

**UNIVERSIDADE CANDIDO MENDES – UCAM  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PESQUISA OPERACIONAL E  
INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL  
CURSO DE MESTRADO EM PESQUISA OPERACIONAL E INTELIGÊNCIA  
COMPUTACIONAL**

**JOSÉ ELIAS DE OLIVEIRA**

**SIMULAÇÃO DISCRETA COMBINADA COM ALGORITMO DE  
ESCALONAMENTO PARA OTIMIZAÇÃO DE PROCESSO JOB SHOP**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES, RJ  
Julho de 2010**

**UNIVERSIDADE CANDIDO MENDES – UCAM  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PESQUISA OPERACIONAL E  
INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL  
CURSO DE MESTRADO EM PESQUISA OPERACIONAL E INTELIGÊNCIA  
COMPUTACIONAL**

JOSÉ ELIAS DE OLIVEIRA

**SIMULAÇÃO DISCRETA COMBINADA COM ALGORITMO DE  
ESCALONAMENTO PARA OTIMIZAÇÃO DE PROCESSO JOB SHOP**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Pesquisa Operacional e Inteligência Computacional, da Universidade Candido Mendes – Campos / RJ, para obtenção do grau de MESTRE EM PESQUISA OPERACIONAL E INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL.

Orientador: Prof. João José de Assis Rangel, D.Sc.  
Co-orientador: Dalessandro Soares Vianna, D. Sc.

CAMPOS DOS GOYTACAZES, RJ  
Julho de 2010

JOSÉ ELIAS DE OLIVEIRA

**SIMULAÇÃO DISCRETA COMBINADA COM ALGORITMO DE  
ESCALONAMENTO PARA OTIMIZAÇÃO DE PROCESSO JOB SHOP**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Pesquisa Operacional e Inteligência Computacional, da Universidade Candido Mendes – Campos / RJ, para obtenção do grau de MESTRE EM PESQUISA OPERACIONAL E INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL.

Aprovada em 09 de Julho de 2010

---

Prof. João José de Assis Rangel, D.Sc. – orientador  
Universidade Candido Mendes

---

Prof. Dalessandro Soares Vianna, D.Sc. – co-orientador  
Universidade Federal Fluminense

---

Prof. Eduardo Shimoda, D.Sc.  
Universidade Candido Mendes

---

Prof. Helder Gomes Costa, D.Sc.  
Universidade Federal Fluminense

CAMPOS DOS GOYTACAZES, RJ  
2010

Dedico este trabalho primeiramente a Deus doador da vida e saúde, a toda minha família: A mãe dos meus filhos, as filhas Danielle e Mirelle, ao filho Ellias e aos irmãos: Celeste, Marta e Paulo Cezar, este último companheiro incansável da árdua jornada, por reconhecerem meu esforço e por estarem ao meu lado.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor João José de Assis Rangel, pela sugestão do tema do trabalho, por toda a ajuda, incentivo e confiança que me foi concedido por ele. Pela paciência, amizade e tranquilidade em todos os momentos, e ao professor co - orientador, Dalessandro Soares Vianna pela prontidão em me atender sempre que solicitado e pelos constantes incentivos. E a todos os professores que contribuíram para nossa formação com toda a sabedoria e experiência. Aos amigos da faculdade que, dedicaram toda amizade e companheirismo e ajudaram em momentos difíceis. Agradeço a Edina Titinoneli pela estadia em sua casa, ao CEFET-MG-campus III - Leopoldina pela flexibilização quanto aos horários e ajuda monetária. Também a Empresa Glynwed fabricante de bombas hidráulicas.

"A fé é a expectativa certa das coisas esperadas, a demonstração evidente de realidades, embora não observadas."

*Hebreus 11:1*

## RESUMO

### SIMULAÇÃO DISCRETA COMBINADA COM ALGORITMO DE ESCALONAMENTO PARA OTIMIZAÇÃO DE PROCESSO JOB SHOP.

O presente trabalho visa desenvolver um mecanismo para combinar um modelo de simulação de eventos discretos com um algoritmo de escalonamento para otimização de processo *job shop* em uma situação hipotética. Com esse mecanismo se propõe avaliar o fluxo de produção, *lead time* e a quantidade produzida da manufatura em um Leiaute Funcional de um sistema de produção *job shop*. Na construção do modelo de otimização para alocação dos recursos da produção, bem como no modelo de simulação, foi considerado a complexidade de um ambiente de manufatura, seus aspectos temporais e o sistema de produção do tipo *job shop*. Podem-se definir recursos como todos os elementos necessários à execução das diversas atividades de um processo produtivo, tais como: Equipamentos, máquinas, mão-de-obra, etc. O processo de alocação dos recursos, obedecendo à seqüência das atividades que fazem parte do projeto, pressupõe que seja a designação mais satisfatória. O resultado oriundo da otimização fornece o momento em que cada tipo de peça entra em cada máquina dando início ao processo de fabricação. Esses valores são registrados em uma Interface em arquivo Excel. Dessa forma, o Modelo de Simulação recebe essas informações buscando gerar um volume considerável de dados representando as diversas atividades operacionais em um modelo, evitando que se façam experimentações reais. Com os resultados fornecidos busca-se encontrar uma solução satisfatória ao problema. O resultado final foi a criação de um mecanismo que permite melhor operação do processo de manufatura auxiliado por escalonamento otimizado da produção. Também, dessa forma, podem-se definir melhor os prazos de entrega das peças a serem fornecidas a um cliente. Através do método espera-se que pessoas com pouco conhecimento em otimização/simulação também possam utilizá-lo.

Palavras-chave: Simulação, Otimização, *Job Shop*, Escalonamento, Leiaute Funcional.

## **ABSTRACT**

COMBINED DISCREET SIMULATION WITH SCHEDULING ALGORITHM TO OPTIMIZATION THE 'JOB SHOP' PROCESS.

This work aims to develop a mechanism to combine a simulation model of discrete events with a scheduling algorithm to optimize the 'job shop' process in a hypothetical situation. The intention is to evaluate the production flow, 'lead time' and the amount of manufacture produced in a Functional Layout of a 'job shop' production system. The complexity of a manufacture environment, temporal aspects and the 'job shop' production system were all considered when developing the model of optimization of production resource allocation, as well as when developing the simulation model. In this sense, 'resource' refers to all elements needed during the production process, such as: equipment, machinery, workforce, and so on. The process of resource allocation, following the sequence of activities in the project, premises a more satisfactory designation. The result originating from of the otimização provide the time in which each kind of part enters each machine starting the manufacturing process. Those figures are shown in a file Excel Interface. Thus, the simulation model gets that information to generate a considerable amount of data representing the several operating activities in a model, avoiding real experimentations. Based on the results we search to find a satisfactory solution for the problem. The final result was the creation of a mechanism that can improve the operation of the manufacture process aided by optimised scheduling of production. It also allows a better definition of delivery time. Furthermore, it is expected that even people with little knowledge of optimization / simulation can use that method.

Key words: simulation, optimization, job shop, scheduling, functional layout.

## Lista de Figuras

Figura 1 - Modelo geral da administração de produção .....	41
Figura 2 - Modelo conceitual de Manufatura .....	43
Figura 3 - Exemplo de leiaute funcional .....	52
Figura 4 - Exemplo de leiaute por produto .....	54
Figura 5 - Exemplo de leiaute por posição fixa.....	54
Figura 6 - Localização do leiaute celular .....	55
Figura 7 - Exemplo de leiaute celular em forma de"U" .....	56
Figura 8 - Exemplo de leiaute celular em linha.....	56
Figura 9 - Classificação dos métodos de otimização .....	68
Figura 10 - Fluxo de simulação-otimização .....	71
Figura 11 - Processo de decisão com modelos de simulação .....	73
Figura 12 - Processo de decisão com modelos de otimização .....	74
Figura 13 - Fluxograma simulação/otimização usando interface em arquivo Excel.....	80
Figura 14 - Sistema para fabricação das peças .....	83
Figura 15 - Tela de início da execução do Modelo de Otimização .....	84
Figura 16 - Dados de entrada fornecidos ao Modelo de Otimização.....	85
Figura 17 - Tela do comando "Escalonamento" .....	87
Figura 18 - Tela exibindo o Resultado do escalonamento .....	88

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Características de alguns simuladores.....	33
Tabela 2 - Relações diretas e indiretas e seus respectivos vínculos .....	45
Tabela 3 - Software de otimização .....	69
Tabela 4 - Comparação qualitativa dos métodos de modelagem.....	74
Tabela 5 - Cenários de ocupação das máquinas no tempo zero .....	90
Tabela 6 - Dados de Entrada fornecidos ao Modelo de Otimização .....	91
Tabela 7 - Resultados otimizados conforme cenário 1 .....	91
Tabela 8 - Resultados otimizados conforme cenário 2.....	93
Tabela 9 - Resultados otimizados conforme cenário 3.....	93
Tabela 10 - Cenário 1 na interface para simulação.....	93
Tabela 11 - Cenário 2 na interface para simulação.....	96
Tabela 12 - Cenário 3 na interface para simulação.....	97
Tabela 13 - Resultado do final do processo .....	98

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E DEFINIÇÕES GERAIS.....	13
1.2	OBJETIVO GERAL .....	17
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
1.4	JUSTIFICATIVAS E CONSIDERAÇÕES .....	18
1.5	ESCOPO DO TRABALHO.....	19
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	20
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	22
2.1	SIMULAÇÃO DE SISTEMAS .....	23
<b>2.1.1</b>	<b>Modelagem e simulação</b> .....	23
<b>2.1.2</b>	<b>Classificação dos sistemas</b> .....	26
<b>2.1.3</b>	<b>Vantagens e desvantagens da simulação</b> .....	27
<b>2.1.4</b>	<b>Metodologia para formulação de um projeto com modelo de simulação</b> .....	28
<b>2.1.5</b>	<b>Principais interfaces gráficas de simulação de eventos discretos</b> .....	33
<b>2.1.6</b>	<b>Simulação de Sistemas de Produção</b> .....	34
<b>2.1.7</b>	<b>Simulação de Eventos Discretos</b> .....	34
<b>2.1.8</b>	<b>Simulação de eventos discretos no Apoio à Decisão</b> .....	35
<b>2.1.9</b>	<b>Ferramentas e Tecnologias de Simulação</b> .....	38
<b>2.1.10</b>	<b>A simulação como ferramenta de apoio à manufatura</b> .....	39
2.2	SISTEMAS DE PRODUÇÃO .....	40
<b>2.2.1</b>	<b>Sistemas produtivos/Manufatura</b> .....	40
<b>2.2.2</b>	<b>Manufatura em processo produtivo de uma fábrica</b> .....	42
<b>2.2.3</b>	<b>Manufatura Enxuta</b> .....	46
<b>2.2.4</b>	<b>Manufatura celular</b> .....	49
<b>2.2.5</b>	<b>Manufatura discreta</b> .....	50
2.3	LEIAUTE .....	50
<b>2.3.1</b>	<b>Tipos tradicionais de leiaute</b> .....	51
2.4	PLANEJAMENTO E CONTROLE DE PRODUÇÃO (PCP).....	57
<b>2.4.1</b>	<b>Funções e limitações do PCP</b> .....	58
<b>2.4.2</b>	<b>Atividades do PCP</b> .....	58
<b>2.4.3</b>	<b>Sistemas utilizados no PCP</b> .....	59
2.5	SCHEDULING DA PRODUÇÃO EM JOB SHOP .....	62

2.6	OTIMIZAÇÃO.....	65
2.6.1	<b>Métodos de otimização.....</b>	66
2.6.2	<b>Otimização de modelos de simulação a eventos discretos .....</b>	67
2.7	CONCLUSÃO DA REVISÃO DE LITERATURA .....	71
<b>3</b>	<b>SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO DE PROCESSO <i>JOB SHOP</i>.....</b>	75
3.1	CARACTERÍSTICAS DA SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO.....	76
3.2	VANTAGENS E DIFICULDADES DE SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO .....	77
3.3	UM MECANISMO DE SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO EM PROCESSO <i>JOB SHOP</i> ....	78
<b>4</b>	<b>APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO COM OTIMIZAÇÃO EM PROCESSO <i>JOB SHOP</i></b>	81
4.1	DESCRIÇÃO FÍSICA DO SISTEMA.....	81
4.2	DESCRIÇÃO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO .....	83
4.3	DESCRIÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO .....	87
4.4	EXPERIMENTO COM O MECANISMO PROPOSTO.....	89
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	99
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	101
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	102
	<b>APÊNDICE A: MODELO CONCEITUAL DA LINHA DE PRODUÇÃO DE CARÇAÇA.....</b>	109
	(UTILIZANDO ELEMENTOS DO IDEF-SIM)	
	<b>APÊNDICE B: TABELA COM A DESCRIÇÃO DOS ELEMENTOS DO MODELO .....</b>	110
	CONCEITUAL.	

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E DEFINIÇÕES GERAIS

O atual ambiente corporativo tem exigido investimentos cada vez maiores em produtividade e sustentabilidade. Exige-se das empresas cada vez mais máquinas e processos que proporcionem altos desempenhos e ganhos em escala produtiva. Para alcançar esses objetivos, torna-se prioritário a aquisição, por exemplo, de máquinas operatrizes modernas com alta eficiência e precisão, como as máquinas-ferramenta equipadas com comando CNC (Controle Numérico Computadorizado). Essas máquinas possuem interface com sistemas computadorizados permitindo obtenção dos altos desempenho e produtividade desejados (SIPPER, 1997). Juntamente com a aquisição das modernas máquinas operatrizes é necessário o aumento da eficiência do PCP - Planejamento e Controle da Produção (WILD, 2003).

O PCP deve estar atualizado com novas formas de gerenciamento, pois o uso de recursos computacionais facilita o trabalho, tornando-o mais eficiente e participativo.

A classe de manufatura ou o sistema de produção no qual o presente trabalho foi executado é denominado *job shop*. Segundo Oliveira (2002), o processo *job shop* tradicional é caracterizado por permitir diferentes fluxos de produção entre as máquinas em um ambiente composto de vários processos e múltiplos recursos de processamento. É uma forma de produção onde as diversas peças passam pelo

sistema de manufatura, não sendo necessariamente seguir um caminho único. As peças podem ultrapassar ou serem ultrapassadas, não seguindo uma seqüência única.

Para Seixas Filho (2004), surge à necessidade de se focar características de variedade e personalização dos produtos e da capacidade de atendimento dos pedidos, devido às mudanças de perfil dos mercados homogêneos e estáveis para mercados que demandam maior agilidade por parte das empresas para atenderem aos pedidos dos clientes. Portanto, podem-se enumerar seis características essenciais em sistemas produtivos do tipo *job shop* que são:

- Uso de rotas alternativas no processo;
- aumento da freqüência do uso do recurso, aproveitando suas capacidades de produção;
- ciclos curtos de fabricação;
- baixos custos;
- garantia da qualidade; e
- resposta rápida aos consumidores.

Existem algumas restrições para os *jobs* e as máquinas, que são:

- não existe regra de precedência entre as operações de diferentes *jobs*;
- as operações que iniciarem o processo não podem ser interrompidas;
- uma máquina pode somente processar um *job* por vez e um *job* somente pode ser processado em uma máquina por vez.

Assim, muitas vezes, falhas que porventura venham a ocorrer, devido a um planejamento inadequado, podem gerar custos adicionais para as peças produzidas e apenas serem constatadas após a produção de dezenas, centenas ou milhares de unidades, (WHITE, 1990).

O sistema de produção, tipo *job shop*, devido à diversidade de produtos e lotes reduzidos, geralmente mantém uma baixa produtividade tornando-se um problema crítico para as empresas que trabalham com esse sistema. Portanto, a busca de recursos para aumentar a produtividade, mantendo a flexibilidade do sistema, força os responsáveis a buscarem alternativas em softwares de

programação computacional. Dessa forma, atualmente há uma preocupação maior em programar, modelar, simular e validar todo o processo seja ele novo ou já em execução. Também é importante o tipo de leiaute da empresa, visto que o sistema de produção, tipo *job shop*, é típico do leiaute funcional ou por processo. Assim, as máquinas que executam operações do mesmo tipo são agrupadas em uma mesma área (setor de tornos, setor de frisadores, setor de furadeiras, setor de retíficas, e outros).

Torna-se evidente que, apesar das empresas investirem em produtividade e sustentabilidade adquirindo máquinas de alto desempenho, melhorando seus processos produtivos e aumentando a eficiência do PCP, o sistema de produção (*job shop*) aplicado constitui um problema a ser resolvido.

Em um sistema de manufatura, toda vez que objetivos são formulados, é necessário também formular planos de como atingi-lo, organizar recursos humanos e físicos necessários para a ação, dirigir a ação dos recursos humanos sobre os físicos e controlar esta ação para a correção de eventuais desvios. Esse processo é realizado pelo PCP. Dentre várias responsabilidades atribuídas ao PCP, pode-se citar a programação das operações dos vários produtos que entram no sistema e o momento certo em que esse produto deve entrar.

Diante dos vários problemas existentes, ao se montar ou projetar um sistema de produção, é aconselhável, juntamente com a execução do projeto, fazer uso da simulação computacional. Por ser uma importante técnica que está disponível para vários profissionais que atuam em diversas áreas - desde a biologia até as áreas da ciência exatas, como engenharia - a simulação tem sido largamente utilizada. Baseia-se na construção de um modelo matemático para representar o sistema a ser avaliado. O seu uso não tem sido aplicado somente em novos projetos, mas para qualquer mudança que se deseja fazer em sistemas que já existam.

É importante simular qualquer sistema antes da sua implementação real, mas é de fundamental importância, em um sistema de produção do tipo *job shop*, pois se estima que nesse processo os trabalhos despendam 95% do tempo em atividades não produtivas, principalmente em filas. O tempo restante é usado no *setup* e no processamento (ASKIN; STANDRIDGE, 1993, p. 96). Portanto, o principal objetivo de simular um sistema de produção do tipo *job shop* é a redução de custos

operacionais, principalmente identificando as máquinas ou postos de trabalho onde está o gargalo do sistema, onde se formam as filas.

No entanto, com a utilização de simulação computacional pode-se trazer a realidade para dentro de um ambiente virtual, através da criação de um modelo que espelhe o mais próximo possível o comportamento de um processo (existente ou em fase de projeto) determinando como este sistema responderá a modificações que lhe são impostas.

Através da simulação computacional é possível, em um sistema de manufatura, identificar com maior precisão os pontos onde se localizam os desperdícios e gasto em excesso. Com a simulação é possível fazer um estudo do processo e realizar as alterações necessárias após análise dos resultados. Através do modelo computacional é possível testar soluções, avaliar o fluxo de peças que tramita pelas máquinas e estações de trabalho, identificar gargalos, examinar conflitos de demandas por recursos limitados, pode-se ainda avaliar leiaute, seleção de equipamentos e procedimentos de operações (CARSON, 2004); (MARIA, 1997).

Conforme exposto, pode-se afirmar que o uso da simulação computacional, não somente em empresas de grande porte, mas também de médio e pequeno porte, é fundamental para que as empresas permaneçam nesse mercado globalizado e competitivo, que sempre está em busca de soluções melhores para resolução de problemas ou melhorias de sistema.

Um fato que passou a contribuir ainda mais para melhores soluções foi o uso de métodos de otimização combinados com a simulação computacional a eventos discretos em diversas aplicações na área da manufatura. Durante a década de 90, a simulação e a otimização, na prática, eram mantidas separadamente (Fu, 2002). Atualmente, essa integração tem acontecido com frequência, principalmente devido a alguns pacotes de simulação já incluírem rotinas de otimização.

A otimização de modelos de simulação a eventos discretos busca solução ótima para problemas encontrados. Muitas heurísticas têm sido desenvolvidas para problemas de otimização que, apesar de não garantirem encontrar a solução ótima, mostram-se muito eficientes em complexos problemas práticos, encontrando solução que satisfaça a um critério de desempenho.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo do presente trabalho é de desenvolver um mecanismo para combinar um modelo de simulação de eventos discretos com um algoritmo de escalonamento para otimização de processo *job shop*. As principais variáveis para avaliação do mecanismo proposto foram: o fluxo de produção, *lead time* e a quantidade produzida da manufatura em um Leiaute Funcional.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Neste trabalho, o objetivo principal é estudar e avaliar o mecanismo desenvolvido para a fabricação de uma suposta bomba hidráulica. A bomba é composta por três itens de montagem que são as peças A, B e C. Esse estudo visa otimizar a produção de forma que as peças fiquem prontas no tempo certo e o conjunto seja montado no tempo certo. Essas peças ocupam máquinas operatrizes tais como torno fresadora, furadeira, mandrilhadora e outras. Portanto, buscou-se fazer uso da simulação juntamente com a otimização, aplicando o leiaute adotado pela empresa - Leiaute Funcional. Devido à diversidade de peças que são fabricadas e a quantidade de máquinas da empresa, optou-se em fazer o estudo em escala menor. Pretende-se diminuir o *lead time* da peça, gerando maior produtividade sem, contudo desprezar a “qualidade” que é um fator de sucesso para as empresas que querem manter competitivas no mercado atual.

Para isto foram empregadas duas medidas de desempenho:

- Capacidade de produção, referindo à quantidade de peças manufaturadas e prontas para ser entregue ao cliente ou para ser usada na montagem, em um período de tempo;
- tempo de fluxo (*lead time*), referindo-se ao tempo em que a peça demora em ser manufaturada até o seu final.

Finalmente, o objetivo, através dessa modelagem é:

- Obter melhor visualização do processo de manufatura auxiliado por escalonamento otimizado da produção;
- definir melhor os prazos de entrega das peças a serem fornecidas ao cliente;
- possibilitar que pessoas com pouco conhecimento em otimização/simulação possam utilizá-lo; e
- criar cenários para análise dos resultados até encontrar o satisfatório.

Portanto, dessa forma, espera-se minimizar o *lead time* e maximizar a quantidade de peças prontas e montadas. Com a otimização fornecendo o melhor fluxo, e a simulação mostrando o tempo de processo de cada peça, em cada máquina, com informações como filas, gargalos, etc. o resultado se apresenta.

#### 1.4 JUSTIFICATIVAS E CONSIDERAÇÕES

Este trabalho se justifica porque baseia na tendência mundial de busca de melhorias nos métodos de projeto, trabalho e de produção atuais, com ênfase nos subsistemas de programação, execução e controle. Esta busca é motivada e orientada pelas vantagens de se usar os computadores como ferramentas de modelagem, análise, simulação e otimização e não somente como base de dados. Os softwares existentes atualmente controlam o fluxo de peças na produção, alocam máquinas, identificam gargalos, e outros dependendo do sistema que estão gerenciando. Eles não otimizam o sistema escolhendo uma solução “ótima” para os problemas que possam surgir na simulação. No sentido de complementar mais a justificativa para este trabalho, apresentam-se os seguintes aspectos:

- Segundo Lucero (2001), a fabricação de pequenos lotes de peças que é a manufatura do tipo *job shop* é a menos produtiva dentro dos tipos de processos produtivos existentes. Este fato pode ser revertido usando técnicas mais eficazes para escalonamento e despacho da produção, tais como:
- A importância do papel exercido pela “programação” direcionado ao sistema de manufatura;

- o uso necessário da flexibilização da produção nas indústrias para atingir os objetivos da demanda dos produtos;

- a necessidade de concepção de modelos que atendam ao perfil desejado.

Portanto, o interesse desse estudo fica evidente abordando o problema de como fazer as coisas de forma estruturada, empregando o mínimo de recursos na transformação de matéria-prima em bens de consumo. Fazendo uso da simulação acompanhada da otimização, satisfazendo às necessidades da empresa e do cliente interno e externo.

## 1.5 ESCOPO DO TRABALHO

Algumas limitações são necessárias para que possam ser tratáveis os problemas envolvidos nos objetivos definidos neste trabalho.

Neste trabalho escolheu-se o setor metal-mecânico, especificamente uma indústria produtora de peças, por processos de fabricação, com atividades tipo *job shop*, que opera sob encomenda e são responsáveis pela fabricação do produto dentro de prazos e quantidades determinadas. Nesta empresa é típica a presença de vários tipos diferentes de peças.

Não foi considerado, aqui, que problemas relativos a espaço de armazenagem, matéria-prima disponível e quebras de máquinas teriam influência significativa sobre o processo. Tempos gastos em alguns fatores que foram parcialmente levados em consideração, estão acrescentado nos tempo dos processos. No entanto sua implicação em relação ao fluxo e a lógica não são ser percebidos no sistema. Contudo, o modelo desenvolvido permite que com a agregação de mais complexidade ao modelo de simulação proposto, algumas simplificações feitas possam ser aplicadas por elementos mais detalhados. O intuito desse trabalho foi de demonstrar a potencialidade das ferramentas e do método. Procurou-se simplificar ao máximo a modelagem do sistema.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado de forma que seja apresentado ao leitor o significado e a importância de citações como *leiaute*, *scheduling* de produção, *job shop*, modelagem, simulação, otimização e outros. Com esta apresentação pretende-se que o leitor consiga visualizar a importância de cada uma dessas citações no cenário atual, principalmente na área de manufatura.

Primeiramente, com a introdução contextualizou-se o assunto apresentado com definições gerais sobre sistema. Os objetivos estão sendo apresentados mostrando as justificativas do m proposto. Posteriormente, foi feita uma revisão de literaturas destacando o que se tem feito, principalmente no cenário de produção, para melhorar *lead time* de peças mantendo a qualidade e lucros satisfatórios. Nessa revisão de literatura, ao qual se refere ao capítulo 2, foram analisados artigos, dissertações e teses sobre:

- Simulação de sistemas, como modelagem e simulação; classificação dos sistemas; vantagens e desvantagens da simulação; metodologia para formulação de um projeto com modelo de simulação; principais softwares de eventos discretos; simulação de eventos discretos; simulação de eventos discretos no apoio a decisão; ferramentas e tecnologias da simulação e também a simulação como ferramenta de apoio à manufatura.

- Simulação de produção, como sistemas produtivos na manufatura e na saúde; manufatura e processo produtivo de uma fábrica falando de setores como a engenharia, de atividades como chão de fábrica e de negócios; interrelações entre atividades; manufatura enxuta; manufatura celular e manufatura discreta.

