc. Em geral, máquinas ferramentas são mais versáteis e normalmente são equipadas com sensores, depósito de ferramentas, e mecanismos de troca de ferramenta automático de forma que uma grande variedade de peças diferentes podem ser processadas automaticamente com mínimo tempo de preparação. O sistema de manipulação de materiais, normalmente um sistema de AGV e robôs, também é mais flexível e conecta vários centros de trabalho do FMS. Porém, toda esta flexibilidade embutida num FMS complica os problemas operacionais devido a um grande número de operações alternativas e rotas para manipulação do material para serem consideradas durante as decisões da programação [Sabuncuoglu e Hommertzheim 1992].

Os sistemas flexíveis de manufatura variam em termos de números de máquinas ferramentas e nível de flexibilidade. Quando o sistema tem somente algumas máquinas, o termo célula flexível de manufatura (FMC – Flexible Manufacturing Cell) é às vezes utilizado. Mas ambos, célula e sistema são altamente automatizados e controlados por computador. A diferença entre um FMS e um FMC não é sempre clara, mas é algumas vezes baseada no número de máquinas (estações) que eles utilizam. O sistema flexível de manufatura consiste de quatro ou mais máquinas, enquanto que uma célula flexível de manufatura consiste de três ou menos máquinas [Groover 1987].

Alguns sistemas e células de manufatura altamente automatizada não são flexíveis, e isto conduz a uma confusão na terminologia. Por exemplo, uma linha de transferência é um sistema de manufatura altamente automatizado, mas ela está limitada à produção em massa de um tipo de peça, sendo assim, ela não é um sistema flexível.

Para qualificar como sendo flexível, um sistema de manufatura deve satisfazer os seguintes critérios:

1. Processar diferentes tipos de peças;
2. Aceitar mudanças na programação da produção;
3. Responder naturalmente ao mau funcionamento e quebras dos equipamentos no sistema;
4. Acomodar a introdução de novos projetos de produtos.

Se um sistema automatizado não possuir estes quatro critérios, ele não poderá ser classificado como um sistema ou célula flexível de manufatura [Groover 1996].

Os fatores que contribuem para a flexibilidade das células de manufatura, e principalmente dos FMSs são [Fernandes 1991]:

- Tempos de preparação muito reduzidos, com o que se torna viável fabricar pequenos lotes;
- Versatilidade dos centros de usinagem em realizar uma variedade de operações em uma peça;
- Possibilidade de mudar o roteiro de fabricação para contornar o problema de máquinas paradas para reparo;
- Disponibilidade de operações alternativas de forma a balancear a carga das máquinas;

2.2. Componentes de um FMS

O sistema flexível de manufatura é composto por *hardware* e *software* que devem ser integrados numa unidade eficiente e eficaz. Neste tópico serão descritos estes componentes e como eles são integrados.

2.2.1. Componentes de hardware

O *hardware* típico de um FMS é constituído por estações de trabalho, sistema automatizado de manipulação de material, e um computador central para controle. As estações incluem máquinas ferramentas CNC com capacidade de troca de

ferramentas, estações de inspeção, limpeza de peça e outras, quando necessário [Groover 1996].

- **Máquinas ferramenta CNC**

Uma máquina ferramenta CNC (controle numérico computadorizado) tem um microcomputador dedicado de modo que programas podem ser desenvolvidos e/ou armazenados localmente. Além disto, as máquinas CNC realizam a troca de ferramentas e a carga e descarga de peças de forma automática [Fine 1989]. A ela pode estar associado um elemento para manipulação de material (robô) para carregar as peças brutas e descarregar as peças acabadas. Um elemento de armazenamento de materiais, denominado *buffer*, com a função de acomodar tanto as peças brutas como acabadas, também pode estar associado às máquinas. Na máquina ferramenta, as operações de processamento são executadas de acordo com um programa NC (comando numérico), mudando o estado tecnológico da peça.

- **Sistema automatizado de manipulação de material**

Um sistema de manipulação de material tem a função de mover peças entre estações de trabalho, locais de armazenagem e pontos de expedição dentro de um FMS, sendo responsável por conectar estes pontos isolados de um sistema de produção e promover as operações de carga e descarga de máquinas. Um sistema de manipulação de material é composto por robôs industriais, transportadores (sistemas de esteiras), veículos auto-guiados (AGV), e armazéns automatizados [Lindsay *et al.* 2000]. As peças são freqüentemente transportadas num FMS sobre pallets e fixadores, dessa forma os pallets são projetados para um sistema de manufatura particular, e os fixadores são projetados para alojar várias geometrias de peças de uma família.

A seguir será apresentada uma descrição sobre os elementos de um sistema de manipulação de material:

- *Robôs industriais*: Um robô é basicamente uma máquina programável que possui características antropomorfias. A mais aparente antropomorfia característica de um robô industrial é seu braço mecânico, ou manipulador. A unidade de controle de um moderno robô industrial é um computador que pode ser programado para executar um conjunto sofisticado de sub-rotinas. O manipulador de um robô combinado com

um controlador de alto nível permite a um robô industrial desempenhar uma variedade de tarefas, tais como carregar e descarregar peças de uma máquina ferramenta, soldar, pintar, etc. Estes robôs são tipicamente utilizados para substituir trabalhadores humanos que realizam estas tarefas [Groover 1996].

- *Veículos auto-guiados:* Os veículos auto-guiados (AGV) são sistemas de carga, transporte e descarga, controlados por computador próprio, sem operador. O controle total do sistema e dos veículos é realizado por meio de um computador central, um computador de bordo e dispositivos de controle de tráfego, que se comunicam com o computador central. O uso de AGVs proporciona:
 - Flexibilidade:- possibilidade de alteração de rotas, acesso direto às estações de trabalho e armazéns automatizados;
 - Segurança:- movimenta-se com velocidade média de 10 a 79 m/min, possuem sensores para precisão de posicionamento, e possui microcomputadores que se comunicam com o computador central para evitar colisões.
- *Transportadores:* Os transportadores são formados basicamente por esteiras. São utilizados em aplicações em que o dispositivo a ser transportado possui uma rota fixa, e a precisão de posicionamento nas operações de coleta e entrega não é um fator determinante. É uma forma bastante convencional de transporte.
- *Armazéns automatizados:* Os armazéns automatizados são sistemas de armazenamento de material para processos de fabricação. São constituídos de casulos onde os materiais são armazenados sem a intervenção humana, com as operações de carga e descarga controladas por um computador.

Os objetivos principais da utilização de armazéns automatizados são:

 - Controle computacional do material em processo (situação e localização *on-line* de uma peça, ferramenta, ou pallet) nos subsistemas do FMS;
 - Redução de inventários;
 - Aumento da segurança e redução das perdas por danificação e erros de localização;
 - Aumento da produtividade.

- **Computador Central**

O FMS possui um computador central que é conectado aos outros componentes de hardware. Além do computador central, as máquinas individuais e outros componentes geralmente têm microcomputadores como suas unidades de controle individuais. A função do computador central é coordenar as atividades dos componentes para alcançar uma integração global das operações do sistema.

2.2.2. Software e funções de controle do FMS

Os softwares de um FMS consistem de módulos que fazem a integração entre os objetivos e metas da produção e os dispositivos e equipamentos de realização física do processo de manufatura, associados com as várias funções realizadas por um sistema de manufatura. Por exemplo, uma função que envolve o *download* de programas de peças para uma máquina ferramenta, outra função que se preocupa em controlar o sistema de manipulação de material, outra que se preocupa com a administração de ferramentas, e assim por diante [Groover 1996].

Algumas das funções incluídas na operação de um FMS são:

- Controle e manutenção de registros das peças, pallets e fixadores: localização, estado, roteiro de listas ordenadas de operações a serem realizadas para cada tipo de peça;
- Controle do sistema de transporte de material: supervisão (comandos) e monitoração (estados) dos dispositivos de transportes (uso de algoritmos de controle);
- Controle e manutenção dos registros das estações de trabalho: supervisão e monitoração de processo de cada estação de trabalho, transferência de peças entre a estação de trabalho e o sistema de transporte, verificação física da identificação da peça;
- Controle, manutenção, armazenamento e transmissão de programas CN (controle numérico) das peças;
- Controle de ferramentas e controle e manutenção da vida útil das ferramentas: ações e relatórios com ferramentas usadas no sistema, banco de dados de ferramentas;

- Disponibilidade de gerenciamento por meio de relatórios de desempenho: desempenho das estações, produção por peça (real e planejada), tempo de processamento, histórico por peças, etc;
- Controle da produção: “mix” de produtos, programação das máquinas, e outras funções de planejamento.
- Controle local: consiste no controle de cada componentes (magazines automatizados, robôs, máquinas ferramentas, AGVs etc), com comandos associados à execução, interrupção e reinicialização e continuação das operações, carga e descarga de programas e envio de mensagens de estado.

Associado com cada uma dessas funções existe um ou mais módulos de software, sendo que em grande parte dessas funções e módulos são aplicações específicas.

Uma estrutura modular dos softwares de aplicação do FMS para o controle do sistema é ilustrada na Figura 2.1. Nesta arquitetura é usada uma comunicação bidirecional, de modo que, dados e comandos são enviados do computador central para as máquinas individuais e outros componentes de hardware, e dados sobre as execuções e desempenhos são transmitidos dos componentes para o computador central.

2.2.3. Operários no ambiente do FMS

Um componente adicional na operação de um sistema flexível de manufatura é o operário humano. Os deveres executados pelos operários incluem:

- Carregar e descarregar peças do sistema;
- Trocar e fixar ferramentas cortantes;
- Realizar manutenção e consertos de equipamentos;
- Construir programas NC para as peças;
- Programar e operar o sistema de computador;
- Administração global do sistema.

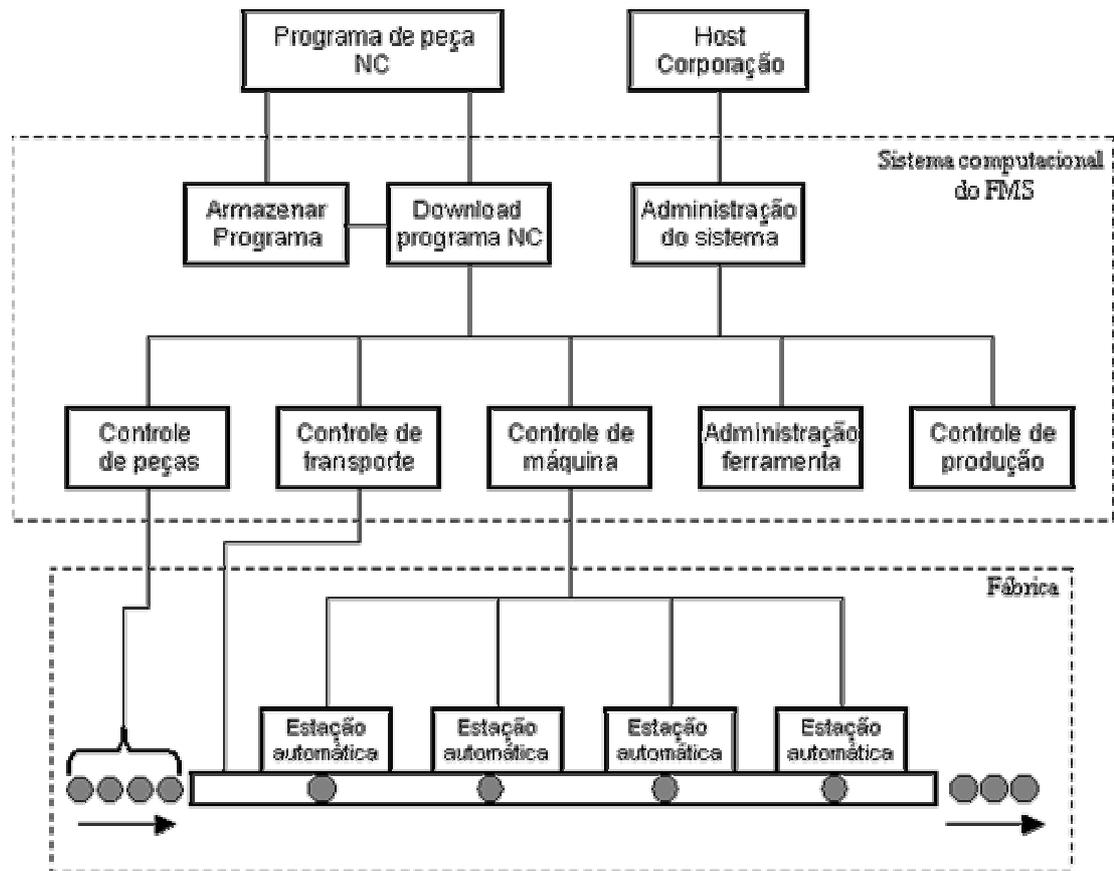


Figura 2.1 – Estrutura do sistema de software de aplicação do FMS [Groover 1996].

2.3. Tipos de “layout” de FMS

O sistema de manipulação de material do FMS estabelece a base para o seu *layout*. Cinco tipos de *layout* podem ser identificados [Groover 1996]: em linha, *loop*, escada, *open-field* e célula com robô centralizado.

O layout em linha, figura 2.2, utiliza um sistema de transferência linear para movimentar as peças entre as estações de processamento e estação de carga/descarga. O sistema de transferência em linha é normalmente bidirecional, senão, o FMS operaria como uma linha de transferência de manufatura, e os diferentes tipos de peças feitos no sistema seguiriam a mesma seqüência básica de processamento devido ao fluxo unidirecional.

O layout em *loop*, figura 2.3, consiste de um transportador em *loop* com as estações localizadas ao seu redor. Esta configuração permite qualquer seqüência de

processamento, porque uma estação está acessível a qualquer outra estação. Isto também é verdade para o caso do layout tipo escada, apresentado na figura 2.4, no qual as estações de trabalho estão localizadas nos degraus da escada.

O layout *open-field*, figura 2.5, é a configuração de FMS mais complexa [Groover 1996] e consiste de vários loops interligados utilizando um sistema de veículos auto-guiados (AGV). E, por último, o layout tipo célula com robô centralizado, apresentado na figura 2.6, que consiste de um robô cujo volume de trabalho corresponde a carregar e descarregar as máquinas da célula de manufatura.

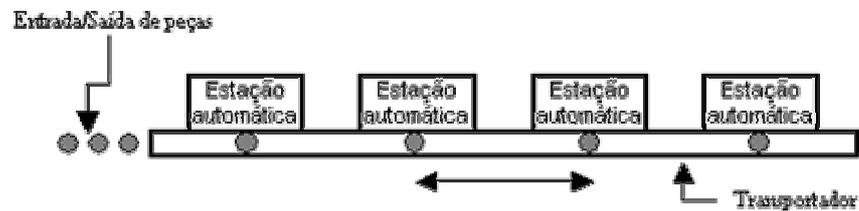


Figura 2.2 – Tipo de layout em linha.

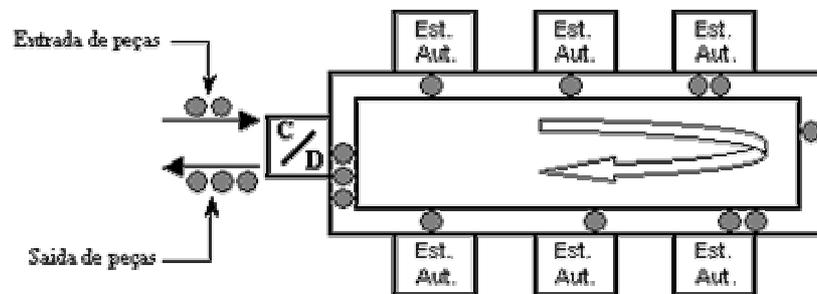


Figura 2.3 – Tipo de layout em loop.

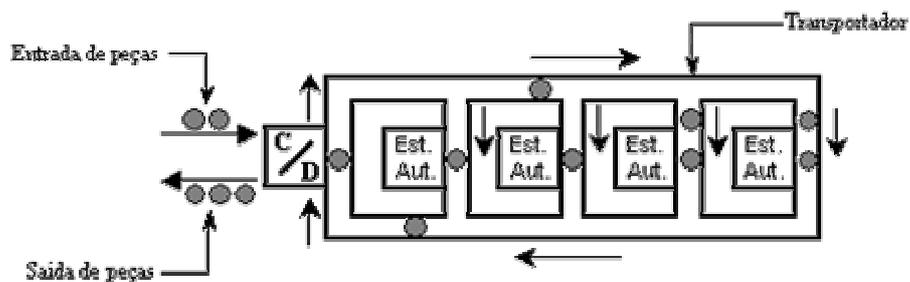


Figura 2.4 – Tipo de layout escada.

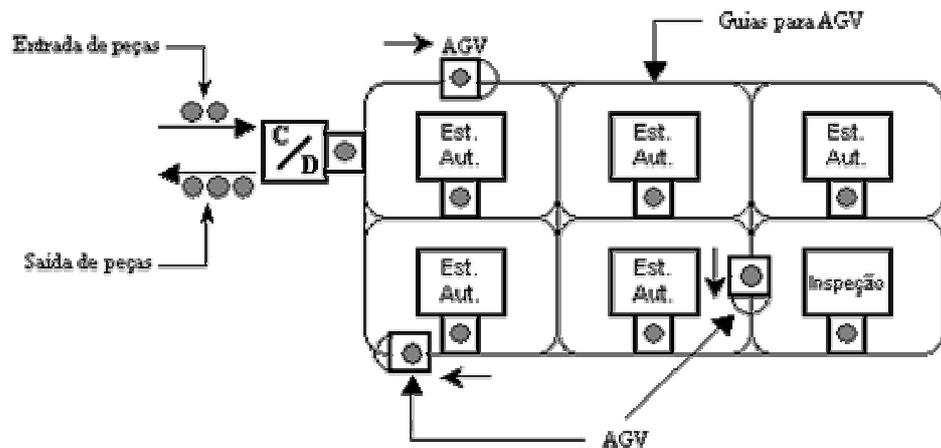


Figura 2.5 – Tipo de layout *open-field*

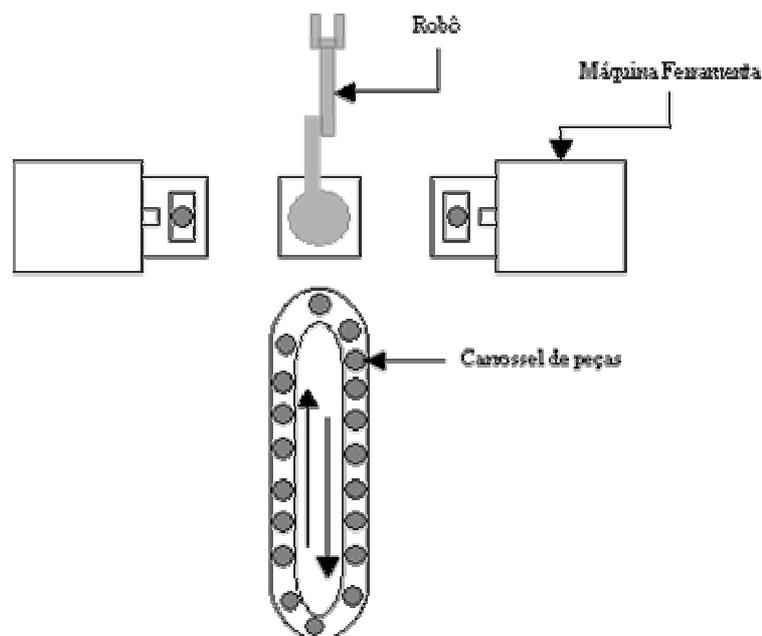


Figura 2.6 – Tipo de layout em célula com robô centralizado.

2.4. Aplicações do Sistema Flexível de Manufatura

Os sistemas flexíveis de manufatura são tipicamente usados para produção de médio volume e média variedade de peças, enquanto que se a produção de uma peça ou produto for feita em grandes quantidades e pouca variedade, seria mais apropriado um sistema de produção dedicado ou uma linha de transferência flexível. Outro caso seria a produção de baixo volume e alta variedade de peças, no qual o

sistema mais indicado seria os que utilizam máquinas-ferramentas de CNC isoladas ou centros automatizados de CNC. Estas características de aplicações estão sumarizadas na Figura 2.7.

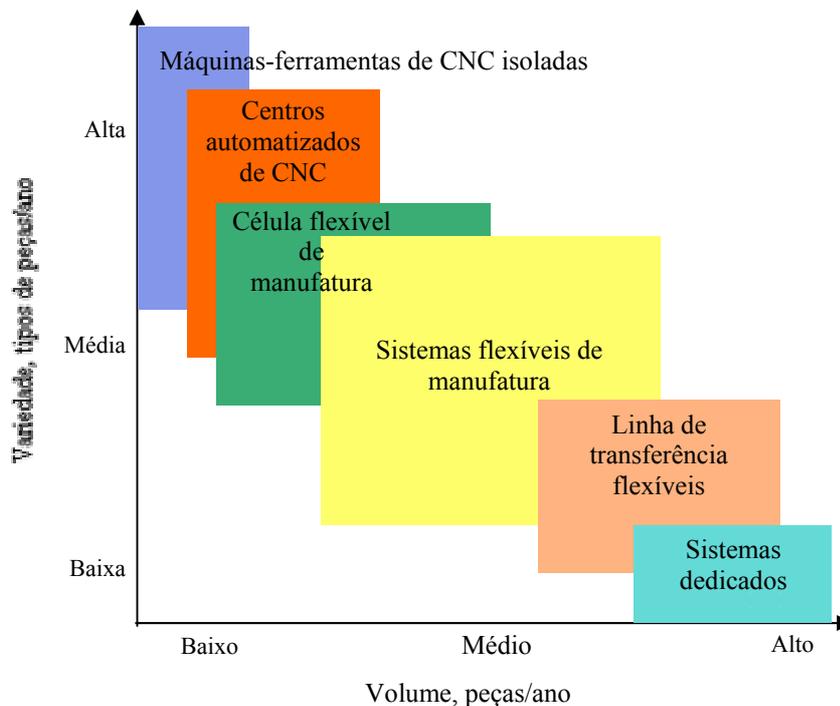


Figura 2.7 – Aplicações características de sistemas flexíveis de manufatura e células relativas a outros tipos de sistema de produção. Fonte: Adaptado de Slack *et al.* (2002).

Os sistemas flexíveis de usinagem são as aplicações mais comuns da tecnologia de FMS. Devido às flexibilidades e capacidades inerentes do controle numérico por computador (CNC), é possível conectar várias máquinas ferramentas CNC a um pequeno computador central e conceber métodos automatizados para transferência de peças entre as máquinas.

Além dos sistemas de usinagem, outros tipos de sistemas flexíveis de manufatura também estão sendo desenvolvidos, embora o estado tecnológico nestes outros processos não tem permitido uma rápida implementação, como tem ocorrido na usinagem. Os outros tipos de sistemas incluem montagem, inspeção, processamento de chapas de metal (furação, corte, dobra, etc), e fundição.

A maior parte das experiências em sistemas flexíveis de manufatura foi adquirida na área de usinagem [Groover 1996] e os benefícios normalmente alcançados por esses sistemas de usinagem com a aplicação do FMS são:

- Aumento da produtividade
 - alta utilização das unidades de produção;
 - redução do tempo de montagem/preparação (“setup”);
 - aumento da taxa de utilização de máquinas.
- Aumento da flexibilidade
 - variedade de produtos;
 - mudança no mix original de produção.
- Redução de estoque
 - estoque de peças em processo;
 - estoque de ferramentas.
- Redução do tempo nas estações de trabalho
 - redução dos tempos de montagem/preparação;
 - utilização de sistemas automatizados de manipulação de materiais.

3. Programação de operações

3.1. Introdução

Em um sistema de manufatura, ao serem definidas suas metas e estratégias, faz-se necessário formular planos para atingi-las, administrar os recursos humanos e físicos com base nesses planos, direcionar a ação dos recursos humanos sobre os físicos e acompanhar esta ação, permitindo a correção de prováveis desvios [Tubino 2000]. No âmbito da administração da produção, essas atividades são desenvolvidas pelo planejamento e controle da produção.

A divisão entre as atividades de controle da produção e a de planejamento da produção não é clara, nem na teoria, nem na prática [Slack *et al.* 2002]. Todavia, há algumas características gerais que ajudam a distinguir as duas atividades. Um plano é uma formalização de o que se pretende que aconteça em determinado momento no futuro, ele não garante que um evento vá realmente acontecer, é uma declaração de intenção de que aconteça.

A atividade de planejamento da produção trata de questões de médio prazo, tais com: planejamento da capacidade produtiva para tentar compatibilizá-la com o comportamento esperado da demanda futura, fornecer diretrizes e parâmetros para que contratos de fornecimento de médio prazo possam ser firmados, etc. As questões de longo prazo são tratadas no âmbito do planejamento estratégico da produção, tais como: grande alteração na linha de produtos, grande expansão ou supressão da capacidade produtiva, incorporação ou desativação de fábricas, etc. [Fernandes 1991].

A atividade de controle da produção é um conjunto de ações que visam ao direcionamento do plano, monitorando o que realmente acontece e fazendo eventuais mudanças no plano que permitem que a operação atinja aos objetivos estabelecidos pelo plano, compreendendo uma verificação constante do objetivo, e uma redefinição freqüente do plano.

O núcleo do controle da produção é o processo decisório que deve ser realizado em etapas sucessivas indo do geral para o detalhe, ou seja, é um processo que deve seguir o enfoque sistêmico [Fernandes 1991]. Essas etapas, denominadas de níveis

de controle de produção, compreendem no primeiro nível um plano de produção de curto prazo chamado de Programa Mestre de Produção (PMP), no qual se estabelecem quais produtos e em quais quantidades deverão ser fabricados num determinado período de tempo. Num segundo nível inclui a etapa de Emissão de Ordens, a qual subentende-se em um processo de converter as necessidades colocadas no PMP em produtos finais, para a forma de necessidades em termos de itens componentes (comprados ou fabricados). E por fim a etapa de Programação de Operações que realiza a programação diária do volume de produção por máquina, ou carga de máquina, necessária para completar as ordens na data devida. [Fernandes 1991].

Entre as atividades de planejamento e controle da produção, este trabalho tem enfoque em uma das etapas da atividade de controle da produção, a Programação de Operações.

De um modo geral, programação de operações é a alocação de recursos limitados para as tarefas num dado período de tempo. É um processo de tomada de decisão que tem como meta o atendimento de um ou mais objetivos [Pinedo 1995; Gamila e Motavalli 2003]. Esses recursos podem ser máquinas em uma fábrica, trabalhadores em uma construção, unidades de processamento em um ambiente de computação, e assim por diante. As tarefas, por sua vez, podem ser operações em um processo de produção, fases em um projeto de construção, execuções de programas de computador, etc. Os objetivos que devem ser atendidos pela programação estão relacionados a essas tarefas e recursos, tais como a minimização do tempo de conclusão da última tarefa, e a minimização do número de tarefas completadas depois do prazo de entrega [Pinedo 1995].

Um programa especifica o tempo em que cada tarefa inicia e termina em cada máquina, como também em qualquer recurso adicional necessário. Um seqüenciamento é simplesmente a ordenação de tarefas em uma máquina, mas se todas as tarefas iniciam-se o mais rápido possível e são processadas sem interrupção por um dado tempo de processamento, podemos dizer que o seqüenciamento determina os tempos de início e fim da tarefa, e então, determina o programa [Sipper e Bulfin Jr. 1998]. Esta definição também é apresentada em [Conway *et al.* 1967] a programação é o seqüenciamento simultâneo e sincronizado de tarefas, formadas por um conjunto de operações, em várias máquinas.

A programação é um processo de tomada de decisão que existe na maioria das manufaturas e sistemas de produção como também na maioria dos ambientes de processamento de informação, sendo um dos aspectos mais difíceis dos sistemas de manufatura [Pinedo 1995].

O problema de programação surge sempre que um conjunto comum de recursos como operários, materiais, e equipamentos devem ser usados para fazer uma variedade de produtos durante o mesmo período de tempo [Gamila e Motavalli 2003].

O ambiente do FMS é dinâmico e a programação é usada não apenas para as máquinas, mas também para o sistema de manipulação de materiais e sistema de apoio, tais como máquinas de inspeção, dispositivos de fixação e ferramentas [Tang *et al.* 1993].

Apesar de muitas das questões operacionais que envolvem *job shops* convencionais e FMS serem conceitualmente similares, existem diferenças significativas nas características dos sistemas [Ro e Kim 1990]. Em *job shops*, os tempos de processamento (incluindo tempos de preparação) tendem a ser muito grande relativamente ao tempo de transporte de material, e o tempo de fila representa a porção maior do tempo de fabricação. Conseqüentemente, a programação eficiente do transporte de material não é crítica. Entretanto, em um FMS, os tempos de preparação são baixos e os tempos de transporte são comparáveis aos tempos de processamento. Além disso, já que as máquinas têm tamanho de buffer limitado, sua produtividade é dependente do fornecimento e retirada de material no momento certo.

O problema de programação de um FMS é considerado ser uma programação detalhada minuto por minuto das máquinas, sistemas de manipulação de material, e outros equipamentos de suporte. Dados as condições correntes da fábrica e um conjunto de peças com as necessidades de processamento conhecidas, a programação deverá realizar as seguintes tarefas [Sabuncuoglu e Hommertzheim 1992]:

- Programar os tempos de liberação das tarefas correntes.
- Seqüenciar as tarefas e determinar os tempos de início e término de cada operação em uma ampla variedade de recursos.
- Monitorar a execução da programação e realizar correções nas contingências.

Embora a programação se refere à alocação de tarefas a todos os recursos do sistema tais como máquinas, ferramentas, sistema de manipulação de material, etc., ela é mais frequentemente utilizada como programação de tarefas nas máquinas. Porém, para um sistema dinâmico e altamente integrado como um FMS, a programação do sistema de manipulação de materiais em tempo real, e considerações sobre capacidades dos *buffers*, roteiros, e outras características deste ambiente, são igualmente importantes, e serão discutidas na próxima seção.

3.2. Característica do ambiente de um FMS

As características do ambiente de um sistema flexível de manufatura que devem ser consideradas na programação do mesmo são [Sabuncuoglu e Hommertzheim 1992; Hansmann e Hoeck 1997; Gamila e Motavalli 2003]:

- *Limitações da capacidade do buffer*: os sistemas de manipulação de materiais de FMS são automatizados e geralmente limitam a quantidade de peças em processo ou peças acabadas que podem ser manipuladas. O estoque em processo pode ser manipulado por um *buffer* centralizado, ou por *buffers* fornecidos para cada estação de trabalho, como um *buffer* para entrada de peças nas estações e um *buffer* de saída de peças já processadas pelas estações. Entretanto, a limitação da capacidade do *buffer* é, geralmente, uma restrição crítica na programação de um FMS, visto que, há sempre a possibilidade de uma máquina ficar bloqueada ou o sistema inteiro ficar travado devido aos espaços dos *buffers* limitados. O bloqueio ocorre quando uma máquina não pode mover a peça que acabou de ser processada para o *buffer* de saída, se ele estiver cheio. Enquanto que, o travamento ocorre quando o sistema está totalmente impedido de funcionar, quando mais nenhum movimento de peça pode ser realizado no sistema. Portanto, a capacidade limitada dos *buffers* deve ser considerada na programação de um FMS.
- *Roteiros flexíveis*: as máquinas CNC, dotadas de carrosséis de ferramentas automatizados, são capazes de realizar muitas operações diferentes com pequenos tempos de *setup* entre as operações [Hansmann e Hoeck 1997]. Esta versatilidade em conjunto com o sistema de manipulação de materiais em um FMS, permite uma considerável flexibilidade na realização dos roteiros de fabricação das peças, pois,

as operações podem ser desempenhadas por mais de uma máquina, possibilitando ao sistema aliviar máquinas gargalos e realizar manutenção nas máquinas. Visto que a maioria dos procedimentos de operação do FMS é controlada por computador, não há necessidade de especificação prévia do roteiro que será realizado pela peça, pois, a escolha da máquina que realizará cada operação do roteiro pode ser feita dinamicamente durante a execução do roteiro, dependendo do *status* do FMS. No FMS, o uso de roteiro flexível fornece mais flexibilidade para a realização das operações e pode melhorar o desempenho do sistema. No entanto, as decisões da programação tornam-se mais complexas.

- *Tempo de transporte*: os tempos de espera de peças em *job shops* são muito altos. Portanto, mesmo se os tempos de trajeto são substanciais, é improvável que uma operação subsequente atrase por causa desse tempo. No entanto, em um FMS, o tempo de transporte é importante e depende da utilização do sistema de manipulação de materiais e da sua velocidade, pois os tempos de transporte são comparáveis aos tempos de processamento, e devem ser considerados na programação de um FMS.
- *Tempos de processamento determinísticos*: Visto que as operações são controladas por computador, os tempos de processamento são bem previsíveis e quase determinísticos. Isto implica que não apenas são programas previsíveis (exceto para falhas aleatórias de máquinas), mas também que recursos podem ser melhor utilizados. Isso pode resultar em tempos de espera reduzidos e, portanto, menos tarefas em processo.
- *Tempos de preparação reduzidos (setup)*: nos FMSs, os seus componentes automatizados, como robôs e máquinas CNC com capacidade de troca de ferramenta, têm operações programáveis, o que reduz sensivelmente os tempos de *setup* entre operações consecutivas. Outro motivo do baixo tempo de *setup* é que o FMS produz uma família de peças de acordo com os princípios da Tecnologia de Grupo [Fernandes 1991]. Nestes casos, os tempos de *setup* podem ser desprezados na programação de um FMS [Hansmann e Hoeck 1997].

A programação também pode ser influenciada por outros fatores tais como prioridade de fabricação, necessidades de datas de entrega, datas de liberação das ordens, restrições de custo, níveis de produção, restrições de tamanho de lote,

disponibilidade das máquinas, capacidade das máquinas, precedência de operações e disponibilidade de recursos [Rodammer e White 1988; Gamila e Motavalli 2003].

3.3. Medidas de desempenho para programação da produção

A medida de desempenho é o processo de quantificar ação, no qual *medida* significa o processo de quantificação, e o desempenho da produção é presumido como derivado de ações tomadas por sua administração [Slack *et al.* 2002]. Uma das ações tomadas pela administração da produção é a programação de operações, e as medidas de desempenho para programação são definidas por uma função de valor escalar que mede o desempenho ou eficiência de uma programação em particular. Uma medida de desempenho normalmente é definida em termos das características do chão de fábrica ou da conclusão de uma tarefa e é determinada como uma função dos tempos de conclusão das operações ou tarefas [Banks 1998].

As medidas de desempenho para programação podem ser classificadas, segundo Banks (1998), em três categorias:

1. *Baseado no desempenho do chão de fábrica.* Este conjunto de medidas considera somente informações de tempo sobre as datas de início e término das tarefas na fábrica. Este tipo de medida inclui:
 - Tarefa em processo (WIP – *work in process*)
 - Utilização
 - Peças concluídas por dia, semana, etc.
2. *Baseado em datas de entrega.* As medidas baseadas em data de entrega consideram a necessidades de entrega especificadas pelo cliente ou informações de datas determinadas internamente, para a programação. Este conjunto de medidas pode incluir:
 - Tempo médio de atraso
 - Número de peças atrasadas
3. *Baseado em custo.* A introdução de diferentes componentes de custo e a dificuldade de se obter estimativas precisas para cada um dos componentes torna as medidas baseadas em custo muito complicadas para os problemas de programação industrial.

Na maioria dos casos, os custos são considerados implicitamente nas medidas dadas nas duas categorias acima.

A escolha apropriada de uma medida de desempenho para a programação é uma consideração importante. Apesar do objetivo final de qualquer empresa ser maximizar o seu lucro, esse critério não se presta facilmente para a tomada de decisão em programação. Infelizmente, é difícil calcular parâmetros financeiros que relacionam um programa com custo e lucro, como também, não são conhecidos algoritmos eficientes para otimizar custos ou lucros para um modelo de programação [Sipper e Bulfin Jr. 1998]. As pesquisas realizadas usam medidas de desempenho que influenciam os custos e lucros. Essas incluem números de peças atrasadas, atraso médio, capacidade, bem como os números médios de peças no sistema, utilização de máquinas e tarefas em processo.

A análise dessas medidas indica que um procedimento de programação que tem um bom desempenho para uma medida não é necessariamente bom para alguma outra. Por exemplo, a tentativa de reduzir o atraso médio pode levar ao aumento do tempo médio de fluxo. Outras complicações surgem no contexto do FMS por causa de variáveis de decisões adicionais envolvendo, por exemplo, o roteamento flexível.

A maioria das medidas de desempenho para *job shop* podem ser utilizadas em FMS, tais como, minimização do *makespan* (minimização do tempo requerido para completar todos trabalhos), minimização do atraso máximo (minimização da maior diferença entre o tempo de conclusão e a data de entrega), minimização do tempo de processamento total, e minimização do custo total [Gamila e Motavalli 2003].

Essas medidas de desempenho para programação da produção, como outras medidas em geral, estão relacionadas com os objetivos mais amplos que as operações produtivas necessitam perseguir para satisfazer os objetivos estratégicos de sua organização, os quais formam o “pano de fundo” para todo o processo decisório da produção. Em Slack *et al* (2002) foi mais estritamente definido um conjunto desses objetivos para o nível operacional, que é formado por cinco objetivos de desempenho básicos que se aplicam a todos os tipos de operações produtivas, sendo eles:

- *Qualidade*: fazer certo as coisas, isto é, produzir produtos sem cometer erros e satisfazer a seus consumidores fornecendo produtos adequados a seus propósitos.

- *Rapidez*: fazer as coisas com rapidez, minimizando o tempo que os consumidores precisam esperar para receber seus produtos, ou seja, a produção procura influenciar a velocidade com que os produtos são fornecidos. Externamente, a rapidez é um aspecto importante do serviço ao consumidor. Internamente, a rapidez tanto reduz estoques, ao diminuir o tempo de atravessamento ou tempo de fluxo, como reduz riscos, ao atrasar o comprometimento de recursos.
- *Confiabilidade de entrega*: fazer as coisas em tempo para manter os compromissos de entrega assumidos com os consumidores, outro aspecto importante do serviço ao consumidor. Internamente, a confiabilidade dentro da produção aumenta a confiabilidade operacional, economizando, assim, tempo e dinheiro, que seriam, de outra forma, gastos em solucionar problemas de confiabilidade, e também dando mais estabilidade à operação.
- *Flexibilidade*: estar em condições de mudar ou de adaptar as atividades de produção para enfrentar circunstâncias inesperadas ou para dar aos consumidores um tratamento individual. Externamente, a flexibilidade pode:
 - produzir novos produtos (flexibilidade de produto);
 - produzir ampla gama ou composto (mix) de produtos (flexibilidade de mix);
 - produzir diferentes quantidade ou volumes de produtos (flexibilidade de volume);
 - produzir e entregar produtos em diferentes momentos (flexibilidade de entrega).Internamente, a flexibilidade pode apressar os tempos de resposta, economizar tempo gasto em troca de equipamentos e manter a confiabilidade.
- *Custo*: fazer as coisas o mais barato possível, isto é, produzir produtos a custos que possibilitem fixar preços apropriados ao mercado e ainda permitir retorno para a organização. Custos baixos permitem às empresas reduzir seus preços de modo a ganhar com volumes mais altos, ou, de forma alternativa, aumentar sua lucratividade nos níveis de volume atual.

