

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**  
**RÔMULO GONÇALVES LINS**

**MELHORIAS NOS PROCESSOS DE GESTÃO E DE  
FABRICAÇÃO DE UMA INDÚSTRIA METALMECÂNICA  
UTILIZANDO REDES DE PETRI AUXILIADA POR  
SIMULAÇÃO DISCRETA**

**TAUBATÉ-SP**

**2008**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**

**RÔMULO GONÇALVES LINS**

**MELHORIAS NOS PROCESSOS DE GESTÃO E DE  
FABRICAÇÃO DE UMA INDÚSTRIA METALMECÂNICA  
UTILIZANDO REDES DE PETRI AUXILIADA POR  
SIMULAÇÃO DISCRETA**

Dissertação apresentada para obtenção do  
Título de Mestre pelo curso de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica do  
departamento de Engenharia Mecânica da  
Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Automação Industrial  
e Robótica.

Orientador: Prof. Dr. João Sinohara da Silva  
Sousa

**TAUBATÉ-SP**

**2008**

**Rômulo Gonçalves Lins**

**MELHORIAS NOS PROCESSOS DE GESTÃO DE E FABRICAÇÃO DE UMA  
INDÚSTRIA METALMECÂNICA UTILIZANDO REDES DE PETRI AUXILIADA POR  
SIMULAÇÃO DISCRETA**

Dissertação apresentada para obtenção do  
Título de Mestre pelo curso de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica do  
departamento de Engenharia Mecânica da  
Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Automação Industrial  
e Robótica.

Data: 29/11/2008

Resultado: \_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. João Sinohara da Silva Sousa

Universidade de Taubaté

Assinatura \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Luiz Octavio Mattos dos Reis

Universidade de Taubaté

Assinatura \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Antônio Carlos de Sousa

CEFET-SP

Assinatura \_\_\_\_\_

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Dr. João Sinohara da Silva Sousa, pela habilidade, paciência e compreensão com que orientou meu trabalho.

Aos professores desta instituição pela enorme contribuição em minha formação pessoal e profissional, em especial ao professor Dr. Luís Octávio Mattos dos Reis.

Ao professor Dr. Antônio Carlos de Sousa pela colaboração, sugestões e por sua participação na banca examinadora.

Ao senhor Vicente Martinho, diretor da Womer Ind. e Com. Ltda, por ceder o espaço e pela confiança depositada a minha pessoa para desenvolver e implantar parte deste trabalho na empresa.

Ao senhor Gustavo da Paragon pelo auxílio com o aplicativo ARENA SIMULATION 11.0, sem o qual não teria desenvolvido grande parte do trabalho.

Ao senhor diretor da Microsiga S/A pelo auxílio pelas dicas e conselhos na implantação do sistema de Planejamento de Recursos Empresariais.

À minha família, em especial à minha mãe pelo carinho e educação com que me educou.

Lins, Rômulo Gonçalves. **MELHORIAS NOS PROCESSOS DE GESTÃO E DE FABRICAÇÃO DE UMA INDÚSTRIA METALMECÂNICA UTILIZANDO REDES DE PETRI AUXILIADA POR SIMULAÇÃO DISCRETA.** 2008.164f. (Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade de Taubaté, Taubaté.

## **RESUMO**

O gerenciamento de projetos assume um papel cada vez mais importante nas atividades empresariais. Os projetos têm papel importante na sobrevivência da empresa. Assim, uma sistemática eficiente para o gerenciamento de seus projetos atenderá aos padrões do mercado na questão de custos e prazo.

A eficiência dos sistemas produtivos também tem grande importância. Neste cenário as empresas devem possuir uma sistemática eficiente para a otimização do sistema produtivo a fim de obter-se um sistema eficaz.

O presente trabalho traz duas propostas para melhoria destes problemas, o primeiro é o desenvolvimento de uma metodologia para gerenciamento de projetos e o segundo uma metodologia de otimização do sistema produtivo utilizando Redes de Petri auxiliado por simulação discreta. Para comprovar a eficácia destas propostas, um estudo de caso foi realizado em uma empresa.

Palavras-chave: Gerenciamento de projetos, otimização do sistema produtivo, Redes de Petri e simulação discreta.