Leiaute, apresentando os tipos tradicionais que são: funcional ou por processo (*Job Shop*), em linha ou por produto (*Flow Shop*), por posição fixa e celular.

- Planejamento e controle de produção (PCP) destacando suas funções e limitações, suas atividades e sistemas utilizados.

- Scheduling da produção em *Job Shop* mostrando opiniões de autores sobre estudos feitos em métodos de escalonamento da produção, principalmente sobre esse processo.

- Otimização, destacando assuntos sobre métodos de otimização e otimização de modelos de simulação a eventos discretos.

Para finalizar o capítulo 2 foi feita uma conclusão sobre os temas citados.

No capítulo 3 trata-se da simulação/otimização de processo *Job Shop* destacando as características, vantagens, dificuldades e apresenta um método.

No capítulo 4 aplica-se a simulação com otimização em processo Job Shop apresentando a descrição física do sistema, o modelo de otimização, o modelo de simulação e o experimento com o método proposto.

No capítulo 5 se faz a conclusão do trabalho executado.

No capítulo 6 são feitas sugestões para trabalhos futuros.

No capítulo 7 se encontram as referências bibliográficas e no capítulo 8 estão os apêndices.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

A fundamentação teórica que deu suporte ao desenvolvimento do trabalho foi feita com a revisão de conceitos sobre o uso da Simulação em sistemas de produção como:

- Manufatura enxuta;
- manufatura celular;
- manufatura discreta;
- *scheduling* da produção em *Job Shop*;
- técnica de simulação para *scheduling* da produção em *Job Shop*;
- leiaute, mostrando seus conceitos e formas de avaliação do desempenho nas mudanças através de um modelo de simulação discreta da mesma; e
- métodos de otimização combinados com a simulação computacional a eventos discretos que têm sido utilizados em diversas aplicações na área da manufatura.

## 2.1 SIMULAÇÃO DE SISTEMAS

A simulação de sistemas ou simulação computacional trata da utilização de certas técnicas matemáticas, aplicadas em computadores, com o propósito de imitar um processo ou operação do mundo real. Através do exercício de modelos se estuda o comportamento do sistema.

### 2.1.1 Modelagem e simulação

Para toda e qualquer simulação, que é a técnica de solucionar um problema analisando um modelo que descreve o comportamento do sistema, usando um computador digital, há de se fazer uma modelagem do sistema.

- **Modelagem**

A modelagem pressupõe a criação ou descrição de um processo, geralmente envolvendo certo grau de abstração, na intenção de simplificar uma organização de um sistema real. Então, um modelo deve ter o nível de detalhamento ideal suficiente para atender às necessidades do experimento. Um modelo com muitos detalhes pode se tornar complexo e demorado, sendo difícil extrair informações úteis. Contudo, um modelo muito simples pode não ser capaz de fornecer os dados necessários.

Uma das vantagens da modelagem em um problema *Job-Shop Scheduling* (Descrição, definição das rotas, tempos de processamento e de inicialização de cada *job*, definição das máquinas que compõe o sistema e definição do objetivo do problema), é minimização do *makespan* (Na fabricação, é o tempo medido entre o início e o término de uma seqüência de trabalhos ou tarefas).

De acordo com Freitas (2001), dependendo da linguagem de simulação utilizada, podem-se citar basicamente três métodos de modelagem: por eventos, por atividade e por processos. Contudo, a modelagem por processos, em sua visão, é a forma mais lógica de modelagem porque é onde o programa do computador imita o

comportamento das entidades passando através do fluxo do sistema conforme as rotinas programadas para o cumprimento das atividades no processo.

### • Simulação

É um termo extremamente amplo. Segundo Schriber (1974) “simulação implica na modelagem de um processo ou sistema, de tal forma que o modelo imite as respostas do sistema real numa sucessão de eventos que ocorrem ao longo do tempo”. Para Shannon (1975), é definido como processo de elaboração de um modelo de um sistema real (ou hipotético) e a condução de experimentos com a finalidade de entender o comportamento de um sistema ou avaliar sua operação.

Para Pedgen *et al.* (1990), simulação é o processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação. Conceitualmente, Vieira (2003) descreve simulação como a tentativa de replicar ou imitar as formas do comportamento de um sistema, que já exista ou não, através da construção de um modelo matemático desenvolvido em um computador. Ainda, segundo Vieira (2003), a simulação procura modelar um sistema ou processo, dando apoio às tomadas de decisão, possibilitando a redução de riscos e de custos envolvidos em um processo de um projeto.

Na maioria das vezes, o modelo é implementado em um computador. Então, usualmente, o termo "Simulação" é sinônimo de "Simulação Computacional", pois embora esta possa ser efetuada manualmente, mas diante do número maciço de cálculos, o tempo gasto para tal seria inviável em termos práticos.

Com o uso crescente e necessário cada vez mais dos microcomputadores, o uso da simulação e sua aplicação tornaram-se comuns e práticos em vários segmentos de mercado. Segundo Garcia (1997), dentre as formas de aplicação da simulação de processos destacam-se o projeto de equipamentos, processos, plantas e seus respectivos sistemas de controle, cujos objetivos são: explorar o dimensionamento físico de equipamentos e componentes; estudar integrações de várias partes do processo; projetar a estratégia de controle; melhorar o entendimento do processo; fornecer uma ferramenta para desenvolvimento, teste e

qualificação de procedimentos; estudar os projetos de expansão e avaliar os requisitos de implementação.

No setor de manufatura, segundo Costa et al, (2008), a simulação computacional, nos últimos anos, tem sido usada em diversos trabalhos para:

- Criar cenários e analisar o desempenho de cada alternativa (O’KANE; SPENCELEY; TAYLOR, 2000);
- Otimizar em sistemas puxados (TORGA, 2007);
- Estudar, no sistema de manufatura, a influência de fatores humanos (BAINES et al., 2003);
- Estudar configurações de leiaute (SHANG; TADIKAMALLA, 1998);
- Identificar gargalos (LIMA; CHWIF; BARRETO, 2007);
- Aplicações em conjunto de Custeio Baseado em Atividades (SPEDDING; SUN, 1999);
- Aplicações em conjunto com Projetos de Experimentos (DOE) (MONTEVECH *et al.*, 2007; SANCHEZ, 2007 e KLEIJEN, 2005).

Os recursos computacionais atuais permitem a visualização dos resultados que são importantes no processo de tomada de decisões uma vez que experiências no sistema real dificilmente podem ser repetidas com os aspectos relevantes para a observação detalhada do seu comportamento. Devido à transformação das condições do mercado, a cada dia, e em velocidades crescentes, as indústrias devem mudar os seus métodos de produção para se ajustar às novas exigências impostas pelo mercado. O ciclo de vida e o ciclo de produção dos produtos devem ser curtos e a produção flexível, estando pronto para atender a uma demanda instável, de acordo com os requerimentos dos clientes (BROWN, 1996).

Atualmente, para se obter sucesso com um produto e continuar competitivo em uma economia cada vez mais competitiva, a empresa deve satisfazer e transformar em produtos os desejos e necessidades de seus clientes. A troca de informações tem um papel importante para se conseguir uma manufatura ágil, que atenda ao mercado eficientemente. Na tentativa de tais objetivos, novas tecnologias são desenvolvidas. Devido à alta complexidade e elevados custos destas novas tecnologias, torna-se arriscado investir em novos sistemas. Portanto, as empresas buscam métodos alternativos para:

- Avaliar, comparar e explicitar o desempenho destes novos sistemas; e
- Auxiliar na decisão pela melhor alternativa, muitas vezes de forma improvisada ou por técnicas empíricas.

Para realização desta importante tarefa, existem ferramentas computacionais que a cada dia se tornam mais capazes de fornecer elementos confiáveis sobre o desempenho destas novas tecnologias de forma prática, rápida e confiável (LEPIKSON, 2001). São as ferramentas de simulação, eficientes e relativamente acessíveis, possibilitando a visualização do sistema em funcionamento antes mesmo deste ter sido implementado. Tais ferramentas fornecem recursos de auxílio ao planejamento da produção, gerenciamento, controle estatístico e simulação, dentre muitos outros.

### **2.1.2 Classificação dos sistemas**

Os sistemas podem ser definidos como “um conjunto de objetivos, entre os quais se podem encontrar ou definir algum tipo de relação, que atuam e interagem com a intenção de alcançar algum objetivo ou propósito lógico” (TAYLOR, 1970).

Segundo Freitas (2008), podem ser classificados em Estáticos e Dinâmicos. Os sistemas Dinâmicos podem ser classificados em Determinísticos e Aleatórios (estocásticos). Os sistemas Aleatórios podem ser classificados em Contínuos e Discretos.

Nos modelos Discretos, as variáveis de estado mantêm-se inalteradas ao longo de intervalos de tempo, mudando seus valores em pontos bem definidos do sistema. Vale salientar que os intervalos de tempo têm que mudar seu valor somente nos pontos permitidos para que o modelo seja Discreto.

Nos modelos Contínuos as variáveis de estado variam continuamente ao longo do tempo. Pode exemplificar uma caixa de água baixando seu nível quando o tampão é retirado ou a torneira é aberta.

Também há a possibilidade de modelagem mista nas quais as variáveis dependentes do tempo podem variar de maneira Contínua ou de maneira Discreta ao longo do tempo.

O sistema referido nessa dissertação é classificado como Dinâmico, pois as variáveis de estado - número de peças aguardando na fila para serem processadas na máquina, ou ainda, máquina livre ou ocupada - se modifica à medida que o tempo evolui. São Aleatórios ou Estocásticos, pois os possíveis estados das variáveis podem ser descritos, mas não predeterminados. Finalmente, são classificados, também, como Discretos, pois as mudanças de estado não ocorrem de forma contínua e sim em pontos Discretos.

### **2.1.3 Vantagens e desvantagens da simulação**

As listas de vantagens e desvantagens são baseadas nos textos de Pegden (1991) e Bankes (1984).

Dentre várias vantagens serão citadas algumas mais importantes como, por exemplo:

- Após criar um modelo de simulação, o mesmo poderá ser usado várias vezes para avaliar projetos e políticas propostas;

- com todos os detalhes que os modelos de simulação têm semelhantes aos sistemas reais, novas políticas e procedimentos operacionais, fluxos de informação, regras de decisão, etc. podem ser avaliados sem que o sistema real sofra alguma perturbação;

- pode-se controlar o tempo, comprimindo ou expandindo, permitindo a reprodução dos fenômenos de maneira lenta ou rápida, de modo que possa estudá-lo melhor;

- aplicar a simulação é geralmente mais fácil que os métodos analíticos;

- hipóteses podem ser testadas para confirmação;

- compreendem-se melhor quais variáveis são mais importantes em relação ao desempenho e como as mesmas interagem entre si e com os outros elementos do sistema;

- um estudo de uma simulação de um sistema bem modelado, mostra como realmente o sistema opera, e que muitas vezes é bem diferente da maneira como se pensa que ele opera;

- consegue-se identificar os “gargalos” que é a maior preocupação no gerenciamento operacional de vários sistemas, tais como fluxo de materiais, de informações e de produtos. Tais fatos podem ser visualizados na simulação.

Apesar das inúmeras vantagens, ainda existem algumas dificuldades consideradas como desvantagens como, por exemplo:

- Na construção de um modelo envolve uma arte e requer treinamento especial. O aprendizado se dá ao longo do tempo com a soma de experiências adquiridas. É natural que dois indivíduos competentes construam, cada um, um modelo de um mesmo sistema e apesar da similaridade entre eles (os modelos), jamais serão iguais;

- muitas vezes, os resultados da simulação, são difíceis de serem interpretados. Os modelos sempre tentam capturar a variabilidade do sistema, portanto é comum ter dificuldades em determinar em que momento uma observação realizada durante uma execução tem relação significativa com o sistema ou a processos aleatórios embutidos no modelo;

- devido à modelagem e experimentação associadas a modelos de simulação consumir muitos recursos, principalmente tempo, a tentativa de simplificá-los, objetivando economia de recursos costuma levar a resultados insatisfatórios. Muitas vezes a aplicação de métodos analíticos (como a teoria das filas, por exemplo) pode trazer resultados menos ricos e mais econômicos.

#### **2.1.4 Metodologia para formulação de um projeto com modelo de simulação**

As fontes sobre este assunto são os textos clássicos de Banks (1984), Law e Kelton (1991), Pegden (1990) e Kelton e Sandowski (1997) que são:

##### **Etapas de Planejamento.**

► **Formulação e análise do problema:** é com a formulação do problema que todo estudo de simulação inicia. Devem ter seus propósitos e objetivos claramente bem definidos. Devem poder responder questões do tipo:

- porque o problema está sendo estudado?

- porque é necessário estudar o problema?
- quais as respostas alcançadas pelo estudo?
- quais são os critérios que serão usados para avaliar a desempenho do sistema?

- quais são as hipóteses e prerrogativas?
- quais restrições e limites que surgirão das soluções obtidas?

► Planejamento do projeto: é executada para se ter a certeza de que os recursos existentes, como pessoal, suporte, gerência, hardware e software são suficientes para realização do trabalho. Também, no planejamento deve ser descrito os vários cenários que serão investigados, devendo haver um cronograma de tempos das atividades desenvolvidas, indicando os custos e necessidades relativas aos recursos citados anteriormente.

► Formulação do modelo conceitual: É recomendado que o modelo se inicie de forma simplificada traçando um esboço do sistema, de forma gráfica ou algorítmica descrevendo as variáveis e interações lógicas e definindo os componentes do sistema. Após esse início simplificado o sistema vai crescendo até alcançar algo mais complexo que contemple as suas peculiaridades e características. Essa etapa deve ter a participação intensa do usuário com respostas para algumas questões como, por exemplo:

- qual deve ser a estratégia de modelagem? Deve ser Discreta, deve ser Contínua? Deve ser uma combinação das duas (Mista)?
- que quantidade de detalhes deve ser inserida no modelo?
- como o modelo apresentará os resultados, os relatórios pós-simulação e as animações durante a execução?
- qual nível de personalização de cenários e ícones de entidades e recursos deve ser implementado?
- que nível de agregação dos processos ou de alguns deles deve ser praticado?
- de que forma os dados serão colocados nos modelos? Manualmente ou por meio de leitura de arquivos?

## **Etapas de modelagem**

► Coleta de macro informações e dados: macro informações são fatos, informações e estatísticas, que são coletadas através de observações, de experiências pessoais ou de arquivos históricos. São macros informações que, em geral, conduzem os futuros esforços de coletas de dados para alimentação de parâmetros do sistema modelado. Apresentam algumas questões que são:

- quais são as fontes dos dados que necessitam para alimentação do modelo?

- que relações e regras conduzem à dinâmica do sistema?
- os dados se encontram na forma desejada?
- os dados relativos a custos e finanças se encontram na forma desejada?

► Tradução do modelo: o modelo deve ser codificado numa linguagem de simulação apropriada. Apesar de que atualmente essa etapa tenha sido minimizada, devido a avanços em hardware e principalmente em software de simulação, algumas questões devem ser respondidas como:

- quem traduzirá o modelo conceitual para linguagem de simulação? Seria fundamental a participação do usuário não sendo ele o responsável direto pelo código.

- de que forma será feita a comunicação entre os responsáveis pela gerência do projeto e a programação?

- e referente à documentação? Os nomes de variáveis e atributos estão documentados? O programa está claro de forma que outros analistas conseguirão entender?

► Verificação e validação do modelo: ter a confirmação que o modelo está operando conforme a intenção do analista e os resultados tenham crédito e representem os resultados do modelo real. As principais questões nessa etapa são:

- as informações geradas pelo modelo satisfazem os objetivos do estudo?
- o modelo gera informações confiáveis?
- há confirmação que o modelo está isento de erros de programação, após aplicação de testes de consistência e outros testes?

## **Etapas de experimentação**

► Projeto experimental final: deve-se projetar um conjunto de experimentos e determinar como cada um deve ser realizado de forma a produzir as informações desejadas. O objetivo principal é obter as informações desejadas com o mínimo de experimentações. As questões principais são:

- quais devem ser os principais fatores relativos ao experimento?
- em que níveis devem estar às variações dos fatores para que se possam avaliar melhor os critérios de desempenho?
- qual deve ser o projeto experimental mais adequado às respostas desejadas?

► Experimentação: simular o modelo para geração dos dados desejados e para realização das análises de sensibilidade.

► Interpretação e análise estatística dos resultados: devem-se traçar inferências sobre os resultados obtidos pela simulação. Após analisar os resultados pode haver necessidade de um maior número de execuções (replicações) do modelo para que se obtenha precisão estatística sobre os mesmos. Também existem questões que precisam ser respondidas como, por exemplo:

- o sistema modelado é do tipo terminal ou não terminal?
- quantas replicações se devem executar?
- quanto tempo deve ser o período simulado para que se possa atingir o seu estado de regime?
- qual deve ser o período de *warm-up*?

## **Tomada de decisão e conclusão do projeto**

► Comparação e identificação das melhores soluções do sistema: o emprego da simulação, muitas vezes, visa identificar as diferenças existentes entre diversas alternativas de sistemas. Em outras situações, o objetivo é comparar um sistema existente ou considerado como padrão, com propostas alternativas. Também existem casos que a idéia é a comparação de todas as respostas entre si, objetivando identificar a melhor ou a mais adequada. As questões são:

- como fazer esse tipo de análise?

- como deve ser o procedimento para se comparar alternativas com um padrão?

- qual deve ser o procedimento para comparar todas as alternativas entre si?
- como identificar a melhor alternativa?
- como garantir os resultados estatisticamente?

► Documentação: sempre é necessária. Serve como guia, registrando todos os resultados obtidos, de experimentos já realizados. Caso haja a necessidade de modificar o modelo, o registro da documentação anterior vem facilitar os novos trabalhos. Pode-se dizer que os documentos citados abaixo devem fazer parte da documentação final de um projeto de simulação:

- descrição dos objetivos e das hipóteses levantadas;
- conjunto de parâmetros de entrada;
- descrição das técnicas e métodos adotados na verificação e na validação;
- descrição do projeto de experimentos e do modelo fatorial de experimentações empregadas;
- resultados obtidos e descrição dos métodos de análise usados;
- conclusões e recomendações. É fundamental descrever os ganhos obtidos monetariamente.

Finalmente deve ser apresentado os resultados e a implementação. Essa apresentação deve ser realizada por toda a equipe participante.

#### **v – Erros mais comuns no emprego da simulação**

- Pouco conhecimento ou pouca afinidade com a ferramenta utilizada.
- Objetivos com pouca clareza ou definição.
- Construção de modelos muito detalhados.
- Realização de conclusões com base em uma só replicação

### 2.1.5 Principais interfaces gráficas de simulação de eventos discretos

Existem atualmente dezenas de simuladores disponíveis mundialmente. Eles diferem muito quanto as suas capacidades, flexibilidade e facilidade de uso. Os principais simuladores comerciais disponíveis no mercado brasileiro e os mais comuns em uso nas universidades são: Arena, AutoMod e Promodel. A tabela 1 mostra esses simuladores e suas características.

Tabela 1 - Características de alguns simuladores TORRES(2001).

<b>Característica</b>	<b>Arena</b>	<b>Promodel</b>	<b>AutoMod</b>
Construção da lógica	Associação de blocos de código a partir de <i>templates</i>	Uso de tabelas e de linguagem própria	Construção de procedimentos em linguagem própria e Linguagem C
Construção da animação (representação gráfica do sistema)	Modelador embutido indissociável	Uso de modelador interno indissociável	Uso de modelador interno indissociável
Criação de relatórios	Configuração definida na lógica	Configuração definida na lógica	Configuração definida na lógica
Interação com outros sistemas	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Linguagem C</li> <li>▪Linguagem <i>Visual Basic for Application</i></li> <li>▪Troca de arquivos texto e binários, planilhas, etc.</li> <li>▪DDE</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Linguagem C</li> <li>▪Linguagem <i>Visual Basic for Application</i></li> <li>▪Troca de arquivos texto e binários, planilhas, etc.</li> <li>▪DDE</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Linguagem C</li> <li>▪Linguagem <i>Visual Basic for Application</i></li> <li>▪Troca de arquivos texto e binários, planilhas, etc.</li> <li>▪DDE</li> </ul>
Projeto de experimentos e otimizadores	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Variação de parâmetros e projeto de experimentos</li> <li>▪Construção de cenários</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Variação de parâmetros e projeto de experimentos</li> <li>▪Construção de cenários</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Variação de parâmetros e projeto de experimentos</li> <li>▪Construção de cenários</li> </ul>
Interfaces com sistemas de CAD e precisão dimensional	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Importação</li> <li>▪Representação Icônica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Importação</li> <li>▪Representação Icônica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Importação / Exportação</li> <li>▪Dimensões precisas</li> <li>▪Conversão automática de unidades</li> </ul>
Representação de sistemas de manuseio de materiais e de máquinas e seus componentes	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Somente desempenho</li> <li>▪Representação Icônica (bitmaps 2 e ½ D)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Somente desempenho</li> <li>▪Representação Icônica (bitmaps 2 e ½ D)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Simulação do desempenho</li> <li>▪Simulação com limitações de movimentos</li> <li>▪Representação com precisão dimensional</li> </ul>

### 2.1.6 Simulação de Sistemas de Produção

Para Law e Kelton (1991), o benefício geral aplicando a Simulação à produção é que permite ao engenheiro ou gerente obter uma visão sistêmica do efeito que alterações locais terão sobre o desempenho global do sistema de produção. “Se uma mudança ocorre numa estação em particular, o impacto em seu desempenho é previsível. Caso contrário seria quase impossível determinar antecipadamente o impacto dessa mudança no desempenho do sistema”.

Law e Kelton (1991) identificam três categorias gerais de problemas em produção que podem ser solucionados com auxílio da Simulação. Tais como: dimensionamento de recursos físicos e mão-de-obra, avaliação do sistema e avaliação de decisões operacionais. Portanto qualquer que seja o problema a ser atacado é de grande importância à determinação de medidas de desempenho adequadas como, por exemplo: capacidade de produção; tempo de fluxo; inventário em processo; pontualidade de entrega; utilização de recursos; situação de recursos

### 2.1.7 Simulação de Eventos Discretos

A modelagem por simulação a eventos discretos, tem se tornado uma das técnicas de análise de sistemas complexos de manufatura mais aplicadas e de melhor custo benefício (BANKS *et al.*, 2005; O’KANE, SPENCELEY, e TAYLOR, 2000).

Eventos referentes a esse trabalho são as chegadas de peças, início do processamento e a saída de peças (ou peças prontas) do sistema. O que caracteriza a simulação a eventos discretos é o fato do tempo da simulação ser descontínuo. Ele anda aos saltos. É como que um evento *EA* ocorra no instante *TA* do tempo simulado e foi sucedido pelo evento *EB*, o qual ocorreu no instante *TB* do tempo simulado. Se não aconteceu nenhum evento de interesse entre *EA* e *EB*, então o tempo simulado pulou de *TA* diretamente para *TB*.

Na simulação de eventos discretos procuram-se representar o sistema através de um conjunto de entidades, que neste caso são as peças que se

movimentam pela fábrica, cada uma possuindo determinados atributos. Essas entidades são os elementos responsáveis por executarem atividades no sistema. Contudo, para além destes dois elementos básicos (peças e máquinas), através dos quais é perfeitamente possível criar um modelo discreto, outros elementos se tornaram importantes com o desenvolver das técnicas de simulação, sendo os de maior relevo os eventos e as filas de entidades.

Os modelos discretos mudam instantaneamente de um estado para outro. Para esse tipo de modelo tem-se como exemplo a existência ou não de um lote de peças. Todo lote está pronto ou nenhuma peça está pronta, quando na realidade as peças são processadas uma a uma. Outro exemplo típico é o desgaste da ferramenta de usinagem. Não se considera o desgaste como contínuo, o que seria correto, mas se considera duas situações apenas: ferramenta quebrada ou não. Portanto, os modelos discretos são apropriados para simulação da manufatura.

### **2.1.8 Simulação de eventos discretos no Apoio à Decisão**

De acordo com Falsarella e Chaves (2004), os Sistemas de Informação (SI) do tipo Sistema de Apoio à Decisão (SAD) surgiu na década de 70, em decorrência de diversos fatores, como por exemplo: Necessidade de informações rápidas para auxiliar no processo de tomada de decisão; Possibilidade de armazenar o conhecimento e as experiências de especialistas em bases de conhecimentos; Disponibilidade de tecnologias de hardware e software para armazenar e buscar rapidamente as informações; Competição cada vez maior entre as organizações; Necessidade de a informática apoiar o processo de planejamento estratégico empresarial. Esses fatores contribuíram para que as organizações começassem a desenvolver SI que pudessem fornecer informações para auxiliar no processo de tomada de decisão.

Existem muitas definições que são contraditórias e que podem, inclusive, ser confundidas com definições de outros tipos de SI. A literatura disponível sobre SAD não deixa muito claro o que vem a ser um SAD. Serão ilustradas três definições como, por exemplo: "SAD é um sistema de informação que apóia qualquer processo de tomada de decisão em áreas de planejamento estratégico, controle gerencial e

controle operacional" (SPRAGUE, 1991 citado por FALSARELLA; CHAVES, 2004). "SAD é um sistema baseado em computador que auxilia o processo de tomada de decisão utilizando dados e modelos para resolver problemas não estruturados" (LUCAS, 1990 citado por FALSARELLA; CHAVES, 2004). "ASD é uma estratégia de implementação que torna o computador útil ao gerente" (ROCKART; BULLEN, 1986 citado por FALSARELLA; CHAVES, 2004).

Os SADs suportam várias funções organizacionais, e uma delas é a manufatura. Portanto, conforme Laudon e Laudon (2004), os SADs auxiliam o processo de decisão gerencial combinando dados, ferramentas e modelos analíticos sofisticados e software amigável ao usuário em um único e poderoso sistema. Fornecem aos usuários um conjunto flexível de ferramentas e capacidade para analisar dados relevantes. De acordo com Sprague e Watson (1995) e Sauter (1997), os três componentes dos sistemas de apoio à decisão são:

- a) Interface: engloba o banco de conhecimento, a linguagem de apresentação e a linguagem de ação;
- b) dados: devem possuir uma idade adequada à situação de decisão em questão, não possuir viés, serem confiáveis e relevantes ao processo decisório, entre outros aspectos;
- c) modelo: é uma simplificação do fenômeno com o objetivo de entender a seu comportamento. Pode ser descrito por meio das dimensões: representação, tempo e metodologia.