Esses cinco objetivos de desempenho são realmente compostos de muitas medidas menores que são usadas para julgar o desempenho de uma função produção e algumas dessas medidas são apresentadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Algumas medidas de desempenho utilizadas na Produção. Fonte: Slack *et al* (2002)

Objetivo de desempenho	Algumas medidas típicas
Qualidade	Número de defeitos por unidade Nível de reclamação de consumidor Nível de refugo Alegações de garantia Tempo médio entre falhas Escore de satisfação do consumidor
Rapidez	Tempo de cotação do consumidor <i>Lead time</i> de pedido Frequência de entregas Tempo de atravessamento Tempo de ciclo
Confiabilidade	Porcentagem de pedidos entregues com atraso Atraso médio de pedidos Proporção de produtos em estoque Desvio-médio de promessa de chegada Aderência à programação
Flexibilidade	Tempo necessário para desenvolver novos produtos/serviços Faixa de produtos ou serviços Tempo de mudança de máquina Tamanho médio de lote Tempo para aumentar a taxa de atividade Capacidade média/capacidade máxima Tempo para mudar programações
Custo	Tempo mínimo de entrega/tempo médio de entrega Variação contra orçamento Utilização de recursos Produtividade da mão-de-obra Valor agregado Eficiência Custo por hora de operação

Muitas destas medidas, apresentadas na tabela 3.1, são utilizadas para avaliar o desempenho de uma programação, como por exemplo, a medida de porcentagem de pedidos entregues com atraso pela produção depois da execução de um programa. Sendo assim, pode-se dizer que o desempenho de uma programação impacta diretamente o desempenho da manufatura.

Neste trabalho serão utilizadas algumas medidas para avaliar o desempenho do procedimento de programação proposto, sendo elas:

1. Porcentagem de pedidos entregue com atraso;
2. Atraso médio de pedidos;
3. Tempo médio de atravessamento ou tempo médio de fluxo;

4. Estoque de peças em processo – WIP (work in process);

Estas medidas influenciam diretamente dois objetivos de desempenho da produção, confiabilidade, por meio das medidas “porcentagem de pedido entregue com atraso” e “atraso médio de pedidos”, e rapidez, com a medida “tempo médio de fluxo”. A medida de estoque de peças em processo está relacionada com a medida “tempo médio de fluxo”, visto que ao realizar operações mais rápidas reduzem o nível de estoque em processo, bem como diminuem os custos administrativos indiretos [Slack *et al.* 2002]. Dessa forma, as medidas de desempenho utilizadas neste trabalho também influenciam, indiretamente, no objetivo custo, uma vez que este objetivo é afetado pelos outros, conforme é ilustrado na figura 3.1, que apresenta os efeitos externos e internos provocados pelos objetivos de desempenho.

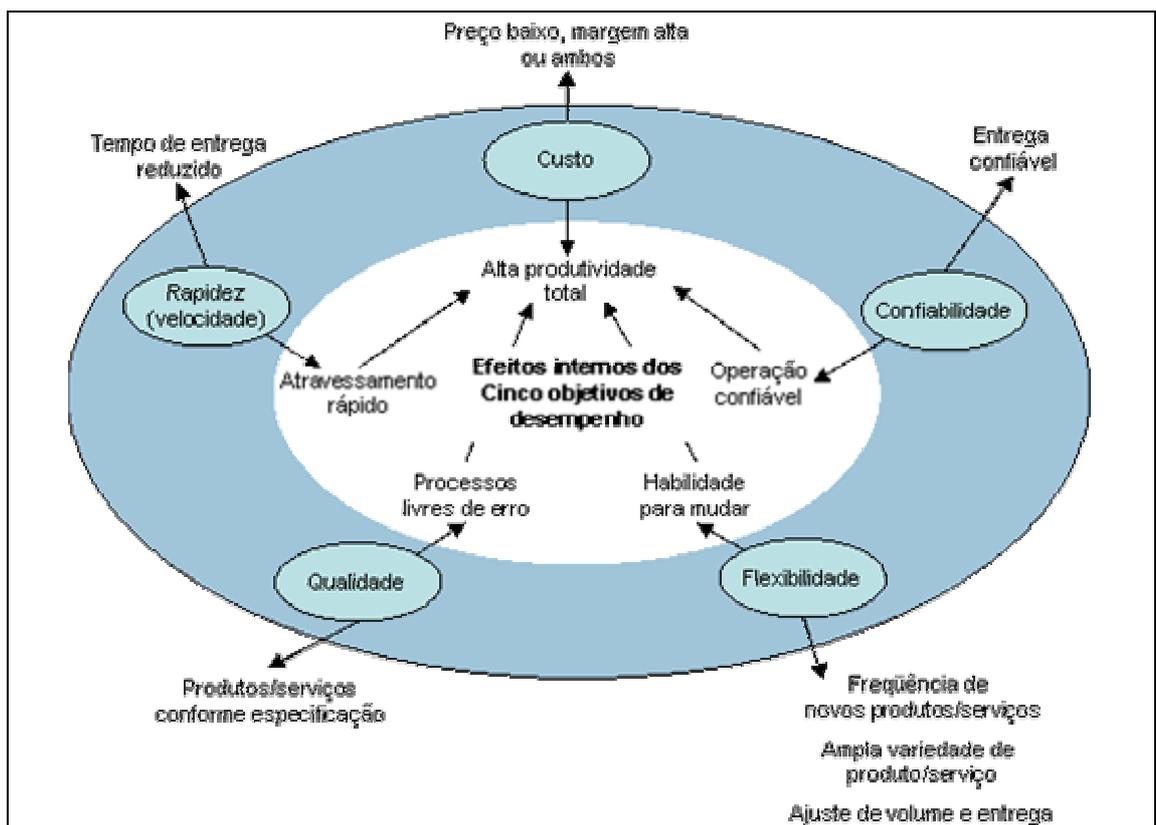


Figura 3.1 – Efeitos externos e internos dos objetivos de desempenho. Fonte: Slack *et al.* 2002.

3.4. Programação “on-line” e “off-line”

Existem dois elementos chaves em qualquer sistema de programação: geração da programação e a revisão, que consiste no monitoramento e atualização da

programação. O primeiro elemento que age como um mecanismo preditivo determina o programa inicial e os tempos de conclusões das operações das tarefas. O segundo elemento, o qual é visto como a parte reativa do sistema, monitora a execução do programa e lida com os eventos inesperados, tais como, quebra de máquinas e ferramentas, cancelamento de pedidos, mudanças de data de entrega, etc. [Sabuncuoglu e Bayiz 2000].

A maior crítica contra os mecanismos preditivos na prática é que os eventos reais no chão de fábrica podem ser consideravelmente diferentes quando comparados ao especificado na programação devido às interrupções aleatórias (mudanças de datas, cancelamento de pedidos, quebras, inclusão de novos pedidos urgentes, etc.). Sendo assim uma ação corretiva apropriada deveria ser tomada para melhorar o desempenho da programação degradada. Ao lado de outros fatores ambientais, a natureza de uma resposta depende do modo que um programa é gerado. Na literatura de programação, existem duas aplicações principais de programação: programação *off-line*, na qual todas as tarefas disponíveis são programadas imediatamente para o horizonte de planejamento inteiro, e programação *on-line*, na qual as decisões de programação são tomadas uma de cada vez quando necessário [Sabuncuoglu e Bayiz 2000]. Nas abordagens *on-line*, a programação não é determinada com antecedência, mas é construída no decorrer do tempo de acordo com as mudanças de estado do sistema. Assim, qualquer distúrbio pode automaticamente ser dirigido por este sistema de programação baseado em evento. Nas abordagens *off-line*, porém, há uma programação gerada anteriormente que precisa ser revisada sempre que necessário, fazendo reparos na programação existente e gerando uma nova programação.

A programação com características de tempo real é um processo de tomada de decisão de curto prazo, que gera e atualiza a programação baseada no estado corrente do sistema e nas necessidades gerais do sistema. A programação em tempo real pode ser empregada tanto para os métodos *on-line* como *off-line* ou em uma combinação dos dois métodos. Se os métodos *off-line* são utilizados, o processo torna-se programável e reprogramável, ao passo que, na programação *on-line*, a decisão de programação é feita quando o estado do sistema muda, por exemplo, pela realização de uma tarefa, chegada de uma peça, etc.

3.5. Modelos de programação

Os modelos são utilizados para avaliar e prever o desempenho dos sistemas de manufatura. A avaliação do desempenho envolve a tarefa de traduzir o sistema real em um modelo matemático ou modelo de simulação e subsequentemente resolvê-lo de modo a obter as medidas de desempenho desejadas [Kamath 1994].

As medidas de desempenho, como já apresentado na seção 3.3, indicam a eficiência de certa configuração de um sistema de manufatura. A configuração de um sistema de manufatura é determinada por um conjunto de decisões de fabricação como os produtos a serem produzidos, o número e tipos de equipamentos, o roteiro das peças, o número e tipos de dispositivos de manipulação de material, capacidade e localização das áreas de armazenagem dos produtos não acabados e estratégias de operação. As medidas de desempenho de um sistema de manufatura são vitais na avaliação de seu projeto, bem como no planejamento de sua operação [Kamath 1994].

Vários modelos vêm sendo desenvolvidos para o problema de programação da produção de FMS, os quais utilizam diferentes abordagens para solução do problema, tais como [Gamila e Motavalli 2003]:

- Programação matemática
- Regras de prioridade
- Heurística
- Inteligência artificial.

Alguns modelos de programação encontrados na literatura são descritos a seguir.

[Chan *et al.* 2003] apresentam uma abordagem de programação em tempo real utilizando um algoritmo de programação dinâmica que faz a seleção de regras de prioridade de máquinas em um FMS. Nesse modelo de programação a regra de prioridade de máquina é trocada dinamicamente a uma frequência que varia pelo número de saídas produzidas pelo sistema. Em cada ponto de troca da regra de prioridade, são calculados índices que representam as medidas de desempenho que estão sendo monitoradas e esses índices são ordenados em ordem decrescente, onde o maior

índice representa a pior situação da medida no sistema. Assim, uma regra apropriada para melhorar esta medida de desempenho será selecionada para a próxima operação.

No trabalho de Chan *et al*, foi desenvolvido um modelo de simulação de um FMS que se sujeita à minimização de três medidas de desempenho simultaneamente (tempo médio de fluxo, atraso médio e adiantamento médio), aplicando-se esta abordagem de programação em tempo real. O ambiente do FMS modelado na simulação é constituído de cinco máquinas, uma estação de carga/descarga de peças, um *buffer* central de capacidade limitada, e dois AGVs para transporte de peças.

O *buffer* central é utilizado para armazenar todas as tarefas que esperam para serem processadas, sendo assim, quando mais do que uma tarefa está requisitando um serviço, uma fila será criada no *buffer* central e a máquina selecionará a próxima tarefa a ser processada de acordo com a regra de prioridade especificada pelo algoritmo de programação dinâmica.

Os dois AGVs são utilizados para transporte de peças entre máquinas e entre estação de Carga/Descarga e máquinas, e quando mais do que um AGV está disponível, o AGV será selecionado pela tarefa que inicia a requisição usando a regra de menor distância, e se a distância dos dois AGVs forem iguais o primeiro AGV sempre será selecionado. Por outro lado, se mais do que uma tarefa está solicitando transporte, então a primeira a requisitar será a primeira a ser atendida, adotando-se a regra FCFS (*First Come First Served*).

As tarefas executadas nesse ambiente do FMS possuem roteiros de fabricação alternativos e no processo de programação do FMS a escolha da máquina é feita de modo aleatório.

Na primeira parte desse trabalho, várias regras de prioridade de máquinas foram simuladas uma a uma neste ambiente de FMS para se estudar os seus efeitos no sistema com base nas três medidas de desempenho escolhidas. Baseado nesse estudo, as regras que obterão o melhor desempenho nas medidas avaliadas foram selecionadas para o algoritmo de programação dinâmica, sendo elas:

- Para *tempo fluxo médio*, a melhor regra foi SPT (menor tempo de processamento).
- Para *atraso médio*, a melhor regra foi EDD (data de entrega mais próxima).

- Para *adiantamento médio*, a melhor regra foi SPT X TOT (o menor valor do produto do tempo de processamento multiplicado pelo tempo de processamento total).

Depois de selecionada uma regra para cada medida, o ambiente de FMS foi novamente simulado utilizando o algoritmo de programação dinâmica em tempo real. Os resultados da simulação mostraram que o desempenho do sistema ao usar programação dinâmica pode ser melhorado mudando-se a regra de prioridade correspondente. Nesse trabalho somente a regra de prioridade de máquinas foi variada, sendo que outras regras de operação importantes, tais como despacho de AGV, regra de seleção de máquina, etc., não são consideradas.

Em [Gamila e Motavalli 2003] foi analisado o problema de programação da produção de um FMS em modo *off-line*. No modelo proposto foi considerada a distribuição de ferramentas, distribuição das operações, e programação das operações. O problema de distribuição de ferramentas é encaminhar as ferramentas necessárias para o magazine de ferramentas das máquinas. A distribuição de operação deve designar as operações de peças para as máquinas sob um plano de produção, enquanto a programação de operações deve determinar a seqüência de entrada das operações encaminhadas para cada máquina. Nesse modelo foi assumido que existe um conjunto de ferramentas com tempo de vida útil conhecida e um conjunto de máquinas que pode produzir uma variedade de peças. Vários tipos de peças são roteadas por meio desse sistema com a suposição que o tempo de processamento e o custo variam com o roteamento das peças para diferentes máquinas e de ferramentas para as máquinas.

Esse problema foi formulado como um problema de programação inteira zero-um para carregar e rotear as operações e as ferramentas entre as máquinas e baseado no plano resultante, uma heurística foi desenvolvida para realizar a programação das operações nas máquinas de forma a minimizar o tempo de conclusão.

Para análise do desempenho do sistema foram utilizadas as seguintes medidas de desempenho: custo de *setup*, custo de processamento, tempo total, máximo tempo de conclusão, custo total, porcentagem de utilização. O modelo desenvolvido foi aplicado a dois exemplos para demonstrar sua eficiência, sendo que em deles foi comparado com o trabalho de [Sarin e Chen 1987].

[Kazerooni *et al.* 1997] investigaram os problemas operacionais dos FMSs por meio de simulação, e diferentes combinações de regras de prioridade foram avaliadas por um sistema *fuzzy* integrado de apoio à tomada de decisão. O objetivo da simulação nesse trabalho foi de modelar um sistema de FMS típico e estudar os efeitos de várias regras de prioridade nas estações de trabalho, e diferentes regras de seleção de máquina para os roteiros alternativos.

O FMS estudado nesse trabalho consiste de sete tipos de peças com roteiros alternativos, seis estações de trabalho onde cada estação contém uma máquina e um *buffer* de entrada/saída com capacidade limitada, uma estação de carga/descarga de peças, uma área de armazenamento, e três AGVs para transporte das peças. Nesse estudo foram considerados os tempos de *setup* e custos de fabricação do produto, como também foi formulado um preço de venda para cada peça para análise do lucro líquido como medida de desempenho, mas não foram considerados os tempos de transportes na programação do FMS.

Nesse trabalho foi utilizada uma combinação de cinco regras de prioridade aplicadas no *buffer* de entrada de cada estação de trabalho e três regras de seleção de máquina. As regras de prioridade utilizadas foram: FIFO (primeiro que entra primeiro que sai), SPT (menor tempo de processamento), LPT (maior tempo de processamento), STPT (menor tempo de processamento total), e LTPT (maior tempo de processamento total). E as regras de seleção de máquina foram: RAN (aleatória), SQL (menor tamanho de fila), e LULIB (menor utilização do *buffer* de entrada local).

As quinze combinações de regras de prioridade foram simuladas no modelo de FMS analisando-se os resultados das medidas de desempenho para cada combinação de regra. As medidas de desempenho analisadas foram: *makespan*, *lead time*, tempo de espera no *buffer* de entrada, WIP (produto em processo), lucro líquido e porcentagem de utilização de máquina.

Nessa simulação constatou-se que as melhores regras de prioridade combinadas para cada medida de desempenho individual são diferentes. Como exemplo, a combinação das regras SQL/SPT obteve o melhor resultado para a medida de desempenho *makespan*, ou seja, o menor *makespan*, comparado às outras combinações de regras, mas não obteve bons resultados nas outras medidas, como o lucro líquido, que foi um dos piores. Sendo assim, com o objetivo de se encontrar qual dessas regras

de produção atinge o melhor desempenho global foi utilizado o método AHP (processo analítico hierárquico) que é conhecido como uma técnica para compilar as regras de melhor desempenho global [Saaty 1990] e unido a este método um sistema de apoio à decisão fuzzy para analisar o desempenho das regras combinadas. Obtendo como resultado de melhor desempenho global, para o modelo de FMS estudado, a regra SQL/STPT.

[Persi *et al.* 1999] apresentam uma abordagem hierárquica para melhorar a utilização de máquinas, com magazines de ferramentas de capacidade limitada, de uma célula flexível de manufatura (FMC). Esta abordagem hierárquica é dividida em quatro níveis: formação de lotes, seqüenciamento de lotes, “*batch linking*”, e programação. O nível superior determina o conjunto de peças que podem ser processadas concorrentemente através do modelo ILP (*Integer Linear Programming*) que minimiza o tempo de processamento dos lotes, e ao mesmo tempo fornece o melhor balanceamento de carga de trabalho nas máquinas. Nos níveis abaixo, o seqüenciamento dos lotes e *batch linking* é abordado com o problema do caixeiro viajante (*Travelling Salesman Problem*), e a programação das peças dentro de cada lote é solucionada usando regras de prioridades, sendo que várias regras de prioridade foram simuladas em uma FMC (*Flexible Manufacturing Cell*) modelo e foram analisadas em relação às medidas de desempenho de tarefa em processo e taxa de utilização de máquina, obtendo como melhor regra de prioridade para este modelo, a regra EDD (data de entrega mais próxima), uma vez que todas as peças do plano de produção têm o fim do período como uma data de entrega comum.

Essa abordagem hierárquica foi aplicada em um caso real de FMC na empresa Grandi Motori S.p.a., Diesel Engine Construction, Trieste (Italy). A FMC é composta de quatro máquinas: três centros de usinagem, um dos quais é um torno mecânico vertical e uma lavadora. Cada máquina tem um *buffer* de entrada/saída de peças. Os centros de usinagem também têm um magazine de ferramenta com 144 posições cada. As ferramentas são carregadas e descarregadas automaticamente e os pallets que transportam peças ou ferramentas são também transportados automaticamente.

[Chan 1999] avaliou por meio de simulação os efeitos de várias regras de controle operacional na programação de um FMS com base nas medidas de

desempenho: makespan, tempo médio de fluxo e porcentagem de utilização de máquina. Para esse estudo um FMS hipotético foi modelado no ambiente de simulação com sete máquinas CNC, uma estação de carga universal ou cinco estações de carga dedicada ambas com capacidade finita, uma estação de descarga com capacidade igual a um, *buffers* locais nas máquinas com capacidade infinita operando com a regra FIFO (primeiro que entra primeiro que sai) que podem estar presentes ou não, e um AGV.

Três regras de controle foram analisadas nesse trabalho, sendo elas:

- *Sem roteamento alternativo* (NAR – *No Alternative Routings*): se nenhum roteamento alternativo é permitido, a rota com o menor tempo de processamento de cada operação é selecionada, e cada peça deve ser processada de acordo com uma seqüência fixa de máquinas.
- *Roteamento alternativo dinâmico* (DAR – *Dynamic Alternative Routings*): quando a próxima operação da peça pode ser executada em mais do que uma máquina é considerada que ela tem roteamento alternativo e a regra DAR seleciona a máquina alternativa com a menor carga de trabalho para executar a próxima operação da peça. Se a máquina não tem *buffer* local e ela está ocupada, a peça será encaminhada para a primeira máquina alternativa desocupada.
- *Roteamento alternativo planejado* (PAR – *Planned alternative routings*): os roteiros alternativos são planejados por um modelo LP o qual almeja maximizar a taxa de produção do FMS. O número de peças alocadas para cada rota é fixado nesta regra.

Estas regras de controle foram simuladas no modelo de FMS descrito anteriormente alternando o ambiente do FMS com uso de *buffer* locais ou não e uso de estação de carga universal ou dedicada. Os resultados dessa simulação, baseados nas medidas de desempenho, indicaram que o FMS com estações de carga dedicada para cada tipo de produto superou o FMS com estação de carga universal em todas as medidas de desempenho. No entanto, a regra DAR produziu o melhor resultado nas medidas de desempenho quando a estação de carga universal foi usada, enquanto que a regra PAR somente gerou os melhores resultados quando a estação de carga dedicada e os *buffers* locais foram usados. Os modelos com a regra NAR geralmente forneceram os piores resultados, exceto quando foi utilizada a estação de carga universal e sem *buffers* locais.

[Özbayrak e Bell 2003] desenvolveram um sistema de apoio à decisão baseado em conhecimento denominado KBDSS para programação de curto prazo de FMS, fortemente influenciada pelo conceito de administração de ferramenta para fornecer um sistema de controle operacional para uma ampla extensão de células de usinagem, onde um nível altamente flexível é demandado, com benefícios de utilização de célula mais eficiente, maior controle do fluxo de ferramentas e um modo seguro de ajustar rapidamente as necessidades da produção em curto prazo.

Os principais componentes do KBDSS são: um sistema de programação de peças baseado em conhecimento, um sistema de seleção de estratégia de administração de ferramenta baseado em conhecimento e um sistema de diagnóstico de falhas na administração de ferramentas e manufatura baseado em conhecimento. Todos estes módulos são integrados por meio de um sistema de administração de base de dados relacional e ambos os módulos de seleção de estratégia e programação de peças são alimentados por um módulo de planejamento de necessidades de ferramenta denominado TRP.

O KBDSS é um sistema de decisão baseado em árvore, que usa o conhecimento do gerente de operações de célula e do pessoal de chão de fábrica na forma de regras SE...ENTÃO. O KBDSS inicia o processo com a programação de peças. A decisão de tamanho do lote é baseada em simples conjuntos de regras SE...ENTÃO que automaticamente determina o tamanho do lote que a máquina pode dispor. As necessidades de ferramentas são determinadas principalmente pela estratégia de remessa de ferramenta adotada, o módulo de programação somente considera as necessidades básicas de ferramenta, as quais são determinadas pelo processo de planejamento, para comparar o número de ferramentas necessárias com a capacidade do magazine de ferramenta da máquina e com a capacidade de transporte. O algoritmo de programação de peças programa as tarefas de acordo com a regra de prioridade preferida do usuário. As variáveis de entrada deste módulo são peças, ferramentas, máquinas, dados dos pallets e regras selecionadas pelo usuário colocadas dentro da base de dados da manufatura. A saída deste módulo é uma lista de tarefas para as estações de trabalho e para as células, e é a principal entrada para o módulo TRP que calcula as necessidades de ferramenta.

O segundo módulo do KBDSS, o sistema de seleção de estratégia, é responsável por encontrar uma estratégia de administração de ferramenta que atenda o ambiente operacional. As principais entradas deste módulo são: base de dados da manufatura, necessidades de ferramenta fornecida pelo TRP e critérios de decisão selecionados pelo usuário.

O último módulo de diagnóstico avalia o desempenho da estratégia de administração de ferramenta e fornece realimentação durante a fase operacional e projeto em ambos os problemas organizacionais e industriais. Este módulo requer entrada dos outros três módulos, sistema de programação, TRP, e o sistema de seleção de estratégia, e ele suporta quatro grupos principais de problemas operacionais e industriais, sendo eles: problemas nas células de manufatura, nas estações de trabalho, no armazém de ferramentas e na ferramentaria.

Um estudo experimental foi realizado nesse trabalho em um ambiente de FMS contendo quatro máquinas, um armazém de ferramentas, um sistema de transporte de ferramentas e peças, uma lista de dezessete peças e uma lista de cinquenta e seis ferramentas, onde foi aplicado o KBDSS e obteve resultados satisfatórios para uma avaliação *off-line*, como também apresentou uma oportunidade promissora para aplicar o KBDSS para despacho *on-line*, diagnosticando, e selecionando estratégias em um ambiente de FMS.

Em [Kim *et al.* 2001] foi abordado o problema de seqüenciamento de entrada de peças em um FMS, ou seja, o problema de determinar a seqüência de entrada de um dado conjunto de peças para ser liberado dentro do sistema com o objetivo de minimizar o *makespan*. Nesse trabalho foi considerado um FMS que consiste de várias máquinas idênticas contendo um magazine de ferramentas de capacidade limitada e com recursos automatizados para troca de ferramenta, pallets dedicados para cada tipo de peças e com número limitado e peças com um conjunto predeterminado de operações, onde as operações podem ser realizadas em várias máquinas e com os mesmos tempos de processamento das operações. Nesse ambiente de FMS foi considerado que os tempos de transportes são pequenos o suficiente para serem ignorados e que as peças são liberadas para o FMS sempre que um pallet estiver disponível.

Na solução abordada pelo autor, um algoritmo heurístico com duas etapas foi desenvolvido baseado na decomposição do problema de seqüenciamento de

entrada de peças em dois subproblemas, o *problema de agrupamento de peças de entrada*, ou seja, agrupar as peças dentro de um ou mais grupos que serão liberados seqüencialmente para dentro do sistema ou selecionar as peças e determinar suas quantidades de produção para serem incluídas em cada grupo de peças a ser formado, e o *problema de seqüenciamento*, que determina a seqüência de entrada das peças incluídas em cada grupo de peças de entrada. O problema de agrupamento de peça é solucionado por métodos matemáticos que podem ser aplicados em modo estático ou dinâmico, de tal maneira que as cargas de trabalho das máquinas são balanceadas, e o problema de seqüenciamento é solucionado com regras de prioridade usadas para selecionar a peça que entrará no sistema, sendo que as regras são aplicadas quando existe uma máquina disponível para a primeira operação de um ou mais tipos de peças e se para a peça selecionada não houver pallets disponíveis para este tipo de peça, outro tipo de peça, com maior prioridade, será selecionado para impedir que a máquina fique parada.

O desempenho do algoritmo proposto nesse trabalho de Kim *et al.* (2001) foi testado por meio de simulação de vários ambientes de FMS gerados aleatoriamente, e os resultados mostraram que o algoritmo proposto obteve desempenho melhor do que um método existente baseado em MPS (*Minimal Part Set*), analisado pelos autores na revisão desse trabalho.

[Sun e Xue 2001] desenvolveram um mecanismo de programação da produção reativo dinâmico para modificar a programação original quando esta não puder ser completada devido às mudanças das ordens de produção e dos recursos da manufatura. As mudanças de ordens de produção incluem o cancelamento de ordens programadas anteriormente e à inclusão de novas ordens urgentes, e as mudanças nas condições dos recursos da manufatura incluem quebra de máquinas e falta de pessoal.

O mecanismo de programação reativa foi desenvolvido como um bloco de função adicionado a um módulo de um sistema de programação da produção inteligente que foi desenvolvido anteriormente. Esse sistema possui funções de programação preditiva e reativa. A preditiva identifica uma programação ótima dos recursos da manufatura para as ordens recebidas de clientes por meio de um algoritmo de busca *best-first* e por uma abordagem de colaboração baseada em agentes. E a reativa, de um outro modo, é conduzida para modificar a programação criada para

responder as mudanças das ordens de clientes e das condições dos recursos da manufatura durante o processo de produção.

No mecanismo de programação reativa foram utilizadas as abordagens de colaboração baseada em agentes, como na preditiva, e “*match-up*” para a reprogramação das tarefas e identificação dos parâmetros destas tarefas, para melhorar a eficiência da programação enquanto mantém sua qualidade. Nesse mecanismo reativo, onde é empregada uma abordagem de reprogramação, não é necessário reprogramar todas as tarefas do sistema, mas somente a tarefa que foi modificada, melhorando a eficiência da programação reativa.

[Tang *et al.* 1993] apresentam um procedimento de programação simultânea de máquinas e sistemas de transporte em modo *on-line*. Nesse procedimento foram estabelecidos seis pontos de decisão envolvidos nas operações entre peças, AGVs e máquinas, onde regras de prioridade associadas a esses pontos de decisão foram avaliadas por meio de experimentos de simulação gerados pelo método de Taguchi.

Com o método de Taguchi várias combinações de regras de prioridade para os pontos de decisão foram geradas e avaliadas com a simulação, para se estudar a relação existente entre elas e as múltiplas medidas de desempenho adotados no procedimento, e por meio desta avaliação foram selecionadas as regras de prioridade para os seis pontos de decisão.

As principais medidas de desempenho adotadas nesse procedimento foram: tempo no sistema, atraso médio, atraso máximo, utilização do sistema, número de máquinas travadas e tarefas em processo.

Os experimentos foram realizados em um ambiente de FMS, modelado na simulação com cinco estações de trabalho, uma estação de entrada e saída de peças e dois AGVs para o transporte de peças. Cada estação de trabalho tem um *buffer* de entrada e saída de peça com capacidade limitada e uma máquina capaz de realizar diversos tipos de operação. Nesse ambiente foram produzidos cinco tipos de produtos com roteiros de fabricação flexível.

Essa abordagem combina o método de simulação e um método estatístico que pode simplificar o grau de dificuldade dos problemas de programação de FMS. Porém, com o aumento do número de regras e pontos de decisão, essa abordagem

necessitará de considerações adicionais dos fatores interativos para encontrar seus efeitos.

Em [Chiu e Yih 1995] foram desenvolvida uma metodologia baseada em aprendizado para programação dinâmica de um FMS. Esta metodologia para programação dinâmica seleciona a melhor regra de prioridade para cada operação numa máquina com a ajuda de conhecimento indutivo.

Essa metodologia é baseada em uma abordagem de aprendizado indutivo que aprende conceitos de exemplos pré-classificados e possui uma arquitetura dividida em módulos. Nesta arquitetura, os exemplos são coletados por um módulo de simulação desenvolvido para gerar estados do sistema dinâmico e buscar a melhor programação. Os dados de entrada deste módulo incluem especificação do sistema, informações dos produtos, atributos do sistema, regras de prioridade, e medidas de desempenho. E com o uso de algoritmo genético é encontrada a melhor programação, ou seja, são colecionados n exemplos que resultam no bom desempenho do sistema.

A partir da melhor programação obtida, um módulo de aprendizado induz o conhecimento de programação usando um algoritmo de aprendizado *on-line*. Depois o módulo de conhecimento é integrado a um sistema de manufatura físico, e o sistema de manufatura irá inteligentemente trocar para uma regra de prioridade apropriada a um ponto de programação, simplesmente apresentando o estado do sistema atual para o módulo de conhecimento. E com um módulo de avaliação de desempenho é avaliado o desempenho do sistema de programação dinâmico baseado em aprendizado, e se não for satisfatório, este módulo fornecerá conhecimento com base em experiências anteriores para refinar o conhecimento existente ou enviar comandos para solicitar novas experiências.

O módulo de simulação foi desenvolvido para implementar um esquema de programação dinâmica baseado em regras de prioridade para escolha de peças para as máquinas de um FMS, e para gerar exemplos de treinamento para avaliar a metodologia baseada em aprendizado. Para a simulação foi considerado um FMS composto de oito máquinas, dois AGVs, e doze *buffers* de entrada. Cada máquina tem seu próprio magazine de ferramenta, uma fila de entrada de tamanho um e uma fila de saída de tamanho oito. Para essa simulação foram considerados oito tipos de produtos com roteiros de fabricação flexível. Os resultados dos experimentos realizados nesse

modelo demonstraram que o sistema de programação dinâmico supera os sistemas de programação estática com uma única regra de prioridade.

Para finalizar este capítulo, é apresentado na tabela 3.2 um resumo desses modelos de programação de operações para FMS, identificando as principais características do ambiente de operação e da programação utilizadas neles.

Autor	AMBIENTE						PROGRAMAÇÃO						Medidas de desempenho
	Chão de Fábrica	Incertezas	Buffer	Setup	Roteiro Flexível	Ferramentas	Considera seleção			Tipo	Método		
							Transporte	Peças	Máquinas				
Chan et al., 2003	FMS	Quebra de máquina, entrada aleatória de peças	Buffer central c/ capac. limitada	Não	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	On-line	Regras de despacho e método pré-emptivo	Tempo fluxo médio, Atraso médio, Adiantamento médio	
Gamila, 2003	FMS	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Off-line	Programação de inteiros e Heurística	Custo de fabricação, Utilização de maq., Tempo total, T. max. conclusão	
Özbayrak, 2003	FMS	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Off-line	Sistema de apoio a decisão baseado em conhecimento	Utiliz. de máquinas, de transp., e armazém de ferramentas, Tempo de throuput, Lead time, Vida útil da ferramenta, Sucesso distr. ferram.	
Kim et al., 2001	FMS	Não	Não	Não	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Estático ou dinâmico	Algoritmo heurístico em duas etapas (métodos matemáticos e regras de despacho)	Makespan	
Sum, 2001	Manufatura em geral	Mudanças de ordens e quebra de máquina	Não	Não	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Off-line em tempo real	Colaboração baseada em agentes	Não utiliza	
Persi, 1999	FMC	Tempos de processamento e quebra de máquina	Buffers locais c/ capac. limitada	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Off-line e On-line	Modelo ILP e regras de despacho	Utilização de máquinas e WMP	
Chan, 1999	FMS	Quebra de máquina	Buffers locais c/ capac. infinita	Não	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Off-line	Regras de controle operacional	Makespan, Utilização de máquina e tempo médio de fluxo	
Kazerooni et al., 1997	FMS	Entrada aleatória de peças	Buffers locais c/ capac. limitada	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim	On-line	Regras de despacho	Makespan, Lead time, WMP, Lucro líquido, Utilização, Tempo no Buffer de entrada	
Chiu, 1995	FMS	Entrada aleatória de peças	Buffers locais c/ capac = 1 e buffers de entrada global	Não	Sim	Não	Não	Sim	Não	On-line	Aprendizado indutivo e algoritmo genético	Makespan, Cíde de peças atrasadas, Atraso máximo	
Tang et al., 1993	FMS	Entrada aleatória de peças e quebra de máquina	Buffers locais c/ capac. limitada	Não	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	On-line	Regras de despacho c/ 6 pontos de decisão	Tempo no sistema, atraso médio e máximo, utilização de maq., Maq. Travadas e WMP	
Proposta	FMS	Entrada aleatória de peças e quebra de máquina	Buffers locais c/ capac. limitada	Não	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	On-line	Sistema Fuzzy	Atraso médio, Porcentagem de peças atrasadas, Tempo médio de fluxo, WMP	

4. *Lógica Fuzzy*

4.1. Introdução

Neste capítulo apresentam-se os conceitos básicos sobre o uso da lógica *fuzzy* em sistemas. Apesar de haver uma complexa base formal sustentando seu uso para o desenvolvimento deste trabalho, será apresentado apenas o essencial para o entendimento da teoria básica dos sistemas *fuzzy* [Gomide *et al.* 1993; Lima 1993; Klir e Yuan 1995], os quais são utilizados neste trabalho, na programação da produção de FMS.

A imprecisão e/ou incerteza podem estar freqüentemente associadas com as atividades do dia a dia, principalmente quando na avaliação humana, a observação e a decisão estão presentes. A falta de um conhecimento preciso sobre significados semânticos de eventos e estados é freqüente em sistemas controlados por operadores humanos, tais como os sistemas de produção [Custódio *et al.* 1994].

A teoria de conjunto *fuzzy* introduzida por [Zadeh 1965] generaliza as noções de conjunto de modo a permitir a representação de conceitos de imprecisão. Juntamente com a lógica *fuzzy* [Klir e Yuan 1995] constitui-se em um dos pilares onde é construída a lógica de raciocínio aproximado [Zadeh 1979], que oferece um poderoso aparato formal para processar a informação imprecisa. Com base nesta teoria, têm emergido propostas para formulação e solução de problemas de produção.

As principais vantagens do uso da lógica *fuzzy* são [Custódio *et al.* 1994]:

- Simplificação do desenvolvimento, manutenção e experimentação, desde que é muito mais fácil mudar regras do que os programas;
- Representação de conceitos vagos, isto é, incorpora e pondera a imprecisão e incerteza do sistema;

Quanto a um sistema de lógica *fuzzy* aplicada à programação da produção, suas principais vantagens são [Custódio *et al.* 1994]:

- O problema da programação detalhada é totalmente considerado.

- O método de decisão baseado na lógica fuzzy, desenvolvido para o nível de controle mais baixo do sistema de produção, é muito flexível e vários critérios de decisão podem ser usados para unir diferentes objetivos de produção.
- Na abordagem do método de decisão baseado na lógica fuzzy, a maior parte do tempo computacional é consumida pelo processo de inferência. Entretanto, se o tempo computacional se tornar um problema, o método permite a definição de uma tabela de busca para a base de regras, que reduz enormemente o tempo computacional.

Nas seções seguintes são apresentados resumidamente alguns conceitos básicos necessários ao atendimento do trabalho.

4.2. Conjuntos Fuzzy

Na teoria de conjuntos clássica, um elemento pertence ou não a um determinado conjunto, o qual é definido por uma função usualmente chamada de função característica. Assim, dado um conjunto universo de elementos U e um subconjunto A de U , a função característica associada com A é um mapeamento

$$\begin{aligned} \mu_A(x) : U &\rightarrow \{0,1\} \text{ tal que, para todo elemento } x \in U, \\ \mu_A(x) &= 1 \text{ se } x \in A \text{ e } \mu_A(x) = 0 \text{ se } x \notin A \end{aligned}$$

Como generalização da teoria de conjunto clássica, onde um elemento pertence totalmente a um conjunto ou não, Zadeh (1965) propôs uma caracterização mais ampla, na medida em que sugere que nos conjuntos fuzzy, alguns elementos são mais membros de um conjunto do que outros. A função característica pode então assumir, ao invés de apenas 0 ou 1 como na teoria clássica, qualquer valor do intervalo dos reais entre 0 e 1. Assim, dado um conjunto universo de elementos U , um subconjunto fuzzy A de U é associado com uma função característica

$$\mu_A(x) : U \rightarrow [0,1]$$

Nesse novo contexto, a função característica é normalmente chamada de função de pertinência, sendo que o valor 0 indica uma completa exclusão e o valor 1 representa uma completa pertinência de um dado elemento no conjunto, e os valores

intermediários representam o grau de pertinência do elemento no conjunto. Por exemplo, para expressar a idéia de que uma temperatura tem seu valor por volta de 25, pode-se utilizar uma função de pertinência triangular (figura 4.1), com pico em 25, para sugerir a idéia de que quanto mais perto de 25, mais ele se identifica com o conceito representado.