Turban *et al.* (2005, p.365) ampliam a visão dos componentes do SAD adicionando os subsistemas baseados em conhecimento em sistemas avançados, como segue:

- i) Subsistema de gerenciamento de dados;
- ii) Subsistema de gerenciamento de modelos;
- iii) Interface com o usuário;
- iv) Usuários; e
- v) Subsistemas baseados no conhecimento.

Destaca também a existência de tipos emergentes de SAD. Os SADs de linha de frente correspondem à automatização dos processos de decisão pelas empresas, transferindo-os para parceiros ou para níveis inferiores da organização.

Os sistemas de apoio à decisão, geralmente adotados, são incapazes através de medidas realizadas no próprio sistema, prever o comportamento futuro do mesmo

para adotar automaticamente oportunidades de melhoria. São incapazes de realizar uma avaliação quantitativa de um conjunto de melhorias propostas, e apontar a melhor.

Utilizando-se a simulação de eventos discretos como suporte desses processos decisórios soluciona-se a deficiência encontrada nos outros sistemas de apoio a decisão, ou seja, quantifica-se o efeito de cada decisão analisada. Exemplificando, quando a configuração do sistema deixa de atender uma demanda devido ao aumento da mesma, é possível simular o modelo do sistema real e identificar a restrição que impede o aumento da capacidade do sistema. Pode, finalmente, auxiliar no processo de análise das possíveis soluções para a remoção ou aumento da capacidade da restrição.

Portanto, a simulação de eventos discretos tem-se revelado uma ferramenta de uso diário na gestão da produção. A simulação de eventos discretos se aplica melhor quanto mais for à questão a ser estudada. Por exemplo, quando é detectado um problema de chão de fábrica, fica mais simples, com a simulação de eventos discretos, compararem as possíveis soluções encontradas. Também, torna-se maior a possibilidade de determinar quais medidas de desempenho deve ser utilizada para definir qual das soluções é a melhor.

A simulação é capaz de integrar-se às várias tecnologias de informação utilizadas na gestão da produção, inclusive podendo tornar-se um sistema automático sendo alimentado pelos outros sistemas de informação.

A Simulação foi utilizada neste trabalho como ferramenta que reúne informações referentes ao sistema para analisar seus comportamentos por meio de modelos antes de sua aplicação real. Segundo Freitas (2001), a abordagem do método empregado na modelagem é visto pelos especialistas em simulação nada mais que a realidade do sistema.

Hiller e Lieberman (1997), descrevem como objetivos da simulação, a eliminação das inviabilidades econômicas e os gastos de tempo para que as estratégias empresariais sejam implementadas, ou efetuar as modificações sucessivas no sistema real, para só depois estimar se os parâmetros de desempenho foram satisfatórios.

A simulação está cada vez mais, fazendo parte do cotidiano dos analistas, sendo mais aceita e vista como uma técnica/ferramenta para verificar e encaminhar soluções aos problemas encontrados nos mais diversos segmentos industriais.

### 2.1.9 Ferramentas e Tecnologias de Simulação

Encontram-se, no mercado, várias ferramentas e tecnologias para simulação, o que torna o processo de escolha correta um problema. O sucesso ou o fracasso do projeto depende da escolha correta.

As linguagens de programação genéricas ou convencionais, as linguagens de simulação e os simuladores (Software dedicado) são tecnologias candidatas a executarem uma simulação.

Em todas, existem vantagens e desvantagens. As linguagens de programação genéricas têm um nível de flexibilidade muito elevado e exigem do modelador, conhecimentos de programação, bem como muito mais tempo para a criação do modelo do que as alternativas. São exemplos destas linguagens o C, C++, Java, FORTRAN e Pascal.

Elas foram criadas especificamente para a criação de simulações e por isso têm a vantagem de estar direcionada para a área. Entretanto, como um requisito para a construção da simulação, mantém-se a necessidade de conhecimentos de programação. Algumas, nas diversas linguagens disponíveis, foram criadas para certas áreas, outras são mais genéricas e abrangem mais mercados. São exemplos de tipos de linguagens o SIMAN, GPSS, DYNAMO, Simula e SIMSCRIPT.

Os simuladores surgiram para facilitar a criação de modelos de simulação. Apesar de serem precisos alguns conhecimentos ao nível da programação do simulador, este conhecimento é muito pequeno se comparado com as alternativas anteriores e em muitos casos a interface do simulador com o modelador quase que elimina este requisito. Porém, grande desvantagem destas ferramentas é o seu elevado custo quando comparado com o custo (ou custo zero em alguns casos) das mencionadas acima. A flexibilidade na modelação do sistema é muito menor nos simuladores, no entanto o tempo de concepção dos modelos é muito mais rápido que em qualquer uma das alternativas. Dentro deste mercado existem algumas hipóteses, umas mais genéricas, outras mais específicas em certas áreas. Como exemplos de simuladores temos o Rockwell Arena, Simulink, AMESim e AnyLogic.

### 2.1.10 A simulação como ferramenta de apoio à manufatura

A Simulação é um dos mais importantes instrumentos de previsão de um sistema de manufatura. A simulação ajuda na convergência dos investimentos que minimize desperdícios e reduza gastos.

Os principais tipos de simulação são a matemática, experimental e a computacional. Segue algumas de suas principais características (AKBAY, 1996):

- Matemática – os resultados oferecidos são bons, pois fornece respostas ideais trabalhando pouco com as equações. Mas, também, pode não se conseguir resolver a equação ou não ser possível resumir a dinâmica do sistema em uma equação.
- Experimental – a dificuldade de se implementar esse método é devido ao número de configurações alternativas que podem ser testadas ser pequeno, e também, ser demorado e caro. Esse método torna-se inviável quando se trata de sistema que ainda estão sendo criados.
- Computacional – a variabilidade no sistema real pode incorporar-se com facilidade na modelagem associando-se distribuições aleatórias às entradas do modelo. Não se limita a equações para descrição da dinâmica do sistema. Portanto faz-se necessário o tratamento estatístico dos dados obtidos. Também é preciso realizar muitas tentativas para descobrir qual o melhor sistema, o que pode levar muito tempo.

Algumas etapas devem ser seguidas para se obter um modelo que explicita as características do sistema real. São elas: a análise do sistema; modelagem e programação onde se faz validação do modelo, análise de sensibilidade e geração de aleatórios.

Concluídas todas as etapas, tem-se a certeza de que o sistema operacional foi bem representado tornando possível a aquisição de dados fundamentais para o estudo da otimização. Estes também poderão ser exportados para outras ferramentas, onde serão analisados por diferentes aspectos.

Referindo a integração de tecnologia, o intercâmbio de informação entre os softwares não é tão simples, principalmente devido à incompatibilidade de formatação existente entre as estruturas de dados dos diferentes sistemas e a forma com que acessam as informações, tornando ainda mais difícil a comunicação.

Conclui-se que métodos eficazes de importação, exportação e formatação de dados seriam de grande utilidade, reduzindo o tempo normalmente gasto com esta etapa e, conseqüentemente, aumentando o poder das ferramentas e reduzindo os custos. O problema que persiste é o de garantir a transposição confiável dos dados, por que inclui assegurar a integração dos sistemas.

## 2.2 SISTEMAS DE PRODUÇÃO

### 2.2.1 Sistemas produtivos/Manufatura

Um sistema produtivo ou de manufatura pode ser representado por um conjunto de dispositivos físicos, computadores e pessoas, todos em operação para realizar uma tarefa produtiva (FREIDRICH; STANGE, 1997). Também pode ser genericamente definido como sendo um elemento capaz de transformar recursos de entrada (*inputs*) em produtos e/ou serviços como saída (*outputs*), conforme Figura 1.

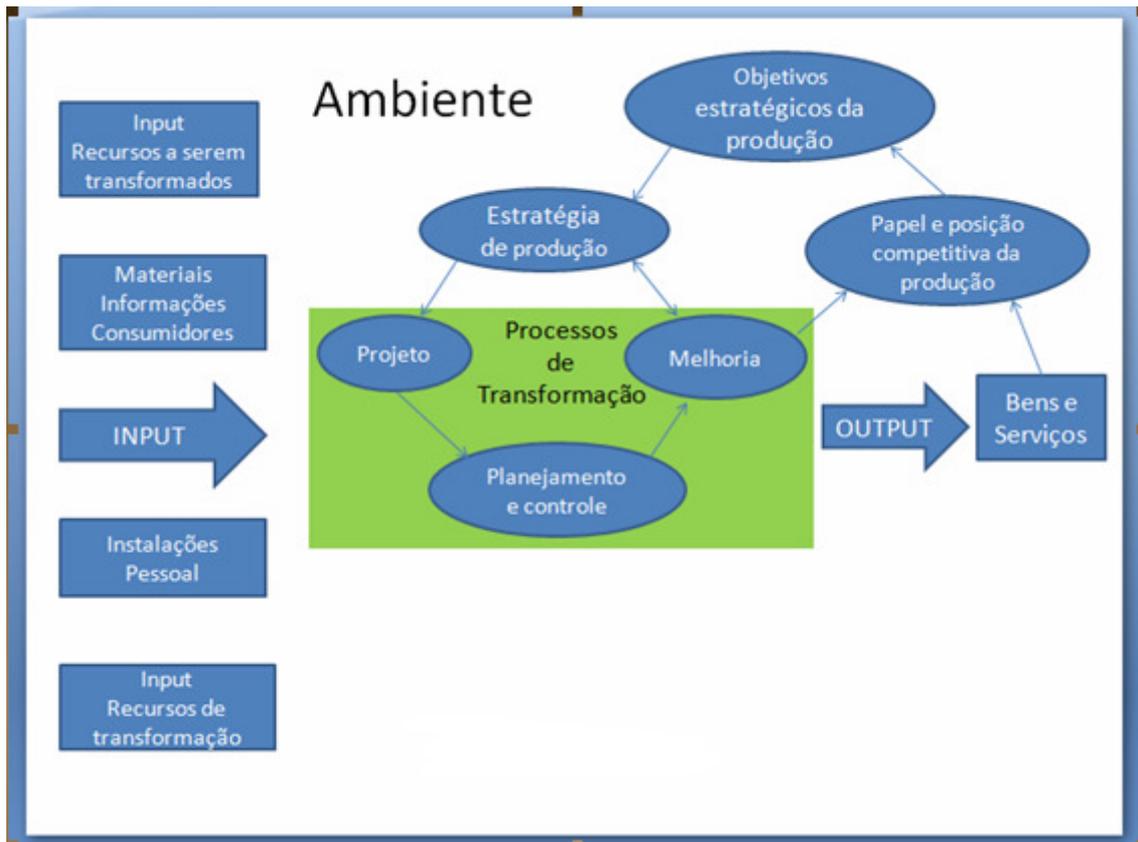


Figura 1 - Modelo geral da administração de produção adaptado de (SLACK et al, 1997).

O conceito de sistema produtivo é mais amplo, abrange também outras funções além da manufatura.

Esse modelo ilustrado na Figura 1 pode ser aplicado em qualquer atividade de produção (*input* – transformação - *output*).

Pode-se citar uma ampla variedade de operações como de: dentista, loja de departamentos, gráfica, polícia, linha aérea, fabricante de alimentos, fabricante de automóveis, dentre outros. Serão destacados dois que sem uma análise mais profunda parecem ser completamente diferentes.

#### 2.2.1.1 Sistema produtivo na saúde

Pode-se citar um exemplo aparentemente estranho, mas os hospitais possuem *inputs* de médicos, enfermeiras e outros equipamentos da área médica;

camas, equipamentos médicos, funcionários de limpeza, produtos farmacêuticos, administradores, etc. Seu propósito é transformar os pacientes doentes em pessoas saudáveis. Os *outputs* da operação são os pacientes tratados, pesquisa médica, resultados de exames médicos e procedimentos médicos práticos. A natureza desse processo não é diferente dos outros. O hospital trabalha com diagnóstico, processos assistenciais e terapêuticos (conjuntos separados de instalações, prédios, máquinas e outros que também aplicam tecnologias de processos). Os funcionários e a tecnologia de um hospital transformam os próprios consumidores. Os pacientes são partes do *input* de produção – são eles que serão “processados” (SLACK et al, 1997).

#### 2.2.1.2 Sistema produtivo em fábrica de automóveis

A natureza dos processos contidos na ampla variedade de operações é diferente. A fábrica de automóveis possui *inputs* da produção que são funcionários e instalações agindo sobre, conformação de metais, corte de chapas e processos de montagem. A fábrica de automóveis, usando seus funcionários e instalações transformam aço, pneus, plásticos, tecidos e outros (*inputs*) em veículos (*outputs*) que serão entregues aos consumidores.

Pode-se dizer que somente a natureza dos seus *inputs* é a diferença entre as duas operações. As duas possuem "funcionários" e "instalações" como *inputs* da produção agindo sobre coisas bem diferentes.

#### 2.2.2 Manufatura em processo produtivo de uma fábrica

Planejar e controlar com eficiência a produção exige, necessariamente, um conhecimento em tempo real da situação do sistema da produção (DURAN; BATOCCHIO, 1997). Os dados de entrada podem ser materiais em bruto e/ou dados como programas de CNC de peças que devem ser processados. Esses dados utilizam também de vários componentes auxiliares do sistema como, por exemplo,

ferramentas de corte, dispositivos de fixação e sensores de dados para retorno de informações.

A relação entre os dados de entrada, os estágios de fabricação e saídas ou resultados se dão na forma de informações de entrada e *feedback*. Os controles executados em um sistema de manufatura sejam controles de qualidade ou controles de produção são caracterizados pelo fluxo de informações entre os dados de entrada e saída processo.

Como um todo, o sistema de manufatura recebe informações e influências externas, assim como as devolve na forma de *feedback*. Essas inter-relações estão esquematizadas na Figura 2

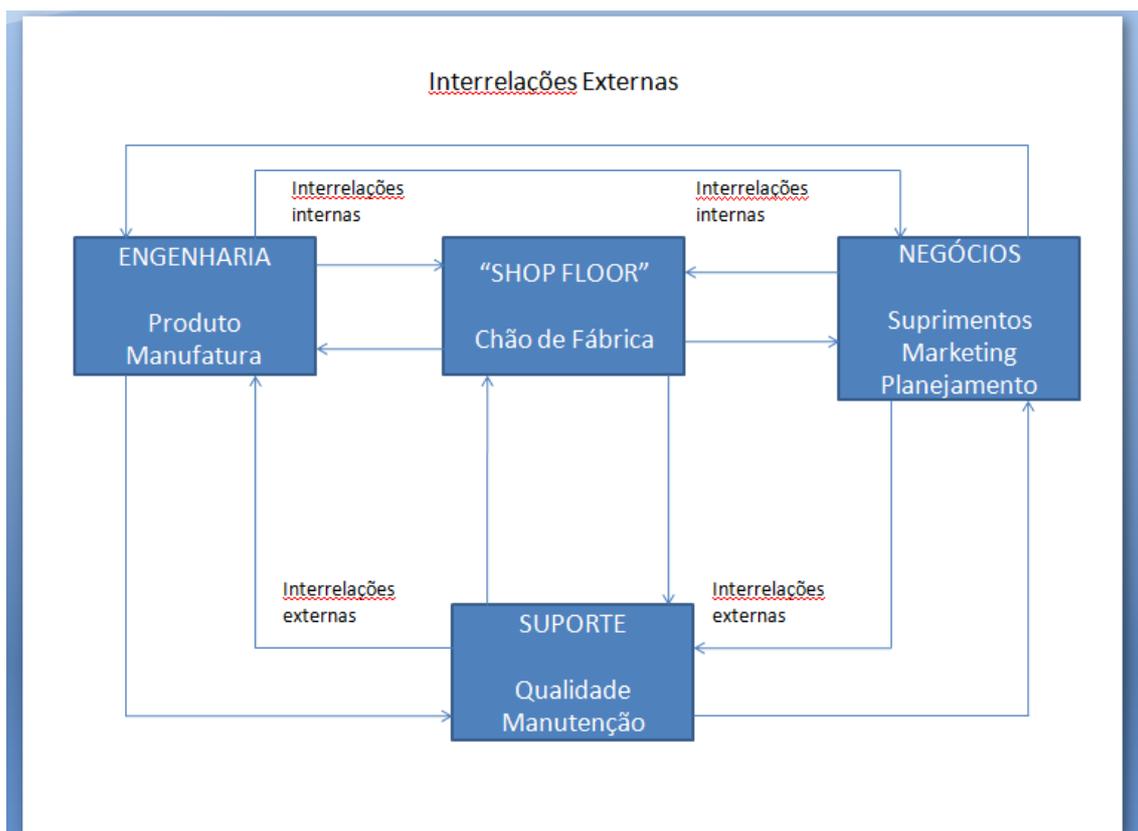


Figura 2 - Modelo conceitual de Manufatura (AGOSTINHO, 1994).

Definindo manufatura como sistema, o mesmo pode ser entendido como composição dos seguintes elementos básicos:

### 2.2.2.1 Setor de Engenharia

O setor de engenharia é responsável pela criação e desenvolvimento dos produtos a serem fabricados. É responsável também pelo desenvolvimento dos meios de produção necessários como processos de fabricação, ferramental e equipamentos. Este setor deve englobar as Engenharias de Produto e Fabricação.

### 2.2.2.2 Atividades de Chão de Fábrica (*Shop Floor*)

As atividades de “chão de fábrica” ou (*Shop Floor*) são responsáveis pela fabricação do produto dentro dos prazos e quantidades determinadas. Além de máquinas e equipamentos, possuem também como recursos disponíveis, a mão-de-obra direta, representada pelos “operadores”. Como mão de obra indireta, são os “suportes relacionados diretamente com a produção”.

Tais suportes às atividades de chão-de-fábrica têm a função de manter o seu desempenho e características, tanto de qualidade, como operacionais dos equipamentos.

No chão-de-fábrica, algumas funções básicas devem ser realizadas para que o objetivo principal seja atingido que é a transformação de matéria prima em produto final. Estas funções envolvem processamento; montagem; armazenamento e manuseio de material; inspeção e teste; e controle. As quatro primeiras funções dizem respeito às atividades físicas que se relacionam diretamente com o produto sendo fabricado. A função de controle é necessária para coordenar e regular as atividades físicas dos vários dispositivos que existem no chão-de-fábrica.

### 2.2.2.3 Atividades de Negócio

A atividade de Negócios deve ser um elo onde acontece a inter-relação do sistema de manufatura, com o mundo exterior que é o mercado consumidor

(clientes) e mercado supridor (fornecedores). Assim esta atividade compreende as atividades de marketing, suprimentos e planejamento.

Portanto a atividade de planejamento e controle de produção deve ser responsável pela ligação da atividade de negócios ao chão de fábrica. Em empresas com conceitos de integrações de funções mais definido, as atividades de planejamento fino e controle da produção podem estar integradas às atividades de manufatura.

#### 2.2.2.4 Interrelação entre atividades

Nas diversas atividades do sistema de manufatura, a interrelação entre elas, deve ser classificada tanto pela sua relação direta (vínculo operacional) como pela sua relação indireta (vínculo interrelacional), conforme descrito na Tabela 2.

Tabela 2: Relações diretas e indiretas e seus respectivos vínculos (AGOSTINHO, 1994).

Relação Direta	Vínculo
Engenharia ↔ Chão-de-Fábrica	- Engenharia de Fabricação
Negócios ↔ Chão-de-Fábrica	- Planejamento e Controle da Produção
Suporte ↔ Chão-de-Fábrica	- Engenharia da Qualidade/Manutenção
Relação Indireta	Vínculo
Engenharia ↔ Negócios	- Marketing (para novos produtos) - Suprimentos (para desenvolvimento de fontes de suprimento)
Engenharia ↔ Suporte	- Engenharia da Qualidade (especificações) - Manutenção (previsibilidade dos equipamentos)
Negócios ↔ Suporte	- Engenharia da Qualidade (qualificação de suprimentos e política da qualidade)

### 2.2.3 Manufatura Enxuta

Segundo Georgetti (2004), o conceito da produção enxuta é a união do melhor da produção em massa, que são a intercambiabilidade das peças e a repetibilidade dos processos, com o melhor da produção artesanal, podendo ser traduzido como produção de pequenos lotes. Sendo assim a produção enxuta apresenta a capacidade de reduzir o custo unitário e aumentar a qualidade; e isso com uma variedade de produtos crescente e um trabalho cada vez mais estimulante.

A Manufatura Enxuta (*Lean Manufacturing*), que é a filosofia *just-in-time*, foi desenvolvida no Japão pela *Toyota Motor Company* na década de 60, para combater a produção em excesso e o desperdício, produzindo apenas os componentes certos, no lugar certo e na hora certa levando à redução dos estoques, dos custos e melhora na qualidade dos produtos.

O objetivo do *just-in-time*, não é só eliminar desperdícios, mas também eliminar as operações que não agregam valor.

Segundo Womack e Jones (1996), as atividades desenvolvidas em uma fábrica podem ser divididas em três categorias: aquelas que agregam valor, as que não agregam valor e as que agregam valor, mas não são necessárias, citando como exemplo, as atividades de movimentação de material.

O *just-in-time* procura resolver os problemas que surgem no processo ao invés de encobri-los com estoques em excesso, estoques de segurança e longos *lead times*. Tais problemas são resolvidos seja reduzindo tamanhos dos lotes, seja reduzindo o tempo de preparação, seja eliminando refugos, ou as três atividades em conjunto.

O primeiro passo ou o ponto de partida para pensamento enxuto, de acordo com os mesmos autores, pode ser resumido com valor. Esse valor só pode ser definido pelo cliente final, sendo significativo quando expresso em “termos” de um produto específico que atenda as necessidades específicas do cliente, a um preço específico, em um momento específico.

O segundo passo é identificar a cadeia de valor, que é um conjunto de ações específicas necessárias para se levar um produto específico a passar pelas tarefas gerenciais críticas de qualquer negócio. São elas:

*Tarefa de solução de problemas* – vai da concepção até o lançamento do produto, passando pelo projeto detalhado e pela engenharia;

*Tarefa de gerenciamento da informação* – seguindo um detalhado cronograma vai do recebimento do pedido até a entrega do produto;

*Tarefa de transformação física* – vai do recebimento da matéria prima ao produto acabado nas mãos do cliente.

O terceiro passo é fazer com que o valor tenha um fluxo mais rápido pela cadeia produtiva.

Um conceito essencial nessa etapa é a definição de tempo, que sincroniza e define a velocidade, ou ritmo da produção, para que se ande na velocidade de venda desejada pelo cliente.

O quarto passo é a produção puxada. É ter condições de projetar, programar e produzir exatamente o que o cliente quer. Produção puxada significa que um processo inicial não deve produzir um bem ou serviço sem que o cliente deste processo faça uma solicitação. Dessa forma a produção passa a fluir pela requisição e demanda real do cliente e não por uma previsão de vendas.

Esse sistema foi chamado de Toyotismo, porque primeiramente desenvolvido nas indústrias Toyota, ou Produção Enxuta, dada a sua filosofia de produzir mais e mais com cada vez menos.

Além de eliminar desperdícios, a manufatura enxuta procura utilizar todo o potencial dos operadores. Eles têm o compromisso de produzir itens de qualidade para atender no tempo certo o passo seguinte do processo produtivo. Na produção enxuta é usado um sistema para a movimentação do material chamado *Kanban* que autoriza a retirada das peças processadas de uma célula de trabalho para a próxima célula do processo.

Ohno (1978) descreve o que ele chamou de espírito Toyota o qual consiste na produção em séries pequenas de produtos bastante diferentes. O maior desafio desse sistema é conseguir mais produtividade sem aumentar as quantidades produzidas.

Para isso, ele disse que é preciso pensar ao contrário sempre se questionando como produzir "*just-in-time*". O autor tentou primeiro a solução clássica adotada no mundo ocidental, da produção em massa e que não funcionou, então ele terminou por ensaiar a solução inversa. Na solução clássica a produção é definida de montante a jusante, então na solução inversa será necessária que seja definida

de jusante a montante do fluxo de produção. Portanto, cada posto de trabalho deverá informar ao posto precedente o que produzir. Essa informação é veiculada pelos “*Kanbans*”.

Ainda segundo Onho (1997), a meta a buscar é que nada deverá ser executado na produção que não adicione valor ao produto associado diretamente com a transformação do material para a sua forma desejada.

Tais ganhos de produtividade foram obtidos reduzindo-se expressamente os estoques de material em processo e o pessoal da produção, através de engenhosos sistemas que determinam os volumes a produzir com base na necessidade do elemento seguinte da cadeia de produção.

Segundo Monden (1998), o sistema *Kanban* é um meio de informação que controla a fabricação de produtos necessários nas quantidades necessárias e no tempo necessário em todo o processo produtivo de uma empresa. Esse sistema requer uma produção nivelada para que as retiradas de peças pelo último estágio do processo sejam balanceadas. Esse balanceamento irá requerer a redução do *lead time* da produção que só poderá ser atingido com a fabricação de pequenos lotes, que por sua vez, serão possíveis com a redução dos tempos de *setup*.

Segundo Black (1998), o sistema *Kanban* associa precisamente as necessidades de componentes com a programação dos produtos acabados. Ele o descreve como um sistema essencialmente manual, o qual significa “registro visual”, mais comumente cartão. Esse sistema foi desenvolvido dessa forma foi devido à língua japonesa, à base de ideogramas, não se prestar bem para a informação. Também sua forma visual permite que qualquer operador possa operá-lo, não necessitando de mão-de-obra especializada.

Segundo Lubben (1989), o objetivo da mentalidade enxuta é de obter um processo de manufatura que atenda seus objetivos usando o mínimo de recursos onde pode citar os materiais, equipamentos, mão-de-obra, espaço físico, energia, etc.

## 2.2.4 Manufatura celular

A Manufatura Celular (*cellular manufacturing*) compreende as células de produção formadas por conjuntos de máquinas agrupadas com funções diferentes para executar a produção de componentes ou família de peças.

Alguns autores defendem que as células de manufatura foram criadas para melhorar a eficiência de uma linha de produção, porém, com possibilidade de fabricar peças diferentes, dentro de uma mesma família.