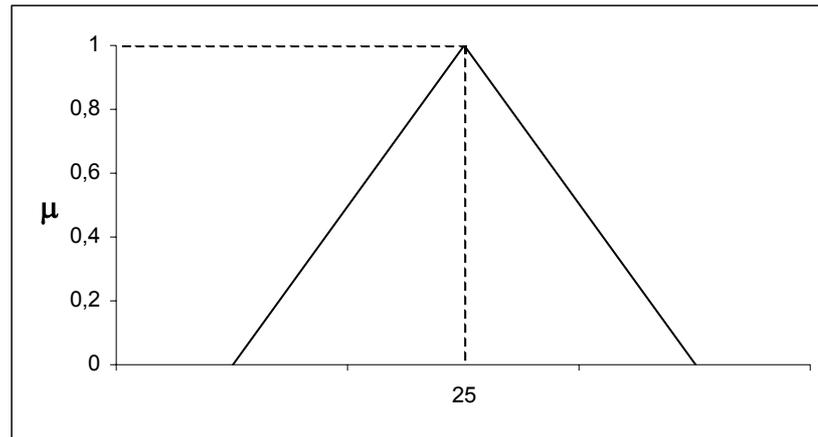


Figura 4.1 – Representação de uma função de pertinência para um conjunto da variável linguística “temperatura”.

Um conjunto A da teoria dos conjuntos clássica pode ser visto como um conjunto fuzzy específico, denominado freqüentemente de “crisp”, para o qual $\mu_A(x): U \rightarrow \{0,1\}$, ou seja, a pertinência é do tipo “tudo ou nada”, “sim ou não”, e não gradual como para os conjuntos fuzzy [Yager e Filev 1994].

Os conjuntos fuzzy são particularmente úteis para representar conceitos com limites imprecisos. Por exemplo, assumimos um conjunto de pessoas X como universo de discurso. Se estivermos interessados em representar um subconjunto de pessoas altas, o uso de um subconjunto fuzzy nesta situação para representar as pessoas altas nos livra da restrição de ter que categorizar cada pessoa como sendo um membro ou não deste conjunto, e nos permite fazer distinções mais sutis usando os graus de pertinência. Esta habilidade para representar este conceito impreciso mais naturalmente é importante para o projeto de sistemas inteligentes, pois nos permite representar tipos de conceitos usados pelos humanos, como baixo, velho, jovem, pequeno, gordo, e assim por diante [Yager e Filev 1994]. Se nosso universo de discurso for o conjunto de números reais, conceitos como *pequeno*, *grande*, *próximo de 5*, e assim por diante, também são representados mais naturalmente como um conjunto fuzzy do que como um conjunto crisp.

4.3. Operação com Conjuntos Fuzzy

Sejam A e B dois conjuntos fuzzy em U com suas funções de pertinência μ_A e μ_B , respectivamente. As operações padrão de conjuntos como união, intersecção e complementação para conjuntos fuzzy são definidas pelas suas funções de pertinência e a definição padrão dessas operações é baseada nos operadores de mínimo (min) e máximo (max), como segue:

União: A união entre dois conjuntos fuzzy A e B de U, denotado por $A \cup B$ é um conjunto fuzzy:

$$A \cup B = \max \{ \mu_A(u), \mu_B(u) \} \quad \text{ou} \quad \mu_{A \cup B}(u) = \mu_A(u) \vee \mu_B(u)$$

Intersecção: A intersecção entre dois conjuntos fuzzy A e B de U, denotado por $A \cap B$ é um conjunto fuzzy:

$$A \cap B = \min \{ \mu_A(u), \mu_B(u) \} \quad \text{ou} \quad \mu_{A \cap B}(u) = \mu_A(u) \wedge \mu_B(u)$$

Complemento: O complemento de um conjunto fuzzy A, denotado por $\neg A$ é um conjunto fuzzy:

$$\neg A = 1 - \mu_A(u)$$

Essas operações são chamadas de operações fuzzy padrão e funcionam precisamente como as operações correspondentes para conjuntos crisp quando o alcance dos graus de pertinência é restrito ao conjunto $\{0,1\}$, ou seja, as operações fuzzy padrão são generalizações das operações de conjuntos clássicas correspondentes [Klir e Yuan 1995].

Essas operações não são as únicas generalizações possíveis, pois existe uma classe de operadores denominada de T-normas e outra T-conormas que também são qualificadas como generalizações fuzzy das operações clássicas. Essa classe de operadores T-normas e T-conormas implementam as operações de intersecção fuzzy e união fuzzy, respectivamente [Klir e Yuan 1995]. Assim, as operações de união e intersecção demonstradas anteriormente podem ser generalizadas substituindo-se os operadores de mínimo e máximo por outros operadores das classes T-normas e T-conormas, respectivamente.

4.4. Variáveis Lingüísticas

Entre os vários tipos de conjuntos fuzzy, há um tipo de significado especial, que são os conjuntos fuzzy definidos no conjunto dos números reais. As funções de pertinência destes conjuntos, as quais têm a forma $A: \mathfrak{R} \rightarrow [0,1]$, claramente possuem um significado quantitativo e podem ser vistas como números fuzzy ou intervalos fuzzy, quando capturam concepções intuitivas de números ou intervalos aproximados, tais como “números próximos de um dado número real” ou “números em torno de um dado intervalo de números reais”. [Klir e Yuan 1995]

O conceito de um número fuzzy tem um papel fundamental na formulação de variáveis fuzzy quantitativas. Estas são variáveis cujos estados são números fuzzy que representam conceitos lingüísticos, tais como “muito pequeno”, “pequeno”, “médio”, e assim por diante, quando interpretada em um contexto particular [Klir e Yuan 1995]. Essas variáveis são chamadas de variáveis lingüísticas, que também podem ser definidas como uma variável cujo domínio, ou valores, são termos da linguagem referentes a certo contexto.

Os estados de cada variável lingüística são expressos por termos lingüísticos interpretados como números fuzzy específicos, os quais são definidos em termos de uma variável base, cujo seus valores são números reais dentro de um alcance específico [Klir e Yuan 1995]. Uma variável base é uma variável no sentido clássico, como “temperatura”, “pressão”, “desempenho”, “idade”, etc, em que os termos lingüísticos de uma variável lingüística representam os valores aproximados de uma variável base, apropriada a uma aplicação particular.

Um exemplo de uma variável lingüística, denominada “Temperatura”, é apresentado na figura 4.2. Está variável expressa a temperatura (a qual é a variável base neste exemplo) em um dado contexto por três termos lingüísticos (baixa, média, alta). Em cada um dos termos lingüísticos é associado um número fuzzy por uma regra semântica (regra que associa cada termo lingüístico a seu significado, que é um conjunto fuzzy sobre um universo U), como mostra a figura. Os números fuzzy, cujas funções de pertinência tem a forma trapezoidal, são definidos no intervalo $[0, 45]$, o alcance da variável base neste exemplo, em que cada um dos números fuzzy expressa uma restrição fuzzy neste alcance.

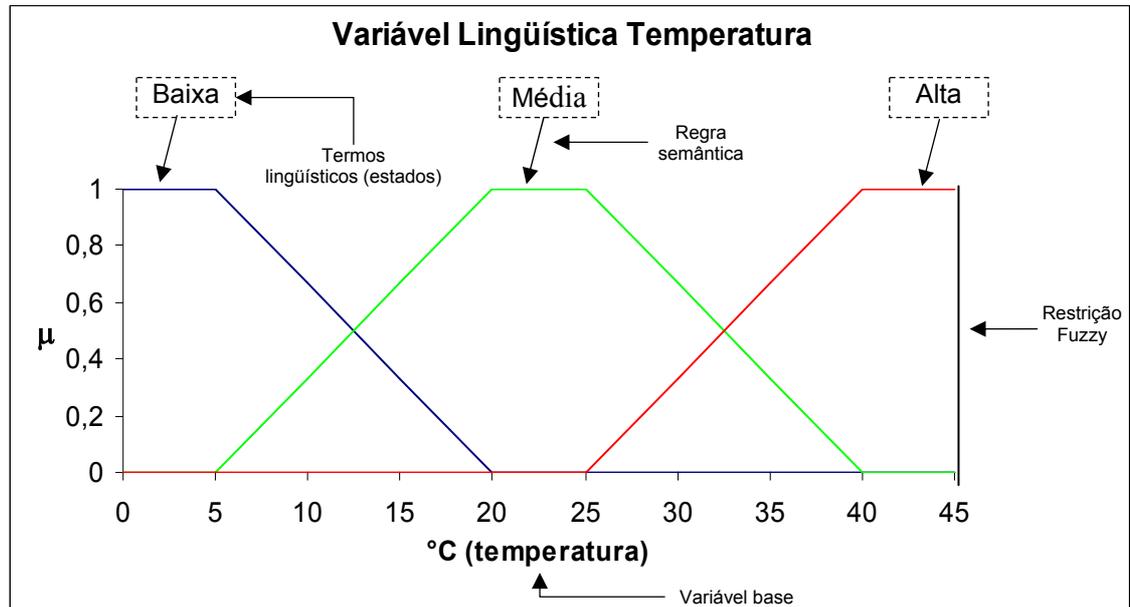


Figura 4.2 – Exemplo de uma variável linguística. Fonte: Adaptado de [Klir e Yuan 1995].

4.5. Raciocínio Aproximado

Em [Zadeh 1979] foi introduzido a Teoria do Raciocínio Aproximado (RA). Esta teoria, baseada no uso de conjuntos fuzzy, fornece um poderoso *framework* para o raciocínio diante de informações incertas. O centro desta teoria é a representação de proposições como sentenças designando conjuntos fuzzy como valores para variáveis, ou seja, é a implementação de proposições fuzzy com o uso de variáveis linguísticas e seus valores (termos) representados por conjuntos fuzzy [Yager e Filev 1994].

Uma proposição fuzzy é simplesmente a atribuição de um valor linguístico a uma variável linguística e é denotada, na forma canônica, pela sentença

$$p: V \text{ é } A,$$

onde “V” é uma variável que possui valores “v” de algum conjunto universo U, e “A” é um conjunto fuzzy em U que representa um predicado fuzzy, tal como alto, médio, baixo, e assim por diante [Klir e Yuan 1995]. Assim, dado um valor particular de “V”, este valor pertence ao conjunto “A” com grau de pertinência $A(v)$, o qual é então interpretado como grau de verdade, $T(p)$, da proposição fuzzy, ou seja, $T(p) = A(v)$ para cada valor “v” da variável “V” na proposição p .

A Teoria de RA inclui dois componentes, que são as regras de tradução e as regras de inferência. As regras de tradução determinam como uma informação é traduzida na representação apropriada em termos de relações fuzzy [Klir e Yuan 1995], fornecendo assim, uma representação quantitativa da informação dada. As regras de inferência fornecem um meio de manipular a informação representada, para se obter novas informações [Scarpelli *et al.* 1996]. Assuma que se têm duas proposições V_1 é A e V_2 é B, onde A e B são conjuntos *fuzzy* de X e Y, respectivamente. Uma das regras de tradução do raciocínio aproximado determina que a conjunção

$$V_1 \text{ é A e } V_2 \text{ é B}$$

induz uma relação *fuzzy* D sobre o conjunto $X \times Y$ denotado por

$$(V_1, V_2) \text{ é D}$$

onde (V_1, V_2) é chamada de *variável conjunta*. A disjunção

$$V_1 \text{ é A ou } V_2 \text{ é B}$$

também induz uma relação *fuzzy* E sobre o mesmo conjunto $X \times Y$.

A conjunção de proposições é convencionalmente traduzida na Teoria de RA pelo operador de intersecção e a disjunção, pelo operador de união.

Entre as proposições *fuzzy* compostas de várias variáveis, a mais usada e estudada é a proposição *fuzzy* condicional não qualificada, que é representada na forma canônica por

$$p: \text{SE } V \text{ é A ENTÃO } U \text{ é B}$$

onde V e U são variáveis dos conjuntos X e Y respectivamente, e A e B são conjuntos *fuzzy* aplicados sobre X e Y respectivamente [Klir e Yuan 1995]. Pelas regras de tradução do RA, a proposição condicional induz uma relação *fuzzy* sobre $X \times Y$ que é determinada para todo $x \in X$ e todo $y \in Y$ por

$$R(x, y) = f[A(x), B(y)] \quad (1)$$

onde f denota uma função, que será melhor analisada na seção 4.5.2.

Para a discussão que se segue assume-se que X e Y são conjuntos base, V e U são variáveis sobre X e Y respectivamente e que A e B são conjuntos *fuzzy* sobre X e Y, respectivamente.

4.5.1. Regras de Inferência

As regras de inferência do RA oferecem um meio de obter novas relações *fuzzy* a partir de relações *fuzzy* conhecidas.

As regras de inferências básicas não são apresentadas aqui e podem ser encontradas em [Zadeh 1979]. Para os objetivos deste trabalho, será discutida apenas a regra de inferência composicional.

Sejam R uma relação *fuzzy* sobre $X \times Y$, A' e B' conjuntos *fuzzy* sobre X e Y respectivamente. Se R e A' são dados, pode-se obter B' , nos casos em que os conjuntos base são conjuntos discretos, pela equação:

$$B'(y) = \max_{x \in X} \min[A'(x), R(x, y)] \quad \text{para todo } y \in Y. \quad (2)$$

Esta equação também pode ser escrita na forma matricial

$$B' = A' \circ R$$

Dada uma outra proposição q da forma

$$q: V \text{ é } A'$$

pode-se concluir $V \text{ é } B'$ pela regra de inferência composicional. Esse procedimento é chamado de *modus ponens* generalizado, que pode ser representado pelo padrão de inferência:

Regra: SE $V \text{ é } A$ ENTÃO $U \text{ é } B$
 Fato: $V \text{ é } A'$
 Conclusão: $U \text{ é } B'$

Neste esquema, B' é calculado pela equação (2) e R é calculado por (1).

Outra regra de inferência da lógica *fuzzy*, chamada *modus tollens* generalizado, é representada pelo padrão de inferência [Klir e Yuan 1995]:

Regra: Se $V \text{ é } A$ ENTÃO $U \text{ é } B$
 Fato: $U \text{ é } B'$
 Conclusão: $V \text{ é } A'$

Neste caso, a regra de inferência composicional tem forma

$$A'(x) = \max_{y \in Y} \min[B'(y), R(x, y)]$$

Para regras com mais de uma condição no antecedente, a inferência é aplicada como uma generalização das regras de tradução e de inferência apresentadas.

Considere o caso das regras com duas condições no antecedente:

$$\text{SE } V_1 \text{ é } A_1 \text{ e } V_2 \text{ é } A_2 \text{ ENTÃO } U \text{ é } B$$

A conjunção $V_1 \text{ é } A_1 \text{ e } V_2 \text{ é } A_2$ induz uma relação *fuzzy* D sobre $X \times Y$ obtida por um operador de intersecção.

A regra induz uma relação *fuzzy* sobre $X \times Y \times Z$ que é determinada para todo $x \in X, y \in Y$ e $z \in Z$ por

$$R(x, y, z) = f[D(x, y), B(z)]$$

onde f é a função definida na seção 4.5.2.

A proposição $V_1 \text{ é } A'_1 \text{ e } V_2 \text{ é } A'_2$ induz uma relação D' sobre $X \times Y$.

Para o padrão de inferência:

Fato: $V_1 \text{ é } A'_1 \text{ e } V_2 \text{ é } A'_2$

Regra: SE $V_1 \text{ é } A_1 \text{ e } V_2 \text{ é } A_2$ ENTÃO $U \text{ é } B$

Conclusão: $U \text{ é } B'$

o valor de B' é obtido por

$$B'(z) = \max_{x \in X} \min[D'(x, y), R(x, y, z)]$$

Este processo pode facilmente ser generalizado para regras com n condições no antecedente.

4.5.2. Inferência com Regras *Fuzzy*

Como foi visto anteriormente, uma regra do tipo

$$\text{SE } V \text{ é } A \text{ ENTÃO } U \text{ é } B$$

Induz uma relação R entre as variáveis V e U que pode ser definida por

$$R(x, y) = f(A(x), B(y)) \quad \forall (x, y) \in X \times Y$$

onde f é uma função da forma

$$f : [0,1]^2 \rightarrow [0,1]$$

Conforme foi apresentado em [Pedrycz e Gomide 1998], a relação R pode derivar três classes principais da função f : conjunção *fuzzy*, disjunção *fuzzy* e implicação *fuzzy*, sendo que a conjunção e a implicação são mais usadas.

Exemplos típicos de conjunção *fuzzy* são:

$$f_c(A(x), B(y)) = A(x) \wedge B(y) \quad \forall (x, y) \in X \times Y \quad (\text{Mamdani})$$

$$f_p(A(x), B(y)) = A(x) \cdot B(y) \quad \forall (x, y) \in X \times Y \quad (\text{Larseni})$$

As implicações *fuzzy* resultam de generalizações da implicação clássica da forma $p \rightarrow q$.

Na lógica convencional a implicação pode ser definida de várias formas que, embora equivalentes, resultam em classes diferentes de implicações *fuzzy*.

Assim, as implicações *fuzzy* podem ser classificadas em categorias diferentes da expressão da lógica convencional que a originou [Klir e Yuan 1995].

Uma das formas de definir a implicação na lógica convencional é

$$p \rightarrow q \equiv \bar{p} \vee q$$

Estendendo essa fórmula para a lógica *fuzzy*, a disjunção e a negação são interpretadas como união *fuzzy* (S-norma) e complemento *fuzzy*, respectivamente. Isso resulta na classe de implicações *fuzzy*, chamada S-implicações, definida por

$$f_{is}(A(x), B(y)) = \bar{A}(x) S B(y) \quad \forall (x, y) \in X \times Y$$

onde S denota uma S-norma.

Exemplos de implicações típicas dessa classe são:

$$f_l(A(x), B(y)) = \min[1, 1 - A(x) + B(y)] \quad (\text{Lukasiewicz})$$

$$f_b(A(x), B(y)) = \max[1 - A(x), B(y)] \quad (\text{Kleene})$$

$$f_r(A(x), B(y)) = 1 - A(x) + [A(x) \cdot B(y)] \quad (\text{Reichenbach})$$

Outra classe de implicação *fuzzy* resulta da generalização da expressão da lógica convencional

$$p \rightarrow q \equiv \bar{p} \vee q \equiv \bar{p} \vee (p \wedge q)$$

Assim, obtém-se a definição das chamadas *QI*-implicações:

$$f_{\Delta}(A(x), B(y)) = \bar{A}(x) S (A(x) T B(y))$$

Exemplos típicos dessa classe são a implicação de *Kleene* e mais:

$$f_m(A(x), B(y)) = \max[1 - A(x), \min(A(x), B(y))] \quad (\text{Zadeh})$$

Por exemplo, considerando-se os conjuntos $A = \{0.0/1, 0.5/2, 1.0/3\}$ e $B = \{0.2/4, 0.9/5\}$, a regra

SE V é A ENTÃO U é B

induz a relação R que pode ser definida, por exemplo pelo conjunto fuzzy de *Mamdani* resultando:

$$R_c = \{0.0/1, 4 + 0.0/1, 5 + 0.2/2, 4 + 0.5/2, 5 + 0.2/3, 4 + 0.9/3, 5\}.$$

Usando a implicação de *Zadeh* obtém-se:

$$R_m = \{1/1, 4 + 1/1, 5 + 0.5/2, 4 + 0.5/2, 5 + 0.2/3, 4 + 0.9/3, 5\}.$$

Dada a proposição V é A' , onde $A' = \{0.1/2, 0.4/3, 0.8/4\}$, os seguintes resultados são obtidos pela aplicação da composição *max-min*:

$$B'_c = \{0.2/4 + 0.8/5\}$$

$$B'_m = \{0.4/4 + 0.8\}$$

Com o uso dos elementos definidos na lógica fuzzy, esta pode ser usada na implementação de sistemas *fuzzy*. O conhecimento de um especialista referente às relações entre as grandezas abstratas pode ser codificado em regras *fuzzy* da forma

$$\text{SE } V \text{ é } A_i \text{ ENTÃO } U \text{ é } B_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

compondo uma coleção de regras paralelas, que são interpretadas como cada regra induzindo uma relação *fuzzy* R_i , e o conjunto de regras como uma relação que é uma agregação das relações individuais. Assim, a relação total é dada por

$$R = \bigvee_{i=1}^n R_i$$

onde \bigvee é um operador de agregação, normalmente, interpretado como um operador de união.

Com o uso desse operador um sistema *fuzzy* pode ser definido por uma única relação *fuzzy*, que é a combinação de todas as relações *fuzzy* provenientes das diversas regras.

4.6. Sistemas *Fuzzy*

A proposta de [Zadeh 1973] de modelar o mecanismo de pensamento humano, com valores lingüísticos *fuzzy* em lugar de números, conduziu à introdução de nebulosidade (*fuzziness*) na teoria de sistemas e ao desenvolvimento de uma nova classe de sistemas chamada sistemas *fuzzy*.

Uma característica principal desses sistemas é que eles estão baseados no conceito de codificação (divisão) *fuzzy* da informação, e operam com conjuntos *fuzzy* em vez de números [Yager e Filev 1994]. O uso de conjuntos *fuzzy* permite uma generalização da informação, e esta generalização está associada com a introdução de imprecisão. Em muitos problemas reais a imprecisão é admissível, até mesmo útil, porque as categorias de pensamento humano são ideais vagos, os quais são muito difíceis de quantificar [Yager e Filev 1994]. Em particular, a representação da informação em sistemas fuzzy imita o mecanismo de raciocínio aproximado executado na mente humana [Yager e Filev 1994].

Os modelos de sistemas fuzzy basicamente abrangem duas categorias, as quais diferem fundamentalmente em sua habilidade de representar diferentes tipos de informação [Yager e Filev 1994]. A primeira inclui os Modelos Lingüísticos (MLs) que são baseados na coleção de regras SE-ENTÃO com predicados vagos e usam raciocínio fuzzy [Tong 1979; Pedrycz 1989].

A segunda categoria de modelos fuzzy é baseada no método Takagi-Sugeno-Kang (TSK) de raciocínio [Takagi e Sugeno 1983; Sugeno e Kang 1986]. Estes modelos são formados por regras lógicas que tem uma parte fuzzy antecedente e funcional conseqüente, ou seja, essencialmente eles são uma combinação de modelos fuzzy e não fuzzy [Yager e Filev 1994]. Os modelos fuzzy baseados no método TSK de raciocínio integram a habilidade do MLs para representação do conhecimento qualitativa com um potencial efetivo para expressar informações quantitativas. Este tipo de modelo fuzzy permite uma aplicação relativamente fácil de técnicas de aprendizado para sua identificação de dados.

Neste trabalho foi utilizado um modelo de sistema fuzzy da categoria MLs, assim nas próximas seções serão discutidas as características desse tipo de modelo.

4.6.1. Modelos lingüísticos

Um ML descreve o sistema por meio de um conjunto de regras SE - ENTÃO com predicados vagos.

O modelo lingüístico é um sistema baseado em conhecimento, que contém regras que incorporam o conhecimento do mundo real inerentemente *fuzzy* ou

efetivamente “fuzzificável” [Yager e Filev 1994]. A habilidade de tomada de decisão do ML depende da existência de uma base de regras e de um mecanismo de raciocínio *fuzzy*.

4.6.1.1. Base de Regras

Um modelo de sistema fuzzy (MSF) da categoria ML é caracterizado por um conjunto de declarações lingüísticas baseadas no conhecimento de especialistas. O conhecimento normalmente é expresso na forma de regras SE-ENTÃO, que são facilmente implementadas por meio de implicações fuzzy da lógica fuzzy:

$$\begin{aligned} & \mathbf{SE } U_1 \text{ é } B_{11} \mathbf{ E } U_2 \text{ é } B_{12} \mathbf{ E } \dots \mathbf{ E } U_r \text{ é } B_{1r} \mathbf{ ENTÃO } V \text{ é } C_1 \\ & \dots \\ & \mathbf{SE } U_1 \text{ é } B_{m1} \mathbf{ E } U_2 \text{ é } B_{m2} \mathbf{ E } \dots \mathbf{ E } U_r \text{ é } B_{mr} \mathbf{ ENTÃO } V \text{ é } C_m \end{aligned} \quad (4.1)$$

onde U_1, \dots, U_r são variáveis de entrada e V é a variável de saída do ML. B_{ij} e C_i , $i=(1,m)$, $j=(1,r)$ são subconjuntos fuzzy do universo de discurso X_1, \dots, X_r e Y de U_1, \dots, U_r e V . Normalmente os conjuntos fuzzy B_{ij} e C_i são associados com rótulos lingüísticos (termos), e o operador **E** nos antecedentes das regras é interpretado com uma interseção fuzzy.

A escolha correta das variáveis de entrada e das variáveis de saída é essencial para a caracterização da operação de um sistema fuzzy. Além disso, a seleção das variáveis lingüísticas tem um efeito significativo no desempenho do sistema.

As regras fuzzy têm a forma de uma implicação fuzzy que relaciona as variáveis do antecedente da regra com as variáveis do conseqüente. Em relação a este fato, é interessante notar que, no dia a dia, a natureza da maioria das informações nas quais nossas decisões se baseiam são lingüísticas ao invés de numéricas. Sob essa ótica, as regras fuzzy provêm uma estrutura natural para a caracterização do comportamento humano no processo de tomada de decisão.

4.6.1.2. Modelo lingüístico tipo Mamdani

Nesta seção é apresentado o modelo lingüístico que utiliza o método de raciocínio de Mamdani, o qual será aplicado neste trabalho, por ser este um método bastante utilizado e com sucesso reconhecido [Yager e Filev 1994].

O ML tipo Mamdani inclui módulos de interface que transformam variáveis de entrada em conjuntos *fuzzy* equivalentes e, posteriormente, as variáveis *fuzzy* geradas em variáveis numéricas proporcionais, adequadas para os sistemas de atuação existentes.

Na figura 4.3 é mostrado um diagrama de um ML tipo Mandani.

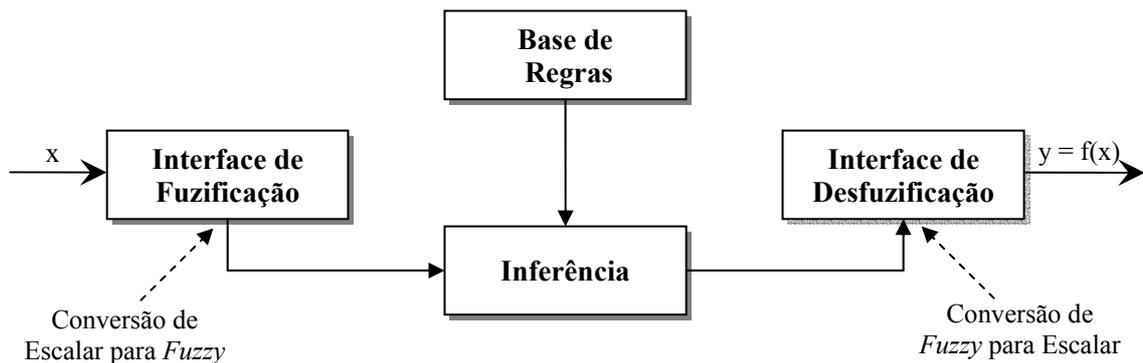


Figura 4.3 – Diagrama de um modelo lingüístico tipo Mamdani.

O *Módulo de Inferência* recebe valores *fuzzy* provenientes do módulo de interface de *fuzificação*, processa as regras existentes na Base de regras e gera um conjunto *fuzzy* de saída para o módulo de *interface de desfuzificação*, a partir da composição de todas as regras disparadas. Por uma regra disparada, entende-se uma regra cujo processamento do antecedente para as entradas atuais gerou graus de pertinência não nulos, ou seja, a relação *fuzzy* entre as entradas e os termos primários do antecedente é maior que zero.

A regra tradicionalmente utilizada para o processamento de inferências no método de Mamdani é a regra de inferência Max-Min, que utiliza as operações de união e intersecção entre conjuntos, por meio de operadores de máximo e mínimo, respectivamente. Considerando uma regra *fuzzy* genérica como mostrada anteriormente em (4.1), o método de inferência Max-Min proposto por Mamdani (1977) será detalhado a seguir.

Durante o processo de *fuzificação*, os antecedentes de cada regra são processados por meio da intersecção entre os graus de pertinência das entradas atuais nos termos primários definidos em cada uma. Este processo gera um grau de pertinência

de disparo para cada regra *fuzzy*. Em outras palavras, é calculado para a *i*-ésima regra da Base de regras um coeficiente de disparo $D^{(i)}$ segundo a expressão (4.2), utilizada nos casos em que as entradas são valores “crisp” x_1^*, \dots, x_r^* , onde os índices *i* nos conjuntos *fuzzy* denotam os termos primários que compõem a regra *i* na base de regras e as funções de pertinência dos conjuntos B_{ir} são denotadas por $B_{ir}(x)$. Este processamento transforma informações quantitativas em informações qualitativas, e é considerado um processo de generalização.

$$D^{(i)} = \min[B_{i1}(x_1^*), \dots, B_{ir}(x_r^*)] \quad (4.2)$$

Todas as regras para as quais o coeficiente de disparo for maior que zero, são ditas regras que dispararam para as entradas atuais. Isto quer dizer que elas vão contribuir para o cálculo da saída correspondente do sistema de inferência. Os coeficientes de disparo, por sua vez, vão limitar os valores máximos dos conjuntos *fuzzy* de saída gerados por estas regras. Finalmente, uma operação global de união vai compor um conjunto *fuzzy* *F* para a variável de saída, contendo informações sobre todas as regras disparadas para as entradas atuais. Na expressão (4.3) é mostrada a composição deste conjunto para o caso da variável de saída *V* da regra mostrada em (4.1), e uma representação gráfica deste processo de inferência é apresentado na figura 4.4.

$$F(y) = \max_{i=1}^m [\min(D^{(i)}, C_i(y))] \quad (4.3)$$

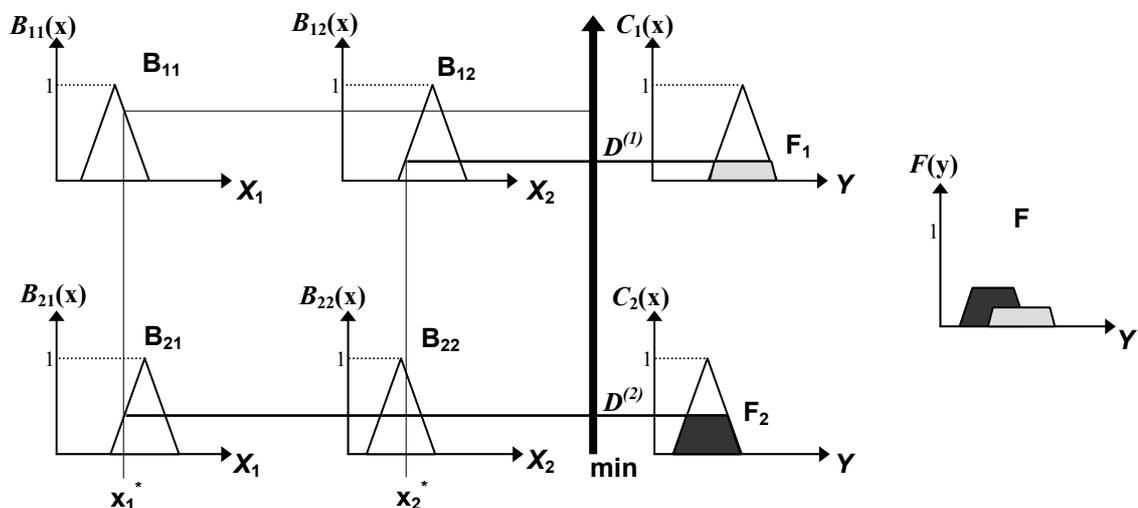


Figura 4.4 – Processo de inferência utilizando o método de [Mamdani 1977].

O conjunto *fuzzy* F gerado durante o processo de inferência pode então ser utilizado diretamente em um diagnóstico de tomada de decisão, ou será convertido em um valor escalar proporcional para atuação externa por meio de atuadores convencionais, como no caso de um sistema de controle.

O processo de converter cada conclusão obtida pelo processo de inferência, a qual é expressa em termos de um conjunto *fuzzy*, em um único número real é realizado pela *interface de desfuzificação*. Para a regra *fuzzy* definida em (4.1), parte-se do conjunto *fuzzy* de saída F obtido pelo processo de inferência e chega-se a um valor escalar ou número “crisp” y^* correspondente.

O método do centro de massa é um dos métodos mais utilizados para o processo de *desfuzificação*, pelo qual se calcula, para um dado conjunto *fuzzy* de saída proveniente de uma base de regras processada, a abscissa (no universo de discurso definido para a variável em questão) do ponto de centro de massa correspondente, e se utiliza como o valor escalar de saída. A expressão analítica da implementação deste método, para um caso discreto, em que a saída é definida sobre um conjunto universo finito $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_q\}$, é apresentada em (4.4) [Yager e Filev 1994].

$$y^* = \frac{\sum_{j=1}^q F(y_j) y_j}{\sum_{j=1}^q F(y_j)} \quad (4.4)$$

5. Procedimento de Programação Proposto

5.1. Introdução

Os Sistemas Flexíveis de Manufatura (FMS) têm sido utilizados nas indústrias, na busca por melhores e mais adequados resultados para atendimento às solicitações do mercado consumidor.

Esses sistemas têm sido estudados para obtenção de técnicas de planejamento e controle da produção, analisando-se diferentes abordagens e técnicas, entretanto, considerando-se os trabalhos até então desenvolvidos, ainda persistem alguns problemas para que se possa planejar e controlar sistemas complexos.

Dentre os problemas encontrados no nível de controle da produção, encontra-se a etapa de programação de operações. Nas décadas passadas até os dias atuais vários modelos de programação de operações foram e estão sendo desenvolvidos, muito deles baseando-se em técnicas de Inteligência Artificial [Meziane *et al.* 2000].

O problema básico da programação, conforme já apresentado no capítulo 3, pode ser descrito como o da alocação de recursos disponíveis para um número de tarefas sobre um determinado período de tempo, com a finalidade de cumprir certos objetivos de produção.

Devido às incertezas que freqüentemente ocorrem em FMS, principalmente incertezas de demanda, mudanças na programação devem fazer parte das atividades rotineiras desse tipo de sistema de manufatura, e não um caso de exceção. Assim, um procedimento de programação pode ser utilizado para fornecer um novo programa em tempo apropriado, de forma que o FMS possa lidar com as incertezas e atender aos objetivos de produção previamente definidos.

A dinâmica de operação desse tipo de sistema exige um procedimento de programação que permita explorar a flexibilidade dos equipamentos que o compõe, que responda às incertezas de produção provenientes de demandas externas não previstas e às falhas nas operações e funcionamento dos seus componentes. Desta maneira, neste trabalho é proposto um procedimento de programação *on-line* da produção baseado em

lógica *fuzzy* que tem o objetivo de atender as características de operação do chão de fábrica dos FMS [Domingos e Politano 2003].

Neste ambiente de manufatura altamente flexível, o procedimento proposto deve construir um programa de produção durante a operação do FMS, ou seja, à medida que cada tarefa nas máquinas, *buffer*, sistema de manipulação de materiais for realizada, o procedimento deve definir qual será a próxima tarefa a ser executada. Sendo assim, uma decisão deve ser tomada em tempo real, na ocorrência de cada evento, seguindo uma estratégia de programação que atenda os objetivos de produção estabelecidos. Esta abordagem de programação, conforme apresentado na seção 3.4, é denominada de programação *on-line*.

Visto que, a quantidade de informações a respeito do conjunto de parâmetros envolvidos na operação dinâmica do FMS é grande, o procedimento de programação deve ter a capacidade de manipular esses parâmetros de modo a gerar um programa de produção adequado. Por esta razão, a tarefa de programar sob essas condições é muito complexa. Uma das alternativas para atender a tarefa de programar as operações do FMS é que o procedimento permita a modelagem de estratégias de programação baseada no conhecimento de um especialista de chão de fábrica.

A lógica fuzzy oferece uma alternativa formal para a representação do conhecimento e para métodos de inferência em sistemas baseados em conhecimento, permitindo o tratamento das imprecisões e incertezas. Com o uso da lógica fuzzy o conhecimento passa ser representado por um conjunto de regras fuzzy que conectam antecedentes com conseqüentes, ou condição com ações.

Dessa forma o conhecimento de um especialista de chão de fábrica pode ser representado por um conjunto de regras fuzzy, ou seja, características de operação do FMS e estratégias de programação podem ser codificadas como regras e mantidas numa base de conhecimento que será utilizada pelo procedimento de programação no processo de tomada de decisão, por meio de métodos de inferência.

O procedimento proposto tem a capacidade de realizar a programação simultânea das operações de transporte e de processamento das peças nas máquinas em função da evolução das operações, da entrada aleatória de peças, dos roteiros de fabricação alternativos e das incertezas provenientes do ambiente, utilizando a lógica

fuzzy para modelar o processo de tomada de decisão na programação das operações, realizando a agregação de regras de modo que atenda a vários objetivos de produção.

Deste modo, as principais características do procedimento proposto são:

- realizar a programação *on-line*,
- programar simultaneamente as operações de transporte e processamento,
- utilizar roteiros alternativos de fabricação ,
- atender a vários objetivos de produção.

O procedimento de programação é indicado para ambientes de FMS com as seguintes características:

- Possuem várias estações de trabalho compostas por uma máquina capaz de executar diferentes operações, um magazine automático de ferramentas acoplado a máquina que realiza a troca da ferramenta de forma automática, e um *buffer* de entrada e outro de saída com capacidade de armazenamento limitada ou não;
- Utilizam um ou mais AGVs para o transporte de peças através de rotas unidirecionais, os quais podem transportar somente uma peça ou um pallet, contendo um lote padronizado de peças de um mesmo tipo, por vez;
- Produzem vários tipos de peças;
- Possuem roteiros de fabricação alternativos para as peças produzidas pelo FMS;
- Os tempos de “setup” são relativamente baixos devido à utilização de máquinas automatizadas e com magazine de ferramentas automatizado;
- Ocorrem eventos inesperados, tais como solicitações de demandas não previstas, alterações nos prazos de entrega e com menor frequência falhas dos seus componentes.