Segundo Stockton (1994), as empresas podem ter vários benefícios, tais como maior qualidade e redução dos tempos, adotando células de manufatura. Estes benefícios poderão ser obtidos devido a operadores polivalentes, aos fluxos de materiais mais simplificados e a redução do estoque em processo através do uso de Kanbans, maior facilidade de identificação de gargalos, etc.

A manufatura baseada em células (manufatura celular) representa uma tentativa de combinar a eficiência do *layout* orientado a fluxo (*product-flow layout*) com a flexibilidade do *layout* orientado a processo (*process layout*) em sistemas de produção em *Batch*.

Na manufatura celular, o sistema de manufatura é decomposto em um conjunto de centros de trabalho ou células. Cada centro de trabalho é uma coleção de processos e equipamentos dedicados para o atendimento dos requisitos de processamento de uma família de peças (peças com requisitos de fabricação similares). Utilizando da organização celular, os tempos de transporte de material podem ser significativamente reduzidos. Na busca de flexibilidade e automação, a manufatura celular utiliza equipamentos tais como robôs, máquinas-ferramenta numericamente controladas, sistemas automáticos de inspeção e sistemas de transporte de material.

Segundo Schappo, 2006 um elemento considerado extremamente importante na manufatura celular é a polivalência da mão-de-obra. Ele considera também que o ideal, seria que todo o operador conhecesse todas as operações da célula e, a célula fosse responsável pelo produto do começo ao fim da produção.

### 2.2.5 Manufatura discreta

Pesquisa realizada na internet através do site <http://www.eps.ufsc.br/teses96/friedrich/cap1/capitulo1.htm> demonstra que a Manufatura Discreta (*discrete manufacturing*) se caracteriza pela fabricação de produtos diferentes. Pode ser classificada segundo a atividade de produção (quantidade de produto fabricado) e em função do *layout* da fábrica.

Considerando a atividade de produção, existem três tipos principais de sistemas de produção: pequena produção de produtos especiais numa quantidade única ou em lotes únicos (*Job shop*), produção de produtos repetitivos de forma intermitente ou em lotes (*Batch*), produção de produtos repetitivos de forma contínua, linha de produção (*Mass*).

O tipo *Job shop* é caracterizado pela grande variação de peças fabricadas e pelo baixo volume de produção. Usualmente o tamanho do lote de manufatura é pequeno, podendo fabricar somente uma peça. A produção em lotes, *Batch*, é caracterizada pela fabricação de peças em lotes de tamanho médio de forma intercalada contínua ou com a intenção de satisfazer a demanda do usuário por um determinado produto. A produção em linha, *Mass production*, é caracterizada pelas altas taxas de produção, com maquinários que são completamente dedicados à produção de um produto em particular; a fábrica normalmente é projetada com o propósito exclusivo de fabricar um produto específico.

## 2.3 LEIAUTE

O arranjo e a distribuição de áreas de trabalho tiveram seu início com o comércio de forma intuitiva e com o desenvolvimento do sistema produtivo. Passou a ser dada uma atenção maior a ocupação do espaço disponível visando um melhor aproveitamento do mesmo e melhor fluxo do produto. Devido aos estudos de Taylor, Barnes, Maynard, casal Gilbreth e de outros contemporâneos, o simples arranjo intuitivo do espaço físico passou a ter vários conceitos e técnicas de visualização de processos que se tornou possível a sua evolução para uma área de estudos mais

específica. Mas pode-se observar que as técnicas do estudo de leiaute evoluíram muito nas últimas décadas, saindo do estágio intuitivo, com uso de recursos simples como projetistas testando alocações de maquinários através de desenhos e medições, para o uso de sofisticadas técnicas de programação matemática e simulação.

O arranjo físico do sistema produtivo é um dos pontos de grande importância para obter bons resultados na produção (chão-de-fábrica), atendendo aos clientes nos prazos acordados em contrato e com preços competitivos em relação ao mercado. Conforme afirma Rentes *et al.* (2007), um projeto adequado do *layout* resulta numa redução de movimentação tanto de operadores, como de peças e/ou produtos. Fiedler (2009) afirma que o estudo do layout é de fundamental importância para assegurar um claro entrosamento interno mantendo um funcionamento harmônico do ambiente. Canen e Williamson (1998) relatam que os recursos de produção são de vital importância para a empresa, porque certamente, na maioria das vezes, representam seu maior e mais caro patrimônio. Também, o principal motivo para o planejamento do layout em um setor produtivo é o interesse em se reduzir os custos de movimentação e tempos improdutivos.

### **2.3.1 Tipos tradicionais de leiaute**

A classificação em função do leiaute da fábrica refere-se ao arranjo físico dos equipamentos de fabricação. Em sistemas de produção intermitente são conhecidos quatro tipos distintos de leiaute associados aos sistemas de produção de peças discretas (NARDINI, 1999):

- Leiaute funcional ou por processo (*job shop*);
- Leiaute em linha ou por produto (*Flow Shop*);
- Leiaute por posição fixa; e
- Leiaute celular

### 2.3.1.1 Leiaute funcional ou por processo (Job Shop)

É o leiaute mais antigo e grande parte das empresas, embora trabalhe com pequenos e médios lotes, utiliza em suas fábricas o leiaute do tipo funcional ou por processo, ou seja, agrupando máquinas que executam operações do mesmo tipo, em uma mesma área (setor de tornos, setor de fresadoras, setor de furadeiras, setor de retíficas, e outros) conforme mostra Figura 3.

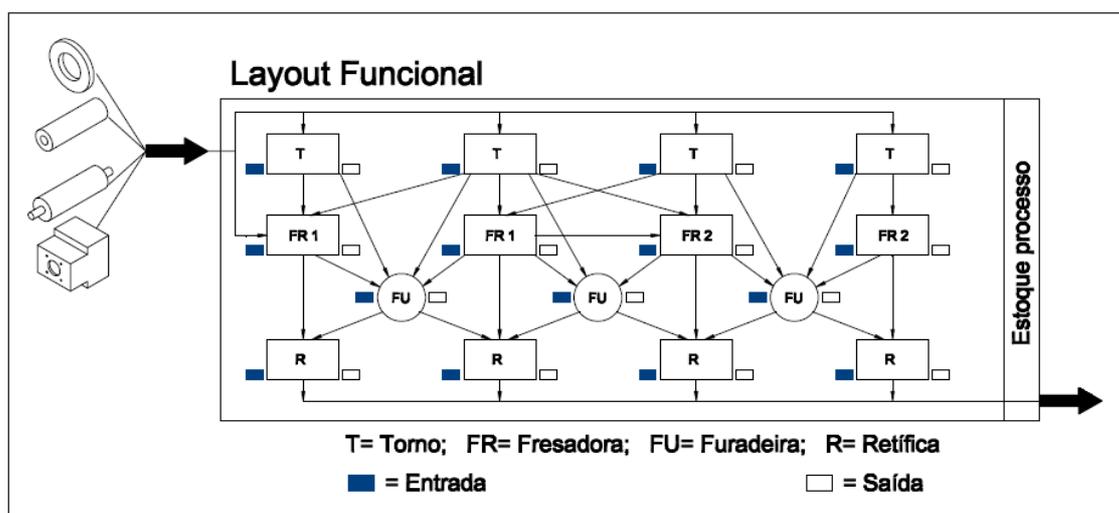


Figura 3 - Exemplo de leiaute funcional.

É um tipo de leiaute muito utilizado devido à facilidade de sua implantação (basta somente agrupar as máquinas do mesmo tipo, não havendo a necessidade de fazer análises mais profundas e detalhadas do fluxo de fabricação), pela dificuldade de estudo e implantação de outros tipos de leiautes e também pelo desconhecimento das vantagens e adequabilidade desses outros tipos.

Este tipo de leiaute tem algumas vantagens, como seguem (BURBIDG, 1985):

- Um melhor controle dos processos complexos ou precisos, principalmente os de alto risco e alto custo, para o qual se requer muita inspeção;
- uma grande flexibilidade de produção para acompanhar as mudanças na demanda;
- uma maior facilidade para se contornar as paradas de máquinas para manutenção.

Apesar de toda flexibilidade e de outras vantagens apresentadas por este tipo de leiaute, não se pode deixar de apresentar também, as desvantagens de sua aplicação, o que compromete e muito, os custos de produção. Dentre outros, destacam-se os seguintes inconvenientes (BURBIDG, 1985):

- Os sistemas que controlam o fluxo de material são bastante complicados e difíceis de serem gerenciados com eficiência. Além das peças, deve-se observar que acompanhando as mesmas, existem os desenhos, ordem de fabricação, folhas de processos, ferramental, dispositivos de fixação, inspeções, refugos, etc., que caminham à frente e atrás, aumentando ainda mais o fluxo e reduzindo o potencial de lucratividade;

- os ciclos de duração são muito longos, prejudicando e muito as necessidades atuais impostas pelo mercado;

- os estoques intermediários, ou em processos, são altos, congestionando o chão-de-fábrica, comprometendo a eficiência do capital da empresa e entrando em rota de colisão com a filosofia *just in time*; e

- a responsabilidade pela qualidade do produto e o prazo de entrega ao cliente é dividida entre vários grupos de trabalho.

#### 2.3.1.2 Leiaute em linha ou por produto (*Flow Shop*)

Tem a característica por organizar o arranjo das máquinas, geralmente especiais, em linha, para a produção de um determinado produto conforme Figura 4. Geralmente, nesse leiaute, a movimentação de materiais é feita sobre linhas de transferências (*transfers*) ou sobre mesa de rolos (*conveyors*). Como vantagem, proporciona pequenos ciclos de produção, baixo custo, sistema de planejamento e controle de produção, simplificados. Como desvantagem principal destaca-se a baixa flexibilidade (PIRES, 1989).

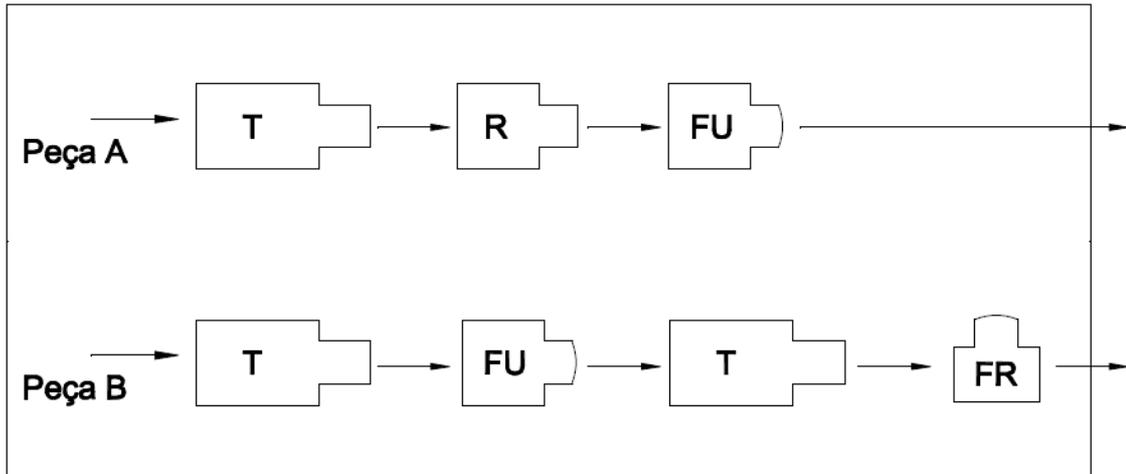


Figura 4 - Exemplo de leiaute por produto.

### 2.3.1.3 Leiaute por Posição Fixa

É característico das áreas de montagem de grandes conjuntos e/ou produtos como navio, aviões, etc. É o tipo de leiaute menos encontrado, onde os materiais convergem para um ponto em comum em que são executadas as operações. A Figura 5 ilustra esse leiaute.

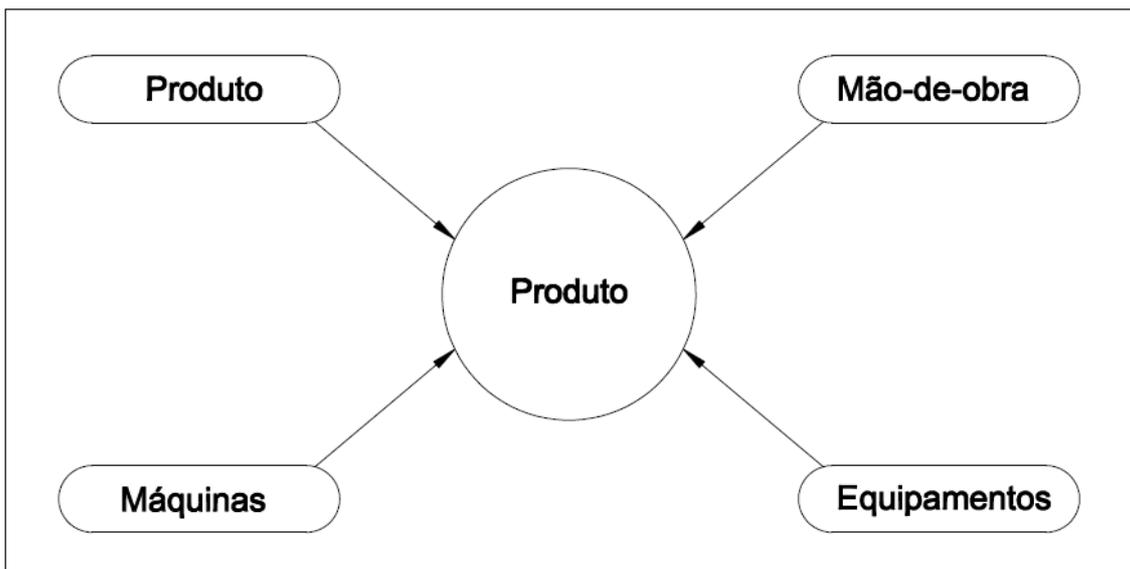


Figura 5 - Exemplo de leiaute por posição fixa. Fonte: adaptado de PIREs, 1989.

### 2.3.1.4 Leiaute celular

Uma célula de fabricação é constituída por um grupo de máquinas adequadamente escolhida, dimensionadas e arranjadas de tal forma que permitam produzir todos os componentes de uma família de peças em seu interior. É possível afirmar que uma célula de fabricação procura obter a produtividade dos arranjos físicos por produto e a flexibilidade característica dos arranjos físicos funcionais. A Figura 6 ilustra essa afirmação.

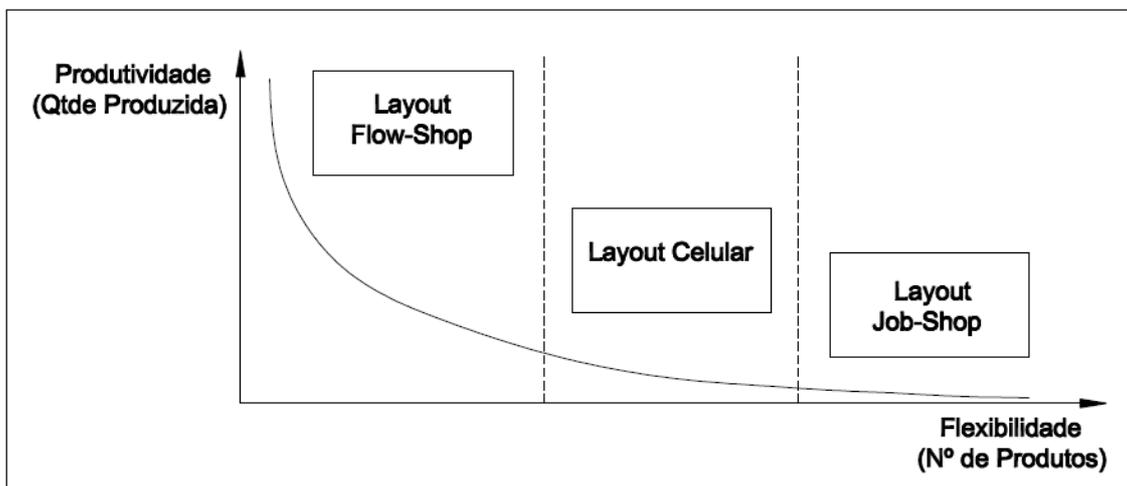


Figura 6 - Posicionamento dos tipos de leiaute celular. Fonte: adaptado de PIREs, 1989.

Existem várias razões para uma empresa optar pela implantação dos arranjos físicos celulares. Pode-se considerar, dentre elas:

- Minimizar os ciclos de produção;
- Minimizar os tempos de preparação de máquinas;
- Minimizar os níveis de inventários de matéria-prima, material em processo e produtos acabados;
- Maximizar a produtividade industrial.

Na realidade não existe um padrão de leiaute celular. No entanto, pode-se dizer que os arranjos que mais são utilizados são em “U” e “em linha”, conforme Figuras 7 e 8 consecutivamente.

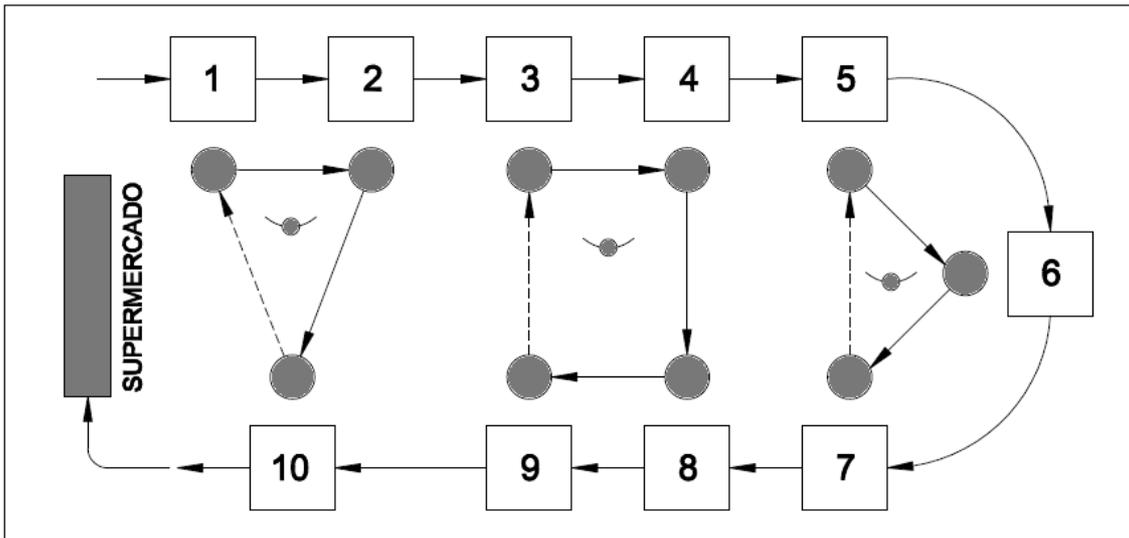


Figura 7 - Exemplo de leiaute celular em forma de "U".

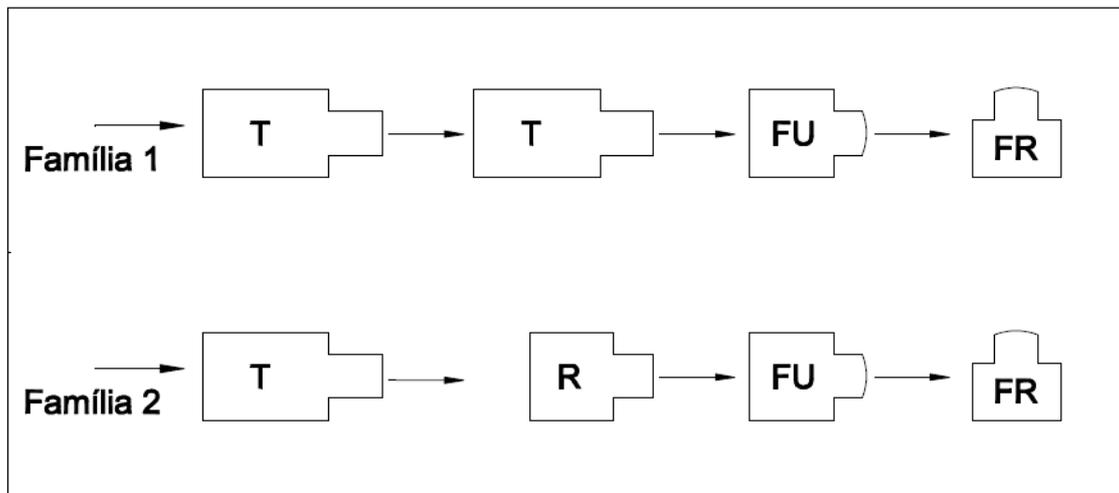


Figura 8 - Exemplo de leiaute celular em linha.

Várias são as vantagens e poucas são as desvantagens atribuídas aos leiautes celulares em relação aos leiautes funcionais, que representam a grande maioria dos arranjos físicos instalados nas indústrias com produção de pequenos e médios lotes.

## 2.4 PLANEJAMENTO E CONTROLE DE PRODUÇÃO (PCP)

As atividades desenvolvidas pelo PCP, em um sistema produtivo com base em metas e estratégias bem definidas são, formular planos para administrar os recursos humanos e físicos, direcionar os recursos humanos sobre os físicos, acompanhar esta ação e fazer correção de prováveis desvios.

Segundo Tubino (2002), o PCP pode ser definido como a função organizacional que tem o objetivo de desenvolver os planos que irão orientar a produção, e com base nos planos executados realizar o controle da produção.

Normalmente o PCP é um departamento de apoio à produção subordinado à Gerência Industrial que recebe e administra informações vindas de diversas áreas. Da Engenharia do Produto vêm informações como listas de materiais contidas em desenhos técnicos para execução de algum trabalho. Por esse motivo consulta almoxarifado para verificar produtos em estoque ou faz pedido de materiais e ferramentas ao setor de Compras; da Engenharia do Processo vem os roteiros de fabricação e o *lead times* fazendo com que o PCP trabalhe mais diretamente com a produção resolvendo problemas de manutenção, treinamento e recrutamento de pessoal com o Departamento de Recursos Humanos, investimento em maquinários com o Departamento Finanças e com outros setores não citados. Como exposto, o PCP desempenha a função de coordenador do sistema produtivo com relação direta com os setores apresentados e indiretamente com praticamente todas as funções deste sistema.

Assim, conforme Mesquita *et. all.* in Lustosa (2008), o PCP engloba, as atividades de Planejamento Agregado, Planejamento Mestre da Produção (PMP), Programação da Produção (PP) e Acompanhamento e Controle da Produção.

Segundo Slack (2002), a evolução dos processos produtivos tem mantido relação direta com os sistemas utilizados para o planejamento e o controle da produção. Slack afirma que existem basicamente três configurações que são:

- A primeira, com base em uso de TI (Tecnologia da Informação), onde os sistemas MRP (*Material Resources Planning*), MRP II (*Material Resources Planning II*) e ERP (*Enterprise Requirements Planning*) mostra uma grande capacidade de planejamento da produção, mas pouco controle;

- a segunda, com base no sistema *Kanban*, que prioriza o controle; e

- a terceira, mista, combinando a utilização do ERP na aquisição de materiais e *Kanban* no controle do fluxo da produção. Os sistemas MES (*Manufacturing Execution System*), segundo Favaretto (2001), complementam os sistemas de Planejamento e Controle de Produção ampliando o conjunto de funcionalidades ligadas à produção.

#### **2.4.1 Funções e limitações do PCP**

Segundo Russomano (1995), o PCP tem as funções de gerir os estoques, emitirem ordens de produção, programar as ordens, movimentar as ordens de fabricação e acompanhar a produção.

O planejamento e controle têm o propósito de garantir que a operação ocorra eficazmente e produzindo produtos e serviços como se deve. Uma das características do PCP é fazer o planejamento e controle dos produtos e serviços atendendo a demanda de seus consumidores.

Contudo, todas as situações de planejamento e controle acontecem sob limitações de recursos. Dentre eles, os mais conhecidos são: limitações de custos, limitações da capacidade, limitações de tempo e limitações de qualidade (SLACK, 2002).

#### **2.4.2 Atividades do PCP**

Tubino (1999) explica que o PCP é de um departamento de apoio à produção, dentro da gerência industrial. Portanto, o PCP é o responsável pela coordenação e aplicação dos recursos produtivos de forma que atenda da melhor forma possível, os planos estabelecidos em 03 níveis:

- **Estratégico**, são definidas as políticas estratégicas de longo prazo, gerando assim o planejamento estratégico da produção. Esse planejamento tem a função de estabelecer um plano de produção para determinado período

(longo prazo), conforme as estimativas de vendas e disponibilidade de recursos financeiros e produtivos.

- **Tático**, é executado os planos de médio prazo para a produção, desenvolvendo o Planejamento mestre da produção para obtenção do Plano-Mestre da Produção – PMP. Este plano só terá êxito se estiver de acordo com as decisões tomadas, previstas no planejamento estratégico da produção (longo prazo).
- **Operacional**, os programas de curto prazo de produção são preparados e feitos acompanhamentos para a realização da programação da produção, administração dos estoques seqüenciados, emitindo e liberando as ordens de compras, fabricação e montagem, bem como executando o acompanhamento e controle da produção. (TUBINO, 1999).

Os objetivos da programação e seqüenciamento da produção, segundo Martins (1993), são: aumentar a utilização dos recursos, reduzir o estoque em processo e reduzir os atrasos no término dos trabalhos.

### 2.4.3 Sistemas utilizados no PCP

Cada empresa, conforme suas características seguem um sistema distinto para as funções do PCP. Contudo, podem ser implementadas e operacionalizadas através do auxílio de, pelo menos, três sistemas: MRP / MRPII, JIT e OPT.

O sistema MRP (*Manufacturing Resources Planning* - Planejamento dos Recursos da Manufatura) surgiu a partir da formulação dos conceitos de que os itens em estoque podem ser divididos em duas categorias: itens de demanda dependente e itens de demanda independente. Conceitos estes desenvolvidos por Joseph Orlicky. Dessa forma, os itens dos produtos acabados possuem uma demanda independente devendo ser prevista baseada no mercado consumidor. Os itens dos materiais que compõem o produto acabado possuem uma demanda dependente de algum outro item, podendo ser calculada com base na demanda deste. Segundo Aggarwal (1985) o sistema MRP tem algumas desvantagens, tais como: é sistema complexo e necessita de uma grande quantidade de dados de entrada; assume

capacidade ilimitada em todos os recursos, sendo que na realidade alguns centros produtivos comportam-se como gargalos. Para este autor, tais considerações, prejudicam de forma considerável a programação lógica do MRP, além de tornar ineficiente sua capacidade de planejamento e controle.

Com a evolução natural da lógica do sistema MRP, surgiu sistema MRP II com conceito de cálculo não mais apenas dos recursos materiais e sim estendendo as necessidades ao planejamento dos demais recursos de manufatura. Corrêa & Giansi (1993) definem MRP II como: "um sistema hierárquico de administração da produção, em que os planos de longo prazo de produção, agregados (que contemplam níveis globais de produção e setores produtivos), são sucessivamente detalhados até se chegar ao nível do planejamento de componentes e máquinas específicas". Correll (1995), com o objetivo de se evitar a simples automação dos processos existentes, sugere que se efetue a reengenharia dos processos da empresa, antes da instalação de um sistema MRPII. Algumas críticas negativas mais comuns feitas ao sistema MRP II dizem respeito à sua complexidade e dificuldade de adaptá-lo às necessidades das empresas, ao nível de acuracidade exigida dos dados, ao fato do sistema assumir capacidade infinita em todos os centros produtivos e a não enfatizar o envolvimento da mão-de-obra no processo. Contudo, alguns fatores positivos do sistema MRP II são reconhecidos como, a introdução dos conceitos de demanda dependente, ser um sistema de informações integrado, disponibilizando um grande número de informações para os diversos setores da empresa (GARCIA, 2004).

Em um ambiente **JIT** – "*Just in Time*", o planejamento da produção é tão importante e necessário quanto em qualquer outro.

No que diz respeito à produção, o princípio básico da filosofia JIT é atender de forma rápida e flexível à demanda do mercado que é muito variada, produzindo normalmente em pequenos lotes. Na filosofia JIT, o planejamento e a programação da produção procuram adequar à demanda esperada com as possibilidades do sistema produtivo utilizando a técnica da produção nivelada (GABELA, 1995).

A ênfase da gerência dentro da filosofia JIT, está no fluxo da produção, objetivando fazer com que os produtos fluam de forma suave e contínua através das diversas fases dentro de um processo produtivo. Para um sistema JIT, a ênfase prioritária para as linhas de produção é a flexibilidade. Espera-se que as linhas de

produção sejam balanceadas fazendo com que a produção esteja ajustada às variações da demanda.

Em um ambiente JIT, controlado por *Kanban*, o fluxo e o controle da produção é mais simples que num ambiente de produção tradicional. As peças são deixadas em recipientes padronizados, acompanhadas do cartão *Kanban* de identificação correspondente, contendo um número definido destas. Cada cartão *Kanban* vale uma autorização para fabricação de um novo conjunto de peças em quantidades definidas. Cada setor deve ser responsável pelo fornecimento das peças requisitadas, no prazo de reposição, na quantidade estipulada no cartão *Kanban* e com a qualidade garantida, para evitarem paradas desnecessárias do processo produtivo (GABELA, 1995).

O **OPT** ("*Optimized Production Technology*" - Tecnologia de Produção Otimizada) é uma técnica de gestão da produção, desenvolvida pelo físico Eliyahu Goldratt (1992). Esta ferramenta vem sendo considerada interessante na programação e planejamento da produção. O OPT é composto de dois elementos fundamentais: sua filosofia (composta de nove princípios) e um software "proprietário". O sistema OPT, considerando as limitações de capacidade dos recursos gargalos, decidem por prioridades na ocupação destes recursos. Com base na seqüência definida, calcula como resultado os *lead times* e, portanto, pode programar melhor a produção.

As críticas negativas ao sistema OPT derivam do fato de o mesmo ser um *software* "proprietário", o que significa que não são tornados públicos detalhes dos algoritmos utilizados pelo *software*; além do fato também de que o seu preço é considerado caro. Muitos dos autores sugerem a utilização de mais de um sistema PCP. Citado por Melo (2006), BERMUDEZ (1991), sugere o uso conjunto do MRP II com o JIT. Ambos fornecem um gerenciamento mais eficaz do sistema de manufatura. O primeiro executaria um planejamento de todos os recursos da produção e o segundo agiria como um método de eliminação contínua dos desperdícios e da redução do *lead time* para se alcançar a excelência na manufatura. Autores como Louis (1991) e outros, propõem a utilização de um sistema denominado MRP III, que é a junção do MRP II com um módulo de controle de produção baseado nos conceitos do JIT / *Kanban*. Segundo o autor, este sistema apresentou os benefícios tais como a redução dos níveis de estoques, a redução

das inspeções de controle de qualidade e a redução do manuseio de materiais e principalmente eliminação de procedimentos que não agregavam valor ao processo.

Segundo (MELO; VILAR e SEVERIANO FILHO, 2006), “Todas as considerações acerca das vantagens e desvantagens da utilização, conjunta ou não, de alguns sistemas de PCP devem ser consideradas, no entanto, o mais importante é a adequação desses sistemas com fatores como: a estrutura organizacional da empresa; estratégia adotada pela empresa para conquistar o mercado a que ela pertence; fatores infra-estruturais e características dos produtos produzidos pela empresa”.

Apesar de que tão somente a escolha de um determinado sistema de produção não garantir o sucesso competitivo de uma organização, mas é condição necessária para se garantir este sucesso. É preciso então, que se conheçam todas as implicações estratégicas de suas decisões no que se refere ao tipo de sistema de produção e o seu modo de operação.

Portanto, o Planejamento e Controle da Produção (PCP) é uma das áreas de decisão da manufatura tendo sob sua responsabilidade uma das atividades mais desafiadoras: o *scheduling* (a programação) de operações, ou seja, quando produzir. Tal tarefa tornou-se importante pela necessidade de se obter vantagens competitivas devido à rápida entrega dos produtos aos clientes.

## 2.5 SCHEDULING DA PRODUÇÃO EM JOB SHOP

O *scheduling* surgiu do núcleo dos problemas em manufatura, telecomunicações, logística, e muitos outros contextos comuns onde reserva de recursos são demandados.

Um problema pode ser descrito como *scheduling* quando os recursos são distinguidos (pelo menos em parte) pelo período de tempo em que estão disponíveis. Portanto, quando aplicado à produção, se procura a melhor ordem numa seqüência de tarefas em máquinas (ou processadores) para aumentar a eficiência de processos. Recursos podem ser requisitados para a execução de serviços, bem como prioridades na execução e disponibilidade das máquinas. O problema aumenta em dificuldade quando o sistema de produção é o *Job Shop*. O

*Job Shop* apresenta as seguintes características: - a produção de baixos volumes, porém com maior variedade, havendo até customização; cada peça segue uma rota própria ou única dentro do sistema de produção; o *layout* típico é o funcional (processo), onde os equipamentos são agrupados por similaridade (SIPPER; BULFIN, 1997, p. 9-10). Um problema comum dos *Job*

*Shops* é “programar os tempos de produção para  $N$  jobs em  $M$  máquinas” (ASKIN; STANDRIDGE, 1993, p. 113), pois existem  $(n!)m$  possibilidades (SIPPER; BULFIN, 1997, p. 438).

Segundo Rodrigues (2007), a atividade de programação é uma das mais complexas no gerenciamento da produção devido a ter que lidar com os diversos recursos ao mesmo tempo: as máquinas com diferentes capacidades, as pessoas com diferentes habilidades e os processos com diferentes requisitos. Em si, a atividade de seqüenciamento é que determina o prazo das atividades a serem cumpridas e a seqüência de cada uma delas, após uma análise correta e precisa das informações de disponibilidade de mão de obra específica, de equipamentos, de matérias-primas, do processo de produção, dos tempos de processamento, dos prazos e das prioridades das ordens de fabricação.

Conforme Rodrigues (2007), para o seqüenciamento das atividades, deve-ser considerado uma série de elementos irão disputar vários recursos por um período de tempo, sendo que esses recursos possuem capacidade limitada. Os elementos que serão processados são chamados de trabalhos (ou *jobs*) e esses *jobs* são compostos de partes que são elementares, chamadas de atividades ou operações.

Na medida em que o número de atividades e trabalhos aumenta, cresce rapidamente o número de programações possíveis. Portanto para se calcular o número de programações possíveis segue a seguinte fórmula:

$$\text{Número de programações} = (n!)m.$$

Onde:  $n$  é o número de trabalhos (ou produtos a serem produzidos)

$m$  é o número de atividades (ou máquinas do processo)

Uma linha de produção com apenas cinco diferentes tipos de produtos (*jobs*) e apenas cinco máquinas possui 24.883.200.000 diferentes programações possíveis.

Pode-se observar, então, que gerenciar um *Job Shop* é tarefa difícil, pois a programação se torna mais complexa à medida que se aumenta a variedade de

produtos. Empregando técnicas de priorização, também denominadas regras de despacho (*Dispatching*) são uma alternativa para superar os problemas levantados. Dentre elas, as principais são: - menor tempo de processamento (SPT); data mais próxima agenda (EDD); o primeiro a chegar, primeiro a ser feito ou a sair (FCFS) folga por operação restante (SRO ou SLK); e com maior tempo de processamento (LTP); entre outras (ASKIN; STANDRIDGE, 1993, p. 115; SIPPER; BULFIN, 1997, 442; WILD, 2003, p. 366; SUSUMU; LEE, 1997).

Portanto, frente à complexidade do problema apresentado, uma ferramenta se apresenta necessária para a escolha da melhor programação, ou seja, da otimização da programação da produção.

Segundo Rodrigues (2007), o *Scheduling* é essa ferramenta, amplamente utilizada na manufatura e em serviços, que causa um grande impacto na produtividade de todo o sistema produtivo. O objetivo dessa ferramenta, na manufatura, é minimizar o tempo e os custos de produção, revelando à operação o que fazer, quando fazer e com que recurso fazer. Da mesma forma, em serviços, tais como manufatura de peças, objetiva a maximização da eficiência da operação e a redução de custos de produção. Modernas ferramentas computacionais de *Scheduling* garantem uma eficácia infinitamente maior que métodos manuais de seqüenciamento. Fornece poderosas interfaces gráficas onde é possível a visualização da programação ótima em tempo real nos mais diversos estágios da produção.

São diversos os benefícios do uso da otimização da programação da produção tais como:

- Redução das mudanças de última hora;
- Redução do nível de estoque em processo;
- Redução do esforço de programação;
- Aumento da eficiência da operação;
- Nivelamento da carga de mão-de-obra;
- Aumento na confiabilidade da data de entrega; e
- Disponibilização da informação em tempo real.

A modelagem de um problema de *Scheduling*, do tipo *Job Shop*, pode ser feita como um problema de Programação, que é aquele onde existem uma função

objetivo (minimizar custos, por exemplo) e restrições que formalizam as necessidades do problema.

Segundo Jain e Meeran (1998), um problema de *Scheduling* pode ser modelado da seguinte forma:

- Função objetivo que minimize o tempo total de produção ou a soma do tempo improdutivo de cada *job* (trabalho);
- restrições de precedência: restrições que garantam a ordem de atividade de cada *job* e a duração de cada uma delas;
- restrições disjuntivas: que garantam escolha do *job* que deve utilizar cada recurso; e
- outras restrições menos relevantes.

## 2.6 OTIMIZAÇÃO

Otimizar é melhorar algo já existente, com objetivo de encontrar a melhor configuração para um determinado sistema sem ser necessário testar todas as possibilidades envolvidas, reduzindo assim o tempo destinado a ele. Dessa forma fica possível o tratamento simultâneo de uma maior quantidade de variáveis e restrições de difícil visualização (gráfica ou tabular) e a obtenção de soluções não tradicionais com o menor custo.

A otimização, segundo Harrel (2000), é o processo de tentar diversas combinações de valores para variáveis que podem ser controladas denominadas variáveis independentes. Esse processo busca valores que apresenta a saída mais desejada. Na maioria das vezes se torna difícil ou até impossível de ser realizado em um sistema real, esse processo de tentar diferentes combinações para as variáveis, e por esse motivo é que se faz através de modelos.

Se a resposta obtida no modelo for submetida a todos os possíveis valores das variáveis (variáveis de decisão), a representação gráfica destes valores com os resultados obtidos é chamada de superfície de resposta. Quando há mais de duas variáveis de decisão, essa superfície de resposta se torna de difícil visualização, uma vez que o número de dimensões na qual está inserida tal superfície, também aumenta ( $n^{\circ}$ . de dimensões =  $1 + n^{\circ}$ . de variáveis), além de uma grande demanda de

tempo. Portanto, em uma otimização deve haver um equilíbrio entre a busca da solução ótima e o tempo alocado a essa tarefa.

### **2.6.1 Métodos de otimização**

De uma forma geral, para a execução de uma otimização, é necessário seqüenciar alguns passos ou etapas apresentadas a seguir:

Primeiramente se faz uma análise do problema, se define as variáveis do processo e as características específicas de interesse. Na etapa seguinte propõe-se a determinação de um critério para a otimização e especificação da função objetivo de acordo com as variáveis identificadas na primeira etapa.

A fase de resolução e análise da solução envolve o emprego de um método de otimização apropriado à representação formal estabelecida para o problema. A etapa de análise envolve a avaliação da solução candidata para determinar se ela já é ótima. Embora em grande parte dos casos seja difícil chegar a uma resposta ótima, o resultado da função objetivo, fornecido por cálculos numéricos repetitivos, para uma suposta solução ótima será a melhor dentre todas as alternativas conhecidas.

Muitas vezes, através de expressões matemáticas, a modelagem de um problema envolve o desenvolvimento de uma representação para o processo ou sistema. Esse modelo deve relacionar as variáveis de entrada (inputs) e de saída (outputs). Também devem ser incluídas aqui as restrições impostas ao sistema. Sendo a formulação do problema muito extensa para sua utilização, faz-se necessário a simplificação da função objetivo e/ou do modelo, sem, contudo, perder as características essenciais do problema.

Segundo Edgar e Himmelblau (2001), a escolha do método de otimização para qualquer caso particular dependerá fundamentalmente das características da função objetivo e se ela é conhecida explicitamente, da natureza das restrições e do número de variáveis dependentes e independentes. Não existe método ou algoritmo de otimização que possa ser aplicado a todos os problemas.

Carneiro (1996), propôs uma nova classificação dos métodos de otimização de forma que fosse abrangente, proporcionando uma melhor compreensão da

distribuição dos métodos, facilitando o estabelecimento de relações entre eles. Essa nova classificação foi baseada em classificação de outros autores (Figura 9).

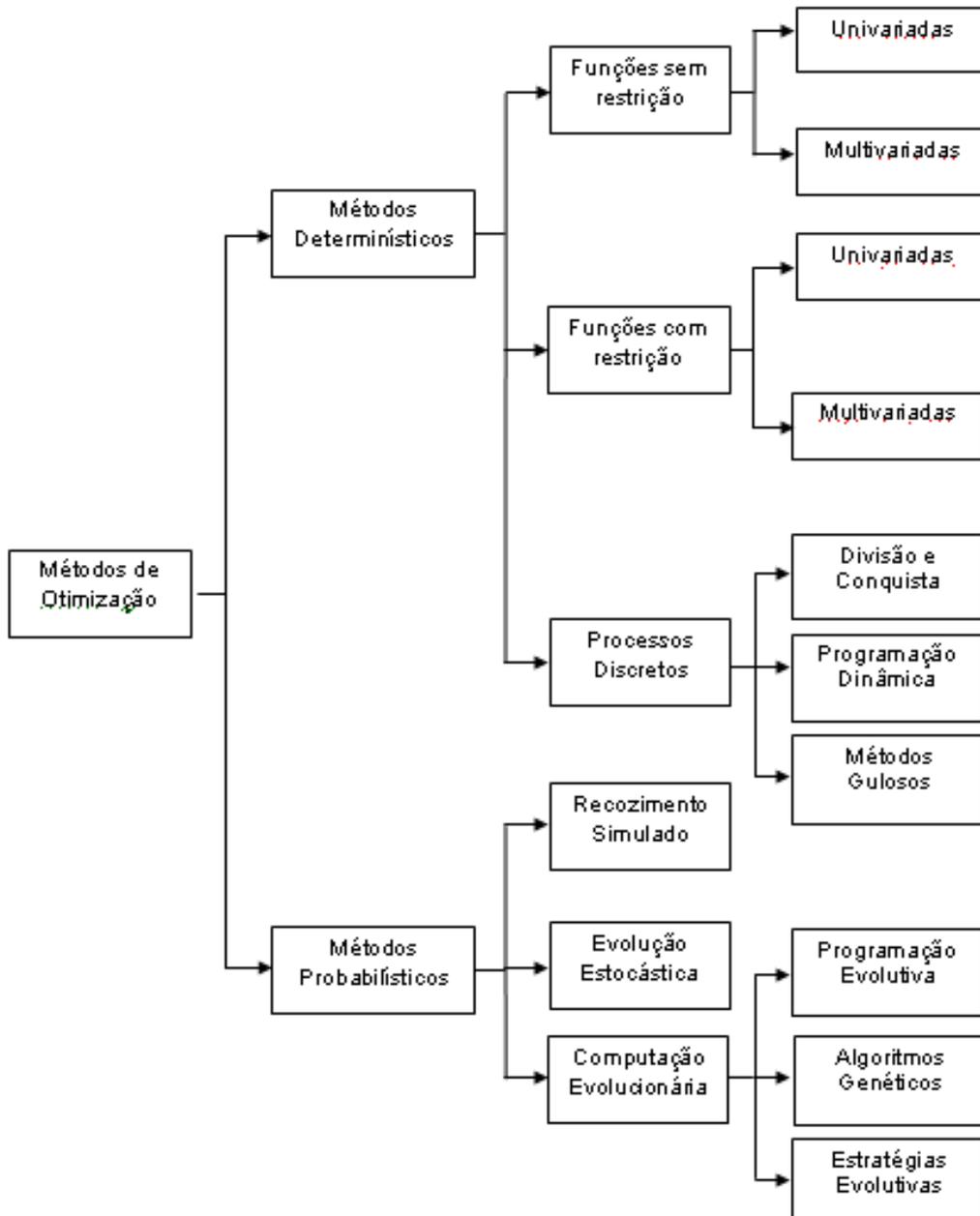


Figura 9 - Classificação dos métodos de otimização (CARNEIRO, 1996).

## 2.6.2 Otimização de modelos de simulação a eventos discretos

Métodos de otimização combinados com a simulação computacional a eventos discretos têm sido utilizados em diversas aplicações na área da manufatura. Conforme afirma Fu (2002), durante a década de 90, a simulação e a otimização, na prática, eram mantidas separadamente. Porém, conforme afirma alguns autores, atualmente, essa integração tem acontecido bastante, principalmente devido a alguns pacotes de simulação já incluírem rotinas de otimização.

A Tabela 3 apresenta alguns *softwares* de otimização, os pacotes de simulação que estão incluídos e as técnicas de otimização utilizadas.

Tabela 3 - Software de otimização (Adaptado de FU, 2002).

Software de otimização	Pacote de simulação	Técnica de otimização
AutoStat	AutoMod	Algoritmos evolutivos e algoritmos genéticos
OptQuest	Arena, Crystal Ball, etc.	Busca Scatter e tabu e redes neurais
OPTIMIZ	SIMUL8	Redes neurais
SimRunner	ProModel	Algoritmos evolutivos e algoritmos genéticos
Optimizer	WITNESS	Simulated annealing e busca tabu

Segundo Hao e Shen (2008) a otimização em combinação com a simulação tem sido utilizada em diversas aplicações de sistemas produtivos. O motivo é que a otimização de sistemas produtivos é bastante complexa para se resolva utilizando-se apenas de abordagens matemáticas.

Para Banks *et al.* (2005), a existência de uma variabilidade na amostragem das variáveis de entrada utilizadas, força a otimização via simulação a possuir uma heurística de busca bastante robusta. Têm sido desenvolvidas muitas heurísticas para problemas de otimização que, apesar de não garantirem encontrar a solução ótima, mostram-se muito eficientes em complexos problemas práticos. Dentre as vantagens de se utilizar a simulação está à possibilidade de se responder a questões do tipo “o que aconteceria se...?”, ou seja, avaliando os resultados do modelo para determinadas condições. Assim, ao usar a simulação para avaliar e

buscar a melhoria do processo, se faz necessárias a construção de cenários e em seguida simular cada um deles analisando os resultados encontrados (OPTQUEST FOR ARENA USER'S GUIDE, 2002). Tal processo pode ser capaz de gerar bons resultados, porém pode ser cansativo e consumir muito tempo, não garantindo na maioria das vezes que as melhores configurações sejam experimentadas.

Na realidade, a intenção de se associar técnicas de otimização e simulação é justamente resolver tais problemas. Desta associação surge algumas terminologias diferentes como “otimização para simulação”, “otimização via simulação” e “otimização em simulação”, sendo as duas últimas as mais utilizadas (FU, 2002). Em uma situação onde o objetivo é minimizar ou maximizar algumas medidas de desempenho de um sistema, e este sistema só pode ser avaliado através da simulação computacional Banks *et al.* (2005) utilizam a expressão “otimização via simulação”.

Pelo processo de otimização testa-se várias combinações de valores para variáveis que podem ser controladas (variáveis independentes), na busca da solução ótima. Em muitos casos, devido ao grande número de combinações possíveis não é possível avaliar todas as combinações prováveis de variáveis. Nestes casos, deve-se fazer o uso dos algoritmos heurísticos de otimização. Para Fu (2002), a otimização deve ocorrer como complemento à simulação, fornecendo as variáveis de uma possível solução (inputs) à simulação, e a simulação, fornecendo respostas (outputs) para a situação proposta, que retornam à otimização, caso a solução não seja considerada satisfatória. A otimização gera novas variáveis, utilizando técnicas de otimização específicas, que são novamente testadas pela simulação. Este ciclo é repetido até que pare e essa parada é definida de acordo com o método de otimização que foi utilizado.

Quanto a metodologia para otimizar utilizando a simulação, ela parte de um modelo já existente e validado, primeiramente, definem-se as variáveis de decisão, aquelas que afetam a função objetivo do problema. Posteriormente, se define a função objetivo, que pode ser de maximização ou minimização, cujo resultado na busca de um valor ótimo, será avaliado pelos algoritmos de otimização. Seguindo a seqüência, o próximo passo é a definição das restrições do problema seguido pela configuração de alguns parâmetros, tais como: número de replicações, precisão e critério de parada (SILVA, 2005).

A conjugação de resultados de simulação e otimização segue o fluxo conforme mostrado na Figura 10. Parte de um modelo de otimização com a meta de estimar a solução ótima conforme os critérios estabelecidos para o problema. A solução deste modelo serve como entrada para a condição operacional do modelo de simulação. O modelo de simulação tem por objetivo avaliar a sensibilidade da solução ótima às variabilidades associadas ao sistema modelado. Baseando na análise de cenários do modelo de simulação podem surgir dois resultados: o resultado é considerado robusto e apresenta uma solução a ser implementada; ou o resultado não é considerado robusto e necessita de adaptação. Esta deverá acontecer através da imposição / relaxamento de regras sobre os modelos gerados, de modo a refletir de forma mais ajustadas às características do sistema sob estudo.

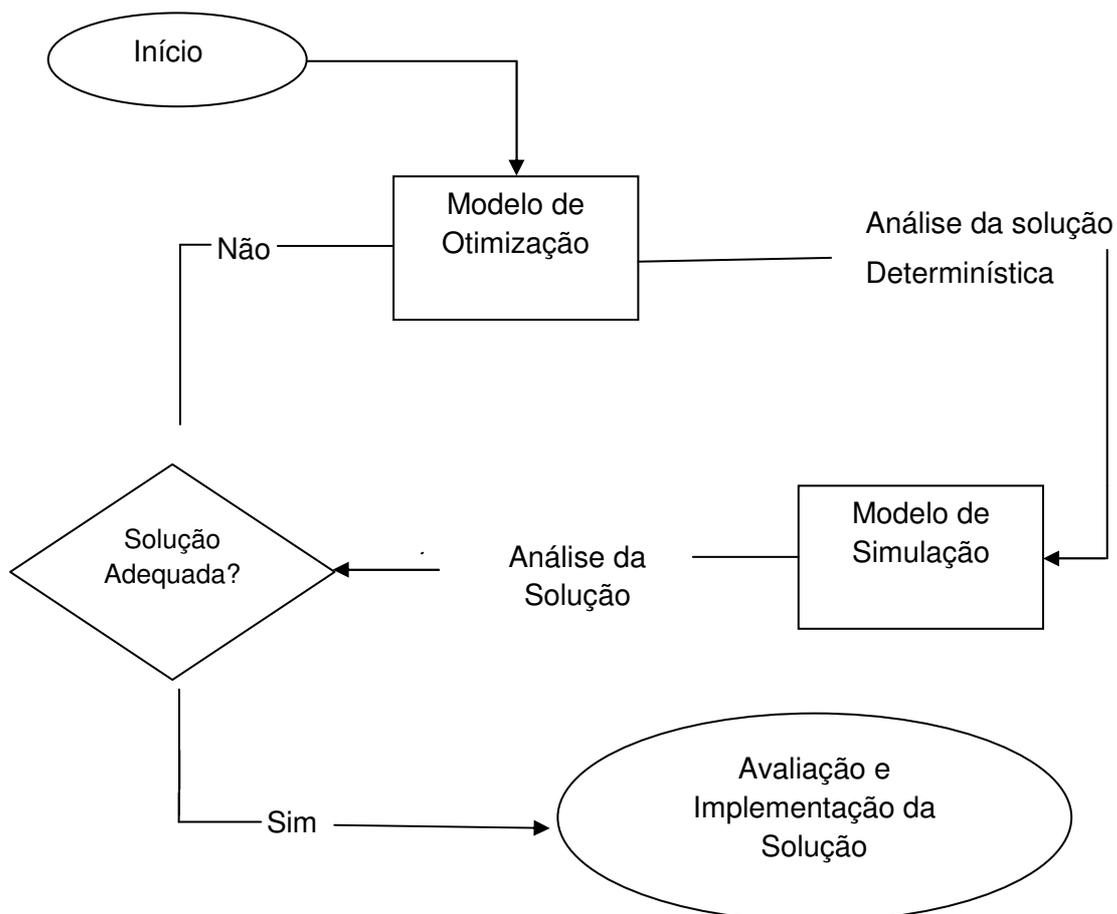


Figura 10 - Fluxo de simulação-otimização

Segundo Pinho, Montevechi e Marins (2009) e Harrel, Ghosh e Bowden (2000), propuseram uma metodologia específica para o uso da otimização de modelos de simulação através do *SimRunner*®. Estes passos são listados a seguir.