5.2. Descrição do Procedimento Proposto

O procedimento de programação consiste de um modelo de sistema fuzzy (MSF), um algoritmo de controle, e uma base de dados que contém informações sobre o ambiente do FMS, conforme esquema apresentado na figura 5.1.

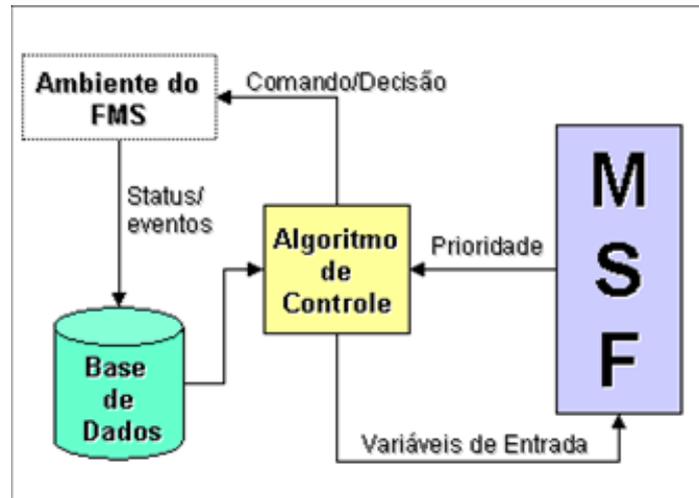


Figura 5.1 – Esquema do procedimento de programação on-line da produção de FMS baseado em lógica fuzzy.

Pode ser observado na Figura 5.1, que o algoritmo de controle verifica constantemente as informações contidas na base de dados sobre o estado atual do FMS e baseado nestas informações, o algoritmo identifica as operações a serem realizadas num determinado momento e dá início ao processo de tomada de decisão de programação. Neste processo o algoritmo de controle extrai as informações necessárias da base de dados, sobre cada tarefa que será programada, e às fornece ao MSF. A cada uma destas tarefas é atribuída uma prioridade pelo MSF, baseada na estratégia de programação de chão de fábrica que está codificada na forma de regras fuzzy para o MSF. O algoritmo de controle então, toma a decisão baseada na maior prioridade atribuída pelo MSF, selecionando a tarefa com maior prioridade e enviando um comando para o FMS para sua execução.

No diagrama de fluxo da figura 5.2 é apresentada a lógica utilizada pelo procedimento para realizar a programação *on-line* das operações do FMS, na qual é determinada a seqüência em que os eventos devem ocorrer no FMS e em que momentos ocorrem o processo de tomada de decisão de programação.

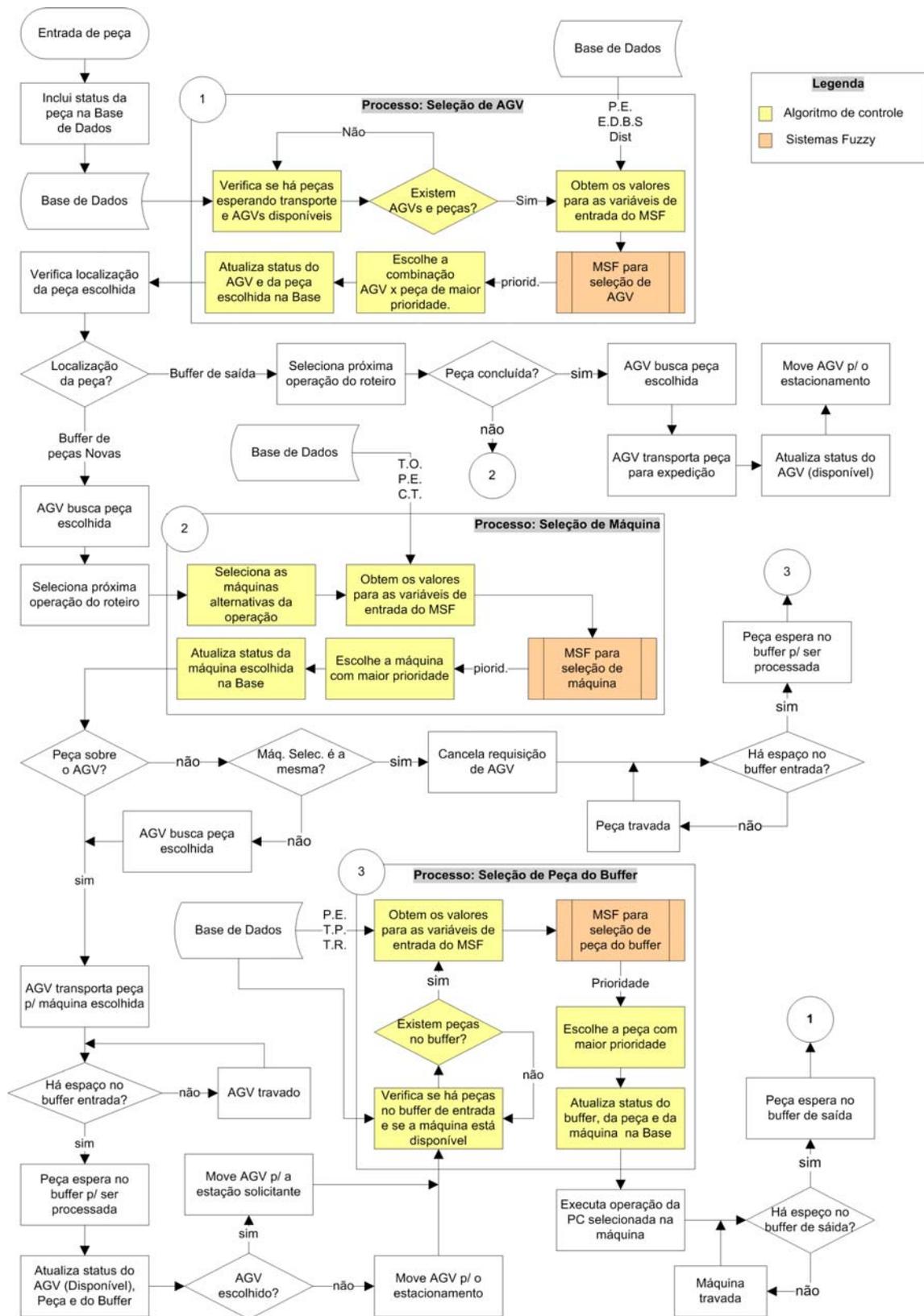


Figura 5.2 – Diagrama de fluxo do procedimento de programação *on-line* baseado em lógica *fuzzy*.

5.2.1. Base de Dados

A base de dados armazena informações referentes às peças fabricadas pelo FMS, ao layout do FMS, às ordens de fabricação de peças, e ao estado corrente do FMS, as quais são necessárias ao funcionamento do procedimento de programação. Estas informações ou dados contidos nesta base são de natureza estática e dinâmica. As variáveis dinâmicas terão seus valores atualizados em função da mudança de estado do FMS e da execução do algoritmo de controle. As variáveis estáticas poderão ser alteradas quando o algoritmo não estiver sendo executado.

Os dados estáticos necessários à base de dados são:

- O roteiro de fabricação alternativo de cada peça;
- O tempo de processamento de cada operação do roteiro nas máquinas;
- Distância entre as estações de trabalho;
- Velocidade média e quantidade de transportadores (AGVs);
- Tamanho dos *buffers* de armazenamento temporário.

Os dados dinâmicos que são atualizados pelo ambiente do FMS e algoritmo de controle são:

- A quantidade atual de peças nos *buffers* de armazenamento temporário;
- Prazo de entrega das ordens de fabricação de peça;
- Tipo de peça da ordem de fabricação;
- Estado atual das máquinas (ocupada, livre, em manutenção);
- Estado atual do transportador (ocupado, livre, em manutenção);
- Distância mínima a ser percorrida pelo transportador, da sua posição corrente a cada um dos *buffers* de armazenamento temporário;
- Tempo estimado do percurso da posição corrente do transportador até cada uma das estações de trabalho;
- Localização de cada peça no chão de fábrica do FMS (peça no buffer entrada X, no buffer de saída X, na máquina X, na estação de carga, ou sobre o transportador X);

- A seqüência de operações já realizadas de cada ordem de fabricação.

5.2.2. Algoritmo de Controle

A função do algoritmo de controle é gerar a programação *on-line* das operações de transporte e processamento das peças nas máquinas, no FMS.

A programação será gerada à medida que decisões de programação forem tomadas durante a operação do FMS. Estas decisões são necessárias nas situações em que se é preciso escolher ou definir qual será a próxima tarefa executada pelo FMS, as quais denominamos de ponto de decisão.

Na revisão bibliográfica realizada neste trabalho foram identificados vários pontos de decisão utilizados na programação de operações do FMS, tais como os apresentados em [Tang *et al.* 1993; Kazerooni *et al.* 1997; Chan 1999], e com base nas características do procedimento proposto e nas características do ambiente de FMS para o qual o procedimento é indicado, foram selecionados os seguintes pontos de decisão:

- **Seleção de AGV:** quando uma peça entra no sistema do FMS, é armazenada na estação de carga de peças, e a partir deste momento é necessário um AGV para transportá-la para uma estação de trabalho, neste ponto ocorre o processo de decisão para escolha de um AGV para realizar a tarefa. Outro caso seria quando uma peça concluiu seu processamento em uma das estações de trabalho e é transferida para o *buffer* de saída da estação, e então novamente será solicitado um AGV para transportá-la para próxima estação.
- **Seleção de uma máquina por uma peça:** a maioria das peças produzida por um FMS possui roteiros de fabricação alternativos, sendo assim, antes de executar uma operação do roteiro de uma peça é preciso escolher em qual das máquinas possíveis será realizada a operação, uma vez que existem tempos de processamentos diferentes para cada máquina executar a operação e em cada instante as cargas de trabalho para estas máquinas também são diferentes. Este caso é um outro ponto de decisão, escolher a máquina que executará a operação, e o processo de decisão para este ponto ocorrerá depois que a peça foi carregada pelo AGV escolhido, e então será determinada para qual máquina a peça será transportada.

- **Seleção de uma peça do *buffer* de entrada pela máquina:** depois que foi selecionado a máquina que executará a próxima operação do roteiro, a peça será transportada e armazenada no *buffer* de entrada da máquina escolhida, onde ela concorrerá, por uma escolha, com as demais peças armazenadas no *buffer* de entrada. A cada operação concluída pela máquina, é necessário selecionar qual será a próxima peça do *buffer* a ser executada pela máquina, quando a quantidade de peças armazenadas no *buffer* for maior que um, e novamente é necessário tomar uma decisão de programação.

O algoritmo de controle irá gerar a programação *on-line* durante as decisões tomadas nestes pontos de decisão. Para isso o algoritmo utilizará um modelo de sistema fuzzy (MSF) para cada um dos pontos de decisão, para auxiliá-lo nas decisões de programação. O MSF atribuirá um grau de prioridade a cada solicitação feita pelo algoritmo de controle, com base nas informações fornecidas pelo algoritmo sobre o estado atual do FMS e sobre as tarefas que estão sendo programadas. Em função deste grau de prioridade, o algoritmo tomará a decisão de qual tarefa será executada e por qual recurso do FMS, e dessa forma a programação das tarefas será realizada durante a operação do FMS com base no conhecimento do especialista de produção que está contido na base de regras do MSF.

A descrição genérica dos passos principais do algoritmo de controle é apresentada a seguir:

1. Verificar se existem Peças esperando transporte e se existem AGVs disponíveis.
2. Se existe Peça esperando transporte e tem AGV disponível, então faça:
 - 2.1. Para cada Peça i esperando transporte e cada AGV j disponível faça:
 - 2.1.1. Obter informações atuais do FMS, acessando a Base de Dados;
 - 2.1.2. Acionar o MSF₁, enviando os dados obtidos no passo 2.1.1, para calcular um valor de prioridade P_{ij} para a combinação Peça _{i} x AGV _{j} .
 - 2.2. Determinar a maior prioridade P_{\max} entre as prioridades P_{ij} calculadas no passo anterior;
 - 2.3. Escolher AGV e Peça da combinação com prioridade P_{\max} , caso haja mais que uma combinação com prioridade P_{\max} , escolha a combinação com a Peça que está a mais tempo esperando por transporte;
 - 2.4. Enviar comando ao FMS para que o AGV escolhido busque a Peça escolhida;

3. Selecionar a próxima operação do roteiro da Peça que será transportada, consultando a base de dados;
4. Para cada Máquina k capaz de executar a operação selecionada do roteiro faça:
 - 4.1. Obter informações atuais do FMS, acessando a Base de Dados;
 - 4.2. Acionar o MSF_2 , enviando os dados obtidos no passo 4.1, para calcular um valor de prioridade $P2_k$ para a Máquina k ;
5. Determinar a maior prioridade $P2_{max}$ entre as prioridades $P2_k$ calculadas no passo anterior;
6. Escolher a Máquina com a prioridade $P2_{max}$, caso haja mais que uma Máquina com prioridade $P2_{max}$, escolha a primeira Máquina avaliada;
7. Enviar comando ao FMS para que o AGV transporte a Peça até a Máquina escolhida e descarregue-a no buffer de entrada da Máquina;
8. Para cada Máquina y do FMS faça:
 - 8.1. Se Máquina $_y$ estiver livre e existir Peça no buffer de entrada da Máquina $_y$, então faça:
 - 8.1.1. Para cada Peça z que está no buffer de entrada da Máquina $_y$ faça:
 - 8.1.1.1. Obter informações atuais do FMS, acessando a Base de Dados;
 - 8.1.1.2. Acionar o MSF_3 , enviando os dados obtidos no passo 8.1.1.1, para calcular um valor de prioridade $P3_z$ para a Peça z ;
 - 8.1.2. Determinar a maior prioridade $P3_{max}$ entre as prioridades $P3_z$ calculadas no passo anterior;
 - 8.1.3. Escolher a Peça com a prioridade $P3_{max}$, caso haja mais que uma Peça com prioridade $P3_{max}$, escolha a Peça que entrou primeiro no buffer;
 - 8.1.4. Enviar comando ao FMS para que a Peça escolhida seja processada na Máquina $_y$.

5.2.3. Modelo de Sistema *Fuzzy*

A função do Modelo de Sistema *Fuzzy* (MSF) é auxiliar o algoritmo de controle no processo de tomada de decisão, conforme descrito na seção anterior. Para isso, um MSF foi definido para cada ponto de decisão monitorado pelo algoritmo de controle, utilizando a estrutura dos Modelos Linguísticos (MLs) baseados na coleção de regras *fuzzy* apresentado no capítulo 4.

O MSF utiliza o conhecimento do especialista em estratégias de programação de chão de fábrica, de modo que essas estratégias são codificadas na forma de regras *fuzzy* e combinadas em uma base de regras, com cada regra contribuindo

parcialmente com a conclusão, ou seja, fornecendo um grau de prioridade para cada tarefa solicitada pelo algoritmo de controle, de modo que esta conclusão esteja relacionada com o atendimento de alguns objetivos de produção simultaneamente e será a base para tomada de decisão de programação.

Os objetivos de produção que visam serem atendidos simultaneamente pelo procedimento de programação, por meio do MSF, são: *confiabilidade*, *rapidez* e *custo*. Conforme já apresentado na seção 3.3, a avaliação do desempenho do procedimento de programação será realizada com base em quatro medidas de desempenho, que influenciam diretamente e indiretamente estes três objetivos de produção:

- Porcentagem de pedidos entregue com atraso;
- Tempo médio de atraso;
- Tempo médio de fluxo; e
- Estoque de peças em processo (WIP).

Para se modelar as estratégias de programação de chão de fábrica, um especialista em programação da produção foi consultado, o Engenheiro de Produção Flávio Donizeti Bolsam, que atualmente trabalha em uma empresa do setor Metal-Mecânico com a produção de peças e equipamentos agrícolas.

Com base na revisão bibliográfica realizada e com o apoio do especialista foram definidas quais seriam as informações necessárias do ambiente de FMS, para se tomar uma decisão de programação em cada um dos pontos de decisão, relatados na seção anterior, de modo que os objetivos de produção definidos neste trabalho fossem atendidos.

Essas informações são tratadas como variáveis de entrada para o MSF, onde os valores obtidos do FMS para essas variáveis são transformados, na interface de *fuzificação*, em valores lingüísticos correspondentes através de funções de pertinência, tais como “pequeno”, “médio” e “grande”, de acordo com os conjuntos *fuzzy* definidos para cada uma das variáveis de entrada. Com essas variáveis de entrada são composta as regras *fuzzy*, utilizadas nos antecedentes das regras, que codificam as estratégias de programação e constituem a base de regras do MSF para cada um dos pontos de decisão. As regras existentes na base de regras são processadas pelo módulo de

inferência do MSF, com base nos valores *fuzzy* recebidos da interface de *fuzificação*, e gera um conjunto *fuzzy* de saída, a partir da composição de todas as regras disparadas, para a interface de *desfuzificação*. A interface de *desfuzificação* converte, então, o conjunto *fuzzy* de saída em um número “crisp”, o qual é adotado como grau de prioridade para a tarefa solicitada pelo algoritmo de controle.

O processo realizado pelo MSF é apresentado na figura 5.3.

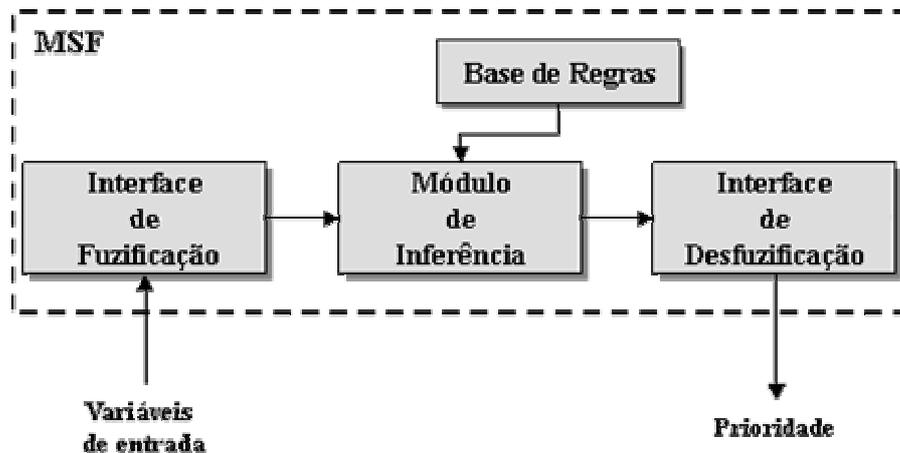


Figura 5.3 – Representação do processo realizado pelo MSF.

5.2.3.1. Variáveis de entrada e saída

Os valores determinísticos de entrada e saída de um sistema *fuzzy* são representados respectivamente por variáveis de entrada e saída. Estas variáveis são variáveis lingüísticas cujos valores são termos lingüísticos, definidos por conjuntos *fuzzy* por meio de funções de pertinência tipo triangular. As funções de pertinência foram definidas, neste trabalho, guardando uma relação de equidistância e simetria entre as funções, visando não privilegiar determinados valores lingüísticos em detrimento de outros.

A variável de saída utilizada pelos MSFs é a mesma para todos os pontos de decisão, e foi definida com sendo a variável “Prioridade”, a qual irá apresentar, após todo o processo de inferência do sistema, o grau de prioridade de cada uma das tarefas solicitadas pelo algoritmo de controle. Esta variável de saída é uma variável lingüística cujos valores podem ser os termos lingüísticos “muito baixa”, “baixa”, “média”, “alta” e

“muito alta” definidos por conjuntos *fuzzy* sobre o universo de discurso entre 0 e 10, conforme apresentado na figura 5.4.

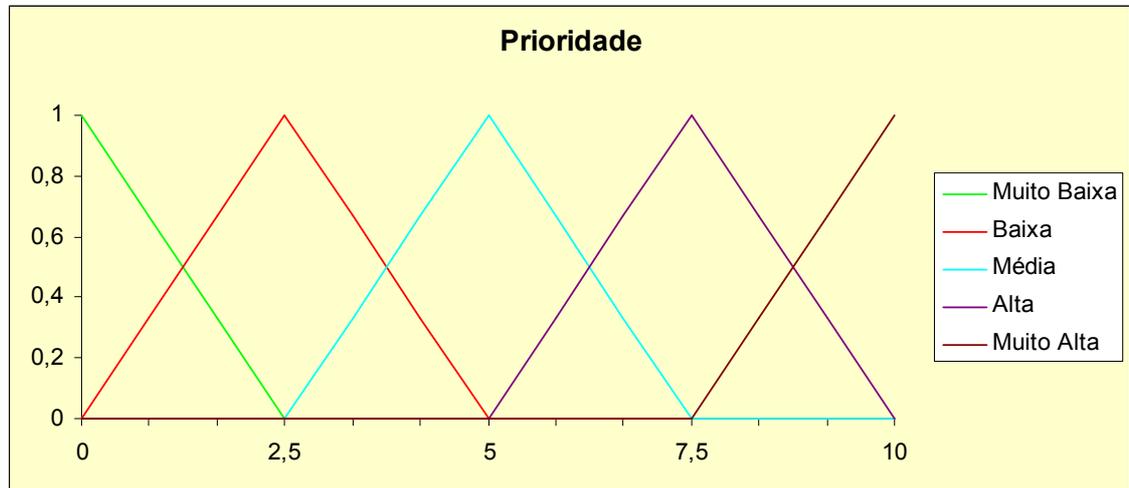


Figura 5.4 – Representação gráfica da variável lingüística de saída Prioridade.

As variáveis de entrada definidas, por meio da revisão bibliográfica e com o apoio do especialista de produção consultado, para cada um dos MSF que atuam nos pontos de decisão são listadas a seguir.

Para o MSF que atua no ponto de decisão em que é necessário selecionar um AGV, as variáveis definidas foram:

- *Prazo de entrega* da peça: esta variável definirá o valor da diferença entre a data de entrega da peça, que está requisitando um AGV, e o tempo corrente em que esta peça se encontra no FMS. A utilização dessa variável tem como objetivo principal controlar os atrasos de entrega de peças, de forma a contribuir com o atendimento do objetivo de produção confiabilidade. Os seus valores podem assumir os termos lingüísticos “atrasada”, “no prazo” e “adiantada” definidos por conjuntos *fuzzy* sobre o universo de discurso determinado em um ciclo de produção.
- *Espaço disponível no buffer de saída* em que se encontra a peça que está solicitando um AGV: o objetivo principal da utilização desta variável é evitar um possível travamento de uma determinada estação de trabalho. Os valores dessa variável podem ser os termos lingüísticos “pequeno”, “médio” e “grande”, definidos por

conjuntos *fuzzy* sobre o universo de discurso determinado pelo número de peças que podem ser armazenadas no *buffer*.

- *Distância*: esta variável representa a menor distância entre a posição atual do AGV disponível e a posição atual da peça requisitante. O objetivo principal de sua utilização é reduzir os tempos de transporte envolvidos nas operações do FMS, de forma a proporcionar o atendimento do objetivo de produção rapidez. Os termos lingüísticos assumidos para essa variável podem ser “pequena”, “média” e “grande”, definidos por conjuntos *fuzzy* sobre o universo de discurso definido entre 0 metros e a máxima distância que o AGV possa percorrer em uma operação de transporte no chão de fábrica do FMS.

Essas variáveis lingüísticas são apresentadas graficamente na figura 5.5.

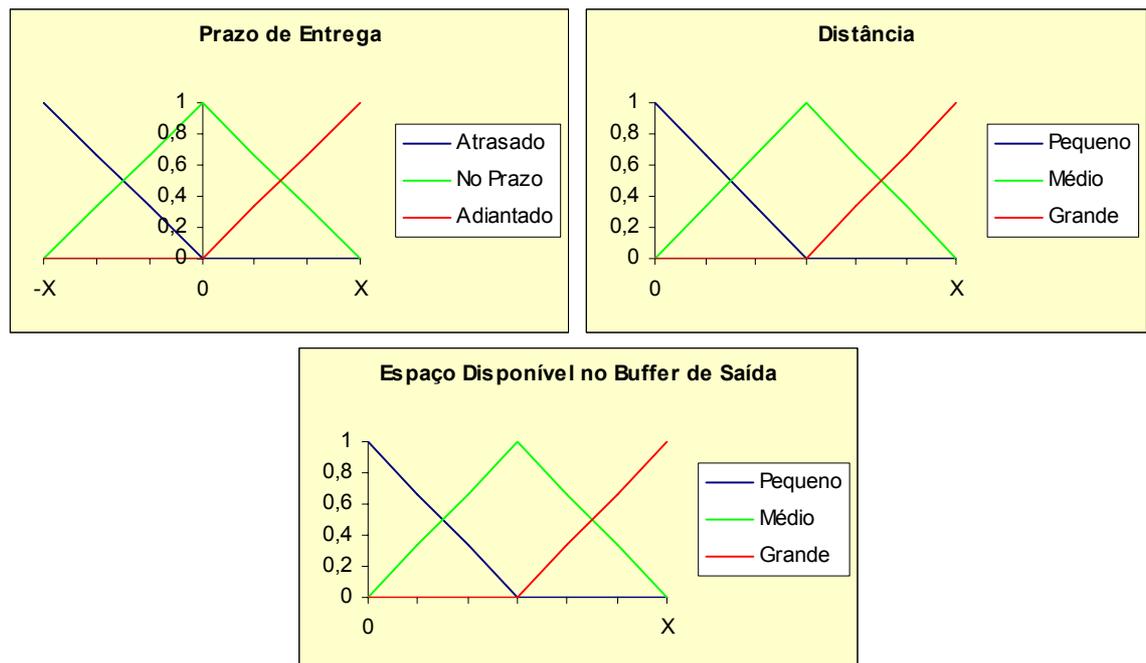


Figura 5.5 – Representação gráfica das variáveis lingüísticas de entrada do MSF utilizado no ponto de decisão “Seleção de AGV”.

As variáveis definidas para o MSF que atua no ponto de decisão “seleção de uma máquina por uma peça” foram:

- *Prazo de entrega* da peça: esta variável é a mesma utilizada no MSF do ponto de decisão anterior.

- *Tempo de operação*: calculado pela soma do tempo de processamento gasto pela máquina para executar a próxima operação com o tempo de transporte gasto pelo AGV para percorrer o caminho necessário até a máquina. O principal objetivo da utilização desta variável é minimizar o tempo de fluxo das peças no FMS, contribuindo com o atendimento do objetivo de produção rapidez, como também reduzir o nível de estoque em processo, visto que as operações serão realizadas mais rápidas e assim influenciará no atendimento do objetivo custo [Slack *et al.* 2002]. Os valores desta variável podem assumir os termos lingüísticos “pequeno”, “médio”, e “grande”, definidos por conjuntos *fuzzy* sobre o universo de discurso definido entre 0 e o maior tempo de operação possível encontrado no FMS.
- *Carga de Trabalho*: esta variável indica a quantidade de peças que estão esperando para serem processadas pela máquina. A utilização dessa variável tem como objetivo evitar que uma peça seja encaminhada a uma estação de trabalho que esteja com sua capacidade de armazenamento temporário comprometida, e assim evitar um possível travamento do AGV que está transportando a peça. Os seus valores podem ser os termos lingüísticos “pequeno”, “médio”, e “grande” definidos por conjuntos *fuzzy* sobre o universo de discurso definido entre 0 peças e a capacidade total de armazenamento do *buffer* de entrada da máquina.

Essas variáveis lingüísticas são apresentadas graficamente na figura 5.6.

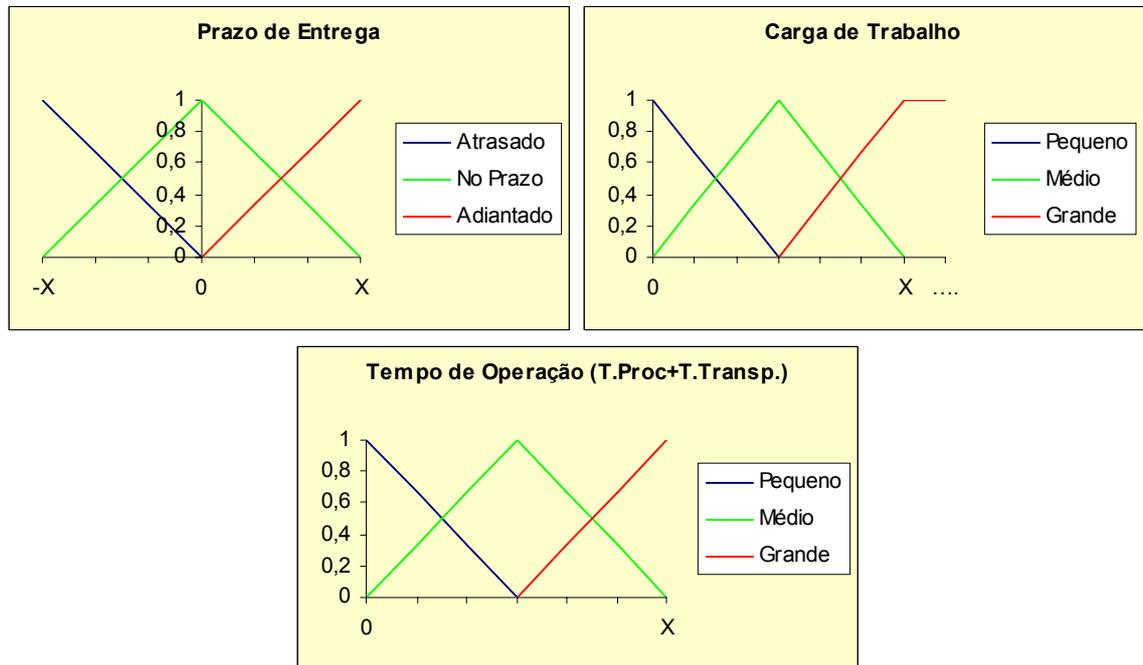


Figura 5.6 – Representação gráfica das variáveis lingüísticas de entrada do MSF utilizado no ponto de decisão “Seleção de uma máquina por uma peça”.

As variáveis definidas para o MSF que atua no ponto de decisão “seleção de uma peça do *buffer* de entrada pela máquina” foram:

- *Prazo de entrega* da peça: esta variável é a mesma utilizada nos outros MSF.
- *Tempo de processamento*: é o tempo gasto pela máquina para executar a próxima operação do roteiro de fabricação da peça que se encontra no *buffer* de entrada. Esta variável é utilizada pelo mesmo objetivo da variável “tempo de operação” descrita anteriormente, e também contribuirá para o atendimento dos objetivos de produção rapidez e custo. Os valores dessa variável lingüística podem assumir os termos lingüísticos “pequeno”, “médio”, e “grande”, definidos por conjuntos *fuzzy* sobre o universo de discurso definido entre 0 e o maior tempo de processamento de uma determinada operação dentre os roteiros de fabricação do mix de peças produzidas pelo FMS.
- *Tempo de processamento restante*: é o maior tempo necessário para se terminar as operações restantes do roteiro de fabricação alternativo da peça. . Esta variável é utilizada para auxiliar o processo de decisão, para que o mesmo não tome uma decisão apenas com base em uma visão local, analisando somente o tempo de

processamento da operação atual, mas que também analise as próximas operações que devem ser realizadas pela peça. Seus valores podem assumir os termos lingüísticos “pequeno”, “médio”, e “grande” definidos por conjuntos *fuzzy* sobre o universo de discurso definido entre 0 e o maior tempo de processamento total de uma determinada peça.

Essas variáveis lingüísticas são apresentadas graficamente na figura 5.7.

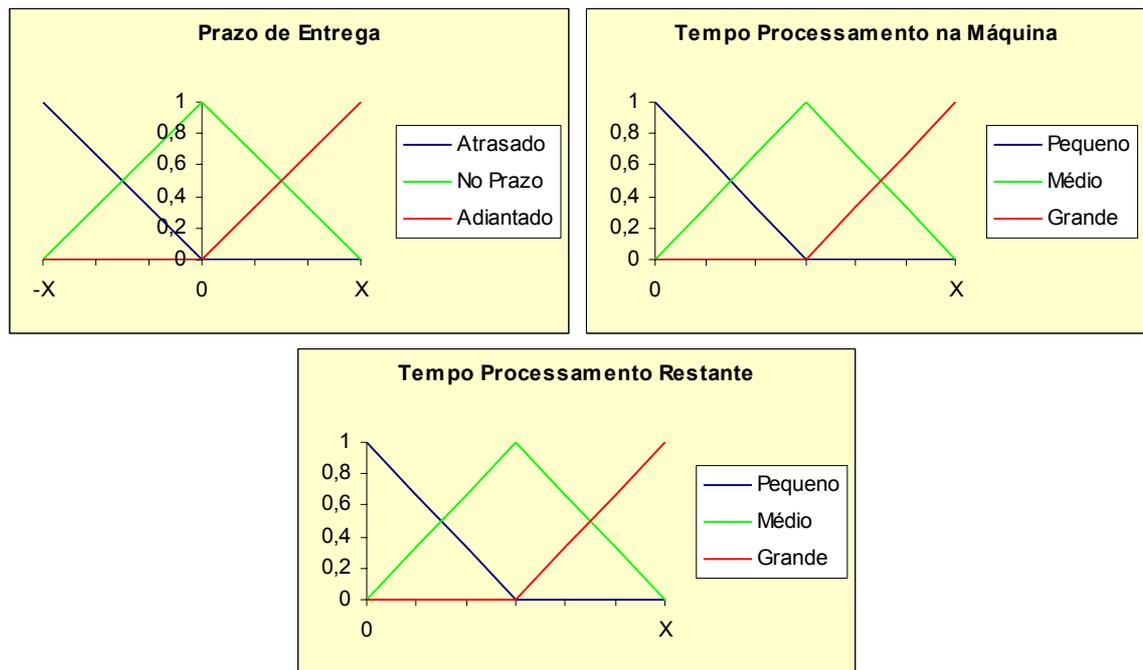


Figura 5.7 – Representação gráfica das variáveis lingüísticas de entrada do MSF utilizado no ponto de decisão “Seleção de uma peça do *buffer* de entrada pela máquina”.

Os valores das variáveis de entrada são fornecidos ao MSF pelo algoritmo de controle, o qual os obtém da base de dados do procedimento de programação.

5.2.3.2. Base de Regras

As bases de regras dos MSFs são formadas por regras *fuzzy* geradas com base nas variáveis de entradas definidas na seção anterior. As regras *fuzzy* assumem o formato das proposições condicionais **SE** <condições> **ENTÃO** <conclusão>, onde os antecedentes e conseqüentes das regras são proposições *fuzzy* formadas com as variáveis lingüísticas de entrada e a variável lingüística de saída respectivamente. Assim, as regras *fuzzy* utilizadas neste trabalho apresentam a seguinte forma:

SE prazo de entrega é atrasado **E** tempo de processamento é pequeno **E** tempo de processamento restante é médio **ENTÃO** prioridade é alta.

onde “prazo de entrega”, “tempo de processamento”, “tempo de processamento restante” são variáveis de entrada e “prioridade” a variável de saída, e os termos “atrasado”, “pequeno”, “médio” e “alta” são os termos lingüísticos definidos por conjuntos *fuzzy* que são assumidos pelos valores dessas variáveis.

Seguindo este formato, a base de regras de cada MSF será formada por 27 regras, abrangendo assim, todas as combinações dos valores das variáveis lingüísticas de entrada. Essas regras foram definidas com o apoio do especialista de produção consultado, baseando-se nos pontos de decisão que elas vão atuar e no atendimento dos objetivos de produção. As regras definidas para este trabalho são apresentadas na tabela 5.1, 5.2, e 5.3.

Tabela 5.1 – Base de regras definida para o MSF utilizado no ponto de decisão “seleção de AGV”.

Regra	Prazo	Buffer Saida Rest	Distância	Prioridade
1	Atrasado	Pequena	Pequena	Muito Alta
2	Atrasado	Pequena	Média	Muito Alta
3	Atrasado	Pequena	Grande	Alta
4	Atrasado	Média	Pequena	Muito Alta
5	Atrasado	Média	Média	Muito Alta
6	Atrasado	Média	Grande	Alta
7	Atrasado	Grande	Pequena	Muito Alta
8	Atrasado	Grande	Média	Muito Alta
9	Atrasado	Grande	Grande	Alta
10	No Prazo	Pequena	Pequena	Alta
11	No Prazo	Pequena	Média	Média
12	No Prazo	Pequena	Grande	Baixa
13	No Prazo	Média	Pequena	Alta
14	No Prazo	Média	Média	Média
15	No Prazo	Média	Grande	Baixa
16	No Prazo	Grande	Pequena	Muito Alta
17	No Prazo	Grande	Média	Alta
18	No Prazo	Grande	Grande	Média
19	Adiantado	Pequena	Pequena	Média
20	Adiantado	Pequena	Média	Média
21	Adiantado	Pequena	Grande	Muito Baixa
22	Adiantado	Média	Pequena	Alta
23	Adiantado	Média	Média	Média
24	Adiantado	Média	Grande	Muito Baixa
25	Adiantado	Grande	Pequena	Alta
26	Adiantado	Grande	Média	Média
27	Adiantado	Grande	Grande	Média

Tabela 5.2 – Base de regras definida para o MSF utilizado no ponto de decisão “seleção de uma máquina por uma peça”.

Regra	Prazo	Tempo Operação	Carga Trabalho	Prioridade
1	Atrasado	Pequeno	Pouco	Alta
2	Atrasado	Pequeno	Razoável	Média
3	Atrasado	Pequeno	Muito	Baixa
4	Atrasado	Médio	Pouco	Muito Alta
5	Atrasado	Médio	Razoável	Média
6	Atrasado	Médio	Muito	Muito Baixa
7	Atrasado	Grande	Pouco	Média
8	Atrasado	Grande	Razoável	Baixa
9	Atrasado	Grande	Muito	Muito Baixa
10	No Prazo	Pequeno	Pouco	Alta
11	No Prazo	Pequeno	Razoável	Média
12	No Prazo	Pequeno	Muito	Baixa
13	No Prazo	Médio	Pouco	Alta
14	No Prazo	Médio	Razoável	Baixa
15	No Prazo	Médio	Muito	Muito Baixa
16	No Prazo	Grande	Pouco	Muito Alta
17	No Prazo	Grande	Razoável	Alta
18	No Prazo	Grande	Muito	Baixa
19	Adiantado	Pequeno	Pouco	Muito Alta
20	Adiantado	Pequeno	Razoável	Alta
21	Adiantado	Pequeno	Muito	Muito Baixa
22	Adiantado	Médio	Pouco	Alta
23	Adiantado	Médio	Razoável	Média
24	Adiantado	Médio	Muito	Muito Baixa
25	Adiantado	Grande	Pouco	Alta
26	Adiantado	Grande	Razoável	Média
27	Adiantado	Grande	Muito	Média

Tabela 5.3 – Base de regras definida para o MSF utilizado no ponto de decisão “seleção de uma peça do *buffer* de entrada pela máquina”.