1. Definir as variáveis que afetarão as respostas do modelo e que serão testadas pelo algoritmo de otimização. São estas variáveis que terão o valor alterado a cada rodada de simulação.
2. Definir o tipo de variável (real ou inteira) e limites inferiores e superiores. Durante a busca, o algoritmo de otimização gerará soluções respeitando o tipo das variáveis e seus limites. O número de variáveis de decisão e a gama de valores possíveis afetam o tamanho do espaço de busca, alterando a dificuldade e o tempo consumido para identificar a solução ótima.
3. Definir a função objetivo para avaliar as soluções testadas pelo algoritmo. A função objetivo já poderia ter sido estabelecida durante a fase de projeto do estudo de simulação tendo por base peças (*entities*), equipamentos (*locations*), operários (*resources*) entre outros, buscando minimizar, maximizar ou fazer uso de ambos em diferentes variáveis, dando inclusive pesos diferentes para compor a função objetivo.
4. Selecionar o tamanho da população do Algoritmo Evolutivo. No caso do *SimRunner*® o algoritmo evolutivo utilizado é o Algoritmo Genético. O tamanho da população afeta a confiabilidade e o tempo requerido para a condução da busca, assim, é necessário que haja um equilíbrio entre o tempo requerido e o resultado esperado da otimização. Nesta fase também é importante definir outros parâmetros como: precisão requerida, nível de significância e número de replicações.
5. Após a conclusão da busca um analista deve estudar as soluções encontradas, uma vez que, além da solução ótima, o algoritmo encontra várias outras soluções competitivas. Uma boa prática é comparar todas as soluções tendo como base a função objetivo.

## 2.7 CONCLUSÃO DA REVISÃO DE LITERATURA

Entende-se que na evolução das técnicas aplicadas ao sistema produtivo na área da manufatura o desenvolvimento de novos processos não descarta a utilização dos conhecimentos adquiridos anteriormente. Os processos antigos foram

incrementados com novas idéias à medida que se apresentam novos desafios à produção. Por este motivo, a revisão do caráter evolucionário de tais técnicas é importante, pois mantém vivo os caminhos percorridos, facilita o desenvolvimento de novos modelos com o aproveitamento dos conceitos, ferramentas e experiências já existentes para a solução de novos problemas.

Essa pesquisa revela que a busca mundial em melhorias nos métodos de projeto, trabalho e de produção atuais, com ênfase nos subsistemas de programação, execução e controle tem sido constante pela vantagem de usar os computadores como ferramentas de modelagem, análise e otimização e não somente como base para dados. Apresentam-se os diversos sistemas de produção ou manufatura, mais usados atualmente conforme a área de atuação da empresa. Registra também conceitos sobre o uso da Simulação aplicados em sistemas de produção, *scheduling* da produção em *Job Shop*, técnica de simulação para *scheduling* da produção em *Job Shop*, leiaute e métodos de otimização combinados com a simulação computacional a eventos discretos que têm sido utilizados em diversas aplicações na área da manufatura atualmente. Um fato em que os autores são unânimes em afirmar é que, o Departamento de PCP e um setor de apoio à produção e deve ser sempre atualizado acompanhando o desenvolvimento e a tendência mundial em busca de melhorias de processo e gestão. No início somente empresas de grande porte usavam máquinas computadorizadas para executarem seus produtos com maior qualidade e rapidez. Atualmente empresas menores, também estão fazendo adquirindo máquinas modernas e computadorizadas, melhorando seu leiaute de acordo com o processo de manufatura de sua empresa. O mesmo acontece com o uso da simulação e da otimização.

Como já mostrado, modelos de simulação procuram representar o mundo real objetivando permitir a geração e análise de alternativas antes de programar qualquer uma delas. Os administradores podem criar ambientes futuros possíveis e testarem alternativas.

O critério de escolha da melhor alternativa não é fixado na estrutura do modelo e é aplicado pelo analista conforme representa a Figura 11.

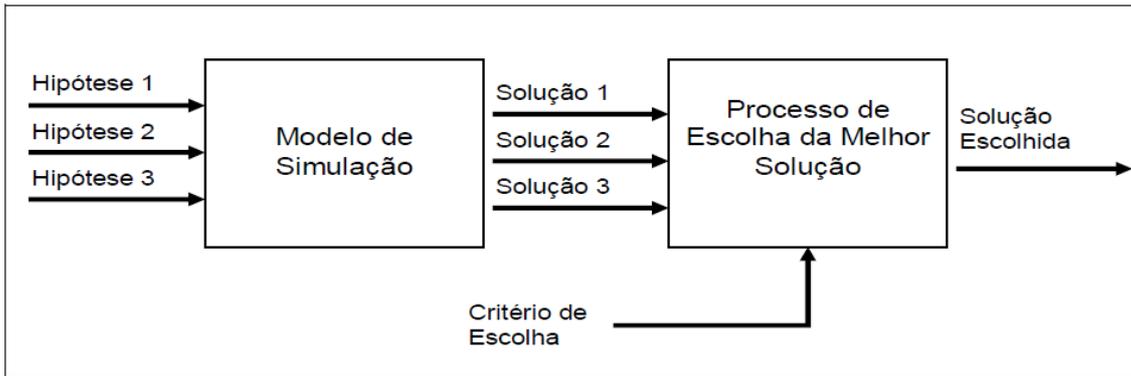


Figura 11 - Processo de decisão com modelos de simulação. Fonte: Adaptado de (ANDRADE, 1998).

Contrário ao modelo de simulação, o modelo de otimização não permite escolha de alternativa, visto que é estruturado para selecionar uma única, que segundo o critério do analista, será considerada “ótima”. O critério faz parte da estrutura do modelo, que através de uma análise matemática encontra a melhor solução. Essa análise matemática é processada usando métodos sistemáticos de solução que são chamados de algoritmos.

Segundo o critério, a “solução ótima” encontrada é usada como referência para decisão real. Figura 12 ilustra o processo.

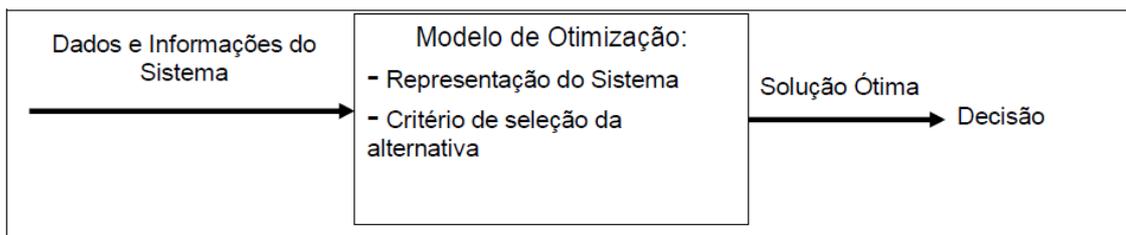


Figura 12 - Processo de decisão com modelos de otimização. Fonte: Adaptado de (ANDRADE, 1998).

De acordo com os conceitos de simulação e otimização apresentados pode-se comparar qualitativamente as características apresentadas conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Comparação qualitativa dos métodos de modelagem (ANDRADE, 1998).

Características	Simulação	Otimização
Simplificações do sistema real	Baixa	Alta

Investimento no desenvolvimento da ferramenta	Alto	Baixo
Risco de desestabilizar o sistema real	N/A	N/A
Flexibilidade	Alta	Média
Complexidade na construção da ferramenta	Alta	Média
Complexidade na análise da resposta	Média	Baixa
Desde o início o objeto esta definido	Regra	Fundamental
Utilização de variáveis aleatórias	Aplicável	Difícil aplicação
Repetibilidade	Alta	Alta
Realização de análise de sensibilidade	Baixa	Alta
Identificação de gargalos	Alta	Média

(\*) N/A= não se aplica

Foi constatado que existe um caminho bem explorado de técnicas para resolução de problemas, no sentido de aprimorar, em cada uma das áreas do conhecimento, separadamente (no caso, simulação e otimização). Porém se deixa de aproveitar o potencial que se pode conseguir com a integração dessas técnicas. Existem poucos estudos nessa área específica já que, como já mencionado, durante a década de 90, a simulação e a otimização, na prática, eram mantidas separadamente. Contudo, a partir do século XXI, foram desenvolvidos softwares capazes de fazer a integração das técnicas de simulação com otimização conforme demonstrados nos trabalhos de Fu (2002); Banks *et al.* (2005); Hao e Shen (2008); (SILVA, 2005) e outros.

Diante dos problemas encontrados é que esse trabalho foca o assunto da utilização da simulação discreta computacional combinada com algoritmo de escalonamento para otimização, nas soluções dos problemas de *scheduling* da produção em processo *job shop*.

### **3 SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO DE PROCESSO *JOB SHOP***

Existem muitos recursos complexos aperfeiçoados, importantes, que tem que ser projetados de forma que certas metas sejam otimizadas, Morito et al. (1999). Modelagem e análises são dois fatores, freqüentemente críticos para o êxito do projeto de um bom sistema. Então, nesse sentido, a programação matemática é considerada uma ferramenta mais importante no processo de otimização, enquanto a simulação é bem mais adequada para avaliação de desempenho com maior flexibilidade.

Historicamente, um dos motivos do surgimento da pesquisa operacional foi à necessidade de resolver problemas logísticos. Os autores Kochel, Kunze e Nielander (2003) afirmam que os sistemas de hoje, que tiveram de ser projetados de forma a controlar um caminho ótimo, são tão complexos que aproximações analíticas tradicionais não direcionam as soluções suficientes. Portanto, esses autores sugerem a união de métodos de pesquisa operacional com ciência da computação.

Como resultado dessa união surgiram métodos de simulação-otimização, que, por meio de um simulador do sistema real a ser investigado, é integrado com métodos de otimização satisfatórios para um determinado problema.

Atualmente, o sistema combinado, simulação-otimização é uma área ativa de pesquisa. De acordo com Granger, Krishnamurthy e Robinson (2002), um dos primeiros métodos proposto foi o de aproximação estocástica. Os analistas têm aplicado técnicas de aproximação (heurísticas) para produzir ferramentas de

avaliação mais rápidas e simplificadas, visando melhorar o desempenho de sistemas industriais.

### 3.1 CARACTERÍSTICAS DA SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO

Azadivar (1999) relata que quando se compara a simulação-otimização com problemas genéricos de programação não lineares, as principais características são:

- As funções-objetivo e as restrições são funções estocásticas de variáveis de decisão determinísticas, representando o maior problema na estimação de variáveis locais (pontuais). Além disso, trabalha-se contra o uso de varredura completa, já que baseado em uma só observação de cada ponto, não se pode determinar o melhor ponto de decisão.

- Não há uma expressão analítica da função-objetivo ou das restrições. Isso elimina a possibilidade de diferenciação ou cálculo exato de gradientes locais.

- Programas de simulação computacional são muito mais caros do que a avaliação de funções analíticas. Isso torna a eficiência dos algoritmos de otimização mais crítica.

- Os usuários, em sua maioria, utilizam para modelar seus sistemas algumas linguagens de simulação. Porém, a otimização exige o uso de algumas linguagens que diferem de um usuário para outro. Não é sempre uma tarefa fácil fazer a ligação de modelos de simulação com modelos genéricos de otimização.

Morito et al. (1999) afirmam que as forças e fraquezas da programação matemática e da simulação são complementares. Enquanto a programação matemática é fraca em alguns fatores, a simulação é fraca em sua capacidade de otimização. Portanto, o ideal seria a combinação dos dois desde que existam problemas apropriados para satisfazer a junção da simulação com a otimização.

Freqüentemente, a formulação de sistemas de simulação-otimização é feita por maximização e minimização de valores esperados da função objetivo do sistema. Porém, de acordo com Azadivar (1999), nem sempre esse tem que ser o caso, pois a operação de um sistema pode ser considerado ótima se o risco de exceder certo limiar for minimizado.

Na formulação de problemas de simulação-otimização, outro assunto pertinente é o tratamento de restrições estocásticas. Essas restrições, como as funções-objetivo, são, às vezes, funções de variáveis de decisão determinísticas e primícias para definir uma região determinística possível.

Por exemplo, em um problema de alocação de recurso, a meta pode ser minimizar o *lead-time* sujeito a um inventário em processo limitado. Nesse caso, o *lead-time* e inventários em processo podem ser respostas estocásticas de um modelo de simulação.

Devem-se propor valores ótimos para as variáveis de decisão esperando que o *lead-time* seja minimizado. Mas, declarar que se deve fazer a otimização de tal forma que o valor esperado do estoque em processo não ultrapasse certo limiar, pode não ser a aproximação mais correta, pois, os inventários em processo são entidades físicas e requerem espaço físico. Mesmo que os valores esperados estejam dentro dos limites aceitos, pode ser que os valores atuais ultrapassem as restrições de espaços físicos.

Segundo, Granger, Krishnamurthy e Robinson (2002), uma característica comum a esses métodos de simulação-otimização convencionais é a simulação repetitiva do sistema, fazendo que a cada passo de melhoria, o desempenho do sistema deva ser avaliado pela simulação pelo menos uma vez.

### 3.2 VANTAGENS E DIFICULDADES DE SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO

As principais vantagens conforme Azadivar (1999) são:

- Para sistemas estocásticos, a discrepância da resposta é controlável por meio de várias técnicas de análise de dados de saída;
- Complexidade do sistema modelado não afeta, significativamente, o desempenho do processo de otimização;
- Onde estruturas de sistemas de otimização são consideradas, a simulação fornece uma vantagem que não é freqüentemente possível em procedimentos clássicos de otimização, caso em que, mediante emprego de técnicas apropriadas, a

função-objetivo ou as restrições podem ser mudadas de uma iteração a outra para refletir os planos alternativos do sistema.

Segundo Granger, Krishnamurthy e Robinson (2002), simulação é bem conhecida e muito usada para modelar vários tipos de sistemas estocásticos. Esses autores afirmam que a simulação é ativamente usada em modelo de fluxos, como por exemplo, no setor de manufatura. Porém, a simulação pode exigir um tempo de execução muito longo se o problema for grande ou complexo.

Realmente, o que se quer saber não é somente como um tipo de sistema opera, mas quais mudanças se devem fazer para que seu desempenho chegue o mais próximo possível a algum conjunto de padrões que se deseja. Por exemplo:

- Os recursos existentes disponíveis podem estar limitados não sendo possível aplicá-los no melhoramento do sistema.
- O espaço físico pode ser insuficiente para o que se pretende.
- Pode haver necessidade de aquisição de elementos produtivos.

Todas essas ações têm impacto no sistema e requerem recursos escassos. Analisando como se deve investir para a melhoria do sistema, Granger, Krishnamurthy e Robinson (2002) concluem que não existe problema de análise estática, mas de otimização. Afirmam, também, que a simulação ainda é uma ferramenta essencial, pois é a única genérica conhecida por avaliar os muitos tipos diferentes de sistema estocástico, mas tem que ser uma etapa dentro do método de simulação-otimização.

### 3.3 UM MECANISMO DE SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO EM PROCESSO *JOB SHOP*

Desta forma, o que se pretende apresentar nesta dissertação é um mecanismo para integração de um modelo de simulação com outro de otimização para analisar o fluxo de produção em um processo *job shop*. Esse mecanismo deve permitir ainda que pessoas com pouco conhecimento na área de simulação e otimização possam usá-lo. Para isto, uma interface em arquivo Excel foi construída para fazer a integração do modelo de simulação com o modelo de otimização. Esta interface recebe informações otimizadas referentes ao fluxo dos processos de

manufatura das peças. Com estas informações o Modelo de Otimização busca o melhor fluxo para alocar as peças nas máquinas. O objetivo é alcançado quando se consegue introduzir estas peças na produção sem causar atrasos de outras. Contudo, a pretensão é que o prazo de entrega acordado ou a fornecer, seja real. Os resultados são gerados após executar a simulação no Modelo de Simulação conforme se pode constatar na Figura 13. Os registros manuais são feitos na tabela de **Dados de Entrada**. Uma vez construído os Modelos de Simulação e Otimização, a necessidade de alteração só acontecerá se o leiaute for modificado. Com ajuda da simulação a solução de problemas torna-se visível, possibilitando observar, passo a passo, o caminho das peças pelas máquinas.

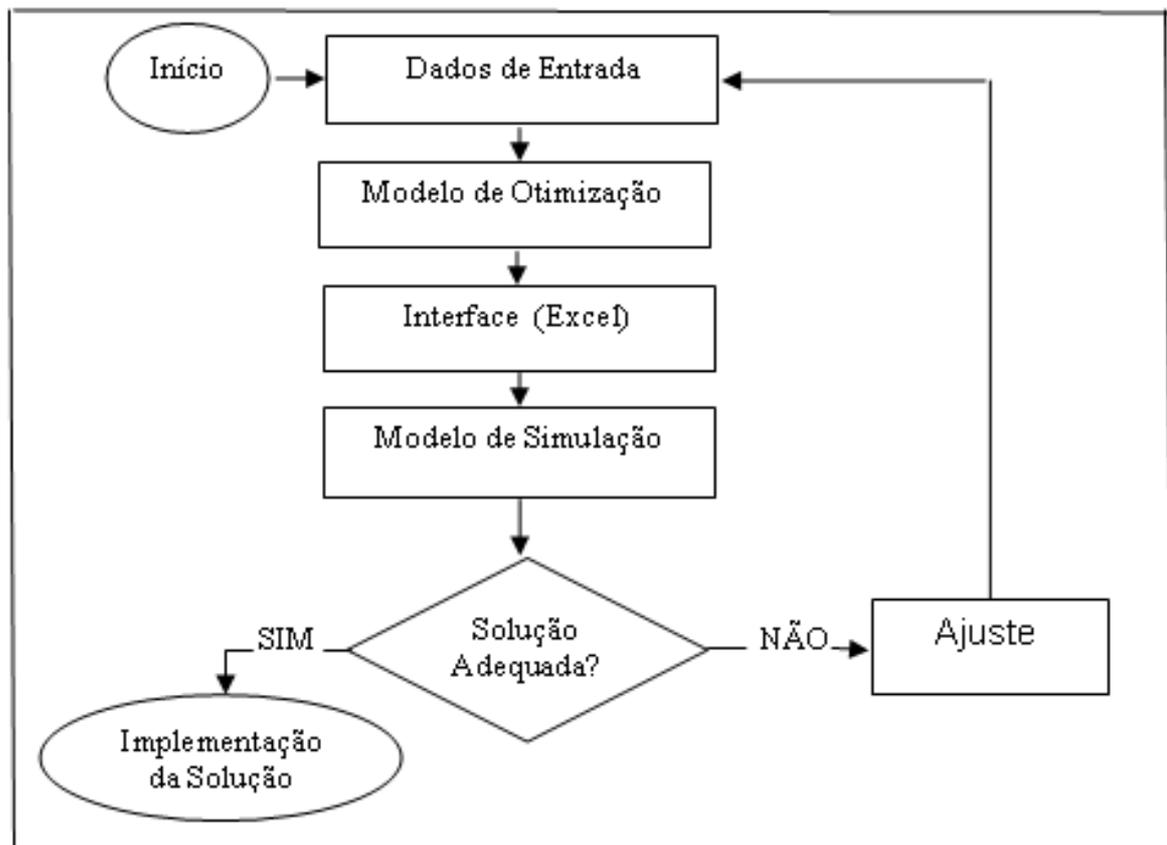


Figura 13 - Fluxograma simulação/otimização usando interface em arquivo Excel.

Comprovando que o problema se torna mais visível, mesmo no ambiente virtual, que é a simulação, pode-se observar no apêndice 3 o artigo “Um modelo de simulação para análise de usinagem metal mecânica do tipo *job shop* – um estudo de caso”, (Oliveira, J.E. ; Rangel, J.J.A. e Vianna, D.S.,2009). Com ajuda da

simulação, encontrou uma solução para aumento da produção de um tipo de peça. Criou-se um modelo que refletiu o mais próximo possível o comportamento do processo determinando como este sistema responderia a modificações que lhe foram impostas. Não foi com a máquina, Centro de Usinagem, que essa parte do problema foi resolvida.

Os passos para o método proposto são:

1º passo - Informar o momento (tempo) e o tipo da máquina em que a peça pode ser iniciada. Essas informações são registradas em “Dados de Entrada” em arquivo texto.

2º passo - O Modelo de Otimização recebe esses dados e otimiza o melhor fluxo das peças nas máquinas objetivando uma melhora no *Lead Time*.

3º passo - O Modelo de Otimização, fornece dados otimizados à Interface em arquivo Excel.

4º passo - O Modelo de Simulação lê a interface em Excel, executa a simulação, gera resultados que são analisados pelo operador do sistema.

5º passo - Verifica se o resultado atende ao objetivo (prazo de entrega). Caso o resultado não seja satisfatório fazem-se ajustes nos registros de “Dados de Entrada” (em arquivo de texto) em busca de melhor solução.

6º passo – Repete-se o 2º, 3º, 4º e 5º passos. Os resultados são comparados com os anteriores.

7º passo – Repete-se o 6º até que os resultados fornecidos pelo Modelo de Simulação sejam próximos do satisfatório.

Vale notar que Solução Adequada é aquela que atende aos prazos de entrega das peças que foram ou serão acordados com o cliente.

Também, os valores registrados nos “Dados de Entrada” podem ser modificados e inseridos pelo operador, otimizados e simulados pelos modelos, em busca de prazos de entrega que atendam ao cliente.

## 4 APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO COM OTIMIZAÇÃO EM PROCESSO *JOB SHOP*

Neste capítulo será descrito a aplicação do mecanismo proposto em um sistema hipotético, semelhante a uma situação típica de um processo *job shop* encontrado em uma empresa da indústria metal mecânica. O processo de fabricação das peças é por meio de uma operação de usinagem.

### 4.1 DESCRIÇÃO FÍSICA DO SISTEMA

A empresa produz diversos tipos de peças, porém para este caso específico foi considerada a fabricação de três tipos diferentes que formariam uma carcaça. As peças receberam a denominação de **Peça A**, **Peça B** e **Peça C**. O sistema destinado a esse trabalho está configurado em um leiaute funcional da seguinte forma: **Torno 1**, **Torno 2** e **Torno 3**; **Fresadora 1** e **Fresadora 2**; **Retífica 1**, conforme representado na Figura 14.

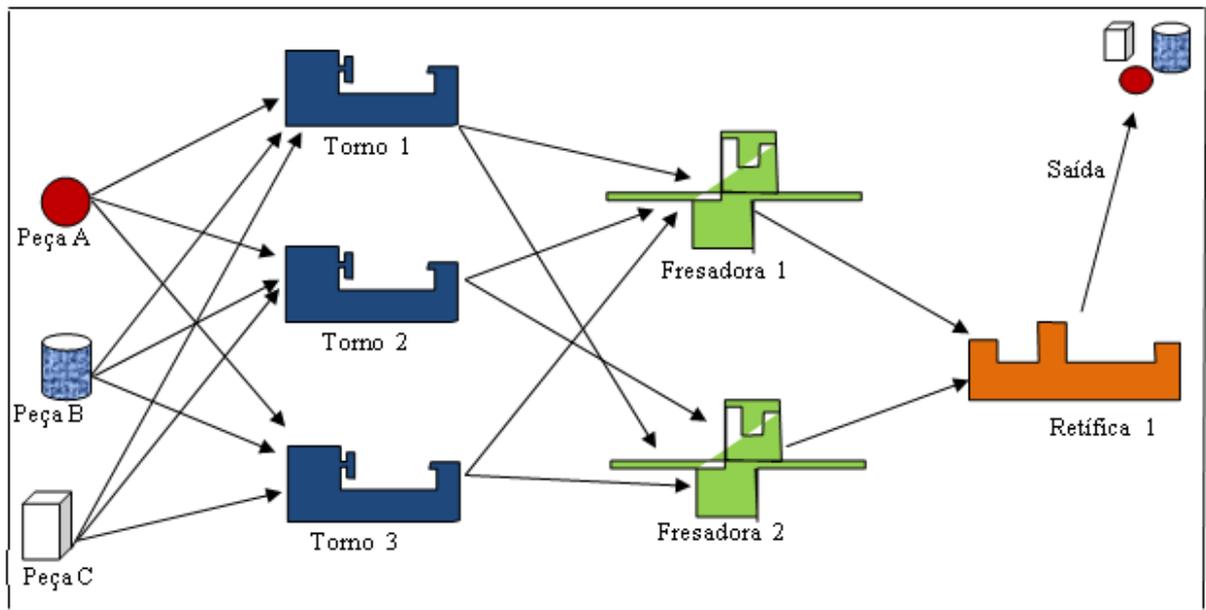


Figura 14 - Sistema para fabricação das peças.

A fabricação das peças para as respectivas montagens da carcaça obedece a um roteiro que indica em quais máquinas as peças poderão ser trabalhadas. Também, informa a seqüência a ser seguida, ou seja, qual é o próximo trabalho e em que máquina deve ser feito. Seguindo o registro do roteiro encontra-se a informação do tempo, em minutos, destinado a ao processo de fabricação de cada peça. A informação quanto ao início do processo de cada tipo de peça, em cada máquina especificada, fica registrado na tabela de “Dados de Entrada”. O sistema simulado busca mostrar a situação real da manufatura em um processo *job shop*. Portanto, não se pode iniciar um tipo de peça, a qualquer momento, em uma máquina. Esta máquina, neste momento, pode estar ocupada com outro tipo de peça.

Vale ressaltar que cada conjunto de máquinas, Tornos e Fresadoras, possuem capacidades iguais de trabalho.

Revedo os processos que estão em trâmite pela produção tem-se a informação dos tempos de ocupação das máquinas. Dessa forma é possível informar ao Modelo de Otimização o momento (minutos) em que a máquina está disponível para executar as novas operações especificadas. De posse dessas informações é feito o escalonamento otimizado do processo.

## 4.2 DESCRIÇÃO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO

As tarefas foram escalonadas nas máquinas utilizando uma versão modificada do melhor algoritmo, **AG+RC+ILS**, desenvolvido por Franco, (2010), cujo título é “algoritmos híbridos para a resolução do problema de *job shop* flexível”. Nela foram desenvolvidos diferentes algoritmos para o problema de *job shop* flexível que combinavam diferentes estratégias: Algoritmos genéticos; Reconexão por caminhos; GRASP; e ILS.

No problema de *job shop* flexível existem um conjunto de  $N$  jobs que devem ser processados por um conjunto  $M$  máquinas. Cada operação a ser realizada é representada por uma tarefa e o conjunto específico de operações que são processadas de acordo com uma ordem de precedência preestabelecida é chamado de “*Job*”. Existe um subconjunto de máquinas que podem executar cada tarefa e o número de tarefas por *job* pode ser distinto.

O algoritmo **AG+RC+ILS**, proposto por Franco, (2010) em sua dissertação foi modificado no intuito de permitir que:

- As máquinas já pudessem começar com alguma carga de trabalho;
- as tarefas pudessem ser processadas em bloco.

Como se pode observar na Figura 15, o modelo apresenta na tela um arquivo de “Entrada”, outro de “Escalonamento” e o último de “Resultado”.

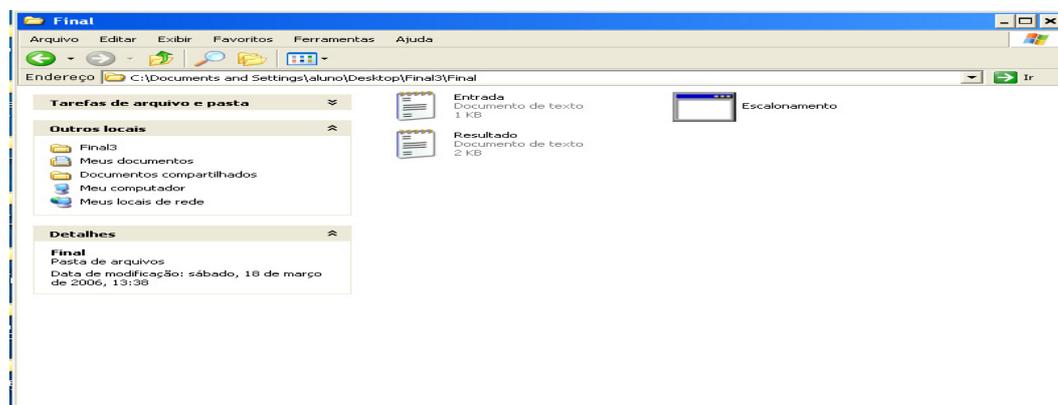


Figura 15 - Tela de início da execução do Modelo de Otimização.

A Figura 16 mostra uma tela onde estão os “Dados de Entrada” que o modelo de otimização utiliza para fazer o escalonamento.

```

Entrada - Bloco de notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
//Numero de tipos de pecas
3
//Quantidade de cada tipo de peça
10 10 10
//Numero de Tarefas por peça
3
//Numero de Tarefas
9
//Numero de Tipos de Máquinas
3
//Quantidade total de máquinas
6
//Quantidade de Máquinas de cada tipo
3 2 1
//Tempo Tarefa por tipo maquina
30 40 25
65 80 20
85 75 15
//Tempo de ocupação de cada máquina
0 40 0 30 0 50

```

Figura 16 - Dados de entrada fornecidos ao Modelo de Otimização.

No “Número de tipos de peças” está registrado o valor 3. São as peças A, B e C.

Na “Quantidade de cada tipo de peça” estão registrados os valores 10 10 10. São os três lotes de peças com 10 peças cada um. Estes valores podem ser alterados.

No “Número de Tarefas por peça” está registrado o valor 3. São três tarefas diferentes executadas em cada peça – a primeira tarefa no Torno, a segunda tarefa na Fresa e a terceira tarefa na Retífica.

No “Numero de Tarefas” está registrado o valor 9. São três tipos de peças multiplicados por três tarefas.

No “Numero de Tipos de Máquinas” está registrado o valor 3. São três tipos de máquinas diferentes - Torno, Fresa e Retífica.

Na “Quantidade total de máquinas” está registrado o valor 6. São 3 Tornos, 2 Fresas e 1 Retífica.

Na “Quantidade de Máquinas de cada tipo” estão registrados os valores 3 2 1. São os três Tornos, 2 Fresas e 1 Retífica.

No “Tempo Tarefa por tipo de máquina” estão registrados os valores 30 40 25 na primeira linha, 65 80 20 na segunda linha e na terceira linha 85 75 15. São os valores, em minutos, correspondentes aos tempos de execução do processo fabricação de cada tipo de peça, em cada máquina. A primeira coluna representa à peça A com seus respectivos tempos do processo de fabricação, sendo: 30 minutos

do Torno, 40 minutos da Fresa e 25 minutos da Retífica. A segunda coluna representa a **peça B** com seus respectivos tempos do processo de fabricação, sendo: 65 minutos do Torno, 80 minutos da Fresa e 20 minutos da Retífica. A terceira coluna representa a **peça C** com seus respectivos tempos do processo de fabricação, sendo: 85 minutos do Torno, 75 minutos da Fresa e 15 minutos da Retífica.

No “Tempo de ocupação de cada máquina” estão registrados os valores 0 40 0 30 0 50. São os valores correspondentes ao momento, em minutos, em que as máquinas estão disponíveis para iniciarem o processo de fabricação. Esses valores podem ser alterados. O primeiro tempo, o **tempo 0**, informa que o Torno1 está disponível. O segundo tempo, o **tempo 40**, informa que o Torno2 só estará disponível a partir de 40 minutos do tempo zero. O terceiro tempo, o **tempo 0**, informa que o Torno3 está disponível. O quarto tempo, o **tempo 30**, informa que o Fresa1 só estará disponível a partir de 30 minutos do tempo zero. O quinto tempo, o **tempo 0**, informa que o Fresa2 está disponível e o sexto tempo, o **tempo 50**, informa que o Retifica1 só estará disponível a partir de 50 minutos do tempo zero.

Esse modelo foi executado de forma que os valores registrados na “Quantidade de cada tipo de peça” pudessem ser alterados pelo operador. Dessa forma, os lotes de cada um dos três tipos de peças podem ser modificados. Também os “Tempo de ocupação de cada máquina” podem ser alterados pelo operador. Os demais itens não podem ser alterados.

A Figura 17 é a tela que fica aberta quando se executa o ícone “Escalonamento” .

```

C:\Documents and Settings\aluno\Desktop\Final3\Final\Escalonamento.exe
Processo executado com sucesso... em 30 segundos
Melhor Custo Alcançado : 1195.
=====
=          Fim da Execucao da Fase I !!!          =
=====
1 1 0 2 0 2 0 1 2  Custo: 1195

```

Figura 17 - Tela do comando “Escalonamento”.

A Figura 18 apresenta o “resultado” do escalonamento onde aloca: **peça B** no Torno1, no início 0 (Tempo zero), para iniciar seu primeiro processo de fabricação; **peça B** na Fresa2, após 65 minutos do tempo zero, para seu segundo processo de fabricação; **peça A** no Torno3, no início 0 (Tempo zero), para iniciar seu primeiro processo de fabricação; **peça C**, no Torno2, após 40 minutos do tempo zero, para seu primeiro processo de fabricação; **peça A** na Fresa1, após 30 minutos do tempo zero, para seu segundo processo de fabricação; **peça C** na Fresa1, após 430 minutos do tempo zero, para seu segundo processo de fabricação; **peça A** na Retífica1, após 70 minutos do tempo zero, para seu terceiro e último processo de fabricação; **peça B** na Retífica1, após 455 minutos do tempo zero, para seu terceiro e último processo de fabricação e a **peça C** na Retífica1, após 885 minutos do tempo zero, para seu terceiro e último processo de fabricação.



(Torno2) e R3 (Torno3) atendendo as funções F7 (controlar entrada peça A no Torno), F8 (controlar entrada peça B no Torno) e F9 (controlar entrada peça C no Torno). Em seguida os controles C1 (fornecimento peça A para um dos três Tornos), C2 (fornecimento peça B para um dos três Tornos) e C3 (fornecimento peça C para um dos três Tornos) decidem para qual recurso enviar as peças, R1 (Torno1), R2 (Torno2) ou R3 (Torno3).

Obedecendo às decisões tomadas pelo Modelo de Otimização as peças seguem pelas funções F1 (processo de torneamento no torno1. Peça A, 30min.; Peça B, 65min. e Peça C, 85min.), F2 (processo de torneamento no torno2. Peça A, 30min.; Peça B, 65min. e Peça C, 85min.) e F3 (processo de torneamento no torno3. Peça A, 30min.; Peça B, 65min. e Peça C, 85min.). Seguindo o fluxo, o processo obedece às funções F10 (controlar entrada peça A na Fresadora), F11 (controlar entrada peça B na Fresadora) e F12 (controlar entrada peça C na Fresadora). Os próximos passos são os controles C4 (fornecimento peça A para uma das duas Fresadoras), C5 (fornecimento peça B para uma das duas Fresadoras) e C6 (fornecimento peça C para uma das duas Fresadoras) decidem para qual recurso enviar as peças, R4 (Fresadora1) ou R5 (Fresadora2).

Mais uma vez, após decisão do Modelo de Otimização, as peças seguem pelas funções F4 (processo de fresamento na Fresadora1. Peça A, 40min.; Peça B, 80min. e Peça C, 75min.) e F5 (processo de Fresamento na fresadora2. Peça A, 40min.; Peça B, 80min. e Peça C, 75min.). Faltando passar pelo processo de retífica, as funções F13 (controlar o fornecimento de peça A para Retífica), F14 (controlar o fornecimento de peça B para Retífica) e F15 (controlar o fornecimento de peça C para Retífica) são ativadas. O recurso R6 (Retífica1) executa a função F6 (processo de retificação na Retífica1. Peça A, 25min.; Peça B, 20min. e Peça C, 75min.). Após todo o processo descrito, as peças vão para o Despacho onde saem para serem entregues aos clientes externos, ou em caso de fornecimento de Bombas completas, a clientes internos.

#### 4.4 EXPERIMENTO COM O MECANISMO PROPOSTO

A Tabela 5 apresenta uma descrição dos cenários criados. Os cenários 1, 2 e 3 foram criados com o intuito de demonstrar diferentes situações em que o sistema poderá estar sujeito sob uma situação normal de regime de trabalho. O tempo zero significa que no momento em que o lote de peça é liberado para ser executada, a máquina está pronta para iniciar o serviço imediatamente.

Tabela 5 - Cenária de ocupação das máquinas no tempo zero

Cenários	Momento (em min.) da disponibilidade do Início do Processo de Fabricação em Cada Máquina					
	Torno			Fresadora		Retífica
	1	2	3	1	2	1
1	0	40	0	30	0	50
2	150	0	50	0	150	0
3	60	0	0	40	30	90

No cenário 1 as máquinas Torno2, Fresadora1 e Retífica1 estarão ocupadas com outras peças. O Torno2 só estará disponível para uso em um dos lotes de peça propostos após 40 minutos. A Fresadora 1 só estará disponível para uso em um dos lotes de peça propostos após 30 minutos. A Retífica 1 só estará disponível para uso em um dos lotes de peça propostos após 50 minutos. As demais máquinas estarão disponíveis no tempo zero.

No cenário 2, o Torno1 só estará disponível após 150 minutos do tempo zero e a Fresadora 2 após 150 minutos. As demais máquinas estarão liberadas no tempo zero.

No cenário 3, o Torno1, só estará disponíveis, após 60 minutos do tempo zero. A Fresadora1 e 2 só estarão disponíveis, consecutivamente, após 40 e 30 minutos. A Retífica1 após 90 minutos.

Após otimizar o fluxo das peças pelos postos de trabalho, considerando as que já estão passando pelo processo, fica registrado o tempo de início de disponibilidade de cada máquina.

Na Tabela 6 encontram-se os “tempos de processos” que são fornecidos ao modelo de otimização.

Tabela 6 - Dados de Entrada fornecidos ao Modelo de Otimização.

Peça	Tempo de processo(min.)		
	Torno	Fresadora	Retífica
A	30	40	25
B	65	80	20
C	85	75	15

Como se pode observar, as **Peças A, B e C**, terão sua **primeira** operação de usinagem no **Torno**, podendo ser **1, 2 ou 3**, com tempo previsto de **30 minutos** para **peça A**, **65 minutos** para **peça B** e **85 minutos** para **peça C**. A **segunda** operação de usinagem, será na **Fresadora 1 ou 2**, com tempo previsto de **40 minutos** para **Peça A**, **80 minutos** para **peça B** e **75 minutos** para **peça C**. A **terceira** operação de usinagem, será na **Retífica 1**, com tempo previsto de **25 minutos** para **peça A**, **20 minutos** para **peça B** e **15 minutos** para **peça C**.

A Tabela 7 mostra os resultados após a otimização do escalonamento do fluxo conforme o **cenário 1** da Tabela 6.

Tabela 7 - Resultados otimizados conforme cenário 1.

Peças	Início (momento em min.)					
	Torno			Fresadora		Retífica
	1	2	3	1	2	1
<b>A</b>			0	30		70
<b>B</b>	0				65	455
<b>C</b>		40		430		885

A **peça A** teve determinada o seu primeiro processo de fabricação no **Torno3**. Como é lote de 10 peças, o tempo gasto para cada peça é de 30 minutos, esse

torno só será liberado após 300 minutos. Porém, tão logo a primeira peça ficou pronta, a Fresadora iniciou processo de fabricação, ou seja, após 30 minutos devido a sua disponibilidade. Então a **Fresadora1** estará liberada após 430 minutos do tempo zero. Apesar da **Retífica1** estar disponível após 50 minutos, a Peça A teve seu início do processo de fabricação após 70 minutos porque é o momento em que a Fresadora1 libera a primeira peça. A Retífica1 permanece 10 minutos ociosa aguardando a chegada da peça.

Para **Peça B** o início do processo de fabricação iniciou no **Torno1** no tempo zero, somente sendo liberado após 650 minutos. A **Fresadora2** como estava livre no tempo zero, iniciou seu processo de fabricação no tempo 65 minutos, que é o momento em que o torno1 libera a primeira peça. Logo em seguida, no momento 455 minutos, após a **Retífica1** liberar as Peças A, inicia-se a **Peça B**. Observa-se que a Retífica1 ficou ociosa 135 minutos em tempos alternados, aguardando as Peças A ficarem prontas na Fresadora1.

A **Peça C** teve seu primeiro processo de fabricação no **Torno2** no momento 40 minutos. Momento esse, que o torno2 passou a estar liberado. Em seguida, como a Fresadora1 foi liberada antes da Fresadora2, a **Peça C** foi alocada na **Fresadora2** no momento 430 minutos. Na seqüência a **Peça C** teve seu início na **Retífica1** aos 885 minutos.

Observa-se que a Retífica1 ficou ociosa 230 minutos em tempos alternados, aguardando as Peças B ficarem prontas na Fresadora2

A Tabela 8, pela mesma forma da tabela 7, apresenta os tempos de início de fabricação de cada lote de peças conforme **cenário 2**.

A **Peça A** teve seu primeiro processo de fabricação no **Torno2**, no início de tempo zero, passando para a **Fresadora1** no início de tempo 30 minutos e pela **Retífica1** no momento 70 minutos.

A **Peça B** teve seu primeiro processo de fabricação no **Torno1**, no início de tempo 150 minutos, passando para a **Fresadora2** no início de tempo 215 minutos e pela **Retífica1** no momento 455 minutos.

A **Peça C** iniciou-se no **Torno3**, no início de tempo 50 minutos, passou para a **Fresadora1** no momento 430 minutos e em seguida para a Retífica1 no momento 1035 minutos.

Tabela 8 - Resultados otimizados conforme cenário 2.

Peças	Início (momento em min.)					
	Torno			Fresadora		Retífica
	1	2	3	1	2	1
<b>A</b>		0		30		70
<b>B</b>	150				215	455
<b>C</b>			50	430		1035

Da mesma forma, a Tabela 9, após toda descrição das anteriores apresenta-se o resultado do escalonamento otimizado do fluxo das peças e máquinas conforme cenário 3.

Tabela 9 - Resultados otimizados conforme cenário 3.

Peças	Início (momento em min.)					
	Torno			Fresadora		Retífica
	1	2	3	1	2	1
<b>A</b>		0			30	90
<b>B</b>	60			125		455
<b>C</b>			0		430	945

Vale notar que as peças uma vez iniciadas na máquina, não para o processo até que termine todo o lote. As peças são diferentes e apesar de não ter sido computado o tempo de preparação de máquina foi considerado uma preparação para cada lote.

Para os testes de simulação consideraram-se os três cenários. Os valores de cada cenário são informados à interface em Excel, conforme Tabela 10. O Modelo de Simulação faz a leitura e simula fornecendo informações necessárias quanto ao comportamento das peças ao passar pelo sistema.

Tabela 10 - Cenário 1 na interface para simulação.

Interface para Montagem de Carcaças Cenário 1			
Peças	Torno	Início (min)	Processo (min)
A	3	0	30
B	1	0	65
C	2	40	85
Peças	Fresa	Início (min)	Processo (min)
A	1	30	40
B	2	65	80
C	1	430	75
Peças	Retífica	Início (min)	Processo (min)
A	1	70	25
B	1	455	20
C	1	885	15

Nessa tabela, a coluna **Peças** representa os três tipos diferentes de peças que serão fabricadas, sendo **Peças A, B e C**. A coluna das máquinas que são o **Torno**, a **Fresa** e a **Retífica** está o número da máquina que o modelo de otimização alocou correspondente a cada tipo de peça. Na coluna **Início (min)** está registrado o tempo, em minutos, de início do processo de fabricação, referente à máquina alocada e o tipo de peça. Representa o início do tempo em que a máquina está liberada para executar uma operação. A coluna **Processo (min)** apresenta o tempo, em minutos, de execução da peça em referência na máquina alocada. Portanto, conforme o **cenário 1**, o lote referente a **Peça A**, composto por 10 unidades, tem o início do processo de fabricação no **Torno3**, no tempo zero, levando um tempo de 30 minutos para executar cada peça. Após terminar a primeira peça, passa para a **Fresadora1**, que só pode iniciar o processo de fabricação, dessa peça, após o tempo de 30 minutos. O processo de fabricação, para cada peça, leva o tempo de

40 minutos. Finalmente inicia o processo de fabricação na **Retífica1**, no tempo 70 minutos, apesar da retífica estar liberada no tempo 50 minutos, levando 25 minutos para processar cada peça.

O lote referente à **Peça B**, composto por 10 unidades, tem o início do processo de fabricação no **Torno1**, no tempo zero, levando um tempo de 65 minutos para executar cada peça. Após terminar a primeira peça, passa para a **Fresadora2**, que só pode iniciar o processo de fabricação, dessa peça, após o tempo de 65 minutos. O processo de fabricação, para cada peça, leva o tempo de 80 minutos. Finalmente inicia o processo de fabricação na **Retífica1**, no tempo 455 minutos, levando 20 minutos para usinar cada peça.

O lote referente à **Peça C**, composto por 10 unidades, tem o início do processo de fabricação no **Torno2**, no tempo 40 minutos, levando um tempo de 85 minutos para executar cada peça. Após terminar a primeira peça, passa para a **Fresadora1**, que só pode iniciar o processo de fabricação, dessa peça, após o tempo de 430 minutos. O processo de fabricação, para cada peça, leva o tempo de 75 minutos. Finalmente inicia o processo de fabricação na **Retífica1**, no tempo 885 minutos, levando 15 minutos para usinar cada peça.

Na tabela 11, referente ao **cenário 2** não é diferente, segue o mesmo procedimento da tabela 22.

A **Peça A** inicia o processo de fabricação no **Torno2**, no tempo zero, levando 30 minutos por peça. A seguir passa para **Fresa1**, no tempo 30 minutos, levando 40 minutos por peça. Por fim, vai para **Retífica1**, no tempo 70 minutos, levando 25 minutos por peça.

A **Peça B** inicia o processo de fabricação no **Torno1**, no tempo 150 minutos, levando 65 minutos por peça. A seguir passa para **Fresa2**, no tempo 215 minutos, levando 80 minutos por peça. Por fim, vai para **Retífica1**, no tempo 455 minutos, levando 20 minutos por peça.

Tabela 11 - Cenário 2 na interface para simulação.

Interface para Montagem de Carcaças Cenário 2			
Peças	Torno	Início (min)	Processo (min)
A	2	0	30
B	1	150	65
C	3	50	85
Peças	Fresa	Início (min)	Processo (min)
A	1	30	40
B	2	215	80
C	1	430	75
Peças	Retífica	Início (min)	Processo (min)
A	1	70	25
B	1	455	20
C	1	1035	15

A **Peça C** inicia o processo de fabricação no **Torno3**, no tempo 50 minutos, levando 85 minutos por peça. A seguir passa para **Fresa1**, no tempo 430 minutos, levando 75 minutos por peça. Por fim, vai para **Retífica1**, no tempo 1035 minutos, levando 15 minutos por peça.

Na tabela 12, referente ao **cenário 3** a **Peça A** inicia o processo de fabricação no **Torno2**, no tempo zero, levando 30 minutos por peça. A seguir passa para **Fresa2**, no tempo 30 minutos, levando 40 minutos por peça. Por fim, vai para **Retífica1**, no tempo 90 minutos, levando 25 minutos por peça. A **Peça B** inicia o processo de fabricação no **Torno1**, no tempo 60 minutos, levando 65 minutos por peça. A seguir passa para **Fresa1**, no tempo 125 minutos, levando 80 minutos por peça. Por fim, vai para **Retífica1**, no tempo 455 minutos, levando 20 minutos por peça. A **Peça C** inicia o processo de fabricação no **Torno3**, no tempo zero, levando 85 minutos por peça. A seguir passa para **Fresa2**, no tempo 430 minutos, levando

75 minutos por peça. Por fim, vai para **Retífica1**, no tempo 945 minutos, levando 15 minutos por peça.

Tabela 12 - Cenário 3 na interface para simulação.

<b>Interface para Montagem de Carcaças Cenário 3</b>			
<b>Peças</b>	<b>Torno</b>	<b>Início (min)</b>	<b>Processo (min)</b>
A	2	0	30
B	1	60	65
C	3	0	85
<b>Peças</b>	<b>Fresa</b>	<b>Início (min)</b>	<b>Processo (min)</b>
A	2	30	40
B	1	125	80
C	2	430	75
<b>Peças</b>	<b>Retífica</b>	<b>Início (min)</b>	<b>Processo (min)</b>
A	1	90	25
B	1	455	20
C	1	945	15

Os dados da interface, gerados pelo Modelo de Otimização, são lidos pelo Modelo de Simulação fornecendo resultados que estão registrados na Tabela 13. Conhecendo os resultados é possível fornecer o prazo de entrega de cada tipo de peça, ao cliente.

Tabela 13 - Resultado do final do processo.

<b>Cenário</b>	<b>Peça</b>	<b>Prazo de Entrega (minutos)</b>
1	A	795,27
	B	1248,57
	C	1229,08
2	A	542,40
	B	1080,62
	C	1206,88
3	A	489,88
	B	986,24
	C	1269,85

Considerando que a empresa tem um jornada de trabalho de 40 horas semanais, analisando o resultado da simulação na Tabela 13, pode-se definir os prazos de entrega de cada tipo de peça. No **cenário 1** a **Peça A** estará pronta para entrega ou montagem após 13,25 horas de trabalho ou 1 dia inteiro, mais 5 horas e 15 minutos do outro dia. A **Peça B** estará pronta para entrega ou montagem após 20,80 horas de trabalho ou 2 dias inteiro, mais 4 horas e 48 minutos do outro dia. A **Peça C** estará pronta para entrega ou montagem após 20,48 horas de trabalho ou 2 dias inteiro, mais 4 horas e 29 minutos do outro dia.

No **cenário 2** a **Peça A** estará pronta para entrega ou montagem após 9,04 horas de trabalho ou 1 dia inteiro, mais 1 hora e 3 minutos do outro dia. A **Peça B** estará pronta para entrega ou montagem após 18,01 horas de trabalho ou 2 dias inteiro, mais 2 horas do outro dia. A **Peça C** estará pronta para entrega ou montagem após 20,11 horas de trabalho ou 2 dias inteiro, mais 4 horas e 7 minutos do outro dia.

No **cenário 3** a **Peça A** estará pronta para entrega ou montagem após 8,16 horas de trabalho ou 1 dia inteiro, mais 10 minutos do outro dia. A **Peça B** estará pronta para entrega ou montagem após 16,44 horas de trabalho ou 2 dias inteiro, mais 26 minutos do outro dia. A **Peça C** estará pronta para entrega ou montagem após 21,16 horas de trabalho ou 2 dias inteiro, mais 5 horas e 10 minutos do outro dia.

Para a selecionar o melhor cenário deve-se considerar duas possíveis situações. As peças A, B e C serão entregues ao cliente em lotes separados ou serão entregues juntas montadas uma a outra. Caso seja a **primeira situação**, o melhor é o **cenário 3** porque a **Peça A** poderá ser entregue no tempo **8,16 horas** a partir do início da fabricação, enquanto no cenário 2 será no tempo 9,04 horas e tempo maior ainda é o cenário 1 com 13,25 horas. A **Peça B** poderá ser entregue no tempo **16,44 horas** a partir do início da fabricação enquanto no cenário 2 será no tempo 18,01 horas e tempo maior ainda é o cenário 1 com de 20,80 horas. Somente a **Peça C**, que nesse caso, será entregue no tempo maior que os outros 2 cenários, **21,16 horas** a partir do início da fabricação, enquanto no cenário 2 será no tempo 20,11 horas e o cenário 1 com de 20,48 horas.

Para a **segunda situação**, o **cenário 2** será melhor, pois como as peças serão montadas uma a outra, deve-se aguardar até que a última fique pronta para se iniciar a montagem.

## 5 CONCLUSÕES

O mecanismo proposto neste trabalho apresentou-se como sendo de simples utilização, atendendo aos objetivos inicialmente propostos. Desta forma, em primeiro lugar, teve como objetivo realizar ampla revisão bibliográfica sobre os assuntos em destaque que são: otimização e simulação em processo *job shop*. Dentre os tópicos de assunto visto nessa revisão pode-se citar: simulação de sistemas; sistemas de produção; leiaute; PCP; *scheduling* da produção em *job shop*; otimização e simulação de eventos discretos.