Regra	Prazo	Tempo Proc Maq	Tempo Proc Rest	Prioridade
1	Atrasado	Pequeno	Pequeno	Muito Alta
2	Atrasado	Pequeno	Médio	Muito Alta
3	Atrasado	Pequeno	Grande	Alta
4	Atrasado	Médio	Pequeno	Muito Alta
5	Atrasado	Médio	Médio	Média
6	Atrasado	Médio	Grande	Baixa
7	Atrasado	Grande	Pequeno	Alta
8	Atrasado	Grande	Médio	Média
9	Atrasado	Grande	Grande	Baixa
10	No Prazo	Pequeno	Pequeno	Muito Alta
11	No Prazo	Pequeno	Médio	Alta
12	No Prazo	Pequeno	Grande	Baixa

14	No Prazo	Médio	Médio	Média
15	No Prazo	Médio	Grande	Baixa
16	No Prazo	Grande	Pequeno	Alta
17	No Prazo	Grande	Médio	Baixa
18	No Prazo	Grande	Grande	Muito Baixa
19	Adiantado	Pequeno	Pequeno	Alta
20	Adiantado	Pequeno	Médio	Média
21	Adiantado	Pequeno	Grande	Média
22	Adiantado	Médio	Pequeno	Alta
23	Adiantado	Médio	Médio	Média
24	Adiantado	Médio	Grande	Baixa
25	Adiantado	Grande	Pequeno	Alta
26	Adiantado	Grande	Médio	Média
27	Adiantado	Grande	Grande	Muito Baixa

5.2.3.3. Fuzificação

No processo de *fuzificação*, os valores de entrada fornecidos pelo algoritmo de controle ao MSF, os quais são determinísticos (crisp), são transformados em valores *fuzzy*. Essa transformação, conforme já descrito no capítulo anterior, consiste em encontrar o grau de pertinência dos valores de entrada nos conjuntos *fuzzy* que representam valores lingüísticos das variáveis de entrada. Esses valores *fuzzy* são utilizados pelo módulo de inferência para calcular o grau de disparo das regras (GDR), ou seja, o grau de verdade para os antecedentes de cada regra da base.

5.2.3.4. Inferência

No módulo de inferência, a base de regras *fuzzy* é acessada e para cada regra da base é calculado o valor do GDR, disparando assim, as regras cujo grau de verdade (GDR) é diferente de zero. O grau de verdade para os antecedentes das regras disparadas é então aplicado na parte conseqüente de cada regra, resultando em um conjunto *fuzzy* que é atribuído a variável de saída prioridade de cada regra. Os conjuntos *fuzzy* obtidos em cada regra são combinados para formar um único conjunto para a variável de saída, por meio de um operador de agregação, contendo informações sobre todas as regras disparadas para os valores de entrada atuais.

Este processo de inferência foi realizado seguindo-se o modelo de Mandani (1977), ou seja, utilizando-se o método Min-Max [Pedrycz 1993; Yager e

Filev 1994], por ser um método bastante utilizado e com sucesso reconhecido, principalmente em aplicações industriais.

5.2.3.5. Desfuzificação

No processo de desfuzificação o conjunto *fuzzy* resultante do processo de inferência é convertido, por meio do método do centro de área, em um número crisp, obtendo assim, uma conclusão precisa que represente, da melhor forma possível, as conclusões fuzzy resultantes do processo de inferência.

Este valor “crisp” resultante do processo de desfuzificação é o valor da variável de saída prioridade, obtido para os valores de entrada atual do MSF, e será o grau de prioridade atribuído à tarefa solicitada pelo algoritmo de controle, que baseado neste grau, escolherá qual tarefa será realizada no ponto de decisão em questão.

6. *Análise do Procedimento proposto*

6.1. Introdução

Vários trabalhos foram realizados no sentido de se comparar o desempenho das diferentes regras de prioridade utilizadas na programação de FMS [Tang *et al.* 1993; Politano 1996; Chan *et al.* 2003] e os resultados das simulações publicadas demonstraram um bom desempenho quando são utilizadas diversas regras combinadas em diversos pontos de decisão, como por exemplo, a combinação das regras SQL (menor tamanho da fila) e SPT (menor tempo de processamento) nos pontos de decisão de escolha de máquina e escolha de peça do buffer de entrada, respectivamente.

Visando analisar o desempenho do procedimento proposto, foram efetuadas várias simulações com o objetivo de comparar os resultados do procedimento baseado em lógica fuzzy com os resultados de procedimentos de programação baseado em regras de prioridade.

A análise e comparação dos resultados foram realizadas por meio das medidas de desempenho mencionadas no capítulo anterior, as quais estão relacionadas com os objetivos de produção que foram estabelecidos para o procedimento de programação. Nas próximas seções são apresentadas as simulações que foram efetuadas e a análise e comparação do procedimento de programação proposto..

6.2. Especificação da simulação

Para a realização de testes e validação do procedimento de programação proposto, foi utilizado uma ferramenta de simulação de eventos discretos, denominada *AutoMod* – fabricante AutoSimulations, que permite a construção de modelos de sistemas de manufatura. Esses modelos são representações computadorizadas de sistemas de manufatura, que apresentam o mesmo comportamento dinâmico e estocástico de um sistema real, sendo utilizados, por exemplo, para testar teorias, solucionar problemas de programação e projetar fábricas.

Nesta ferramenta de simulação foi construído um modelo hipotético de FMS baseado no modelo apresentado no trabalho desenvolvido por [Tang *et al.* 1993], o qual considera as características principais de um FMS real.

O modelo de FMS construído tem o layout do tipo *open field* apresentado na figura 6.1, e possui as seguintes características:

- Possui cinco estações de trabalho, onde cada estação contém uma máquina CNC com capacidade de troca automática de ferramenta e capaz de realizar uma operação por vez, um *buffer* de entrada e outro de saída com capacidade limitada de 10 peças, e um dispositivo automático para carregar e descarregar as peças na máquina;
- Possui uma estação de carga e outra de descarga de peças;
- Utiliza três AGVs para o transporte das peças, os quais têm a capacidade de carregar uma peça por vez. As peças são transportadas com velocidade de 12 m/min em um único sentido no sistema;
- Uma área de estacionamento central é utilizada pelos AGVs quando estão inativos;
- Neste modelo é considerado que os tempos de *setup* são muito baixo devido ao uso de máquinas totalmente automatizadas com todas as ferramentas necessárias disponíveis e sendo assim são desconsiderados.

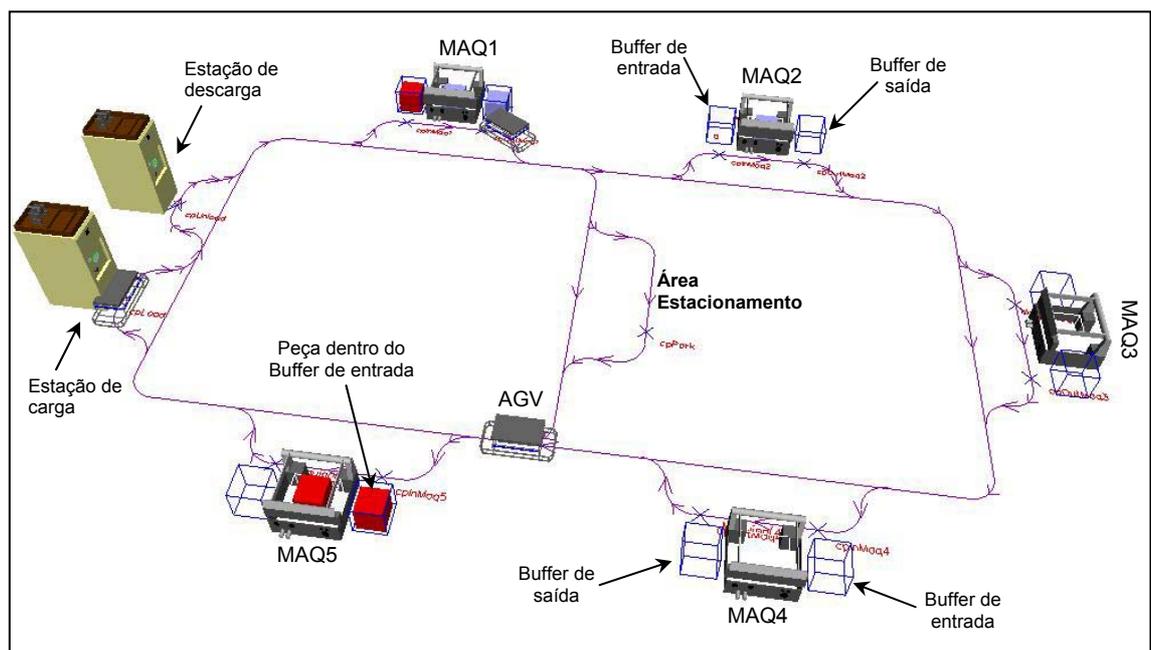


Figura 6.1 – Modelo de FMS construído na ferramenta de simulação AutoMod.

Nesse modelo de FMS, cinco tipos de peças são produzidos de acordo com seus roteiros de fabricação e tempos de processamento apresentados na tabela 5.4. Os roteiros de fabricação dessas peças são alternativos, pois cada operação do roteiro pode ser realizada por mais de uma máquina e com tempos de processamento diferentes para cada máquina, sendo que uma vez iniciada uma operação, ela não poderá ser interrompida antes de ser concluída.

Como exemplo, o roteiro de fabricação da Peça tipo 1 apresentado na tabela 6.1 será produzido pela seqüência de operação C – A – E, onde:

- A operação C pode ser realizada pelas máquinas MAQ1, MAQ2, MAQ3 e MAQ4 com os tempos de processamento de 21 min, 23 min, 22 min e 18 min respectivamente;
- A operação A pode ser realizada nas máquinas MAQ1, MAQ3, MAQ4 e MAQ5 com os respectivos tempos de processamento: 14 min, 15 min, 20 min, e 16 min; e
- A operação E pode ser realizada nas máquinas MAQ1, MAQ3, MAQ4 e MAQ5 com os tempos de processamento de 15 min, 11 min, 13 min e 16 min respectivamente.

Tabela 6.1 – Tempos de processamento e roteiros alternativos das peças produzidas pelo modelo de FMS.

Tipos de Peças	Tipos de Operação	Tempos de Processamento (min/peça) por Nr Máquina					Maior T. Total	Seqüência de operações
		MAQ 1	MAQ 2	MAQ 3	MAQ 4	MAQ 5		
1	A	14	-	15	20	16	66	C - A - E
	C	21	23	22	18	-		
	E	15	-	11	13	16		
2	A	8	-	9	12	13	70	D - B - A - C
	B	-	16	-	24	19		
	C	20	18	16	19	-		
	D	13	9	-	-	12		
3	B	-	17	-	21	18	59	E - D - B
	D	21	20	-	-	23		
	E	11	-	10	14	15		
4	A	12	-	13	9	8	94	A - B - D - C - E
	B	-	18	-	21	20		
	C	24	20	19	22	-		
	D	20	16	-	-	17		
	E	12	-	16	-	11		
5	A	10	-	15	14	11	54	B - C - A
	B	-	18	-	19	20		
	C	18	19	17	16	-		

Essas peças serão introduzidas no processo de produção através da estação de carga e retiradas do processo através da estação de descarga. A entrada de peças no FMS será realizada de forma aleatória, ou seja, seguindo-se o comportamento de uma variável aleatória descrita por uma distribuição teórica de probabilidade, de modo que seja simulada uma demanda aleatória de pedidos.

Os prazos de entrega de cada peça que entrará no sistema também serão definidos de forma aleatória, para que assim cada peça possa ter um prazo de entrega diferente.

As tarefas que deverão ser realizadas pelo modelo de FMS para produzir as peças introduzidas no modelo, serão programadas em modo *on-line* pelo procedimento de programação *on-line* baseado em lógica *fuzzy* apresentado neste trabalho. Sendo assim o procedimento de programação foi integrado ao modelo de FMS desenvolvido na ferramenta AutoMod, de modo que as decisões de programação fossem tomadas em tempo real pelo procedimento no ambiente de simulação.

Nesta integração, a lógica do modelo de simulação, na qual é especificado o fluxo de processos da simulação, foi implementada seguindo-se o diagrama de fluxo do procedimento, e sendo assim, foi necessário realizar a implementação do algoritmo de controle na linguagem da ferramenta AutoMod, em conjunto com a lógica do modelo.

A base de dados utilizada pelo procedimento não foi construída em um sistema de banco de dados, devido à ferramenta de simulação fornecer um conjunto de funções e variáveis que tornam possível obter os dados estáticos e dinâmicos, descritos na seção 5.2.1, necessários ao algoritmo de controle e ao MSF. Por exemplo, a informação sobre a distância mínima a ser percorrida pelo transportador da sua posição corrente a um dos *buffers* de armazenamento temporário, a qual corresponde a um dado dinâmico da base de dados, é obtida por meio da função “*AGV:agv(1) path distance to AGV:cpInMaq2*”, onde *AGV:agv(1)* refere-se ao primeiro AGV do sistema de transporte da ferramenta e *AGV:cpInMaq2* refere-se ao ponto de localização do *buffer* de entrada da Máquina 2. A função *path distance to* é responsável por retornar sempre a menor distância entre dois pontos ou entre um AGV e um ponto de localização, assim com ela se obtém o valor da distância entre o AGV(1) e o *buffer* de entrada citado no exemplo.

Os três MSFs utilizados no procedimento foram implementados em linguagem de programação C, devido ao fato de a ferramenta de simulação AutoMod permitir que se compilem programas escritos em linguagem C modulados em funções junto da linguagem da ferramenta. Assim, por meio deste recurso da ferramenta, os MSFs foram integrados ao modelo de simulação como três funções denominadas de “FuzzySM”, “FuzzySA” e “FuzzyBI” que correspondem ao MSF para seleção de uma máquina, MSF para seleção de AGV e MSF para seleção de peça do *buffer* de entrada, respectivamente. Essas funções são compiladas junto com o modelo e podem ser acessadas em qualquer parte do código fonte que descreve o modelo de FMS na ferramenta AutoMod.

Uma alteração necessária, que deve sempre ser realizada ao utilizar um sistema *fuzzy* em uma aplicação, é a adequação do universo de discurso dos conjuntos *fuzzy* que denotam os valores lingüísticos assumidos pelas variáveis de entrada do sistema, com o universo de discurso das variáveis bases de uma aplicação particular. Sendo assim, as variáveis lingüísticas de entrada dos MSFs foram adequadas ao modelo de FMS simulado e a representação gráfica dessas variáveis são apresentadas na Figura 6.2.

Com a realização desta integração o procedimento de programação *on-line* baseado em lógica *fuzzy* passou a programar todas as tarefas do modelo de simulação em tempo real, possibilitando a execução de várias simulações para avaliar o desempenho do procedimento de programação, as quais são apresentadas na próxima seção.

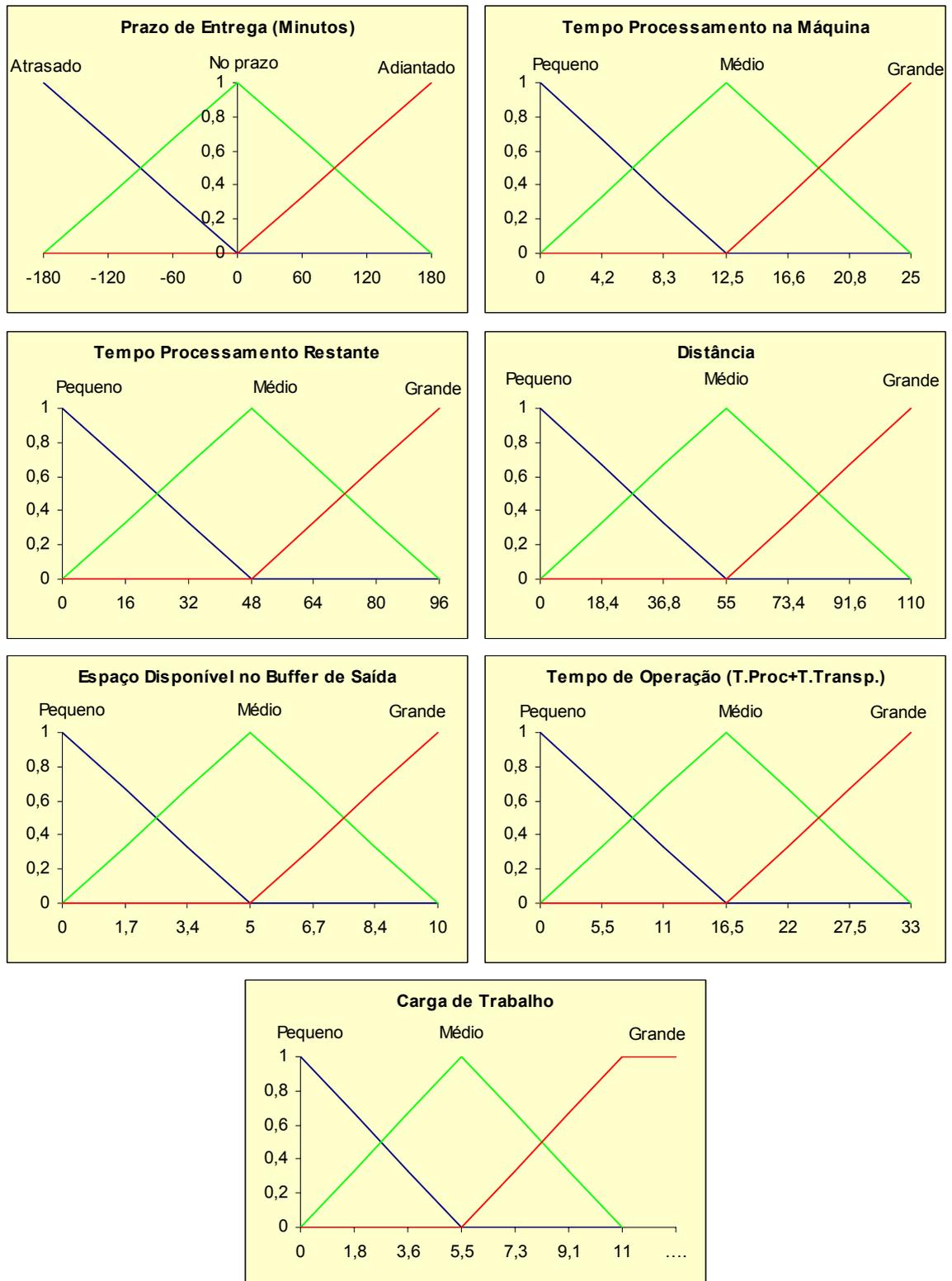


Figura 6.2 – Representação gráfica das variáveis linguísticas de entrada utilizada na simulação.

6.3. Simulações

A análise do procedimento de programação proposto foi realizada por meio de simulações de experimentos montados com modelo de FMS especificado na seção anterior.

Esta análise é realizada com base em quatro medidas de desempenho de programação, que estão relacionadas com os objetivos de produção definidos para este trabalho (ver seção 3.3). As medidas de desempenho utilizadas foram:

- *Percentual de atraso*: porcentagem de peças que foram concluídas depois do seu prazo de entrega.
- *Tempo médio de atraso*: média do tempo ocorrido depois que o prazo de entrega foi vencido. Esta medida de desempenho, como a anterior, indica o nível de atendimento dos prazos de entrega das peças aos clientes. Um tempo médio de atraso ou percentual de atraso alto significa um atendimento pobre aos clientes, indicando uma falta de confiabilidade de entrega e perda de competitividade do FMS.
- *Tempo médio de atravessamento* ou *tempo médio de fluxo*: tempo médio que uma peça permanece no processo de fabricação do FMS até ser concluída e entregue na estação de descarga de peças. Esta medida está relacionada com objetivo de produção rapidez e também sua análise permite a avaliação do estoque necessário para manter a produção de peças. Quanto maior o tempo de fluxo, maior o custo de se manter o estoque de material, para a mesma capacidade instalada.
- *Estoque de produtos em processo* – WIP (work in process): é a quantidade média de peças que permanece no chão de fábrica do FMS durante o processo de fabricação. Esta medida é influenciada pela medida “tempo médio de fluxo”, visto que ao realizar operações mais rápidas reduzem o nível de estoque em processo, bem como diminuem os custos administrativos indiretos.

Essas medidas são funções de tempo de conclusão no qual o melhor desempenho da programação implica na minimização dessas funções. Essas medidas são calculadas neste trabalho como segue [Banks 1998; Sipper e Bulfin Jr. 1998]:

Seja,

- n = Número de peças fabricadas
 R_i = Instante de entrada da peça i no sistema
 D_i = Prazo de entrega da peça i
 C_i = Instante em que a peça i conclui seu processo de fabricação
 TP = Tamanho do período de programação

temos,

$$\text{Tempo médio de Fluxo} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i, \text{ onde } F_i = C_i - R_i \Rightarrow \text{tempo de fluxo};$$

$$\text{WIP} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{TP};$$

$$\text{Tempo médio de Atraso} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k A_i, \text{ onde } A_i = C_i - D_i \Rightarrow \text{atraso};$$

e k = número de peças atrasadas

$$\text{Percentual de Atraso} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha(A_i) \right) * 100,$$

$$\text{onde } \alpha(x) = 1 \text{ se } x > 0 \text{ e } \alpha(x) = 0 \text{ se } x \leq 0.$$

O sistema modelado na simulação é classificado como um sistema não-terminal, ou seja, é um sistema que não tem um estado inicial pré-definido e tampouco um evento caracterizando o encerramento do período de simulação. Neste tipo de sistema existem dois problemas básicos que devem ser contornados antes de se iniciar a computação das estatísticas finais para a análise das simulações [Banks *et al.* 1996; Freitas F. 2001]. O primeiro deles trata do descarte das observações que pertencem ao período transiente, isto é, aquelas observações que são fortemente influenciadas pelo estado inicial do sistema, visto que não existe um estado inicial pré-definido para este tipo de sistema. O segundo problema diz respeito a determinar o período de simulação, uma vez que não se tem um evento característico de término da simulação.

Tendo em vista, que o sistema modelado para simulação refere-se a um sistema não-terminal, inicialmente foi determinado o período transiente e o período de simulação necessário para a realização dos experimentos, para que assim, o interesse das análises recaia sobre o desempenho do sistema quando o mesmo se encontrar em regime. Dessa forma, os resultados iniciais das simulações, referentes ao estado

transiente do sistema, não são incluídos na análise das estatísticas finais. Esses períodos foram determinados com apoio do programa AutoStat, um dos módulos da ferramenta AutoMod destinado a realização de análises estatísticas dos modelos.

Dois projetos de experimentos foram elaborados para analisar o desempenho do procedimento de programação proposto. O primeiro deles é um projeto de experimento fatorial 2^k [Montgomery 1976; Vieira 1999; Freitas F. 2001], elaborado com o objetivo de avaliar se os MSFs utilizados no procedimento juntamente com os pontos de decisão que foram definidos contribuem realmente para os resultados obtidos nas medidas de desempenho. O segundo projeto se refere a um experimento que visa comparar os resultados do procedimento de programação baseado em lógica *fuzzy* com os resultados de um procedimento de programação baseado em combinações de regras de prioridade desenvolvido em Tang *et al* (1993). Esses dois projetos de experimentos são descritos nas seções seguintes.

6.3.1. Projeto de experimento fatorial 2^k

Um projeto de experimento fatorial é uma estratégia de experimentação empregada para estudar os efeitos de diferentes fatores sobre uma variável de resposta e também avaliar as interações entre estes fatores [Montgomery 1976; Freitas F. 2001]. Os fatores são as variáveis controladas pelo experimentador que podem afetar as variáveis de resposta. Cada fator apresenta ao menos dois níveis, onde cada nível do fator constitui uma alternativa para aquele fator. As variáveis de respostas são os valores apresentados por algumas variáveis previamente eleitas, por meio das quais são observados os resultados de um experimento.

Um dos tipos de projetos de experimentos fatoriais existente é o projeto fatorial 2^k , o qual consiste de uma estratégia de experimentação utilizada para determinar o efeito de k fatores, cada um dos quais com duas alternativas ou níveis. Este tipo de projeto fatorial foi empregado neste trabalho para analisar os efeitos dos três pontos de decisão, definidos para o procedimento de programação *on-line* baseado em lógica *fuzzy*, sobre as medidas de desempenho (variáveis de resposta) que foram definidas anteriormente para avaliar o desempenho da programação realizada pelo procedimento.

Os três pontos de decisão “seleção de AGV”, “seleção de uma máquina por uma peça” e “seleção de uma peça do *buffer* de entrada pela máquina” foram considerados como os fatores do projeto fatorial. Em cada um destes pontos é imprescindível a utilização de uma estratégia de programação que auxilie o algoritmo de controle nas tomadas de decisão nestes pontos. Conforme já apresentado, a estratégia de programação utilizada pelo procedimento proposto é fornecida pelos MSFs, e estes foram considerados como uma das alternativas de cada fator do projeto fatorial.

Visto que cada fator necessita de duas alternativas no projeto fatorial 2^k , conforme descrito anteriormente, uma outra estratégia de programação foi definida para auxiliar o algoritmo de controle. Esta estratégia de programação é baseada em uma regra de prioridade simples, a regra SPT (shortest processing time – menor tempo de processamento), a qual faz com que o algoritmo de controle realize a programação do modelo de FMS priorizando as operações de menor tempo de processamento. Assim temos duas alternativas ou dois níveis para cada um dos fatores, conforme se apresenta na tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Fatores e níveis do projeto de experimento fatorial 2^k

Fatores		Nível 1	Nível 2
Fator A	Seleção de AGV	SPT (A_0)	MSF ₁ (A_1)
Fator B	Seleção de uma Máquina por uma Peça	SPT (B_0)	MSF ₂ (B_1)
Fator C	Seleção de uma Peça do <i>buffer</i> de entrada pela Máquina	SPT (C_0)	MSF ₃ (C_1)

Como consequência do projeto de experimento de três fatores com dois níveis (2^3), oito tratamentos (termo utilizado em estatística para indicar o que está em comparação, tal como máquinas, métodos, produtos ou materiais [Vieira 1999]) foram gerados para a análise pela combinação dos três fatores com os dois níveis, os quais são sumarizados na tabela 6.3.

Nesta tabela, os níveis A_0 , B_0 e C_0 representam à aplicação da regra SPT como estratégia de programação utilizada nos pontos de decisão “seleção de AGV”, “seleção de uma máquina por uma peça” e “seleção de uma peça do *buffer* de entrada pela máquina”, respectivamente. Os níveis A_1 , B_1 e C_1 representam, respectivamente, à aplicação do MSF para seleção de AGV, MSF para seleção de máquina e MSF para seleção de peça como estratégia de programação dos pontos de decisão. Assim, cada

tratamento corresponde ao procedimento de programação *on-line* com as estratégias de programação de cada ponto de decisão definida pelo tratamento.

Tabela 6.3 – Tratamentos gerados para o projeto de experimento fatorial 2^k

Fator A = Seleção de AGV	Fator B = Seleção de uma máquina por uma peça			
	B ₀		B ₁	
	Fator C = Seleção de uma peça do <i>buffer</i> de entrada pela máquina			
	C ₀	C ₁	C ₀	C ₁
A ₀	A ₀ B ₀ C ₀	A ₀ B ₀ C ₁	A ₀ B ₁ C ₀	A ₀ B ₁ C ₁
A ₁	A ₁ B ₀ C ₀	A ₁ B ₀ C ₁	A ₁ B ₁ C ₀	A ₁ B ₁ C ₁

Estes tratamentos foram utilizados para gerar a programação do modelo de FMS construído, e os resultados de cada medida desempenho, necessários para a análise do experimento, foram obtidos por meio de simulações realizadas neste modelo com cada tratamento.

As simulações desses tratamentos foram realizadas utilizando-se as seguintes configurações:

- A entrada de novas de peças no FMS foi realizada de forma aleatória, utilizando-se intervalo de tempo de chegada gerado por uma distribuição exponencial com média de 100 minutos para cada tipo de peça independentemente.
- O prazo de entrega de cada peça foi definido seguindo-se uma distribuição exponencial entre 100 e 250 minutos.
- O período transiente determinado para as simulações foi de 14400 minutos, e o período de simulação (período de produção) definido foi de 86400 minutos, considerando-se o período transiente.
- Não foi utilizado nenhum mecanismo para destravamento do FMS, ou seja, quando uma máquina, AGV ou o sistema todo trava, eles permanecem travados até o fim do período de produção que está sendo simulado e os resultados destas simulações foram analisados até o momento do travamento.

Num processo de análise de resultados obtidos por meio de simulação é fundamental a determinação de intervalos de confiança para as variáveis de interesse (medidas de desempenho) que medem o desempenho do sistema [Freitas F. 2001]. Um intervalo de confiança compreende um intervalo numérico que possui uma

probabilidade igual a $(1 - \alpha)$ de incluir o verdadeiro valor da variável ou medida de desempenho sob análise, onde, $(1 - \alpha)$ é denominado o nível de confiança do intervalo [Vieira 1999; Freitas F. 2001]. Dessa forma, α será o erro admitido ao se concluir sobre a presença do verdadeiro valor da variável no intervalo calculado, denominado nível de significância.

A largura de um intervalo de confiança é influenciada por três fatores [Freitas F. 2001]:

- O número de replicações realizadas nas simulações;
- O nível de confiança predefinido;
- A variação associada à medida de desempenho sob análise.

O relacionamento entre esses fatores ocorre da seguinte maneira:

- Na medida em que se aumenta o número de replicações, reduz-se a largura do intervalo de confiança;
- Na medida em que o nível de confiança aumenta, aumenta também a largura do intervalo de confiança;
- Na medida em que a variação aumenta, cresce a largura do intervalo de confiança.

A variância da medida de desempenho de um modelo de simulação é dependente dos parâmetros deste modelo. Não sendo possível modificar os elementos do modelo que alterem sua natureza estocástica, a largura do intervalo de confiança fica em função de alterações do número de replicações e do nível de confiança desejado aos resultados. Desta maneira, se o nível de confiança for fixado, um grande número de replicações resultará num menor intervalo de confiança.

Visto que o número de replicações realizadas numa simulação é um fator relevante na determinação do intervalo de confiança, em sistema de natureza estocástica, foi computado segundo [Freitas F. 2001], o número de replicações necessárias de cada tratamento para um nível de confiança fixado em 95 %.

O número de replicações foi determinado segundo um procedimento estatístico que consiste em executar uma simulação piloto com um determinado número de replicações, para se obter a média amostral de uma medida de desempenho, e estabelecer um nível de precisão de $\pm r\%$ (sobre esta medida) e um nível de confiança

de $100(1-\alpha)\%$. A precisão desejada implica em que o intervalo de confiança deve ser: $[\bar{x}(1-r/100), \bar{x}(1+r/100)]$. Logo, pode-se obter o número de replicações n pela equação [Freitas F. 2001]:

$$n = \left(\frac{100zs}{r\bar{x}} \right)^2, \text{ onde: } \bar{x} \text{ é a média da medida de desempenho; } \quad (6.1)$$

z é o valor da variável *Normal* padronizada para o nível de confiança desejado [Freitas 2001];

s é o desvio padrão.

Para a aplicação deste procedimento foi executada uma simulação piloto com trinta replicações. A equação 6.1 foi aplicada para a medida de desempenho “percentual de atraso”, com nível de precisão de 1,74 % e 95 % de nível de confiança, obtendo-se o número de replicações igual 96,04 para $\bar{x} = 5,39$, $z = 1,96$ e $s = 0,47$.

Assim, arredondando-se o valor de n calculado para cima, o experimento foi replicado 100 vezes, ou seja, para cada tratamento do experimento fatorial foram realizadas 100 simulações, sendo que nestas simulações o estado inicial do sistema permanece sempre o mesmo, alterando-se apenas as sementes dos geradores de números aleatórios em cada simulação.

6.3.1.1. Análise do projeto de experimento fatorial

A análise do experimento fatorial, como já descrito, foi feita com base nas medidas de desempenho “percentual de atraso”, “tempo médio de atraso”, “tempo médio de fluxo” e “WIP”. Os resultados destas medidas foram obtidos por meio das simulações executadas com os tratamentos gerados no experimento fatorial. Os resultados obtidos em cada simulação são apresentados no apêndice I e os valores médios das medidas são apresentados na tabela 6.4, para cada tratamento da tabela 6.3.

A análise destes dados foi realizada com ajuda de um método estatístico denominado análise de variância, que compara a variação devido aos tratamentos com a variação devido ao acaso ou resíduo [Scheffé 1959; Vieira 1999].

Tabela 6.4 – Resultados das medidas de desempenho obtidos nas simulações realizadas com cada tratamento do experimento fatorial.

TRATAMENTOS	Medidas de Desempenho			
	Percentual Atraso	Tempo Médio Atraso (min)	Tempo Médio Fluxo (min)	WIP
A ₀ B ₀ C ₀	19,53	-21,92	151,07	7,56
A ₁ B ₀ C ₀	19,54	-22,01	151,23	7,59
A ₀ B ₁ C ₀	14,52	-6,49	131,64	6,32
A ₀ B ₀ C ₁	18,58	-18,77	143,72	7,19
A ₁ B ₁ C ₀	14,23	-6,27	130,89	6,28
A ₁ B ₀ C ₁	18,53	-18,72	143,67	7,19
A ₀ B ₁ C ₁	5,51	-1,45	101,23	5,07
A ₁ B ₁ C ₁	5,45	-1,38	101,39	5,08

Neste experimento fatorial, oito tratamentos estão em comparação com o objetivo de se avaliar os efeitos dos três pontos de decisão do procedimento proposto (fatores) sobre as medidas de desempenho e comparar as estratégias de programação (níveis).

Esta avaliação é realizada aplicando-se, primeiramente, a análise de variância sobre cada medida de desempenho, para verificar se os resultados obtidos nestas medidas com os diferentes tratamentos não são iguais entre si. Assim, a análise de variância realizada sobre cada medida é apresentada na tabela 6.5, 6.6, 6.7 e 6.8.

Tabela 6.5 – Análise de variância dos dados da medida de desempenho “percentual de atraso”.

Causas de variação	Graus Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F
Tratamentos	7	24.651,62	3.521,66	2.777,58
Resíduo	792	1.004,17	1,27	
Total	799	25.655,79		

Tabela 6.6 – Análise de variância dos dados da medida de desempenho “tempo médio de atraso”.

Causas de variação	Graus Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F
Tratamentos	7	57.670,22	8.238,60	1.006,16
Resíduo	792	6.485,01	8,19	
Total	799	64.155,23		

Tabela 6.7 – Análise de variância dos dados da medida de desempenho “tempo médio de fluxo”.

Causas de variação	Graus Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F
Tratamentos	7	289.212,86	41.316,12	2.263,46
Resíduo	792	14.456,82	18,25	
Total	799	303.669,68		

Tabela 6.8 – Análise de variância dos dados da medida de desempenho “WIP”.

Causas de variação	Graus Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F
Tratamentos	7	739,33	105,62	1.277,54
Resíduo	792	65,48	0,08	
Total	799	804,80		

A interpretação destas tabelas de análise de variância é realizada comparando-se o valor de “F” obtido em cada análise com o valor crítico de “F” correspondente. Este valor crítico de “F” é adquirido em uma “Tabela de F” relacionada com o nível de significância desejado [Scheffé 1959], cujos valores de “F” estão associados ao número de graus de liberdade de tratamentos (numerador) e ao número de graus de liberdade do resíduo (denominador).

Consultando-se o valor crítico de “F” ao nível de significância de 5 % na “Tabela F”, com 7 (tratamentos) e 792 (resíduo) graus de liberdade, encontra-se o valor 2,01. Como o valor de “F” calculado em cada análise apresentada anteriormente é maior que 2,01 rejeita-se, com nível de significância de 5 % ou 95 % de confiança, a hipótese de que os valores médios das medidas de desempenho são iguais para os diferentes tratamentos. Em termos mais práticos conclui-se usando o valor de “F” que, ao nível de significância de 5 %, as estratégias de programação empregada não têm, em média, o mesmo desempenho.

Depois de verificado que os tratamentos têm desempenhos diferentes, pode-se desdobrar a análise de variância para avaliar os efeitos de cada fator (A, B e C) e da interação entre eles (A x B, A x C, B x C e A x B x C) [Vieira 1999]. Esta análise foi realizada novamente para cada medida de desempenho, e os resultados são apresentados nas tabelas 6.9, 6.10, 6.11 e 6.12.

Tabela 6.9 – Análise de variância desdobrada para a medida de desempenho “percentual de atraso”.

Causas de variação	Graus Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F
A	1	1,99	1,99	1,57
B	1	16.635,34	16.635,34	13.120,52
C	1	4.877,02	4.877,02	3.846,57
A x B	1	1,31	1,31	1,04
A x C	1	0,38	0,38	0,30
B x C	1	3.134,54	3.134,54	2.472,25
A x B x C	1	1,05	1,05	0,83
Tratamentos	7	24.651,62	3.521,66	2.777,58
Resíduo	792	1.004,17	1,27	
Total	799	25.655,79		

Tabela 6.10 – Análise de variância desdobrada para a medida de desempenho “tempo médio de atraso”.

Causas de variação	Graus Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F
A	1	0,76	0,76	0,09
B	1	54.163,44	54.163,44	6.614,86
C	1	3.351,55	3.351,55	409,32
A x B	1	1,57	1,57	0,19
A x C	1	0,00	0,00	0,00
B x C	1	151,82	151,82	18,54
A x B x C	1	1,07	1,07	0,13
Tratamentos	7	57.670,22	8.238,60	1.006,16
Resíduo	792	6.485,01	8,19	
Total	799	64.155,23		

Tabela 6.11 – Análise de variância desdobrada para a medida de desempenho “tempo médio de fluxo”.

Causas de variação	Graus Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F
A	1	3,05	3,05	0,17
B	1	193.893,52	193.893,52	10.622,23
C	1	69.987,19	69.987,19	3.834,17
A x B	1	6,21	6,21	0,34
A x C	1	5,93	5,93	0,32
B x C	1	25.301,14	25.301,14	1.386,09
A x B x C	1	15,82	15,82	0,87
Tratamentos	7	289.212,86	41.316,12	2.263,46
Resíduo	792	14.456,82	18,25	
Total	799	303.669,68		

Tabela 6.12 – Análise de variância desdobrada para a medida de desempenho “W.I.P.”.

Causas de variação	Graus Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F
A	1	0,00	0,00	0,00
B	1	575,20	575,20	6.957,49
C	1	128,30	128,30	1.551,85
A x B	1	0,03	0,03	0,38
A x C	1	0,01	0,01	0,11
B x C	1	35,69	35,69	431,68
A x B x C	1	0,10	0,10	1,25
Tratamentos	7	739,33	105,62	1.277,54
Resíduo	792	65,48	0,08	
Total	799	804,80		

Comparando-se os valores de “F” de cada tabela com o valor crítico de “F”, verifica-se que, para todas as medidas de desempenho os fatores B e C, e a interação entre eles B x C, são significantes ao nível de 5 %. Assim podemos concluir que as variações sofridas pelas medidas de desempenho são devidas aos pontos de decisão “seleção de máquina por uma peça” e “seleção de uma peça do buffer de

entrada”, e à interação deles, ou seja, esses dois pontos de decisão são os que realmente contribuem para os resultados obtidos nas medidas de desempenho.

Sabendo-se que os fatores B e C são os responsáveis pelos resultados obtidos nas medidas de desempenho, pode-se verificar qual dos níveis destes fatores proporciona o melhor desempenho, ou seja, entre a estratégia de programação baseada no MSF e a baseada na regra de prioridade SPT, que foram utilizadas nos pontos de decisão, qual obteve melhor resultado nas medidas de desempenho.

Esta análise é realizada comparando-se o valor médio das medidas de desempenho de cada tratamento por meio de um teste estatístico. Este teste é um método que fornece a *diferença mínima significativa* (d.m.s.) entre duas médias. Essa diferença é utilizada como um instrumento de medida. Toda vez que o valor absoluto da diferença entre duas médias é igual ou maior do que a diferença mínima significativa, as médias são consideradas estatisticamente diferentes, ao nível de significância estabelecido.

O teste estatístico utilizado neste trabalho foi o teste de Tukey [Vieira 1999], que fornece o valor de d.m.s. pela fórmula:

$$d.m.s. = q \sqrt{\frac{QMR}{n}}$$

onde q é o valor dado na “Tabela Q” ao nível de significância estabelecido, QMR é o quadrado médio do resíduo da análise de variância e n é o número de repetições de cada um dos tratamentos.

A análise realizada em cada medida de desempenho com auxílio deste teste estatístico é apresentada a seguir.

- **Medida de desempenho “Percentual de Atraso”**

As diferenças existentes entre cada média do percentual de atraso obtido nos tratamentos simulados foram comparadas com a d.m.s. de 0,48 calculada pelo teste de Tukey para $q = 4,29$ (valor dado na tabela, ao nível de significância de 5 %, associado a 8 tratamentos e 792 graus de liberdade de resíduo), $QMR = 1,27$ (obtido na análise de variância desta medida de desempenho) e $n = 100$.

Lembrando que o nível zero significa a utilização da regra de prioridade SPT e o nível um significa a utilização dos MSFs como estratégias de programação, pode-se concluir, comparando as médias desta medida de desempenho apresentada graficamente na figura 6.3 pelo teste de Tukey, que o percentual de atraso é significativamente menor nos tratamentos que utilizam os MSFs como estratégia de programação nos pontos de decisão do procedimento proposto, logo apresentam um melhor desempenho na programação do FMS.

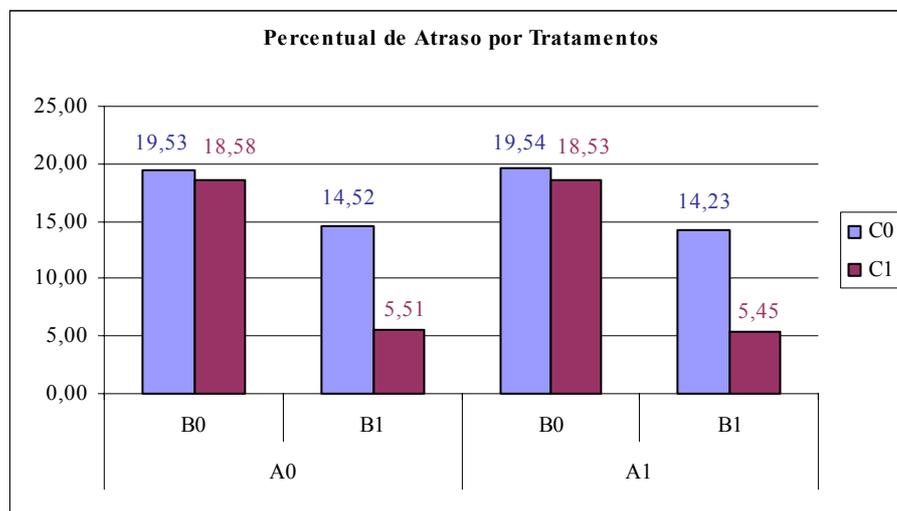


Figura 6.3 – Gráfico das médias da medida de desempenho “percentual de atraso”.

- **Medida de desempenho “Tempo Médio de Atraso”**

As diferenças existentes entre cada média do tempo médio de atraso obtido nos tratamentos simulados foram comparadas com a d.m.s. de 1,23 calculada pelo teste de Tukey para $q = 4,29$, $QMR = 8,19$ e $n = 100$.

Comparando-se as médias desta medida de desempenho apresentada graficamente na figura 6.4 pelo teste de Tukey, pode-se concluir que o tempo médio de atraso é significativamente menor nos tratamentos que utilizam os MSFs como estratégia de programação nos pontos de decisão do procedimento proposto, logo apresentam um melhor desempenho na programação do FMS.

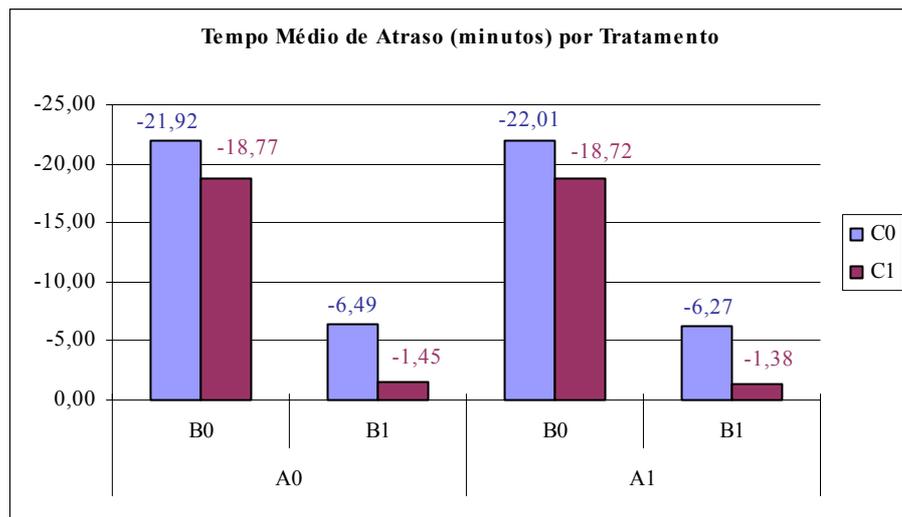


Figura 6.4 – Gráfico das médias da medida de desempenho “tempo médio de atraso”.

- **Medida de desempenho “Tempo Médio de Fluxo”**

As diferenças existentes entre cada média da medida de desempenho tempo médio de fluxo obtido nos tratamentos simulados foram comparadas com a d.m.s. de 1,83 calculada pelo teste de Tukey para $q = 4,29$, $QMR = 18,25$ e $n = 100$.

Comparando-se as médias desta medida de desempenho apresentada graficamente na figura 6.5 pelo teste de Tukey, pode-se concluir que o tempo médio de fluxo também é significamente menor nos tratamentos que utilizam os MSFs como estratégia de programação nos pontos de decisão do procedimento proposto, logo apresentam um melhor desempenho na programação do FMS.

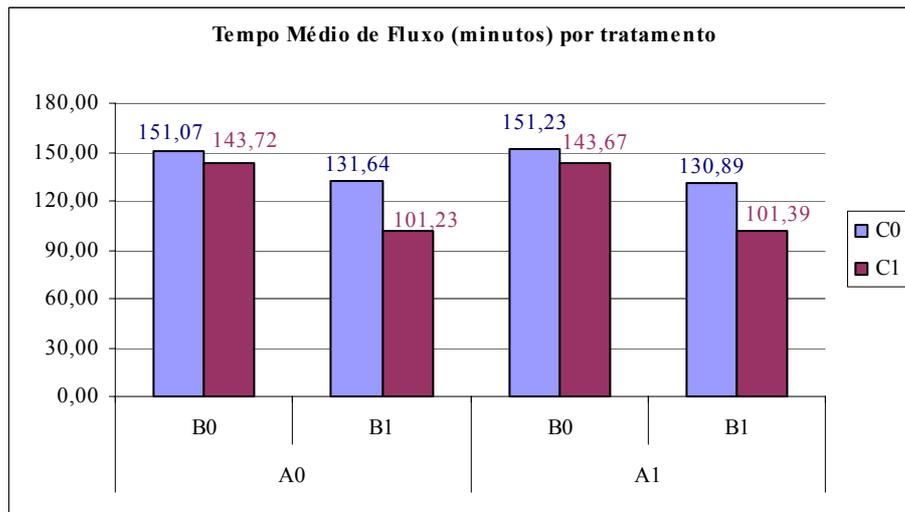


Figura 6.5 – Gráfico das médias da medida de desempenho “tempo médio de fluxo”.

- **Medida de desempenho “Estoque de Peças em Processo (WIP)”**

As diferenças existentes entre cada média da medida de desempenho estoque de peças em processo obtido nos tratamentos simulados foram comparadas com a d.m.s. de 0,12 calculada pelo teste de Tukey para $q = 4,29$, $QMR = 0,08$ e $n = 100$.

Comparando-se as médias desta medida de desempenho apresentada graficamente na figura 6.6 pelo teste de Tukey, pode-se concluir que o estoque de peças em processo também é significativamente menor nos tratamentos que utilizam os MSFs como estratégia de programação nos pontos de decisão do procedimento proposto, logo apresentam um melhor desempenho na programação do FMS.

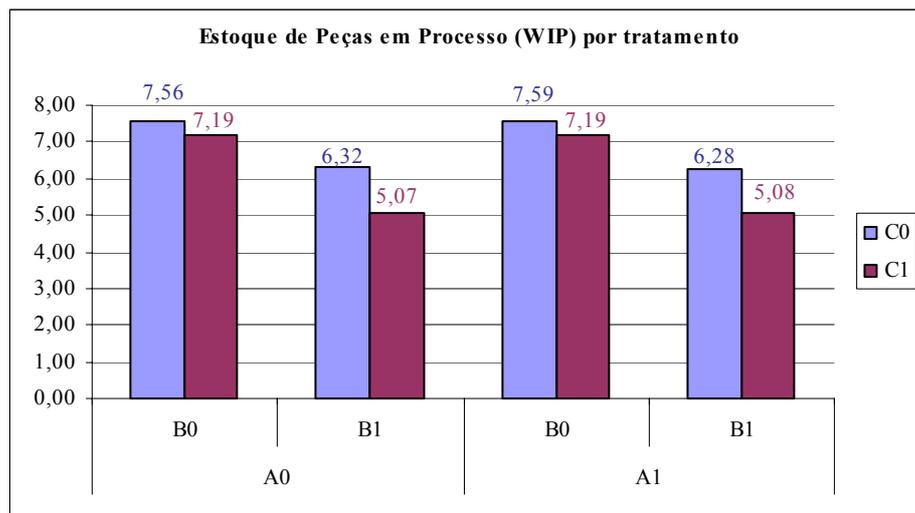


Figura 6.6 – Gráfico das médias da medida de desempenho “estoque de peças em processo”.

6.3.2. Comparando o procedimento de programação proposto

O segundo experimento estatístico realizado consistiu em comparar o procedimento de programação *on-line* baseado em lógica *fuzzy*, proposto neste trabalho, com um modelo de programação *on-line* baseado em combinações de regras de prioridade, apresentado no trabalho de Tang *et al* (1993).

Nesse trabalho de Tang *et al* foram utilizadas regras de prioridade para realizar a programação *on-line* de um FMS, onde foram estabelecidos seis pontos de decisões envolvendo operações entre peças, AGVs, e máquinas. Para cada ponto de

decisão foi selecionado um conjunto de regras de prioridade que foram avaliadas por meio de simulação de experimentos, onde medidas de desempenhos foram definidas como índices de pesos de múltiplos critérios. Na simulação dos experimentos foi usado o método de Taguchi para estudar as relações entre as medidas de desempenho e as regras de prioridade nos seis pontos de decisão, e baseado neste estudo foram selecionadas seis regras, sendo uma para cada ponto de decisão, que utilizadas em conjunto geraram uma programação que melhor atendeu simultaneamente as medidas de desempenho utilizadas.

Os seis pontos de decisão e as regras de prioridade que foram selecionadas em cada ponto são listados a seguir [Tang *et al.* 1993]:

1. Seleção de AGV pela peça
Regra: Seleção cíclica
2. Seleção de máquina pela peça sobre o AGV
Regra: Menor distância da máquina
3. Seleção de peças pela máquina
Regra: Menor tempo de processamento
4. Seleção de máquina pela peça na fila de saída
Regra: Menor tempo de processamento
5. Seleção de peça pelo AGVs
Regra: Menor tempo de fluxo para operação
6. Seleção de máquina pelo AGV
Regra: Esperar na última estação onde completou a tarefa de transporte.

Para realizar a comparação, o procedimento de programação apresentado no trabalho de Tang *et al* (1993) foi implementado no modelo de FMS apresentado anteriormente, de modo que as decisões de programação passassem a ser tomadas em tempo real no ambiente de simulação.

Neste experimento foram realizadas quatro simulações com cada um dos procedimentos de programação, variando-se o intervalo de tempo de chegada de peças novas entre 150, 120, 100 e 90 minutos. Dessa forma pôde-se simular a variação de demanda, de modo que, quanto menor o intervalo de tempo de chegada maior a demanda de peças, e assim analisar e comparar o desempenho dos dois procedimentos de programação quanto ao atendimento das medidas de desempenho.

As simulações deste experimento foram realizadas com as seguintes configurações:

- O período de simulação (período de produção) foi de 60 dias (86400 minutos), com um período transiente de 14400 minutos para o procedimento proposto neste trabalho e 1440 minutos para o procedimento baseado em regras de prioridade.
- O prazo de entrega de cada peça nestas simulações foi definido seguindo-se uma distribuição exponencial entre 100 e 250 minutos.
- Não foi utilizado, nos procedimentos de programação, nenhum mecanismo para destravamento do FMS.
- A entrada de novas de peças no FMS foi gerada de forma aleatória, utilizando-se intervalo de tempo de chegada gerado por uma distribuição exponencial com média definida por cada simulação do experimento (150, 120, 100 e 90 min).

Do mesmo modo que o experimento fatorial apresentado na seção anterior, este experimento foi replicado 100 vezes para cada simulação, a fim de reduzir a variação estatística, com o estado inicial do sistema permanecendo sempre o mesmo e alterando-se apenas as sementes dos geradores de números aleatórios em cada replicação.

Os dados apresentados como resultados para as medidas de desempenho foram obtidos através das simulações e indicam a média dos valores obtidos nas replicações. Os dados dessas simulações são apresentados no Apêndice II.

O desempenho dos dois procedimentos de programação foi avaliado por meio de um teste de estatístico, que com base nos resultados das replicações, estabelece se o desempenho de um procedimento é diferente do outro em determinado nível de significância.

Dentre os testes estatísticos existentes, foi utilizado o “teste t ” [Vieira 1999] para comparar os dois procedimentos de programação. Para aplicar este teste deve-se estabelecer o nível de significância desejado e depois calcular para cada medida de desempenho o valor de t , dado pela fórmula:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right) s_2^2}}, \text{ que está associado a } n_1 + n_2 - 2 \text{ graus de liberdade.}$$

Onde: \bar{x}_1 e \bar{x}_2 - refere-se à média da medida de desempenho em questão obtida pelos dois procedimentos em comparação;

n_1 e n_2 - refere-se ao número de replicações realizadas com cada procedimento; e

s_2^2 - refere-se à variância ponderada [Vieira 1999].

O valor absoluto de t calculado por essa fórmula deve então ser comparado com o valor crítico de t dado em tabela “Tabela de t ”, ao nível de significância estabelecido e com os mesmo graus de liberdade. Se o valor absoluto de t calculado for maior que o valor crítico, rejeita-se a hipótese de que as médias de desempenho dos procedimentos são iguais, ou seja, pode-se concluir que o desempenho de um procedimento é melhor ou pior do que o outro.

As comparações realizadas com os dois procedimentos através do “teste t ” são apresentadas a seguir, considerando o nível de significância de 5 % e graus de liberdade igual 198.

- **Medida de desempenho “Percentual de Atraso”**

Os resultados desta medida de desempenho obtidos nas simulações realizadas com os diferentes intervalos de tempo de chegada para cada procedimento de programação são apresentados na tabela 6.13, juntamente com a aplicação do “teste t ”.

Tabela 6.13 – Comparação dos procedimentos de programação em relação à medida de desempenho “percentual de atraso”.

Medida de desempenho "percentual de atraso"				
Intervalo de tempo de chegada Peças	PROCEDIMENTO DE PROGRAMAÇÃO		Teste $t = 1,96$	
	Regras Prioridade	Lógica Fuzzy	t calculado	Conclusão
150 min	9,87	3,27	66,87	Médias diferentes
120 min	22,36	4,07	35,94	Médias diferentes
100 min	50,50	5,38	40,80	Médias diferentes
90 min	56,63	6,71	42,20	Médias diferentes

Pode-se verificar através do “teste t ” que o desempenho dos procedimentos de programação quanto à medida “percentual de atraso” são significativamente diferentes, o que permite concluir que, o procedimento de programação *on-line* baseado em lógica *fuzzy* obteve menor percentual de atraso de peças do que o procedimento baseado em combinação de regras de prioridade. Logo, o

procedimento proposto neste trabalho obteve melhor desempenho quanto ao atendimento do objetivo de produção confiabilidade, conforme pode ser visto no gráfico comparativo apresentado na figura 6.7.

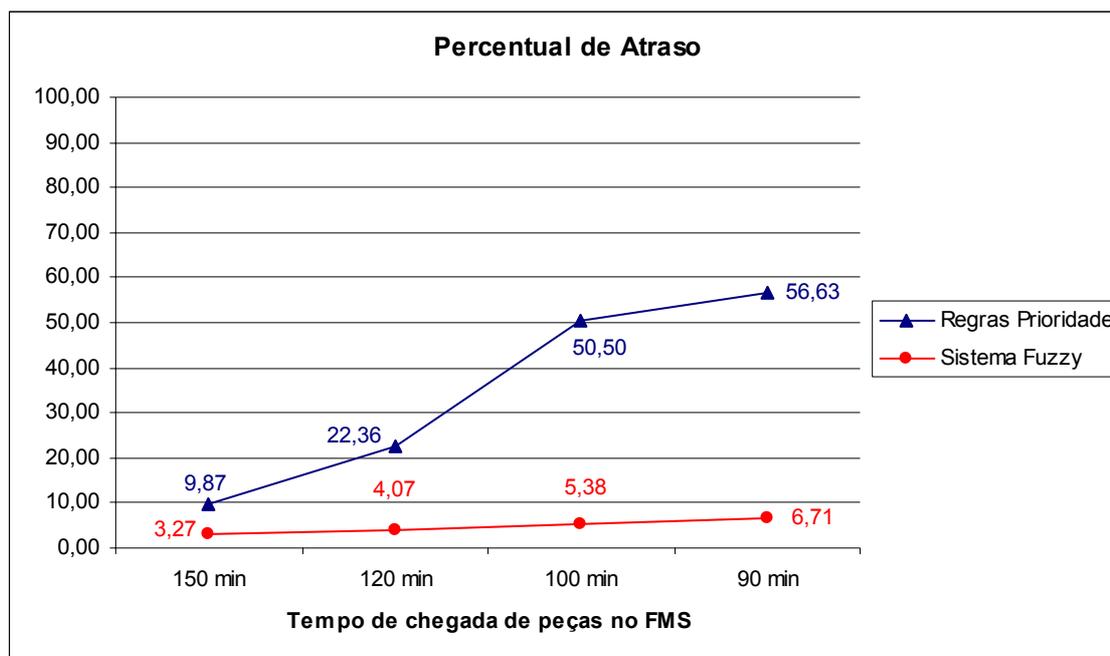


Figura 6.7 – Gráfico dos resultados obtidos para a medida de desempenho “Percentual de Atraso”.

- **Medida de desempenho “Tempo Médio de Atraso”**

Os resultados desta medida de desempenho obtidos nas simulações realizadas para cada procedimento de programação são apresentados na tabela 6.14, juntamente com a aplicação do “teste t ”.

Tabela 6.14 – Comparação dos procedimentos de programação em relação à medida de desempenho “Tempo Médio de Atraso”.

Medida de desempenho "tempo médio de atraso" (minutos).				
Intervalo de tempo de chegada Peças	PROCEDIMENTO DE PROGRAMAÇÃO		Teste $t = 1,96$	
	Regras Prioridade	Lógica Fuzzy	t calculado	Conclusão
150 min	-5,49	-0,62	34,28	Médias diferentes
120 min	-37,29	-0,87	16,07	Médias diferentes
100 min	-152,10	-1,37	26,45	Médias diferentes
90 min	-158,29	-1,99	23,42	Médias diferentes

Pode-se verificar através do “teste t ” que o desempenho dos procedimentos de programação quanto à medida “tempo médio de atraso” são significativamente diferentes, portanto, pode-se concluir que o procedimento de

programação *on-line* baseado em lógica *fuzzy* além de ter entregue o menor número de peças com atraso, alcançou também, menor tempo médio de atraso de peças do que o procedimento baseado em combinação de regras de prioridade. Dessa forma, o procedimento proposto obteve melhor desempenho quanto ao atendimento desta medida, que também está relacionada com o objetivo de produção confiabilidade, conforme pode ser visto no gráfico comparativo apresentado na figura 6.8.

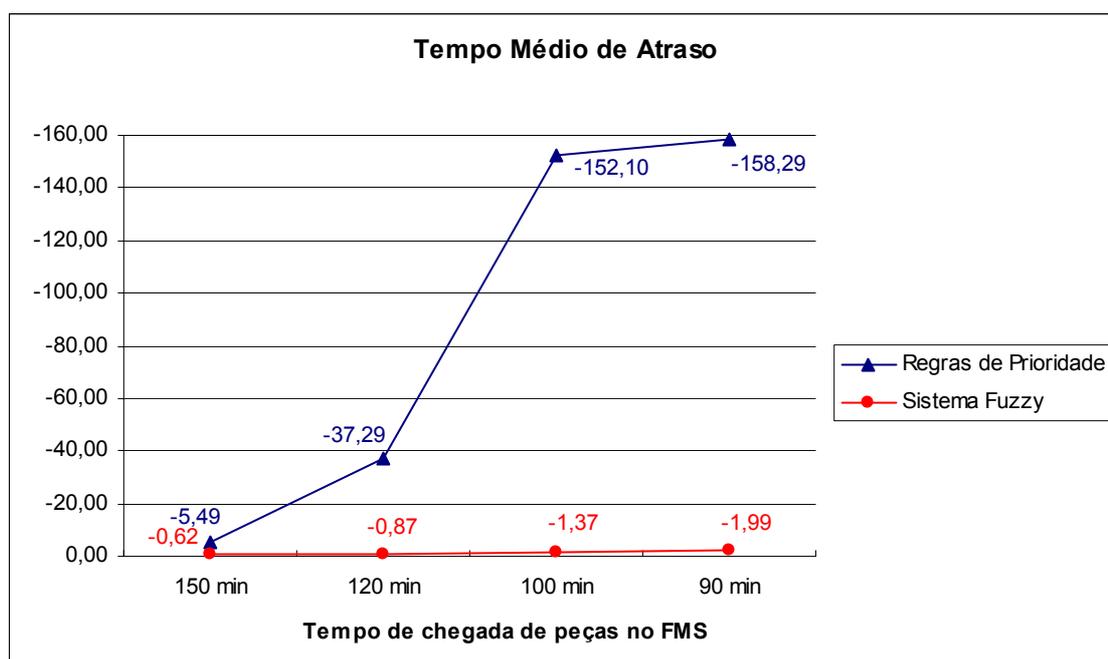


Figura 6.8 – Gráfico dos resultados obtidos para a medida de desempenho “Tempo Médio de Atraso”.

- **Medida de desempenho “Tempo Médio de Fluxo”**

Os resultados desta medida de desempenho obtidos nas simulações realizadas com os diferentes intervalos de tempo de chegada para cada procedimento de programação são apresentados na tabela 6.15, juntamente com a aplicação do “teste *t*”.

Verifica-se por meio do “teste *t*” que o desempenho dos procedimentos de programação quanto à medida “tempo médio de fluxo” são significativamente diferentes, portanto, pode-se concluir que o procedimento de programação *on-line* baseado em lógica *fuzzy* obteve menor tempo médio de fluxo, para a fabricação das peças, em relação ao procedimento baseado em combinação de regras de prioridade. Logo, o procedimento proposto obteve melhor desempenho quanto ao atendimento do

objetivo de produção rapidez, conforme pode ser visto no gráfico comparativo apresentado na figura 6.9.

Tabela 6.15 – Comparação dos procedimentos de programação em relação à medida de desempenho “Tempo Médio de Fluxo”.

Medida de desempenho "tempo médio de fluxo" (minutos).				
Intervalo de tempo de chegada Peças	PROCEDIMENTO DE PROGRAMAÇÃO		Teste $t = 1,96$	
	Regras Prioridade	Lógica Fuzzy	t calculado	Conclusão
150 min	117,97	92,29	90,37	Médias diferentes
120 min	171,60	96,01	25,75	Médias diferentes
100 min	327,21	101,27	32,49	Médias diferentes
90 min	341,74	105,93	23,42	Médias diferentes

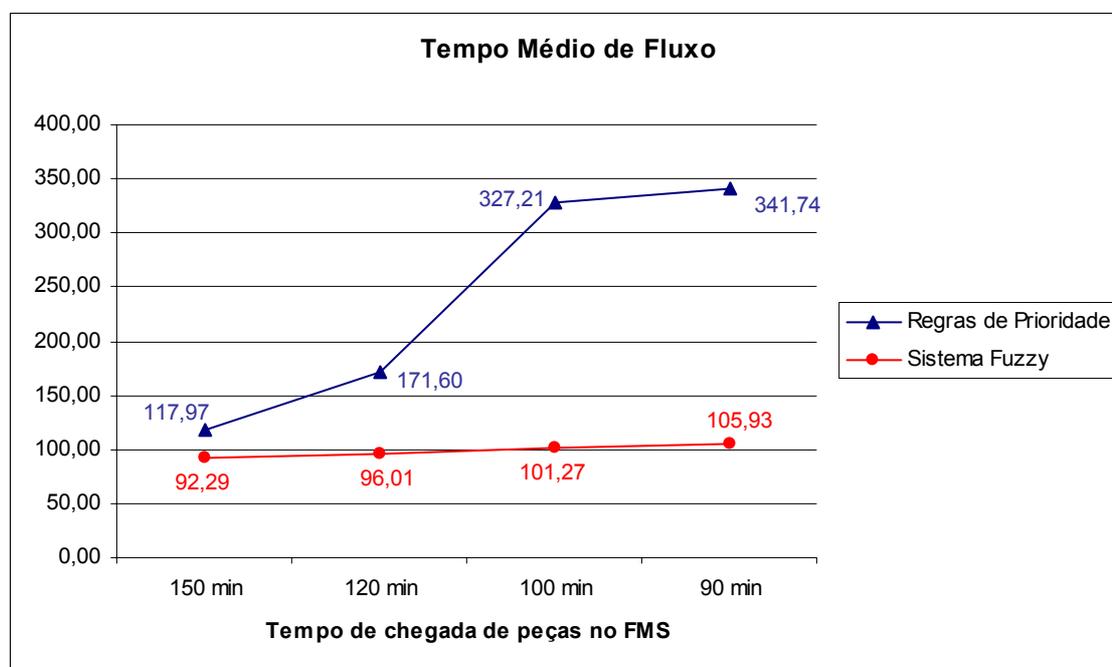


Figura 6.9 – Gráfico dos resultados obtidos para a medida de desempenho “Tempo Médio de Fluxo”.

- **Medida de desempenho “Estoque de Peças em Processo”**

São apresentados na tabela 6.16 os resultados obtidos para esta medida de desempenho por meio das simulações realizadas com cada procedimento de programação. Nesta tabela são apresentados também, os resultados da aplicação do “teste t ”, onde se verificou que o desempenho dos procedimentos é diferente, e que portanto, o procedimento de programação baseado em lógica *fuzzy* obteve melhor

desempenho em relação a esta medida de desempenho, como pode ser visto na figura 6.10, e contribui com o atendimento do objetivo de produção custo.

Tabela 6.16 – Comparação dos procedimentos de programação em relação à medida de desempenho “Estoque de Peças em Processo - WIP”.

Medida de desempenho "estoque de peças em processo - WIP".				
Intervalo de tempo de chegada Peças	PROCEDIMENTO DE PROGRAMAÇÃO		Teste $t = 1,96$	
	Regras Prioridade	Lógica Fuzzy	t calculado	Conclusão
150 min	4,43	2,93	85,31	Médias diferentes
120 min	10,26	3,80	10,62	Médias diferentes
100 min	31,66	4,76	86,89	Médias diferentes
90 min	33,86	5,51	83,48	Médias diferentes

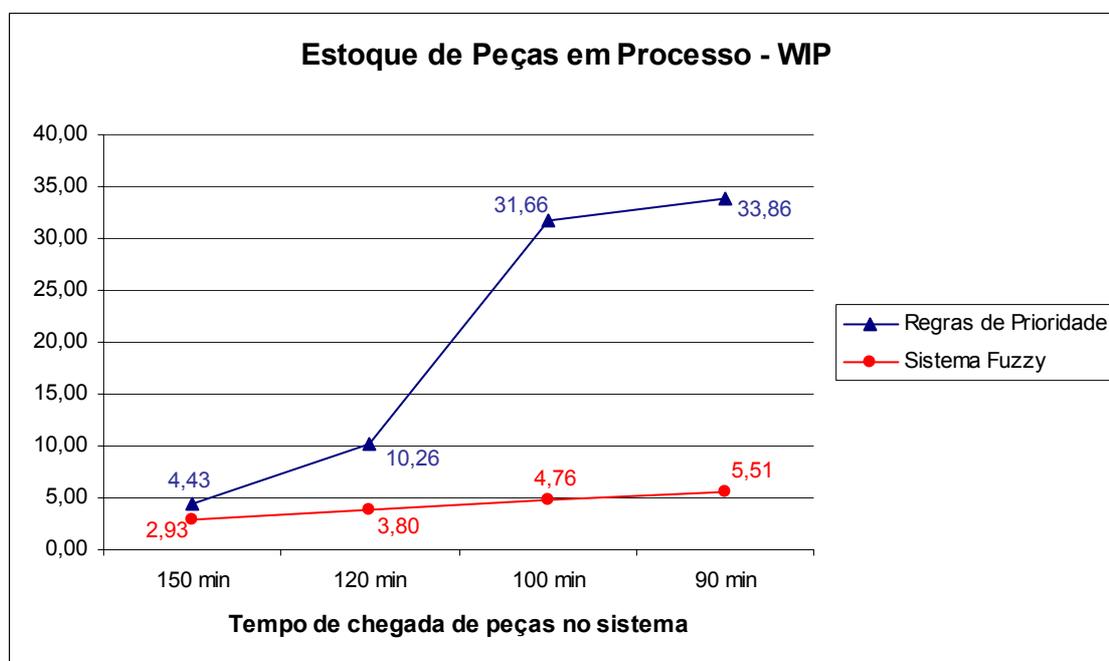


Figura 6.10 – Gráfico dos resultados obtidos para a medida de desempenho “Estoque de Peças em Processo - WIP”.

6.4. Considerações

No experimento em que foi comparado o procedimento de programação proposto com o procedimento de programação de Tang *et al* (1993), foi verificado que em muitos casos, quando a demanda de peças (quantidade de peças que entrou no sistema) foi maior, ocorreu o travamento do modelo de FMS, quando este estava sendo

programado pelo procedimento de programação baseado em regras de prioridade. Este fato não ocorreu nas simulações que utilizavam o procedimento baseado em lógica *fuzzy*, pois o MSF, utilizado no ponto de decisão “seleção de AGV”, avalia o espaço disponível dos *buffers* de saída das máquinas em uma de suas variáveis de entrada, não permitindo dessa forma que a máquina trave e conseqüentemente trave todo o sistema. O MSF utilizado neste ponto de decisão não apresentou nenhuma contribuição direta nos resultados das medidas de desempenho, conforme foi verificado no experimento fatorial, mas foi o principal responsável por não deixar o modelo de FMS travar.

7. Conclusões

Este trabalho propôs um procedimento de programação *on-line* baseado em lógica *fuzzy* para sistemas flexíveis de manufatura (FMS), com o objetivo de realizar a programação simultânea das operações de transporte e de processamento das peças nas máquinas em função do estado corrente do FMS, de forma a atender vários objetivos de produção simultaneamente. Este procedimento foi desenvolvido e aplicado a um modelo de FMS típico construído numa ferramenta de simulação, que permitiu a construção de vários cenários para a análise do procedimento por meio de simulações realizadas neste modelo.

A análise do procedimento foi realizada por meio de dois projetos de experimentos estatísticos em que foram avaliadas quatro medidas de desempenho: *percentual de atraso*, *tempo médio de atraso*, *tempo médio de fluxo* e *estoque de peças em processo* (WIP), as quais estão relacionadas com os objetivos de produção *Confiabilidade*, *Rapidez* e *Custo*. Com base na análise realizada nos projetos de experimentos, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

- Os resultados das simulações realizadas mostraram que o procedimento de programação baseado em lógica *fuzzy* é uma abordagem efetiva e de grande potencial de aplicação para a programação *on-line* de FMS. Comparado com o procedimento baseado na regra de prioridade que segue a lógica da regra SPT e com um procedimento baseado na combinação de várias regras de prioridade, para as simulações realizadas e com base nos testes estatísticos aplicados, o procedimento proposto foi superior nas medidas de desempenho utilizadas, e portanto, no atendimento dos objetivos de produção relacionados.
- A tomada de decisão baseada nos modelos de sistemas *fuzzy* (MSF), mostrou-se capaz de priorizar as operações de transporte e de processamento de peças de modo a atender a várias medidas de desempenho, realizando a programação simultânea de máquinas e sistema de transporte.
- A condição de entrada aleatória de peça no FMS permitiu a avaliação do procedimento quanto sua reação em relação à variação da demanda, na qual pôde ser

verificado que o procedimento realizou uma programação eficiente das operações do FMS, gerando pouca variação nas medidas de desempenho, mesmo quando a demanda aumentava. Apesar de não ter sido simulado, a quebra eventual de uma máquina seria assimilada pelo procedimento pelo fato da programação ser *on-line* e da possibilidade de se obter seqüências alternativas de operações em outras máquinas.

- O procedimento mostrou-se eficiente na programação do sistema de transporte, não permitindo que ocorresse o travamento do FMS e contribuindo, assim, indiretamente com o atendimento das medidas de desempenho.
- A alteração das bases de regras *fuzzy* e das funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* pode ser realizada por um especialista de programação de produção, permitindo assim, a realização de ajustes nas regras e nas funções para obter programas cada vez mais eficientes para as mais variadas condições de operação do FMS.
- O tempo computacional para realização das simulações é muito pequeno, na ordem de alguns segundos. Vale ressaltar que esse tempo é gasto para realizar a programação de todas as peças em um ciclo de produção, e que na realidade, o procedimento propõe a programação *on-line* e não a simulação. Portanto, o tempo de processamento durante a programação *on-line* é centena de vezes inferior ao tempo gasto na simulação.

A partir dos resultados alcançados neste trabalho, faz-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- A partir da base de regras obtidas por especialistas, estudar técnicas baseadas em aprendizado de máquina que possam ser utilizadas na obtenção de novas bases de regras de forma que o procedimento proposto possa fornecer programas mais eficientes.
- Estudar a utilização do procedimento proposto em um chão de fábrica tipo job shop, com o suporte de um sistema de coleta de dados, de modo a realizar a programação *on-line*.

Referências Bibliográficas

[Balic e Pahole 2002]

Balic, J. e Pahole, I. *Optimisation of intelligent FMS using the data flow matrix method*. Materials Processing Technology, vol. 5794, pp. 1-8,2002.

[Banks 1998]

Banks, J. Handbook of Simulation, John Wiley & Sons, Inc.,1998.

[Banks *et al.* 1996]

Banks, J., Carson, J. S. e Nelson, B. L. Discrete-Event System Simulation, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ,1996.

[Chan 1999]

Chan, F. T. S. *Evaluations of operational control rules in scheduling a flexible manufacturing system*. Robotics and Computer integrated Manufacturing, vol. 15, pp. 121-132,1999.

[Chan *et al.* 2003]

Chan, F. T. S., Chan, H. K., Lau, H. C. W. e Ip, R. W. L. *Analysis of dynamic dispatching rules for a flexible manufacturing system*. Materials Processing Technology, vol. 6648, pp. 1-7,2003.

[Chiu e Yih 1995]

Chiu, C. e Yih, Y. *A learning-based methodology for dynamic scheduling in distributed manufacturing systems*. International Journal of Production Research, vol. 33(11), pp. 3217-3232,1995.

[Conway *et al.* 1967]

Conway, R. W., Maxwell, W. L. e Miller, L. W. Theory of Scheduling, Addison Wesley,1967.

[Custódio *et al.* 1994]

Custódio, L. M. M., Sentieiro, J. J. e Bispo, C. F. G. *Production Planning and Scheduling using a fuzzy decision system*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 10(2), pp. 160-168,1994.

[Domingos e Politano 2003]

Domingos, J. C. e Politano, P. R. *On-Line Scheduling for Flexible Manufacturing Systems Based on Fuzzy Logic*. IEEE Trans System, Man, Cybernet, pp. 6p,2003.

[Engell *et al.* 1994]

Engell, S., Herrmann, F. e Moser, F. H. *Priority rules and predictive control algorithms for on-line scheduling of FMS*. Computer Control of Flexible Manufacturing Systems, Chapman & Hall, pp. 75-107,1994.