O modelo desenvolvido para a otimização foi construído aplicando algoritmo **AG+RC+ILS**, proposto por Franco, 2010 em sua dissertação, modificado, com o objetivo de encontrar o melhor fluxo, pelas diversas máquinas, por onde os lotes de peças deveriam passar.

Portanto, otimizando o fluxo, pode-se prever os resultados. Entretanto, somente com o modelo de otimização, informando em que momento as peças entrarão na máquina e em qual delas, não se chega a um resultado que possa ser analisado. Em vista disso, também foi usado um modelo de simulação, auxiliando e mostrando, com maiores detalhes, o funcionamento completo do sistema.

A simulação juntamente com a otimização veio se completarem para auxiliar na manufatura, principalmente em processo *job shop*, apresentando um resultado satisfatório.

Utilizando-se de uma interface em arquivo Excel, criada para receber os dados do modelo de otimização de forma que possibilite a leitura pelo modelo de

simulação tornou-se possível a integração da simulação com a otimização. A vantagem é que o registro desses dados (de entrada) são feitos na interface em Excel. Portanto, podem ser analisados e modificados por pessoas com pouco conhecimento em simulação e otimização.

O resultado do cenário 1 é o real que no momento (no tempo zero) se encontra no sistema produtivo. Como o resultado não foi satisfatório verificou-se a possibilidade de alteração no sistema e montou-se o cenário 2. Também o cenário 2 não atendeu as expectativas e montou-se um cenário 3. Poderia montar quantos cenários fossem necessários. O ideal é que se construam vários cenários possíveis e após análise faça a escolha daquele que atende a necessidade.

A análise do resultado se deu sob duas condições: a primeira seria entregar as peças lote por lote. Nesse caso, o cenário 3 foi o ideal pois as peças do lote A e do lote B ficariam prontas para serem entregues antes que as do cenário 1 e 2. Somente as peças do lote C ficariam prontas, para serem entregues, após as do cenário 1 e 2. A segunda condição seria montar as peças uma com a outra, o qual o cenário 2 seria o melhor, pois as peças do lote C, apesar de ter o maior tempo, ainda é menor que as demais.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como nesse trabalho foi considerado um leiaute com um pequeno grupo de máquinas e somente 3 tipos de peças passando pelo processo, segue abaixo sugestão para trabalhos futuros:

- Considerar um leiaute real, com maior grupo de máquinas considerando a distância entre elas, operadores e tipo de transporte.
- Para o Modelo de Simulação, considerar quebra de máquinas, falha nas ferramentas, tempo de *set-up* e tempo de transporte.
- Para o Modelo de Otimização, como nesse trabalho foi considerado tempo fixo da execução da peça, considerar um tempo com desvio padrão. Executar melhorias no modelo de forma que seja possível alterar todos os dados de entrada.
- Melhorar o Método da interface entre os modelos de otimização e simulação tornando-se mais eficaz a entrada e leitura dos dados entre os mesmos.

## 7 REFERÊNCIAS

AGGARWAL, S. C. **MRP, JIT, OPT, FMS?** Revista Harvard Business. v.63, n.5, p.8-16, Sep./Oct., Boston, USA, 1985.

AGOSTINHO, O. L. **Sistemas de Manufatura**, Faculdade de Engenharia Mecânica/UNICAMP, Campinas, SP, 1994.

AKBAY, K., 1996, "**Using Simulation Optimization to Find the Best Solution**", IIE Solutions, May 1996, N Y, USA, p. 24-29.

ANDRADE, Eduardo Leopoldino de. **Introdução à Pesquisa Operacional: metodos e modelos para a análise de decisão**. 2. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 1998.

ASKIN, R. G.; STANDRIDGE, C.R. **Modeling and analysis of manufacturing systems**. New York: John Wiley & Sons, 1993.

BAINES, T.; MASON, S.; SIEBER, P. O.; LADBROOK, J. *Humans: the missing link in manufacturing simulation?* Simulation Modelling Practice and Theory, N Y, USA,12, 2003.

BANKS, J.; CARSON, J. S. **Discrete-event System Simulation**. New Jersey, USA: Prentice-Hall; Englewood Cliffs, 1984.

BANKS, J.; CARSON, J.S.; NELSON, B.L.; NICOL, D.M. **Discrete-event system simulation**. 2. ed. New Jersey. USA: Prentice Hall, 2005.

BLACK, JT **O Projeto da Fábrica com Futuro**. Porto Alegre, RS: Bookman Companhia, 1998. 281p.

BURBIDGE, J. L. **Production Planning and control – A Personal Philosophy, Computers in Industry**. NY, USA. Vol. 6, p.447-487, 1985.

CANEN, A. G.; WILLIAMSON, G. H. **Facility layout overview: towards competitive advantage**. Facilities. London, Inglaterra, Vol. 16, n. 7/8, p.198-203, 1998.

CARNEIRO, Mara Lúcia F. **Síntese Automatizada de Colunas de Destilação: uma abordagem alternativa ao processo de projeto**. Dissertação de mestrado em engenharia da informática. PUCRS, Porto Alegre, RS, 1996.

CARSON II, J. Introduction to modeling and simulation. In: **Winter simulation conference**, Miami, USA, 2004, p. 9-16.

CHWIF, L., PAUL, R. J., & M. R. P. Barretto, (2006), **Discrete event simulation model reduction: A causal approach**, *Simulation Modeling Practice and Theory*, Vol. 14, Iss. 7, Ottawa, Canadá. p. 930-944.

CORRÊA, L. H., GIANESI, I. **Just-in-Time, MRP II e OPT: um enfoque estratégico**, São Paulo: Atlas, 1993.

CORRELL, J.G. **Reengineering the MRPII Environment: The Key is Successfully Implementing Change**. IIE Solutions, p.24, Dartmouth, USA, July 1995.

COSTA, R. F. S. et al, **Minimização da resistência à mudança em uma célula de manufatura utilizando um modelo de simulação a eventos discretos**. Bauru, SP: SIMPEP, 2008.

DURAN, O.; BATOCCHIO, A. **A produtividade cresce com o planejamento do processo auxiliado por computador**, p. 70 – 79, Revista Máquinas e Metais, Ano XXXII, N° 381, novembro, São Paulo, SP, 1997.

EDGAR, T. F.; HIMMELBLAU, D. M. **Optimization of chemical processes**. New York, USA: McGraw-Hill, 2001.

FALSARELA, O. M.; CHAVES, O. C. Sistemas de informação e sistemas de apoio à decisão. Artigo 2004 Disponível em: <<http://www.chaves.com.br/TEXTSELF/COMPUT/sad.htm>>. Acessado em 10/01/2010.

FAVARETTO, F. **Uma contribuição ao processo de gestão da produção pelo uso da coleta automática de dados de chão de fábrica**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2001.

FIEDLER et al. **Otimização do layout de marcenarias no sul do Espírito Santo baseado em parâmetros ergonômicos e de produtividade**. Revista Árvore. Vol. 33, número 1, p.161-170, 2009. Viçosa, MG

FRANCO, I. S. **Algoritmos Híbridos para a Resolução do Problema de Job Shop Flexível**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Candido Mendes. Campos dos Goytacazes, RJ. 2010.

FREITAS FILHO, P.J. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas**. 2. ed. São Paulo, SP: Visual, 2008. 372 p.

FREITAS FILHO, Paulo José de. **Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas com Aplicações em Arena**. Florianópolis, SC: Visual Books, 2001.

FRIEDRICH, L. F.; STANGE, P. **Desenvolvendo e implementando software de controle de células flexíveis de manufatura**, p. 105- 110, Revista Máquinas e Metais, Ano XXXII, N° 382, novembro, São Paulo, SP, 1997.

Fu, M. C., 2002. **Optimization for Simulation: Theory vs. Practice**. Journal on Computing, vol.14, n 3. Porto Alegre, RS

GABELA, J.M. **Contribuição da informatização no sistema Kanban: critérios e exemplos de implementação**. Dissertação de mestrado. UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 1995. p.162.

GARCIA, C. **Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos**. São Paulo: Edusp – Editora da Universidade de São Paulo, 1997.

GARCIA, Silvio. **Planejamento e controle da produção**. Mensagem recebida por: <jfmmelo@bol.com.br.> Acesso em 29 set. 2004.

GOLDRATT, E. M.; FOX, R. E. **A corrida pela vantagem competitiva**. São Paulo: IMAM, 1992.

GORGETTI, A. D. **Implementação da Manufatura Enxuta em um Ambiente com diversidade de componentes e Kits de entrega**. 112f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas. São Paulo, 2004.

HAO, Q.; SHEN, W., 2008. **Implementing a hybrid simulation model for a Kanban-based material handling system**. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v.24, p.635–646. Canada.

HARREL, C. R.; GHOSH, B. K.; BOWDEN, R. **Simulation Using Promodel**. New York, USA: McGraw-Hill, 2000.

J. S. CARSON. **Introduction to modeling and simulation**. Proceedings of the Winter Simulation Conference, California, USA, 2005.

JAIN, A. N.; MEERAN S., **A State-of-the-Art Review of Job-Shop Scheduling Techniques**. Scotland, UK, 1998

KELTON, W. David; SADOWSKI, Randall P; SADOWSKI, Deborah A. **Simulation with Arena**. Boston, USA: McGraw-Hill, 1997.

LAUDON, K. C.; LAUDON, J. P. **Management information systems: managing the digital firm**. 8 ed. Nova Jersey, USA: Upper Saddle River, NJ; Prentice-Hall, 2004. . p.534.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation Modeling and Analysis**. 2 ed. New York, USA : McGraw-Hill, 1991, p. 400.

LEAL, F.; ALMEIDA, D.A. E MONTEVECHI, J.A.B. ***Uma Proposta de Técnica de Modelagem Conceitual para a Simulação através de Elementos do IDEF.*** Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional – XL-SBPO, João Pessoa - Pb, 1-12, 2008.

LIMA, E. P.; CHWIF, L.; BARRETO, M. E. P. ***O uso da simulação de eventos discretos como ferramenta de apoio na detecção de gargalos nos sistemas de produção.*** In: XIV Simpósio de Engenharia de Produção, 05 a 07 de Novembro de 2007. Bauru, SP.

LUBBEN R. T. ***Just in Time: Uma Estratégia Avançada de Produção.*** 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1989.

LUCERO, A. G. R. ***Um método de Otimização para a Programação da Manufatura em Pequenos Lotes.*** 99f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2001.

MARIA, A. ***Introduction to modeling and simulation.*** In: Winter simulation conference, Miami, USA: p. 7-13, 1997.

MARTINS, R. A., ***Flexibilidade e Integração no novo paradigma produtivo mundial: estudos de casos.*** São Carlos – SP, 137 p. 1993. Dissertação de Mestrado. EESC/USP, 1993.

MELO, J. F. M.; VILAR, A. M.; SEVERIANO FILHO, C.. ***O posicionamento do Planejamento e Controle da Produção – PCP em uma indústria alimentícia.*** In: XIII SIMPEP - Bauru, SP, Brasil, 6 a 8 de Novembro de 2006.

MESQUITA, M.; et. al. ***Programação detalhada da produção.*** In: LUSTOSA, L. J. et. al. *Planejamento e Controle da Produção.* Rio de Janeiro: Elsevier. 2008.

MONDEN, Y. ***Toyota Production System – An integrated approach to Just-in-time.*** Norcross, Georgia, USA; Engineering and Management Press, 1998, 480p.

MONTEVECHI, J.A.B.; PINHO, A.F. de; LEAL, F.; MARINS, F.A.S. ***Application of Design of Experiments on the simulation of a process in an automotive industry.*** In: Winter Simulation Conference, 09 a 12 de Dezembro de 2007. *Anais:* Washington, DC, 2007.

MUTHER, Richard. ***Planejamento do layout: Sistema SLP.*** São Paulo: Edgard Blücher, 1978.

NARDINE, J.J.; ***Tecnologias e Sistemas de Gestão da Produção e da Qualidade; um estudo na indústria metal mecânica, 1999.*** Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo, 1999.

O'KANE, J.F.; SPENCELEY, J.R.; TAYLOR, R. ***Simulation as an essential tool for advanced manufacturing technology problems.*** Journal of Materials Processing Technology, 107, 2000. p. 412-424

OHNO, T.; MODEN, Y., ***Toyota Production System.- Beyond Management of Large Scale Production.*** Tokyo, Japão: Diamond Publishing Co, 1978.

OHNO, T. ***O Sistema Toyota de Produção: além da produção em larga escala.*** Porto Alegre, RS: Bookman, 1997.

OLIVEIRA, A. C. ***Uma contribuição para um problema de programação de tarefas em job shop dinâmico não determinístico com datas de entrega.*** 2002. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

OLIVEIRA, J.E. ; RANGEL, J.J.A.; VIANNA, D.S. ***Um modelo de simulação para análise de usinagem metal mecânica do tipo job shop – um estudo de caso.*** In: XVI SIMPEP - Bauru, SP, 2009.

Pegden, C. D.; Shannon, R.E. e Sandowski, R. P. ***“Introduction to Simulation Using SIMAN”.*** 2 ed. New York, USA: McGraw-Hill, 1990.

PINHO, A.F. DE; MONTEVECHI, J.A.B.; MARINS, F.A.S. ***Avaliação de um método de otimização proposto para modelos de simulação a eventos discretos.*** In: XLI SBPO 2009 - Pesquisa Operacional na Gestão do Conhecimento.

PIRES, S. R. I. ***Planejamento e Controle da Produção em Indústrias que Utilizam Tecnologia de Grupo: um modelo de sequenciamento da produção celular depende dos tempos de preparação de máquinas.*** Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos /USP, 1989, p. 155.

RENTES, A. F. et al. ***A utilização do conceito de abastecimento contínuo de peças para um layout posicional de montagem: Estudo de caso na indústria de máquinas agrícolas.*** Foz do Iguaçu, PR: ENEGEP, 2007.

RODRIGUES, D. A., ***Otimização do Seqüenciamento de Produção em uma Ferrovia Através de Técnicas de Scheduling.*** Monografia curso Engenharia de Produção, UFJF, Juiz de Fora, M.G,(2007).

RUSSOMANO, Victor Henrique. ***Planejamento e controle da produção.*** São Paulo: Pioneira, 1995.

SAUTER, V. ***Decision support systems.*** New York, USA: John Wiley & Sons, 1997.

SCHAPPO, J. A. ***Um método utilizando simulação discreta e projeto experimental para avaliar o fluxo na manufatura enxuta.*** 2006. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2006.

SCHRIBER, T. J. ***“An Introduction to Simulation Using GPSS / H”.*** NY, USA: John Wiley and Sons, 1991.

SEIXAS FILHO, C. ***Manufatura Colaborativa – um novo modelo para uma nova realidade empresarial.*** Revista In Tech, B.H, MG, 2004. n.59, p.52-55.

SHANG, J.S.; TADIKAMALLA, P.R. **Multicriteria design and control of a cellular manufacturing system through simulation and optimization**. International Journal of Production Research, 6, vol. 36, p. 1515-1528. 1998.

SHANNON, R.E. **“Systems Simulation – The Art and Science”**. New Jersey: Prentice-Hall, 1975.

SILVA, W. A. **Otimização de parâmetros da gestão baseada em atividades aplicada em uma célula de manufatura**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2005.

SIPPER, D.; BULFIN, R. **Production: planning, control, and integration**. New York, USA: McGraw-Hill, 1997.

SLACK, N. **Vantagem Competitiva em Manufatura**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

SLACK, N., et al. **Administração da Produção**, São Paulo, Atlas, 1997.

SPEEDING, T. A., SUN, G. Q. **Application of discrete event simulation to the activity based costing of manufacturing systems**. International Journal of Production Economics, 58, Inglaterra, 1999. p. 289-301

SPRAGUE, R. H.; WATSON, H. J. **Sistemas de apoio à decisão: colocando a teoria em prática**. Rio de Janeiro: Campus, 1995.

STOCKTON, David. **Developing the sequence**. *Manufacturing Engineer*, Leicester, Reino Unido, 1994.

SUSUMU, M.; LEE, K.H. **Efficient simulation/optimization of dispatching priority with “fake” processing time**. Proceedings... Winter Simulation Conference, 1997. Disponível em: <<http://www.informs-sim.org/wsc97papers/0872.PDF>> acessado em julho de 2004.

TAYLOR, F.W. **Princípios da Administração Científica**. São Paulo, SP: Atlas, 8. ed, 108 p., 1990.

TORGA, B. L. M. **Modelagem, Simulação e Otimização em sistemas puxados de manufatura**, 152 f. Dissertação (mestrado) – Instituto de Engenharia de Produção e Gestão. Universidade Federal de Itajubá. Minas Gerais. 2007.

TORRES, Isaias. **Integração de Ferramentas Computacionais Aplicadas ao Projeto e Desenvolvimento de Arranjo Físico de Instalações Industriais**, 154f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, SP, 2001.

TUBINO, D. F. **Manual de Planejamento e Controle da Produção**. 2. ed. São Paulo: Atlas. 2000.

TUBINO, Dalvio Ferrari. **Sistemas de produção: a produtividade no chão da fábrica**. Porto Alegre: Bookman, 1999.

TURBAN, E.; RAINER JR, R. K.; POTTER, R. E. **Administração de tecnologia da informação: teoria e prática**. 3 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005. p. 618.

VIEIRA, G. E, (2003); **Avaliação dos impactos do planejamento colaborado em cadeias produtivas por meio de simulação computacional**. Projeto submetido ao CNPQ e aprovado pelo comitê Assessor de Engenharia de Transportes e de Produção. XI SIMPEP – Bauru, SP, Brasil, Dezembro 08 – 10.

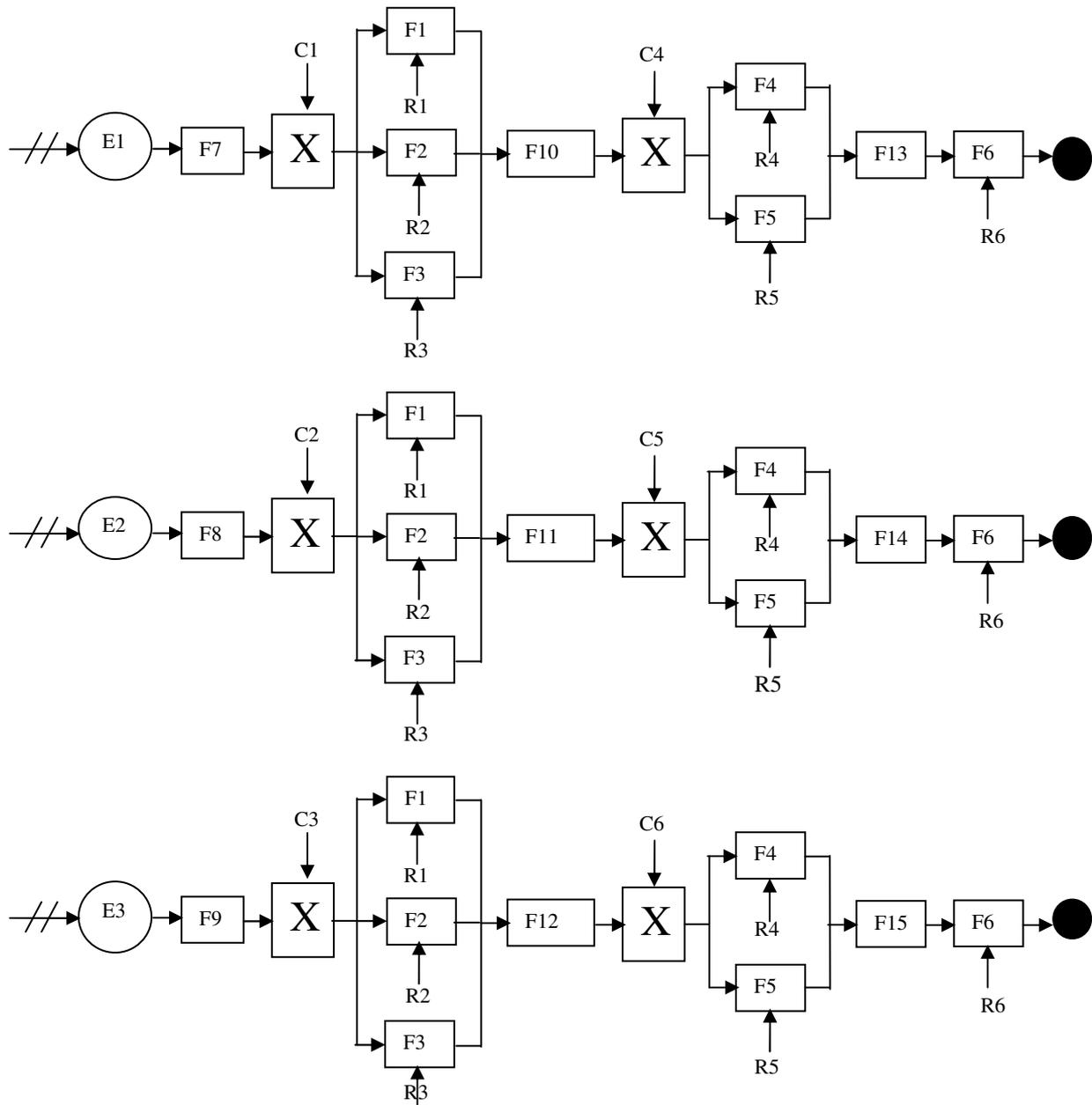
WARREN, C. S.; REEVE, J.M.; FESS, P. E. **Contabilidade gerencial**. São Paulo: Pioneira Thomson learning, 2003.

WHITE, K.P. **Advances in the theory and practice of production scheduling**. In: LEONDES, C.T., Advances in Control and Dynamic Systems. Academic Press. San Diego, CA, USA: 1990. p. 115–157.

WILD, R. **Operations Management**. 6. ed, London: Thomson Learning, 2003. p. 870.

WOMACK, J.P; JONES, D.T. **A Mentalidade Enxuta nas Empresas – Elimine o desperdício e crie riqueza**. Rio de Janeiro, RJ: Campus, 1996.

**Apêndice A - Modelo conceitual da linha de produção peças de carcaça ( utilizando elementos do IDEF-SIM )**



### Apêndice B - Tabela com a descrição dos elementos do Modelo conceitual

	DESCRIÇÃO	PÂRAMETRO
E1	Entidade: peça A	Chega da peça A (Lote de 10 peças)
E2	Entidade: peça B	Chega da peça B (Lote de 10 peças)
E3	Entidade: peça C	Chega da peça C (Lote de 10 peças)
F1	Função: Processo de torneamento (torno 1)	Tempo do processo em min.: Peça A:30; PeçaB:65; Peça C:85; Capacidade 1 peça por vez do mesmo lote
F2	Função: Processo de torneamento (torno 2)	Tempo do processo em min.: Peça A:30; PeçaB:65; Peça C:85; Capacidade 1 peça por vez do mesmo lote
F3	Função: Processo de torneamento (torno 3)	Tempo do processo em min.: Peça A:30; PeçaB:65; Peça C:85; Capacidade 1 peça por vez do mesmo lote
F4	Função: Fresamento (fresadora 1)	Tempo do processo em min.: Peça A:40; PeçaB:80; Peça C:75; Capacidade 1 peça por vez do mesmo lote
F5	Função: Fresamento (fresadora 2)	Tempo do processo em min.: Peça A:40; PeçaB:80; Peça C:75; Capacidade 1 peça por vez do mesmo lote
F6	Função: Retificação (retífica 1)	Tempo do processo em min.: Peça A:25; PeçaB:20; Peça C:15; Capacidade 1 peça por vez do mesmo lote
F7	Função: controla início do processo da peça A no Torno 1, Torno 2 ou Torno 3	Início do processo da Peça A no Torno 1, Torno 2 ou Torno 3
F8	Função: controla início do processo da peça B no Torno 1, Torno 2 ou Torno 3	Início do processo da Peça B no Torno 1, Torno 2 ou Torno 3
F9	Função: controla início do processo da peça C no Torno 1, Torno 2 ou Torno 3	Início do processo da Peça C no Torno 1, Torno 2 ou Torno 3
F10	Função: controla início do processo da peça A na Fresadora 1 ou Fresadora 2	Início do processo da Peça A na Fresadora 1 ou Fresadora 2.
F11	Função: controla início do processo da peça B na na Fresadora 1 ou Fresadora 2	Início do processo da Peça B na Fresadora 1 ou Fresadora 2.
F12	Função: controla início do processo da peça C na na Fresadora 1 ou Fresadora 2	Início do processo da Peça C na Fresadora 1 ou Fresadora 2.
F13	Função: controla início do processo da peça A na Retífica	Início do processo da Peça A na Retífica 1.
F14	Função: controla início do processo da peça B na Retífica	Início do processo da Peça A na Retífica 1.
F15	Função: controla início do processo da peça C na Retífica	Início do processo da Peça A na Retífica 1.
C1	Controle: Fornecimento de peças A para um dos três Tornos	Decide e envia para Torno1, para Torno 2 ou para Torno 3
C2	Controle: Fornecimento de peças B para um dos três Tornos	Decide e envia para Torno1, para Torno 2 ou para Torno 3
C3	Controle: Fornecimento de peças C para um dos três Tornos	Decide e envia para Torno1, para Torno 2 ou para Torno 3
C4	Controle: Fornecimento de peças A para uma das duas Fresadoras	Decide e envia para Fresadora 1 ou para Fresadora 2
C5	Controle: Fornecimento de peças B para uma das duas Fresadoras	Decide e envia para Fresadora 1 ou para Fresadora 2
C6	Controle: Fornecimento de peças C para uma das duas Fresadoras	Decide e envia para Fresadora 1 ou para Fresadora 2
R1	Recurso: Torno 1	Quantidade de 1 equipamento
R2	Recurso: Torno 2	Quantidade de 1 equipamento
R3	Recurso: Torno 3	Quantidade de 1 equipamento
R4	Recurso: Fresadora 1	Quantidade de 1 equipamento
R5	Recurso: Fresadora 2	Quantidade de 1 equipamento
R6	Recurso: Retífica 1	Quantidade de 1 equipamento