[Fernandes 1991]

Fernandes, F. C. *Concepção de um Sistema de Controle de Produção para a Manufatura Celular*. Tese (doutorado) - Universidade de São Carlos- USP-EESC,1991.

[Fine 1989]

Fine, C. H. *Strategic Manufacturing - dynamic new directions for the 1990's*. Dow-Jones Irwin, Homewood, Illinois, USA, pp. 257-274,1989.

[Freitas F. 2001]

Freitas F., P. J. *Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas - com Aplicações em Arena*, Visual Books,2001.

[Gamila e Motavalli 2003]

Gamila, M. A. e Motavalli, S. *A modeling technique for loading and scheduling problems in FMS*. Robotics and Computer integrated Manufacturing, vol. 19, pp. 45-54,2003.

[Gomide *et al.* 1993]

Gomide, F., Gudwin, R. e Andrade Netto, M. L. *Controle de processos por lógica nebulosa*. 5. Congresso Nacional de Automação Industrial, pp. 65-85,1993.

[Groover 1987]

Groover, M. P. *Automation, Production System, and Computer Integrated Manufacturing*, Prentice Hall Inc., New Jersey,1987.

[Groover 1996]

Groover, M. P. *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems*, Prentice Hall Inc., New Jersey,1996.

[Groover e Zimmers Jr 1984]

Groover, M. P. e Zimmers Jr, E. W. *CAD/CAM:Computer-Aided Design and Manufacturing.*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs (N. J.),1984.

[Hansmann e Hoeck 1997]

Hansmann, K. W. e Hoeck, M. *Production control of a flexible manufacturing system in a job shop environment*. International Transactions in Operational Research, vol. 4(5/6), pp. 341-351,1997.

[Holter *et al.* 1995]

Holter, T., Yao, X., Rabelo, L. C., Jones, A. e Yih, Y. *Integration of Neural Networks and Genetic Algorithms for an Intelligent Manufacturing Controller*. Computer ind. Engng, vol. 29(1-4), pp. 211-215,1995.

[Kamath 1994]

Kamath, M. *Recent developments in modeling and performance analysis tools for manufacturing systems*. Computer Control of Flexible Manufacturing Systems, Chapman & Hall, pp. 231-263,1994.

[Kazerooni *et al.* 1997]

Kazerooni, A., Chan, F. T. S. e Abhary, K. *A fuzzy integrated decision-making support system for scheduling of FMS using simulation*. Computer Integrated Manufacturing System, vol. 10(1), pp. 27-34,1997.

[Kim *et al.* 2001]

Kim, Y., Lee, D. e Yoon, C. *Two-stage heuristic algorithms for part input sequencing in flexible manufacturing systems*. European Journal of Operational Research, vol. 133, pp. 624-634,2001.

[Klir e Yuan 1995]

Klir, G. J. e Yuan, B. *Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications*, Prentice Hall, New Jersey,1995.

[Lima 1993]

Lima, P. C. *Um sistema de programação finita baseado em lógica nebulosa*. Tese (doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas,1993.

[Lindsay *et al.* 2000]

Lindsay, C., Bright, G. e Hippner, M. *Advanced material handling system for computer integrated manufacturing*. Robotics and Computer integrated Manufacturing, vol. 16, pp. 437-441,2000.

[Mamdani 1977]

Mamdani, E. H. *Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguist synthesis*. IEEE Transactions on Computers, vol. 26(12), pp. 1182-1191,1977.

[Meziane *et al.* 2000]

Meziane, F., Vadera, S., Kobbacy, K. e Proudlove, N. *Intelligent systems in manufacturing: current developments and future projects*. Integrated Manufacturing System, pp. 218-238,2000.

[Montgomery 1976]

Montgomery, D. C. *Design and analysis of experiments*, New York : Wiley,1976.

[Özbayrak e Bell 2003]

Özbayrak, M. e Bell, R. *A knowledge-based decision support system for the management of parts and tools in FMS*. Decision Support System, vol. 35, pp. 487-515,2003.

[Pedrycz 1989]

Pedrycz, W. *Fuzzy Control and Fuzzy Systems*, Wiley : New York,1989.

[Pedrycz 1993]

Pedrycz, W. *Fuzzy control and fuzzy systems*, Research Studies Press, second extend edition,1993.

[Pedrycz e Gomide 1998]

Pedrycz, W. e Gomide, F. *An introduction to fuzzysets: analysis and desing*. MIT Press, USA, pp. 465p,1998.

[Persi *et al.* 1999]

Persi, P., Ukovich, W., Pesenti, R. e Nicolich, M. *A hierarchic approach to production planning and scheduling of a flexible manufacturing system*. Robotics and Computer integrated Manufacturing, vol. 15, pp. 373-385,1999.

[Pinedo 1995]

Pinedo, M. *Scheduling - Theory, Algorithms, and Systems*, Prentice Hall Inc., New Jersey,1995.

[Politano 1996]

- Politano, P. R. *Procedimento de Programação Reativo On Line de FMS*. Tese (doutorado) - Universidade de São Paulo - USP-EESC, pp. 140,1996.
- [Ro e Kim 1990]
Ro, I. e Kim, J. *Multi-criteria operational control rules in flexible manufacturing systems (FMSs)*. International Journal of Production Economics, vol. 28(1), pp. 47-63,1990.
- [Rodammer e White 1988]
Rodammer, F. A. e White, K. P. *A recent survey of production scheduling*. IEEE Trans System, Man, Cybernet, vol. 18, pp. 841-51,1988.
- [Saaty 1990]
Saaty, T. L. *How to make a decision: the analytic hierarchy process*. European Journal of Operational Research, vol. 69, pp. 200-209,1990.
- [Sabuncuoglu e Bayiz 2000]
Sabuncuoglu, I. e Bayiz, M. *Analysis of reactive scheduling problems in a job shop environment*. European Journal of Operational Research, vol. 126, pp. 567-586,2000.
- [Sabuncuoglu e Hommertzhaim 1992]
Sabuncuoglu, I. e Hommertzhaim, D. L. *Dynamic dispatching algorithm goes scheduling machines and automated guide vehicles in the flexible manufacturing system*. International Journal of Production Research, vol. 30(5), pp. 1059-1079,1992.
- [Sarin e Chen 1987]
Sarin, S. C. e Chen, C. S. *The machine loading and tool allocation problem in flexible manufacturing system*. Int J. Prod. Res., vol. 25(7), pp. 1081-94,1987.
- [Scarpelli et al. 1996]
Scarpelli, H., Gomide, F. e Yager, R. *A Reasoning Algorithm for High-Level Fuzzy Petri Nets*. IEEE Trans. on Fuzzy Systems, vol. 4, pp. 282-293,1996.
- [Scheffé 1959]
Scheffé, H. *The analysis of variance*, New York : Wiley,1959.
- [Sipper e Bulfin Jr. 1998]
Sipper, D. e Bulfin Jr., R. L. *Production: Planning, Control, and Integration*, The McGraw-Hill Companies, Inc.,1998.
- [Slack et al. 2002]
Slack, N., Chambers, S. e Johnston, R. *Administração da Produção*, Editora Atlas S.A.,2002.
- [Sugeno e Kang 1986]
Sugeno, M. e Kang, G. T. *Fuzzy modeling and control of multilayer incinerator*. Fuzzy Sets and Systems, vol. 18, pp. 329-346,1986.
- [Sun e Xue 2001]
Sun, J. e Xue, D. *A dynamic reactive scheduling mechanism for responding to changes of production orders and manufacturing resources*. Computer in Industry, vol. 46, pp. 189-207,2001.
- [Takagi e Sugeno 1983]

Takagi, T. e Sugeno, M. *Derivation of fuzzy control rules from human operators actions*. Proceedings of the IFAC Symposium on Fuzzy Information, Marseille, pp. 55-60,1983.

[Tang *et al.* 1993]

Tang, L., Yih, Y. e Liu, C. *A study on decision rule of a scheduling model in a FMS*. Computer in Industry, vol. 22, pp. 1-13,1993.

[Tong 1979]

Tong, R. M. *The construction and evaluation of fuzzy models*. Advances in Fuzzy Set Theory and Applications, pp. 559-576,1979.

[Tubino 2000]

Tubino, D. F. *Manual de Planejamento e Controle da Produção*, Editora Atlas S.A,2000.

[Vieira 1999]

Vieira, S. *Estatística Experimental*, Editora Atlas S.A,1999.

[Yager e Filev 1994]

Yager, R. e Filev, D. *Essentials of Fuzzy Modeling and Control*. John Wiley & Sons, Inc.,1994.

[Zadeh 1965]

Zadeh, L. A. *Fuzzy sets*. Information and Control, vol. 8, pp. 338-353,1965.

[Zadeh 1973]

Zadeh, L. A. *Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC, vol. 3, pp. 28-44,1973.

[Zadeh 1979]

Zadeh, L. A. *A theory of approximate reasoning*. In; Hayes, J. D. Michie and L. L. Mikulich, eds. Machine Intelligence, vol. 9 Halsted Press, New York, pp. 149-194,1979.

Apêndice – I

Resultado das simulações do projeto de experimento fatorial para a medida de desempenho “Percentual de Atraso”.

Repetição	TRATAMENTOS							
	A0B0C0	A1B0C0	A0B1C0	A0B0C1	A1B1C0	A1B0C1	A0B1C1	A1B1C1
1	20,3	20,65	14,92	17,98	12,86	18,17	5,57	5,42
2	19,96	19,82	15,08	19,12	15,09	18,52	5,92	5
3	18,72	18,84	15,63	19,77	14,9	19,98	6,39	5,44
4	21,95	22,38	15,12	19,05	14,64	19,12	4,8	6,21
5	18,32	18,02	15,68	19	14,23	19,21	5,32	5,22
6	21,3	21,57	14,9	19,49	13,92	20,04	5,84	5,61
7	19,63	19,84	15,46	20,52	14,4	20,94	5,87	4,81
8	21,72	21,63	15,32	19,77	14,32	19,39	5,65	5,59
9	18,85	19,05	13,45	17,07	13,99	17,16	5,09	6,25
10	17,88	17,83	15,09	19,86	13,39	19,78	6,46	5,01
11	14,85	15,07	14,06	17,95	14,35	18,3	5,6	4,92
12	20,67	20,62	12,82	15,65	13,49	16,32	4,89	5,7
13	17,78	17,59	15,94	21,53	15,39	21,32	5,22	5,34
14	18,5	18,36	15,35	17,53	15,06	17,95	6,14	5,86
15	18,95	19,07	14,07	17,72	13,76	17,28	4,97	4,47
16	21,03	20,9	14,32	19,51	14,8	18,98	5,59	5,79
17	19,42	19,15	15,25	20,99	14	20,9	6,24	5,38
18	19	19,21	13,21	14,99	15,1	14,75	5,44	4,61
19	17,71	17,81	14,6	18,34	14,68	18,45	5,04	4,86
20	19,52	19,71	13,82	18,33	14,5	17,88	5,4	4,85
21	20,27	20,08	13,87	17,49	14,47	17,45	5,59	5,11
22	19,38	19,02	13,99	17,82	14,61	17,49	5,22	5,6
23	18,92	18,87	13,89	18,77	14,62	18,91	5,64	6
24	22,23	22,39	15,38	20,03	14,32	19,75	5,7	5,77
25	20,54	20,43	14,9	18,66	13,97	18,59	5,75	5,79
26	20,56	20,47	15,26	18,81	13,33	18,6	5,25	5,12
27	20,6	20,69	14,3	19,05	13,75	18,88	5,93	5,75
28	20,25	20,67	14,57	17,88	15,33	17,46	5,64	5,81
29	21,67	21,72	15,92	21,59	13,5	21,67	6,13	4,86
30	19,37	19,18	13,85	16,32	15,24	16,58	4,88	5,54
31	18,9	19,3	12,32	14,89	14,41	14,87	4,6	4,86
32	17,67	17,88	14,23	17,03	14,1	17,01	4,98	5,19
33	19,39	19,67	15,74	20,3	14,34	20,56	5,65	5,91
34	18,9	18,57	13,67	15,97	13,32	15,97	4,78	5,11
35	17,88	17,72	15,74	21,32	13,77	21,3	6,09	5,15
36	20,39	20,19	15,92	21,13	13,93	20,94	5,26	5,38
37	18,05	17,79	14,76	18,79	14,98	18,24	5,56	5,08
38	19,74	19,77	14,1	18,59	13,89	18,29	5,66	4,99
39	18,24	18,28	13,74	17,55	14,14	17,32	5,34	5,18
40	17,69	17,52	15,12	19,09	15,51	19,15	5,6	5,58
41	20,18	19,83	14,77	17,91	13,4	17,75	6,2	5,31
42	20,06	20,05	15,85	21,44	14,58	21,27	5,81	5,41
43	20,46	20,52	14,33	17,8	14,19	17,98	5,77	5,84
44	20,59	20,6	14,01	17,12	14,76	17,05	4,93	5,78
45	18,4	18,24	15,53	20,41	14,67	21,04	6,44	5,25
46	19,25	18,95	14,84	18,34	15,6	18,48	6,05	5,5
47	20,41	20,21	14,68	18,54	13,64	18,59	5,72	5,11

48	18,47	18,11	14,51	18,87	14,42	18,38	5,62	4,78
49	18,46	18,81	13,16	16,69	15,88	16,29	5,24	5,13
50	20,93	21,16	14,47	17,93	13,5	17,86	5,26	5,35
51	19,85	19,56	12,8	16,65	15,11	16,37	5,23	5,67
52	21,31	21,26	14,64	18,35	14,63	18,21	5,4	6
53	20,43	20,08	13,95	17,87	12,82	17,25	5,64	5,74
54	20,29	20,57	14,74	17,87	14,7	18,05	5,31	5,28
55	18,95	18,44	13,68	18	13,02	18,48	5,62	5,5
56	19,71	19,99	14,75	20,16	13,65	20,52	5,76	5,23
57	17,65	17,98	14,49	17,86	14,86	18,29	5,16	5,23
58	21,43	21,22	14,08	17,79	13,27	17,65	5,5	5,01
59	19,65	19,55	15,32	19,83	13,39	19,54	5,61	5,5
60	19,25	19	13,65	16,3	14,17	16,27	4,65	4,93
61	20,2	20,23	13,72	18,18	14,44	17,73	5,03	5,59
62	18,56	18,13	14,11	16,95	14,37	16,85	4,94	5,68
63	18,4	18,72	15,16	19,57	13,84	19,75	5,2	5
64	18,25	17,92	15,51	19,09	14,95	19,09	5,29	5,53
65	19,62	19,85	14,63	21,78	14,97	21,95	6,16	5,95
66	19,14	19,14	14,72	17,21	14,49	17,49	5,44	6,21
67	18,61	18,31	14,03	18,99	12,91	18,76	5,72	5,22
68	19,51	19,05	15,14	20,85	14,33	20,41	6,29	5,57
69	19,41	18,84	14,36	16,64	14,39	16,85	5,38	4,82
70	21,16	21,02	15,24	18,75	12,39	18,78	5,97	5,91
71	17,16	17,13	16,19	20,27	14,44	20,04	6,02	5,51
72	18,05	18,22	15,12	19,67	14,9	19,7	6,3	4,79
73	21,19	21,56	14,21	17,15	14,38	16,97	4,85	6,13
74	19,82	20	14,31	18,99	13,8	18,88	5,8	5,5
75	18,37	18,44	15,89	18,3	12,89	18,42	5,63	4,88
76	21,45	21,39	14,77	19,88	14,81	19,84	5,77	6,1
77	20,15	19,96	14,63	19,4	14,46	19,43	5,58	5,57
78	17,84	17,86	14,43	18,85	13,61	18,65	5,67	4,79
79	18,03	17,94	13,73	18,35	13,83	18,04	5,28	5,06
80	18,24	17,93	14,45	20,47	13,96	20,78	5,46	5,01
81	19,29	19,39	12,45	15,33	14,27	14,64	4,46	6
82	18,98	19,02	13,71	17,1	12,85	17,18	5,16	5,18
83	20,91	21,2	13,79	16,91	13,62	17,05	5,64	5,62
84	21,64	21,59	14,88	20,82	13,7	20,64	5,3	6,17
85	20,46	23,48	14,07	17,36	15,4	17,45	5,26	6,44
86	16,86	16,57	13,84	17,77	14,96	17,92	5,18	5,17
87	20,82	20,55	14,46	18,21	14,84	18,57	5,66	5,81
88	19,65	19,62	14,21	17,61	14,93	17,28	4,96	6,13
89	19,21	19,12	13,96	18,14	12,29	18,53	5,25	5,66
90	18,53	18,78	15,57	20,94	14,24	20,9	5,94	5,16
91	19,25	19,48	14,81	18,91	14,28	19,05	5,85	5,55
92	22,61	23	13,54	18,5	13,92	18,5	5,28	6,56
93	19,56	19,38	13,08	15,78	14,88	15,55	4,87	5,57
94	19,67	19,93	15,13	19,14	14,66	19,21	5,4	5,65
95	20,64	20,9	14,95	20,65	14,73	19,92	5,76	5,43
96	19,85	19,83	15,03	18,99	14,36	19,31	6,18	5,33
97	20,7	20,42	13,29	16,88	13,37	16,72	5,22	5,17
98	20,77	20,53	16,08	20,72	13,71	20,14	5,87	5,84
99	19,66	19,75	14,63	20,19	14,01	19,7	5,37	5,77
100	18,47	18,49	12,9	17,8	14,82	17,87	5,04	5,86

Resultado das simulações do projeto de experimento fatorial para a medida de desempenho “Tempo Médio de Atraso”.

Repetição	TRATAMENTOS							
	A0B0C0	A1B0C0	A0B1C0	A0B0C1	A1B1C0	A1B0C1	A0B1C1	A1B1C1
1	28,77	28,55	6,15	15,82	5,43	16,05	1,33	1,32
2	21,23	21,3	7,09	19,51	6,82	19,1	1,82	1,13
3	20,58	20,45	6,71	20,85	7,03	21,48	1,88	1,29
4	33,94	33,35	6,72	19,91	6,95	20,02	1,15	1,6
5	18,41	17,97	7,16	19,1	6,3	19,32	1,34	1,32
6	31,12	30,62	6,72	21,18	6,18	21,48	1,73	1,46
7	17,38	17,62	6,97	22,33	6,53	22,1	1,43	1,08
8	31,16	31,44	7,65	21,38	6,66	21,27	1,56	1,24
9	21,1	21,13	5,68	16,56	6,14	16,4	1,13	1,72
10	18,52	18,47	6,56	20,51	5,46	19,95	1,71	1,11
11	13,8	13,78	6,24	18,52	6,55	18,28	1,49	1,1
12	22,78	23,35	6,15	15,42	6,16	15,77	1,35	1,46
13	17,06	17,24	7,18	26,22	6,73	25,96	1,39	1,37
14	16,99	17,13	7,15	16,59	6,06	16,63	1,62	1,47
15	20,49	20,47	6,13	18,27	5,63	18,38	1,27	1,12
16	26,6	26,83	6,51	22,76	6,79	22,82	1,39	1,51
17	25,01	24,97	7,11	27,89	6,57	27,72	1,77	1,35
18	17,15	17,33	5,79	11,5	6,94	11,03	1,34	1,07
19	16,93	16,87	6,3	17,3	7,06	17,55	1,46	1,12
20	19,21	19,05	6,21	16,51	6,34	16,32	1,35	1,29
21	21,39	21,16	6,37	16,27	6,41	15,92	1,52	1,12
22	18,26	18,27	6,23	16,88	6,53	17,04	1,26	1,51
23	20,53	20,06	6,71	21,67	5,84	21,86	1,5	1,64
24	28,45	28,36	7,43	23,17	6,09	22,75	1,67	1,46
25	26,89	26,79	6,94	18,35	6,12	18,59	1,39	1,54
26	28,53	28,97	6,48	19,5	5,92	19,48	1,48	1,41
27	21,03	20,87	6,53	18,85	5,96	18,54	1,64	1,5
28	24,52	24,91	6,39	15,89	7,05	15,77	1,46	1,44
29	21,19	20,8	6,73	25,49	6,19	25,57	1,81	1,37
30	22,16	22,45	5,77	15,12	7,3	14,95	1,28	1,43
31	17,33	17,64	4,97	10,3	6,34	10,22	1,02	1,08
32	14,15	14,15	6,26	14,21	6,33	14,67	1,35	1,37
33	19,35	19,43	7,26	24,1	6,17	24,38	1,67	1,46
34	17,94	17,63	5,61	12,66	5,78	12,54	1,12	1,24
35	17,54	17,39	7,25	22,75	5,73	22,52	1,93	1,14
36	23,66	22,9	6,88	22,66	6,24	22,5	1,44	1,6
37	16,65	16,75	6,57	18,81	6,51	18,72	1,36	1,42
38	22,16	22,05	5,93	21,2	5,97	20,91	1,46	1,18
39	18,84	19,12	5,96	14,37	6,12	14,74	1,27	1,42
40	14,19	14,09	6,45	19,4	6,66	19,12	1,41	1,38
41	21,48	21,72	6,9	17,76	5,82	17,47	1,76	1,3
42	20,44	20,54	7,28	24,82	5,99	25,07	1,45	1,47
43	23,94	24,2	6,45	15,63	5,92	15,94	1,43	1,49
44	24,71	24,6	6,23	13,27	6,5	13,32	1,33	1,5
45	19,22	18,99	6,91	23,41	7,24	23,13	1,88	1,23
46	20,46	20,42	6,86	17,39	7,08	16,99	1,61	1,38
47	24,89	24,54	6,67	19,09	6,05	19,17	1,46	1,31
48	19,55	19,05	6,65	18,81	6,25	18,88	1,55	1,06
49	17,56	17,7	5,63	15,48	7,64	15,28	1,19	1,25
50	25,03	25,01	6,57	15,77	5,46	15,75	1,28	1,36
51	24,04	23,73	5,37	16,89	6,9	16,66	1,29	1,62
52	30,02	30,75	6,3	18,3	6,39	18,28	1,43	1,46

53	24,82	24,53	6	15,45	5,48	15,05	1,47	1,49
54	21,4	21,33	6,47	16,98	6,48	16,75	1,41	1,33
55	19,18	19,18	6,04	18,67	5,79	18,74	1,36	1,37
56	22,14	22,35	7,38	23,72	6,52	23,43	1,69	1,23
57	20,26	20,31	6,01	16,73	6,38	16,77	1,36	1,36
58	26,68	26,61	6,1	17,1	5,45	17,24	1,43	1,31
59	21,93	21,93	7,04	19,45	5,6	19,45	1,48	1,27
60	17,79	17,87	5,96	13,11	6,4	13,14	1,23	1,08
61	26,94	27,04	6,1	19,2	6,69	18,71	1,2	1,38
62	19,93	20,11	6,02	15,9	6,21	16,13	1,32	1,49
63	19,93	19,98	7,04	21,18	5,92	21,43	1,39	1,27
64	20,48	21,18	6,67	18,81	6,67	18,87	1,37	1,39
65	21,19	21,27	7,38	26,97	6,98	27,19	1,82	1,45
66	23,08	22,93	6,35	16	6,27	15,84	1,4	1,54
67	20,83	20,83	6,48	18,06	5,79	17,82	1,52	1,49
68	21,11	21,13	7,05	24,76	6,8	24,58	1,85	1,53
69	20,44	20,38	6,39	14,6	6,18	14,44	1,36	1,14
70	25,46	25,13	7,28	17,27	5,11	17,32	1,52	1,6
71	18,07	18,03	7,39	23,64	6,86	23,5	1,76	1,32
72	19,08	19,24	6,62	18,79	6,55	19,03	1,61	1,21
73	28,57	28,2	5,73	16,73	6,25	16,63	1,2	1,84
74	18,92	18,93	6,69	18,68	5,5	18,42	1,46	1,37
75	25,17	24,6	7,11	17,62	5,47	17,6	1,36	1,18
76	26,32	26,76	6,79	20,55	6,34	20,46	1,52	1,46
77	22,22	21,99	6,59	21,44	6,2	21,39	1,46	1,28
78	16,23	16,17	6,36	16,04	5,9	16,29	1,59	1,31
79	16,44	16,47	6,01	17,19	6,6	17,15	1,34	1,27
80	16,43	16,53	7,07	25,88	6,21	25,58	1,47	1,22
81	20,77	20,98	5,3	12,55	6,21	12,18	1,16	1,53
82	22,78	22,66	6,34	16,28	5,17	16,42	1,33	1,35
83	23,87	23,99	5,98	16,09	5,71	15,84	1,36	1,38
84	32,1	31,56	7,03	25,84	6,11	25,53	1,59	1,68
85	25,77	39,04	6,33	16,09	6,44	16,32	1,3	2,02
86	14,89	14,97	6,16	19,83	6,47	19,43	1,37	1,33
87	25,31	25,28	6,52	17,58	6,81	17,78	1,58	1,42
88	24,43	24,34	6,43	16,23	6,55	16,2	1,2	1,7
89	23,55	23,94	6,19	21,13	5,03	21,03	1,46	1,47
90	20,16	19,82	7,09	21,65	6,13	21,53	1,77	1,23
91	18,73	18,67	7	18,15	6,46	18,22	1,61	1,39
92	33,74	33,75	6,3	19,2	6,49	19,65	1,31	1,87
93	22,37	22,08	5,57	11,08	6,78	11,16	1,08	1,37
94	22,65	22,56	6,56	19,82	6,03	19,99	1,19	1,35
95	19,62	19,66	6,66	21,65	6,82	21,54	1,61	1,36
96	26,96	26,89	6,87	19,48	6,45	19,72	1,54	1,34
97	23,03	22,62	5,86	15,93	5,39	15,6	1,42	1,25
98	22,17	21,79	6,95	22,25	5,84	22,02	1,7	1,45
99	23,91	23,55	6,17	21,82	6,05	21,72	1,3	1,36
100	19,54	19,33	5,22	16,93	6,38	17,01	1,25	1,55

Resultado das simulações do projeto de experimento fatorial para a medida de desempenho “Tempo Médio de Fluxo”.

Repetição	TRATAMENTOS							
	A0B0C0	A1B0C0	A0B1C0	A0B0C1	A1B1C0	A1B0C1	A0B1C1	A1B1C1
1	158,5	158,4	130,6	139,61	126,15	139,84	100,19	101,57
2	150,83	150,84	132,44	144,56	132,46	143,48	102,38	100,53
3	149,43	149,68	133,29	146,86	132,57	148,54	102,82	101,57
4	166,31	165,88	133,07	146,16	131,38	146,49	101,16	102,53
5	144,83	144,52	134,24	145,92	129,58	146,02	101,72	100,15
6	163,38	162,91	132,88	147,3	130,87	147,78	102,2	102,56
7	146,77	147,17	133,75	149,88	130,15	149,63	102,14	100,06
8	163,31	163,29	134,06	148,45	131,28	148,01	101,43	102,47
9	149,36	149,75	129,14	139,95	129,4	139,78	99,35	102,49
10	146,25	146,31	132,78	145,78	128,32	145,29	102,33	100,09
11	136,41	136,64	132,48	143,51	133,07	143,35	100,89	99,19
12	152,1	152,74	129,58	137,52	130,36	137,98	100,67	101,08
13	141,91	142	135,21	155,17	133,83	155,49	101,55	100,29
14	144,58	144,46	131,55	139,71	130,96	139,82	100,73	101,04
15	150,42	150,42	131,26	143,14	129,63	142,89	100,62	101,03
16	156,78	157,12	132,19	148,69	132,17	148,39	101,07	102,53
17	153,77	153,86	132,11	154,49	131,65	154	101,84	101,34
18	145,67	146,05	127,8	131,49	132,25	130,94	99,85	99,71
19	145,16	145,19	130,39	140,75	132,75	141,17	100,24	101,14
20	148,13	148,1	130,62	139,52	130,95	138,99	101,56	100,4
21	151,53	151,21	131,8	139,87	130,7	139,75	101,67	100,57
22	146,42	146,37	131,34	141,63	131,11	141,46	100,3	101,13
23	147,63	147,36	131,4	146,53	131,12	146,79	101,16	101,75
24	162,98	163,06	134,09	150,07	131,08	149,54	102,26	102,64
25	158,15	157,71	132,6	143,65	130,19	144,35	100,8	102,08
26	159,07	159,75	131,41	143,86	128,66	143,71	100,36	101,39
27	150,75	150,87	131,92	144,47	130,63	144,26	101,28	101,42
28	155,18	155,81	130,33	138,18	134,41	137,98	100,83	102,03
29	153,03	152,26	133,8	155,32	132,04	155,2	103,27	101,04
30	151,81	151,88	129,77	138,14	133,02	137,86	100,59	101,29
31	144,84	145,35	127,8	130,56	131,9	130,65	99,21	100,94
32	141,45	141,54	130,53	137,17	131,2	137,73	101,03	101,04
33	149,98	150,46	135,85	152,05	131,7	152,15	102,74	102,07
34	145,89	145,37	127,81	132,23	129,93	132,09	98,76	100,23
35	144,43	144,25	134,89	151,96	129,2	151,99	103,07	100,56
36	153,45	152,8	132,17	149,29	130,39	149,19	101,14	101,78
37	143,91	143,7	132,8	143,97	133,2	143,67	101,91	101,28
38	151,92	151,9	129,33	144,71	128,36	144,07	100,73	100,99
39	145,71	146,3	129,93	137,27	131,4	137,55	101,08	100,24
40	139,94	139,7	131,77	145,5	133,03	145,21	101,38	100,43
41	151,49	151,6	131,77	142,51	130,63	142,39	103,07	101,49
42	151,45	151,84	133,48	151,91	131,09	152,3	102,69	101,36
43	154,59	154,67	129,93	139,48	129,45	139,53	100,31	101,42
44	155,47	155,42	130,98	136,05	130,92	136,56	100,9	101,91
45	146,93	147,04	132,46	149,87	131,07	149,65	102,62	101,32
46	148,57	148,67	131,1	142,12	134,39	141,78	101,2	100,97
47	155,56	155,26	132,11	143,8	130,22	143,9	101,37	101,55
48	147,09	146,41	132,66	144,72	130,95	144,88	100,74	99,93
49	145,39	145,63	129,87	138,37	133,95	138,24	99,56	100,56
50	157,49	157,31	131,12	140,4	128,31	140,09	100,22	103,25
51	153,28	152,96	127,96	138,99	133,09	138,73	99,74	101,69
52	159,87	160,72	130,72	142,09	133,39	142,69	101,12	101,95

53	154,59	154,01	129,57	138,49	126,84	137,76	100,75	101,3
54	151,36	151,52	131,6	140,62	131,71	140,29	101,49	100,75
55	147,19	147,03	130,78	143,35	127,5	143,85	101,2	102,68
56	150,79	150,98	133,82	151	133,06	150,59	102,41	100,6
57	146,99	147,44	129,65	140,65	132,49	140,97	100,85	100,28
58	159,44	159	131,3	141,15	127,42	141,31	102,22	101,59
59	152,52	152,49	134,61	147,66	128,85	147,45	102,03	102,51
60	147,5	147,47	128,84	135,15	132,96	135,37	99,42	101,11
61	157,59	158,35	131,63	145,08	132,9	144,29	101,47	101,83
62	148,39	148,83	132,7	141,25	129,99	140,9	101,41	102,39
63	148,9	149	133,03	147,65	129,59	148,07	100,64	101,44
64	148,16	149,1	133,71	145,52	131,37	145,84	101,9	101,42
65	149,75	149,91	133,9	156,18	132,06	156,88	102,3	101,58
66	151,38	151,27	130,14	138,29	130,71	138,66	100,29	101,83
67	147,47	147,58	131,45	142,85	128,98	142,63	101,2	100,71
68	149,98	149,73	133,14	153,62	132,66	152,89	102,43	101,41
69	150,49	150,27	130,34	137,22	132,46	137,13	99,94	101,39
70	158,05	157,76	133,8	143,8	128,49	143,54	102,04	102,79
71	144,41	144,45	135,09	152,82	131,97	152,26	103,34	100,86
72	146,63	146,96	132,62	145,19	132,96	145,17	101,71	100,46
73	160,06	159,7	131,33	139,75	132,47	139,8	99,83	104,01
74	149,53	149,42	131,55	144,2	129,91	143,34	101,29	101,85
75	152,37	151,85	134,18	142,39	128,72	142,47	101,88	100,69
76	159,45	160,22	131,17	145,37	131,95	145,33	100,61	103,23
77	152,34	152	132,39	146,93	131,59	146,85	102,68	101,84
78	143,56	143,61	131,41	140,54	128,86	140,81	101,56	100,12
79	143,51	143,25	129,69	141,47	130,09	141,41	101,31	99,78
80	141,7	141,74	134,68	153,98	129,64	154,2	102,07	99,79
81	150,53	150,59	126,23	133,3	130,06	132,86	99,2	102,52
82	150,89	150,71	129,42	139,09	127,26	138,81	100,1	101,21
83	154,81	155,07	129,92	138,34	128,7	138	101,03	101,34
84	164,5	163,87	132,72	153,45	129,65	153,1	101,43	102,9
85	156,91	173,43	131,85	140,55	133,29	140,69	100,85	103,61
86	139,29	139,45	129,05	143,49	130,61	143,19	99,83	100,91
87	154,76	154,63	131,42	142,13	131,6	142,36	100,92	101,28
88	154,21	154,01	131,03	139,83	132,57	139,93	100,1	102,36
89	152,19	152,62	130,99	146,17	127,32	145,91	101,55	102,12
90	148,78	148,06	133,72	149,61	130	149,67	103,31	100,51
91	146,38	146,28	132,34	142,73	130,81	142,89	101,57	101,54
92	166,93	167,15	131,96	145,04	132,79	145,16	102,17	103,17
93	150,9	150,8	127,49	132,94	132,56	132,73	99,73	101,58
94	149,7	149,58	131,82	145,94	129,88	145,97	100,1	100,31
95	149,99	150,47	133,55	149,4	131,26	149,51	102,16	100,99
96	156,52	156,32	133,64	145,66	132,03	146,14	102,32	101,13
97	152,75	152,42	129,66	138,05	128,32	137,69	100,72	100,94
98	154,14	153,63	133,26	148,23	128,92	147,8	102,9	102,1
99	152,13	151,68	132,36	149,32	131,39	148,85	101,21	101,38
100	147,67	147,17	128,6	141,58	131,04	141,44	100,02	102,5

Resultado das simulações do projeto de experimento fatorial para a medida de desempenho “Estoque de Peças em Processo WIP”.

Repetição	TRATAMENTOS							
	A0B0C0	A1B0C0	A0B1C0	A0B0C1	A1B1C0	A1B0C1	A0B1C1	A1B1C1
1	7,87	7,87	6,21	6,96	5,92	6,98	5	5,05
2	7,53	7,53	6,28	7,18	6,43	7,12	5,08	5
3	7,56	7,57	6,5	7,48	6,47	7,56	5,23	5,14
4	8,5	8,47	6,53	7,41	6,28	7,43	5,14	5,24
5	7,23	7,21	6,46	7,34	6,11	7,34	5,12	5
6	8,36	8,34	6,48	7,47	6,31	7,49	5,19	5,25
7	7,27	7,29	6,52	7,6	6,32	7,59	5,18	4,96
8	8,25	8,25	6,54	7,53	6,23	7,51	5,15	5,18
9	7,58	7,61	6,12	6,91	6,12	6,9	4,9	5,2
10	7,25	7,26	6,51	7,47	6,07	7,45	5,25	4,97
11	6,54	6,55	6,42	7,26	6,49	7,25	5,11	4,76
12	7,57	7,6	6,05	6,67	6,23	6,69	4,89	5,03
13	7	7,01	6,62	7,94	6,61	7,96	5,2	4,95
14	7,2	7,2	6,25	6,93	6,26	6,93	4,99	5,03
15	7,51	7,51	6,33	7,17	6,16	7,16	5,04	5,04
16	8,03	8,05	6,37	7,48	6,41	7,46	5,09	5,25
17	7,74	7,75	6,43	7,83	6,27	7,8	5,16	5,1
18	7,16	7,18	5,91	6,33	6,45	6,3	4,8	4,9
19	7,15	7,15	6,18	6,95	6,34	6,97	4,95	4,98
20	7,29	7,29	6,25	6,97	6,35	6,95	5,07	4,94
21	7,63	7,62	6,3	6,94	6,31	6,93	5,05	5,06
22	7,23	7,23	6,29	7,08	6,23	7,07	5,01	5
23	7,35	7,34	6,19	7,22	6,4	7,23	4,98	5,07
24	8,35	8,35	6,51	7,59	6,32	7,56	5,17	5,25
25	8,14	8,11	6,53	7,34	6,08	7,38	5,15	5,25
26	8,06	8,09	6,25	7,14	6,02	7,13	4,98	5,14
27	7,51	7,51	6,31	7,22	6,29	7,21	5,06	5,05
28	7,79	7,83	6,21	6,9	6,62	6,89	5,03	5,12
29	7,69	7,65	6,59	7,97	6,35	7,97	5,3	5,08
30	7,65	7,65	6,2	6,88	6,35	6,86	5,01	5,1
31	7,19	7,21	5,99	6,4	6,46	6,41	4,86	5
32	6,98	6,98	6,21	6,8	6,26	6,82	5	4,98
33	7,67	7,7	6,56	7,66	6,32	7,67	5,18	5,22
34	7,26	7,24	5,98	6,46	6,14	6,45	4,83	4,99
35	7,18	7,17	6,69	7,85	6,12	7,85	5,32	5
36	7,66	7,63	6,3	7,41	6,14	7,41	5,03	5,08
37	7,21	7,2	6,43	7,28	6,5	7,27	5,15	5,07
38	7,68	7,67	6,19	7,23	5,98	7,19	5,03	5,1
39	7,09	7,12	6,18	6,79	6,37	6,8	5	4,88
40	6,94	6,93	6,29	7,24	6,51	7,22	5,05	4,98
41	7,59	7,6	6,34	7,13	6,28	7,12	5,15	5,09
42	7,59	7,61	6,43	7,64	6,28	7,66	5,16	5,08
43	7,77	7,78	6,16	6,92	6,19	6,92	4,97	5,1
44	7,91	7,9	6,17	6,68	6,24	6,7	4,95	5,18
45	7,46	7,46	6,31	7,4	6,36	7,39	5,07	5,13
46	7,38	7,38	6,25	7,05	6,63	7,03	5,02	5,01
47	7,8	7,79	6,36	7,23	6,26	7,23	5,09	5,09
48	7,34	7,31	6,39	7,22	6,28	7,22	5,02	4,98
49	7,26	7,27	6,14	6,79	6,56	6,79	4,89	5,02
50	8,05	8,04	6,24	6,99	6,07	6,97	4,99	5,27
51	7,83	7,81	6	6,76	6,41	6,75	4,85	5,19
52	8,15	8,19	6,22	7,03	6,4	7,07	5	5,19

53	7,7	7,67	6,3	7	5,99	6,96	5,09	5,04
54	7,53	7,54	6,25	6,99	6,29	6,97	5,04	5,01
55	7,34	7,34	6,31	7,19	5,96	7,22	5,07	5,12
56	7,54	7,55	6,49	7,68	6,43	7,66	5,21	5,04
57	7,27	7,29	6,22	7	6,48	7,02	5,02	4,95
58	8,21	8,19	6,32	7,06	5,95	7,07	5,1	5,24
59	7,69	7,69	6,63	7,62	6,17	7,61	5,27	5,17
60	7,23	7,23	5,99	6,57	6,49	6,58	4,82	4,96
61	7,9	7,94	6,35	7,27	6,37	7,23	5,09	5,1
62	7,47	7,49	6,36	7,04	6,28	7,03	5,06	5,15
63	7,6	7,61	6,57	7,59	6,19	7,61	5,17	5,19
64	7,26	7,31	6,49	7,38	6,22	7,39	5,17	4,97
65	7,48	7,49	6,53	7,95	6,42	7,99	5,21	5,08
66	7,61	7,61	6,17	6,88	6,25	6,9	4,99	5,12
67	7,32	7,32	6,26	7,09	6,17	7,07	5,02	5
68	7,42	7,41	6,42	7,75	6,44	7,72	5,17	5,02
69	7,63	7,62	6,17	6,76	6,36	6,75	4,93	5,14
70	8,08	8,06	6,49	7,31	6,03	7,3	5,19	5,25
71	7,21	7,21	6,52	7,7	6,38	7,68	5,21	5,04
72	7,27	7,28	6,43	7,4	6,35	7,4	5,17	4,98
73	8,04	8,03	6,28	6,98	6,36	6,98	4,98	5,22
74	7,62	7,62	6,37	7,24	6,17	7,2	5,1	5,19
75	7,56	7,54	6,47	7,15	6,06	7,15	5,11	5
76	8,19	8,23	6,28	7,24	6,4	7,23	5,01	5,31
77	7,68	7,67	6,31	7,31	6,3	7,31	5,11	5,14
78	7,08	7,08	6,25	6,98	5,98	6,99	5,04	4,94
79	7,06	7,05	6,22	7,09	6,19	7,09	5,08	4,91
80	7,01	7,01	6,67	7,93	6,23	7,94	5,26	4,93
81	7,6	7,61	5,86	6,43	6,25	6,41	4,79	5,18
82	7,52	7,51	6,09	6,83	5,91	6,82	4,92	5,04
83	7,87	7,88	6,28	6,98	6,09	6,96	5,1	5,15
84	8,39	8,36	6,4	7,71	6,25	7,69	5,09	5,25
85	6,05	8,83	6,27	7	6,58	7,01	5,02	5,27
86	6,8	6,81	6,06	7,02	6,27	7	4,89	4,93
87	7,92	7,92	6,34	7,12	6,24	7,13	5,06	5,18
88	7,86	7,85	6,32	6,99	6,43	6,99	5	5,22
89	7,68	7,7	6,29	7,34	6,06	7,33	5,1	5,16
90	7,47	7,44	6,43	7,49	6,24	7,49	5,18	5,05
91	7,38	7,38	6,44	7,23	6,31	7,23	5,14	5,12
92	8,54	8,55	6,4	7,35	6,48	7,36	5,18	5,28
93	7,48	7,48	5,99	6,54	6,47	6,53	4,91	5,04
94	7,46	7,45	6,33	7,3	6,26	7,3	5	4,99
95	7,52	7,54	6,55	7,62	6,32	7,63	5,21	5,06
96	7,74	7,73	6,32	7,21	6,34	7,23	5,06	5,01
97	7,58	7,57	6,24	6,95	6,04	6,93	5,07	5,01
98	7,87	7,85	6,45	7,5	6,02	7,48	5,21	5,22
99	7,51	7,49	6,3	7,41	6,28	7,39	5,02	5
100	7,43	7,41	6,18	7,1	6,32	7,09	5,01	5,16

Apêndice – II

Resultado das simulações realizadas com o procedimento baseado em regras de prioridade (R.P.) e com o procedimento baseado em lógica fuzzy (*Fuzzy*), utilizando tempo de chegada de 150 min.

Repetição	MEDIDAS DE DESEMPENHO							
	% Atraso		T. Médio Atraso		T.Médio de Fluxo		WIP	
	R.P.	Fuzzy	R.P.	Fuzzy	R.P.	Fuzzy	R.P.	Fuzzy
1	8,9	3,47	5,7	0,69	116,66	92,84	4,34	2,96
2	9,88	3,04	6,85	0,48	119,63	92,01	4,49	2,85
3	10,72	3,23	5,65	0,6	119,89	91,19	4,6	2,83
4	9,92	3,21	4,92	0,61	117,92	92,22	4,31	3
5	9,66	3,31	4,84	0,66	117,14	92,11	4,39	2,86
6	10,4	3,49	5,8	0,72	119,43	92,06	4,56	2,96
7	10,77	3,24	5,38	0,59	117,78	92,03	4,35	2,86
8	8,33	3,24	3,81	0,59	114,17	92,41	4,25	2,99
9	10,1	3,39	5,08	0,63	115,96	93,2	4,36	2,99
10	10,11	3,15	5,91	0,61	118,97	92,61	4,44	3,01
11	10,26	2,52	5,93	0,53	118,15	91,83	4,45	2,85
12	11,26	3,15	6,37	0,54	121,66	91,99	4,76	2,85
13	9,45	3,67	5,27	0,61	116,83	92,66	4,39	3,07
14	9,78	2,96	4,59	0,54	116,61	92,02	4,41	2,92
15	10,82	3,41	7,09	0,69	122,29	92,26	4,68	2,92
16	10,61	3,58	6,79	0,74	119,99	92,9	4,56	3,02
17	10,5	3,01	7,16	0,58	121,37	92,51	4,55	2,95
18	9,65	3,74	4,31	0,77	115,57	93,82	4,4	3,07
19	9,63	2,94	5,05	0,63	117,42	91,78	4,41	2,96
20	10,92	3,36	6,83	0,67	120,69	91,92	4,59	2,96
21	8,05	3,04	4,3	0,56	114,93	91,8	4,28	2,97
22	10,19	2,86	6,23	0,52	118,07	91,66	4,42	3
23	9,74	3,9	4,51	0,68	115,65	92,25	4,4	2,89
24	9,31	4,29	4,63	0,87	115,74	93,63	4,22	3,03
25	9,6	3,26	4,93	0,58	114,13	91,35	4,32	2,84
26	9,63	3,85	4,76	0,71	116,62	92,16	4,36	2,88
27	10,13	2,75	5,84	0,41	118,74	90,65	4,5	2,84
28	9,88	3,94	6,16	0,78	118,78	93,36	4,43	2,99
29	9,02	3,05	4,65	0,53	114,86	91,46	4,21	2,98
30	9,01	3,7	4,05	0,73	113,5	92,02	4,2	2,91
31	10,25	3,35	5,47	0,65	119,13	92,44	4,48	2,83
32	10,19	3,19	5,67	0,63	117,58	92,16	4,27	2,89
33	9,5	3,48	4,51	0,65	117,67	92,26	4,36	2,91
34	10,16	3,33	7,41	0,56	121,39	92,43	4,64	2,89
35	10,08	3,51	5,99	0,58	119,11	91,94	4,52	2,87
36	9,41	3,41	5,45	0,55	117,3	92,22	4,35	2,91
37	10,47	3,61	4,69	0,7	117,53	93,51	4,32	2,97
38	9,84	3,05	5,08	0,59	117,89	91,83	4,26	2,97
39	10,3	2,68	5,53	0,65	118,25	92,83	4,47	2,91
40	9,86	3	5,19	0,57	119,06	91,16	4,66	2,88
41	10,83	2,98	4,63	0,52	117,65	91,83	4,46	2,88
42	8,41	3,35	3,23	0,7	112,97	92,77	4,3	2,96
43	9,4	3,1	4,65	0,56	116,01	92,2	4,4	2,88
44	9,35	2,89	5,45	0,55	116,81	91,75	4,36	2,88
45	8,78	3,11	3,47	0,57	114,73	92,53	4,18	2,94

46	12,55	4,1	7,9	0,9	124,27	94,08	4,88	2,97
47	9,61	3,62	5,74	0,64	117,51	92,82	4,49	3
48	8,52	3,19	4,04	0,66	115,17	92,08	4,17	2,86
49	9,09	2,95	4,02	0,62	114,74	92,37	4,3	2,98
50	9,69	3,62	5,44	0,79	117,71	93,69	4,36	3,07
51	9,59	3,12	4,97	0,62	116,47	92,48	4,28	2,98
52	9,42	3,29	3,92	0,69	115,03	91,93	4,23	2,87
53	9,79	3,31	5,89	0,64	119,77	92,51	4,56	2,87
54	10,11	3,18	4,82	0,65	118,83	92,53	4,51	2,84
55	9,59	2,94	4,7	0,57	115,28	92,27	4,28	2,93
56	10,77	3,26	6,19	0,65	121,03	92,58	4,66	3,03
57	11,56	3,1	7,42	0,55	122,14	92,77	4,7	3,06
58	10,59	3,64	5,75	0,63	118,46	92,4	4,5	2,92
59	8,54	3,23	3,51	0,56	114,3	92,21	4,24	2,89
60	10,55	3,59	6,69	0,66	119,9	92,77	4,54	3
61	8,73	3	4,69	0,5	116,11	91,89	4,4	2,87
62	9,13	2,7	4,59	0,5	115,77	91,88	4,3	2,89
63	9,35	3,32	4,59	0,62	116,93	92,6	4,36	2,89
64	10,15	2,86	6,14	0,53	118,54	91,84	4,53	2,82
65	8,79	2,68	3,63	0,51	114,45	92,13	4,26	2,94
66	10,01	3,4	4,56	0,65	117,35	91,84	4,33	2,9
67	9,06	3,29	5,02	0,61	115,66	91,84	4,31	2,89
68	10,38	3,87	5,32	0,71	118,4	93,1	4,44	2,91
69	8,58	3,08	4,87	0,66	115,61	93,01	4,35	3,04
70	8,77	3,33	4,9	0,68	116,76	92,07	4,31	2,97
71	8,38	3,28	4,61	0,61	114,73	92,2	4,28	2,9
72	11,89	2,97	8,84	0,6	123,91	91,91	4,66	2,93
73	10,37	3,08	6,58	0,6	121,14	92,47	4,66	2,97
74	11,9	2,85	7,6	0,5	123,78	91,72	4,71	2,96
75	10,88	2,73	6,01	0,46	118,79	90,88	4,51	2,88
76	9,2	2,92	4,96	0,58	115,94	92,25	4,33	2,92
77	9,32	3,47	4,55	0,64	116,63	92,51	4,31	2,99
78	8,96	3,3	4,35	0,6	115,35	93,11	4,3	2,95
79	8,98	2,83	3,72	0,76	115,46	91,93	4,17	2,95
80	11,6	2,94	9,03	0,58	123,36	91,86	4,79	2,98
81	10,66	3,21	5,59	0,64	119,52	91,91	4,4	2,95
82	9,42	3,46	4,2	0,63	116,33	92,36	4,42	2,85
83	11,69	3,45	13,22	0,62	128,25	92,39	4,81	2,97
84	8,53	2,71	3,63	0,48	114,21	91,61	4,15	2,96
85	10,72	2,95	6,55	0,51	122,09	92,79	4,67	3
86	10,64	3,65	7,37	0,65	120,44	92,68	4,61	2,92
87	8,41	3,23	4,06	0,66	114,89	92,39	4,21	2,86
88	8,37	3,91	6,13	0,73	117,68	91,95	4,39	2,82
89	9,93	3,18	4,57	0,52	117,73	92,07	4,55	2,96
90	9,1	4,12	5,17	0,8	116,27	94,04	4,32	3,03
91	10,03	3,93	5,78	0,7	118,37	92,82	4,38	2,93
92	10,96	3,04	7,19	0,54	121,66	92,07	4,7	2,88
93	9,97	3,44	7,38	0,63	121,33	92,8	4,71	2,99
94	10,11	2,89	5,95	0,61	120,15	91,71	4,61	2,84
95	7,89	3,82	3,17	0,76	114	92,96	4,28	2,96
96	10,9	2,83	5,43	0,57	116,23	92,13	4,4	2,92
97	10,08	3,44	5,63	0,67	117,87	91,44	4,41	2,93
98	11,33	2,96	7,35	0,6	123,16	92,08	4,7	2,93
99	10,51	3,13	5,79	0,57	120,84	91,99	4,7	2,92
100	9,97	3,62	5,51	0,75	118,1	91,75	4,4	2,89

Resultado das simulações realizadas com o procedimento baseado em regras de prioridade (R.P.) e com o procedimento baseado em lógica fuzzy (*Fuzzy*), utilizando tempo de chegada de 120 min.

Repetição	Medidas de Desempenho							
	% Atraso		T. Médio Atraso		T.Médio de Fluxo		WIP	
	R.P.	Fuzzy	R.P.	Fuzzy	R.P.	Fuzzy	R.P.	Fuzzy
1	23,1	4,17	45,83	0,93	182,67	96,15	8,65	3,77
2	26,43	3,71	58,5	0,75	199,99	96,41	15,5	3,82
3	20,52	3,57	36,8	0,74	168,56	95,94	8,01	3,81
4	20,56	4,63	28,2	1,02	159,15	97,07	7,58	3,97
5	23,19	4,16	37,84	0,85	174,2	95,19	8,49	3,74
6	22,84	4,49	43,74	0,97	179,8	96,31	8,76	3,88
7	19,9	4,11	32,57	0,86	163,91	96,35	7,75	3,81
8	24,6	4,41	46,62	0,93	186,31	97,57	9,33	3,94
9	21,11	4,6	33,45	1,02	166,61	96,71	7,93	3,88
10	22,63	4,08	38,28	0,83	171,51	96	8,14	3,75
11	19,48	3,25	31,51	0,64	163,68	94,54	7,81	3,58
12	17,04	4,48	17,97	1,05	143,42	96,37	6,63	3,79
13	23,38	4,28	39,56	0,84	175,6	95,34	8,38	3,73
14	20,86	3,7	27,56	0,84	160,32	94,8	7,78	3,7
15	21,35	3,51	30	0,69	163,56	95,73	7,93	3,78
16	21,64	4,7	33,87	0,94	167,87	96,35	8,1	3,88
17	40,55	3,67	116,26	0,74	274,57	95,3	30,84	3,77
18	23,06	3,85	40,07	0,8	175,29	95,09	19,2	3,72
19	36,21	3,85	83	0,74	233,55	95,71	27,98	3,78
20	21,52	4,03	34,69	0,95	167,99	95,22	8,23	3,67
21	18,78	3,54	21,66	0,63	151,75	94,9	7,15	3,75
22	18,42	4,85	19,63	1,01	148,51	97,96	7,05	3,8
23	23,84	4,76	42,42	1,11	178,6	96,65	8,46	3,83
24	17,61	4,11	19,73	0,84	147,49	96,2	7,07	3,88
25	22,32	4,47	40,75	1,01	173,98	96,77	8,38	3,96
26	21,6	4,08	33,69	1	168,58	95,97	8,24	3,83
27	21,22	4,3	32,06	0,89	165,27	95,74	7,83	3,75
28	22,56	4,22	37,77	0,91	171,92	96,08	8,31	3,81
29	24,71	3,38	45,55	0,66	182,41	94,33	8,67	3,7
30	22,27	4,35	35,06	0,92	170,24	96,1	8,16	3,82
31	19,64	3,81	21,69	0,74	151,57	95,86	7,13	3,78
32	25,84	4,47	56,78	0,91	197,5	95,72	9,29	3,72
33	23,09	4,29	38,33	0,93	171,85	97,16	8,34	3,94
34	19,33	4,14	20,88	0,85	151,16	95,92	7,2	3,82
35	19,2	3,46	23,13	0,72	150,86	95,16	7,04	3,75
36	20,35	4,18	31,83	0,97	164,24	96,32	7,77	3,78
37	22,19	3,5	42,95	0,85	179,1	95,59	8,52	3,72
38	18,3	3,69	18,38	0,79	147,38	95,79	6,93	3,84
39	21,26	3,94	28,21	0,88	161,95	95,48	7,75	3,62
40	18,9	4,37	22,47	0,96	151,81	95,61	7,21	3,76
41	44,03	3,89	142,3	0,86	303,33	96,37	25,22	3,82
42	17,27	4,05	17,57	0,89	146,42	96,7	6,8	3,8
43	22,95	4,4	39,13	0,85	175,79	96,02	23,93	3,76
44	28,89	4,11	72,89	0,93	218,18	95,89	10,8	3,87
45	20,62	4,15	40,3	0,93	171,09	96,31	8	3,83
46	25,88	3,83	51,29	0,86	187,71	96,29	14,45	3,83
47	23,58	3,82	41,54	0,81	176,13	96,04	8,42	3,82

48	30,2	3,84	73,58	0,77	218,03	95,57	15,6	3,73
49	21,22	3,65	35,97	0,77	170,07	94,88	8,09	3,78
50	25,88	3,89	44,81	0,81	182,9	97,11	25,53	3,94
51	20,52	3,98	24,07	0,9	156,24	95,52	7,54	3,87
52	48,7	4,66	160,71	0,96	331,58	96,53	29,53	3,91
53	19,65	3,71	24,99	0,84	155,51	96,03	7,42	3,75
54	20,34	4	28,99	0,77	160,75	95,34	7,57	3,75
55	20,84	4,27	29,08	0,97	162,02	97,18	7,77	3,85
56	23,91	4,01	42,48	0,78	178,82	95,67	8,52	3,8
57	33,19	4,01	84,18	0,96	231,73	95,48	30,43	3,69
58	17,36	3,75	17,55	0,78	144,57	96	6,8	3,88
59	18,21	4,07	19,86	0,92	147,94	96,1	6,9	3,82
60	19,45	3,4	26,16	0,67	156,36	95,73	7,41	3,71
61	20,96	4,14	29,53	0,8	162,16	96,46	7,78	3,84
62	17,9	3,93	20,05	0,92	148,91	97,42	7,04	3,9
63	19,96	3,79	23,89	0,76	154,11	95,94	7,3	3,77
64	19,77	3,95	23,1	0,9	153,89	96,29	7,38	3,7
65	21,43	4,11	31,83	0,84	164,62	95,83	7,88	3,75
66	21,69	4,03	33,39	0,85	166,78	95,69	7,95	3,77
67	20,26	4,53	27,37	1,02	158,71	95,69	7,6	3,67
68	18,93	4,09	21,41	0,85	150,76	96,3	7,04	3,76
69	20,51	3,8	29,11	0,78	161,47	95,96	7,51	3,82
70	27,54	4,29	54,59	0,99	195,23	96,31	9,55	3,86
71	18,18	3,75	18,33	0,87	147,52	95,76	6,96	3,77
72	23,25	3,75	40,7	0,8	176,62	95,1	8,56	3,68
73	22,89	4,54	31,36	1,02	169,25	96,45	8,35	3,83
74	19,47	4,55	26,37	0,98	155,75	97,11	7,32	3,88
75	26,47	3,57	55,2	0,76	195,42	95,71	19,72	3,71
76	19,55	4,69	19,61	1,05	147,01	97,75	6,83	4,03
77	18,75	4,1	25,36	0,83	154,55	96,04	7,23	3,78
78	24,15	3,43	42,85	0,71	179,79	95,4	8,64	3,72
79	21,19	3,59	28,87	0,75	162,72	94,46	7,69	3,65
80	20,85	3,4	28,96	0,59	159,71	94,69	7,56	3,68
81	21,48	4,53	28,44	1,08	164,73	97,54	25,05	3,89
82	20,44	4,23	24,27	0,83	156,2	96,89	7,49	3,77
83	18,74	4,38	19,77	0,86	148,15	96,49	7	3,88
84	22,15	4,45	36,07	0,96	170,07	96,52	8,07	3,83
85	22,44	4,12	35,68	0,89	170,52	97,12	8,04	3,96
86	23,27	4,1	39,42	0,84	173,6	95,8	8,21	3,76
87	18,86	4,29	27,62	0,99	156,95	95,42	7,43	3,77
88	18,7	4,47	24,93	0,96	156	96,33	7,51	3,89
89	25,78	3,9	48,97	0,85	186,36	96,24	17,99	3,89
90	20,65	3,9	35,66	0,86	168,18	95,07	7,88	3,72
91	25,82	4,23	49,95	0,97	187,61	95,78	24,25	3,82
92	18,58	4,43	25,53	1,04	154,9	96,31	7,21	3,86
93	18,84	4,27	24,07	0,88	153,6	95,21	7,26	3,67
94	21,13	4,51	36,96	0,91	169,58	95,84	8,13	3,73
95	19,62	3,87	25,4	0,75	156,42	94,28	7,43	3,72
96	19,16	4,12	20,34	0,88	148,84	96,18	7,04	3,78
97	19,03	4,01	22,37	0,8	152	96,25	7,2	3,79
98	17,9	4,27	26,22	0,94	152,9	96,57	7,19	3,89
99	23,24	4,2	27,59	0,91	163,1	95,89	7,88	3,73
100	21,93	3,94	30,63	0,87	164,95	96,28	25,91	3,84

Resultado das simulações realizadas com o procedimento baseado em regras de prioridade (R.P.) e com o procedimento baseado em lógica fuzzy (*Fuzzy*), utilizando tempo de chegada de 100 min.

Repetição	Medidas de Desempenho							
	% Atraso		T. Médio Atraso		T.Médio de Fluxo		WIP	
	R.P.	FUZZY	R.P.	FUZZY	R.P.	FUZZY	R.P.	FUZZY
1	40,95	4,96	88,31	1,22	254,98	100,68	40,65	4,68
2	47,98	5,56	160,93	1,52	323,39	101,99	31,53	4,73
3	56,07	4,73	139,08	1,17	321,19	100,09	36,5	4,61
4	44,16	5,95	97,91	1,49	258,07	100,7	33,32	4,71
5	34,11	5,54	86,72	1,43	239,49	102,85	26,78	4,89
6	42,4	5,08	130,48	1,28	294,64	101,31	36,9	4,85
7	43,9	6,04	117,55	1,47	282,57	102,3	33,28	4,73
8	54,34	5,32	176,3	1,48	359,52	101,34	29,89	4,96
9	31,82	5,34	64,32	1,37	217,02	101,58	30,31	4,83
10	46,27	5,35	115,81	1,23	282,94	101,52	39,63	4,69
11	62,53	5,4	236,39	1,53	428,43	103,15	30,47	4,92
12	36,88	4,96	106,16	1,14	262,83	99,38	30,12	4,55
13	46,42	5,7	123,35	1,37	291,46	102,1	30,63	4,86
14	58,17	5,22	204,37	1,44	389,13	101,59	35,24	4,84
15	73,91	5,36	258,93	1,44	453,66	100,89	34,01	4,72
16	41,4	5,01	120,99	1,25	281,35	101,49	30,62	4,86
17	37,2	4,53	93,86	0,94	261,87	99,17	28,68	4,5
18	70,68	5,8	296,13	1,52	505,74	102	29,7	4,86
19	71,62	6,27	240,12	1,66	436,6	101,21	34,45	4,71
20	47,55	5,63	151,84	1,36	320,1	100,75	29,58	4,74
21	46,42	5,24	138,96	1,25	305,04	100,59	29,99	4,74
22	53,55	5,17	156,43	1,13	332,26	100,08	30,27	4,63
23	49,03	5,28	164,96	1,4	340,21	101,95	32,86	4,76
24	59,3	4,84	196,29	1,31	390,51	100,4	31,94	4,71
25	38,08	5,24	91,77	1,31	247,23	99,92	29,52	4,61
26	46,67	5,18	117,23	1,46	287,12	101,68	29,74	4,82
27	55,65	5,2	193,44	1,28	370,69	101,58	30,66	4,75
28	32,56	4,81	54,19	1,13	215,93	99,74	27,38	4,67
29	56,44	5,04	140,59	1,18	312,26	101,46	36,51	4,8
30	51,93	4,65	153,47	1,14	332,4	101,48	31,68	4,74
31	57,25	5,08	209,32	1,27	393,01	101,35	32,73	4,8
32	51,05	5,24	167,97	1,42	343,59	102,05	31,29	4,8
33	64,04	5,46	133,12	1,62	327,53	101,61	33,23	4,82
34	44,47	5,24	142,49	1,5	308,41	101,39	36,18	4,77
35	53,19	5,52	188,42	1,37	372,04	100,49	30,9	4,7
36	44,47	5,83	164,27	1,59	341,65	101,99	27,96	4,79
37	48,16	4,62	152,82	0,99	323,78	100,39	29,5	4,62
38	43,99	4,62	128,91	1,05	293,28	98,56	32,76	4,56
39	63,41	5,24	129,24	1,37	310,13	101,93	36,7	4,8
40	45,82	5,52	139,45	1,29	313,09	101,67	33,54	4,77
41	35,63	6,12	68,44	1,69	225,26	103,64	32,11	4,97
42	57,18	5,62	219,83	1,41	401,85	100,96	30,5	4,74
43	52,24	6,01	118,96	1,53	295,49	101,23	29,47	4,72
44	34,73	5,72	70,23	1,6	224,78	103,35	29,31	5,11
45	58,7	5,05	180,41	1,15	368,55	99,86	29,54	4,61
46	47,02	5,24	151,3	1,56	332,34	101,95	28,48	4,92
47	48,68	5,88	106,69	1,59	282,11	100,67	30,75	4,7
48	66,94	5,61	156,13	1,66	349,23	102,74	34,48	4,96
49	52,85	5,68	165,96	1,33	344,54	102,71	31,65	4,97

50	49,82	6,41	144,53	1,98	324,9	103,71	33,78	5,05
51	50	4,99	136,5	1,21	300,59	100,55	31,7	4,8
52	72	5,03	297,49	1,25	505,18	100,68	33,21	4,67
53	34,3	4,83	82,25	1,13	235,39	99,9	24,3	4,66
54	28,79	5,17	51,64	1,27	201,22	101,03	30,03	4,67
55	49,79	5,74	112,41	1,5	291,15	102,83	30,46	4,88
56	64,75	5,87	181,79	1,49	367,94	101,39	29,51	4,75
57	61,15	4,97	223,69	1,22	409,12	101,37	30,08	4,74
58	58,33	4,82	184,22	1,3	378,37	99,76	30,97	4,66
59	40,55	5,58	135,44	1,37	301,93	100,89	30,73	4,7
60	65,68	5,27	281,96	1,21	484,42	101,35	29,6	4,69
61	51,41	5,57	153,93	1,46	325,8	101,76	36,49	4,79
62	49,66	4,47	163,42	1,04	333,4	99,08	32,01	4,57
63	45,38	5,38	150,42	1,26	317,1	99,83	22,9	4,67
64	64,86	5,07	176,86	1,22	377,01	101,22	33,44	4,77
65	61,46	4,97	167,72	1,17	359,46	99,78	30,85	4,66
66	58,7	6,12	173,42	1,64	359,61	102,41	40	4,91
67	54,46	4,88	211,59	1,21	385,7	99,56	32,23	4,59
68	36,48	5,53	76,66	1,36	242,59	102,51	41,09	4,85
69	58,9	4,9	149,02	1,17	340,97	100,8	30,85	4,63
70	50,37	5,47	202,08	1,26	376,9	101,69	33,05	4,83
71	64,73	4,82	272,93	1,1	458,51	99,28	31,26	4,55
72	42,22	5,89	115,41	1,53	279,52	102,22	29,98	4,93
73	61,22	5,31	204,59	1,42	391,68	101,94	29,59	4,86
74	52,31	5,53	197,4	1,61	376,23	101,81	28,95	4,78
75	60,53	5,73	197,41	1,55	377,17	103	32,68	4,95
76	34,32	5,55	79,6	1,31	236,64	100,26	28,88	4,69
77	28,19	5,5	45,1	1,39	191,21	101,25	33,37	4,66
78	46,35	5,59	102,43	1,54	272	101,47	31,56	4,85
79	36,55	5,31	77,49	1,58	236,46	102,95	30,76	4,86
80	45,11	5,2	122,91	1,28	297,2	101,29	32,37	4,7
81	76,07	5,57	281,34	1,39	487,26	102,5	30,9	4,92
82	49,88	5,49	164,8	1,47	333,47	101,09	30,02	4,78
83	52,24	5,57	158,06	1,46	331	102,02	30,61	4,86
84	71,8	6,02	272,04	1,51	474,6	101,65	33,64	4,77
85	41,36	5,46	70,24	1,44	238,88	101,78	35,2	4,82
86	63,3	5,81	219,81	1,52	414,32	101,82	31,15	4,84
87	36,54	5,15	107,63	1,19	264	101,96	28,55	4,7
88	59,9	4,8	219,82	1,23	400,28	100,29	30,92	4,72
89	36,84	6,17	88,55	1,55	243,93	101,25	27,87	4,79
90	51,79	4,99	168,99	1,25	344,46	100,53	32,06	4,65
91	35,89	5,85	102,2	1,57	257,23	102,06	28,76	4,82
92	68,65	5,11	199,18	1,14	397,96	100,01	35,59	4,55
93	48,47	5,29	160,35	1,29	336,2	100,33	32,33	4,68
94	39,66	5,66	103,66	1,29	266,57	100,09	28,51	4,76
95	51,52	5,51	156,21	1,43	334,81	102,4	34,72	4,88
96	52,03	5,32	142,58	1,3	318,31	100,2	35,54	4,71
97	50	5,15	164,67	1,3	348,68	101,2	30,67	4,7
98	34,8	5,85	82,58	1,58	237,54	101,1	26,66	4,78
99	60,5	5,89	174,23	1,53	359,5	102,24	30,7	4,8
100	42,52	6	89,62	1,66	247,65	101,46	30,84	4,83

Resultado das simulações realizadas com o procedimento baseado em regras de prioridade (R.P.) e com o procedimento baseado em lógica fuzzy (*Fuzzy*), utilizando tempo de chegada de 90 min.

Repetição	Medidas de Desempenho							
	% Atraso		T. Médio Atraso		T.Médio de Fluxo		WIP	
	R.P.	FUZZY	R.P.	FUZZY	R.P.	FUZZY	R.P.	RUZZY
1	43,82	5,89	120,96	1,66	287,91	104,15	34,53	5,33
2	73,08	6,39	161,29	1,57	368,09	105,57	39,39	5,42
3	41,14	7,01	78,46	2	243,22	106,15	33,33	5,56
4	64,19	6,51	158,03	1,98	355,31	106,23	30,95	5,39
5	61,2	6,22	203,22	1,79	393,86	105,31	33,96	5,41
6	63,46	7,66	196,49	2,64	387,65	109,1	32,99	5,82
7	61,48	6,7	213,28	1,89	413	105,71	31,87	5,42
8	63,45	6,88	211,55	1,9	402,6	105,23	36,44	5,48
9	45,54	6,32	121,8	1,74	289,63	105,2	38,57	5,5
10	52,31	6,59	164,26	2,2	341,4	106,27	40,74	5,5
11	51,42	6,98	167,7	1,95	357,12	106,11	34,12	5,51
12	67,95	7,97	224,61	2,35	433,94	108,72	26,35	5,78
13	50	6,53	158,14	1,91	339,7	105,16	37,36	5,5
14	54,55	6,17	140,45	1,78	327,48	105,93	34,16	5,51
15	74,21	7,13	229,96	2	425,15	106,86	34,48	5,62
16	69,7	6,86	207,08	2,07	412,73	107,01	33,33	5,64
17	70,68	6,84	211,03	2,32	401,66	107,29	34,27	5,59
18	48,56	5,94	130,34	1,81	299,86	104,3	31,49	5,41
19	47,47	6,12	113,03	1,98	291,72	107,02	31,34	5,68
20	71,04	7,24	243,04	2,2	440,98	105,85	29,76	5,51
21	60,89	5,71	182,43	1,68	371,44	103,87	40,96	5,28
22	52,45	6,88	164,5	2,13	345,83	106,35	30,35	5,51
23	52,2	7,2	144,58	2,17	324,79	106,3	27,29	5,62
24	50,94	6,87	79,6	1,99	250,1	106,24	29,66	5,47
25	53,74	6,6	152,91	1,84	334,82	104,05	32,04	5,36
26	74,68	6,46	297,12	1,85	498,13	105,58	30,98	5,5
27	35,93	6,9	58,51	2,06	218,19	106,01	27,51	5,53
28	42,71	5,68	106,71	1,52	271,71	103,57	36,37	5,29
29	49,06	5,65	112,24	1,37	284,55	102,87	32,04	5,26
30	45,49	6,91	134,99	1,97	298,72	104,74	35,16	5,47
31	45,86	5,72	80,74	1,58	255,29	105,44	43,39	5,43
32	38,42	6,87	57,26	2,24	220,36	105,86	33,8	5,44
33	49,3	6,38	76,98	2,23	253,2	106,88	30,97	5,53
34	65,71	7,48	214,23	2,28	405,62	107,35	35,52	5,59
35	60,43	6,49	178,4	1,73	365,1	105,94	37,54	5,53
36	66,41	6,98	175,86	2,03	373,06	105,46	32,16	5,45
37	46,64	6,38	127,59	1,87	298,13	105,87	36,21	5,44
38	45,07	6,16	136,19	1,65	312,63	104,87	32,84	5,25
39	53,95	6,53	148,4	1,94	326,11	104,39	31,94	5,48
40	53,72	6,9	126,44	2,28	311,94	107,81	35,63	5,85
41	48	6,81	130,92	2	301,89	106,04	34,01	5,49
42	54,88	6,89	187,79	1,82	361,54	106,38	35,08	5,63
43	63,11	6,23	198,48	1,82	383,15	104,06	31,65	5,35
44	71,28	6,32	218,32	1,89	418,27	104,79	36,73	5,43
45	52,91	6,18	113,17	1,69	277,32	104,32	40,97	5,25
46	74,83	7,8	205,59	2,47	401,88	108,46	36,77	5,8
47	42,01	6,37	79,75	1,82	245,7	105,16	31,46	5,48
48	39,22	6,52	74,14	1,88	231,21	105,4	31,99	5,35
49	51,3	6,37	138,08	1,64	316,48	104,57	31,93	5,44

50	50,57	6,15	159,02	1,92	342,42	105,21	30,81	5,39
51	58,55	6,89	167,78	1,93	353,86	106,29	30,94	5,52
52	56,63	6,2	114,6	1,87	301,82	105,62	39,31	5,4
53	87,93	6,15	317,41	1,81	536,25	106,12	39,27	5,57
54	41,5	6,48	95,28	1,84	254,5	105,6	33,75	5,52
55	28,34	6,58	50,38	1,85	190,93	104,67	29,96	5,4
56	35,52	6,8	82,41	2,02	237,65	106,15	32,25	5,62
57	60,74	6,83	147,87	1,98	331,79	106,84	39,97	5,6
58	60,4	7,22	176,95	2,09	358,66	105,79	31,58	5,47
59	65,15	6,19	190,28	1,58	377,24	104,57	32,87	5,34
60	62,79	6,92	135,82	2,06	324,15	107,03	31,04	5,57
61	51,19	7,29	149,17	2,19	322,39	106,02	30,63	5,45
62	54,02	6,91	153,51	1,95	333,56	106,17	33,67	5,52
63	69,74	6,72	119,52	1,78	315,26	105,29	31	5,48
64	68,93	7,61	164,86	2,53	364,96	107,47	34,58	5,68
65	46,1	7,05	88,16	2,01	251,1	105,25	35,94	5,5
66	72,31	7,56	101,19	2,59	295,96	107,37	33,49	5,66
67	39,34	5,89	66,82	1,42	232,84	103,24	36,37	5,26
68	59,65	6,46	66,66	1,91	275	105,4	37,03	5,38
69	81,4	6,21	434,59	1,82	644,76	105,01	33,5	5,45
70	65,41	6,12	194,79	1,76	392,26	105,07	38,77	5,45
71	42,14	7,02	115,55	2,3	278,77	106,95	31,31	5,62
72	57,84	7,27	226,1	2,46	418,62	108,53	43,03	5,67
73	53,27	7,39	173,23	2,38	350,02	107,33	36	5,65
74	76,45	6,72	316,75	1,94	520,79	106,38	36,87	5,56
75	55,88	7,22	145,49	2,16	333,12	107,65	32,03	5,76
76	49,68	7,07	132,96	2,59	315,58	107,36	34,24	5,68
77	70,08	6,65	259,32	1,76	464,75	105,37	32,05	5,38
78	67,15	7,36	250,9	2,35	452,57	106,78	34,44	5,67
79	61,61	7,2	144,15	2,11	323,47	105,63	28,64	5,47
80	37,06	8,03	65,7	2,41	221,7	108,35	30,75	5,74
81	55	6,93	170,28	2,04	373,01	104,83	30,9	5,35
82	58,82	6,5	163,35	1,87	350,87	105,69	35,38	5,48
83	50,4	6,89	116,69	2,96	278,26	108,76	29,68	5,73
84	64,65	6,34	185,06	1,58	374,76	104,97	33,11	5,44
85	60,41	7,16	160,3	2,08	354,63	106,56	34,3	5,61
86	50,48	7,78	135,37	2,72	311,63	107,84	31,34	5,62
87	44,92	5,54	92,71	1,61	255,36	103,95	30,51	5,3
88	77,6	5,9	260,69	1,75	466,23	105,29	34,54	5,48
89	45,15	6,74	97,11	1,8	263,24	105,33	34,07	5,55
90	77,82	6,87	311	2,22	509,81	106,77	32,15	5,62
91	66,67	6,43	221,56	1,89	416,17	105,1	34,41	5,4
92	50,68	6,65	134,7	2,05	305,85	106,08	30,44	5,62
93	75	7,52	277,48	2,69	480,95	108,53	37,79	5,76
94	58,33	6,16	165,77	1,68	360,61	105,2	37,91	5,49
95	45,7	6,63	115,01	1,83	284,55	105,61	30,17	5,49
96	61,66	7,11	148,54	2,05	337,09	105,47	38,98	5,43
97	40,91	6,55	67,47	1,82	251,95	105	32,17	5,42
98	48,98	7,74	152,57	2,6	335,6	107,81	34,11	5,66
99	54,84	6,01	66,4	1,59	247,58	105,39	35,66	5,56
100	71,62	6,75	223	2,08	429,35	106,26	29,77	5,61