## **ABSTRACT**

The management of projects assumes a role nowadays each more important time in the enterprise activities. In manufacture companies who work in an environment under order, the projects have important paper in the survival of the company. Thus, these companies must possess an efficient systematics for the management of its projects, in order to take care of to the standards, each limited time more, of cost, stated period and quality of its customers.

The efficiency of the productive systems also has great importance in the activities entrepreneurs now a day. The companies who do not present efficient a productive system do not obtain to compete in equality in this globalizado world, in this scene the companies must possess an efficient systematics for the optimization and the simulation of the productive system in order to arrive at an efficient system.

The present work brings two proposals for improvement of these problems, the first one is developing of a methodology for management of projects and as a methodology of optimization of the productive system using nets of Petri assisted for discrete simulation, and to prove the effectiveness of these proposals a case study it was elaborated in a company in order to get itself resulted for the evidence of the elaborated proposals.

Word-key: Management of projects, optimization of the productive system, nets of Petri and discrete simulation.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- ESTRUTURA DO TRABALHO .....	18
FIGURA 2- RESUMO DAS INTERAÇÕES ENTRE OS GRUPOS DE PROCESSOS .....	23
FIGURA 3- COMPONENTES DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO.....	27
FIGURA 4- EFEITO DA TRANSFORMAÇÃO . .....	27
FIGURA 5- SISTEMA DE PRODUÇÃO . .....	29
FIGURA 6- COMPARATIVO ENTRE OS SISTEMAS DE PRODUÇÃO .....	32
FIGURA 7- ARQUITETURA BÁSICA DE UM SISTEMA FLEXÍVEL DE MANUFATURA . .....	32
FIGURA 8- VISÃO GERAL DAS ATIVIDADES PCP .....	36
FIGURA 9- OCORRÊNCIA DE UM DEADLOCK . .....	57
FIGURA 10- DEMANDA DE PRODUÇÃO DO ANO DE 2006.....	59
FIGURA 11- FLUXOGRAMA DO MÉTODO DE GERENCIAMENTO PROPOSTO. ....	61
FIGURA 12- FLUXOGRAMA PARA IMPLANTAÇÃO DO MÉTODO. ....	68
FIGURA 13- MODELO DE MAPA DE PROCESSOS. ....	69
FIGURA 14- TERMO DE ABERTURA DO PROJETO.....	73
FIGURA 15- FLUXOGRAMA DO MODELO PROPOSTO. ....	81
FIGURA 16- MODELO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO EM REDES DE PETRI UTILIZANDO HPSIM®. ....	84
FIGURA 17- MODELO DO SISTEMA NO ARENA.....	87
FIGURA 18- MODELO LÓGICO DO SISTEMA. ....	90

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1- TRANSFORMAÇÃO DOS ELEMENTOS DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO .....	28
TABELA 2- COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS FLEXÍVEIS DE MANUFATURA. ....	34
TABELA 3- RESUMO DA ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS.....	70
TABELA 4- INDICADORES DE DESEMPENHO.....	71
TABELA 5- COMPARAÇÃO DO CUSTO DE PROJETO. ....	75
TABELA 6- CUSTO POR HORA DOS RECURSOS. ....	77
TABELA 7- INDICADORES DE SATISFAÇÃO DOS CLIENTES.....	77
TABELA 8- ROTEIRO DE FABRICAÇÃO DO ARMÁRIO INDOOR.....	78
TABELA 9- ÍNDICES PARA MEDIÇÃO DA PRODUTIVIDADE. ....	82
TABELA 10- SETORES DO MODELO DE SIMULAÇÃO. ....	89
TABELA 11- MEDIDAS DE DESEMPENHO DO SISTEMA INSTALADO. ....	93
TABELA 12- MEDIDAS DE DESEMPENHO SIMULADAS.....	95
TABELA 13- COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS EM TERMOS DE FATURAMENTO. ....	95
TABELA 14. INDICADORES DE DESEMPENHO DO SISTEMA ATUAL.....	125

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

**CNC - COMANDO NUMÉRICO COMPUTADORIZADO;**

**PCP – PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO;**

**FMS – SISTEMA FLEXÍVEL DE MANUFATURA;**

**AVG – VEÍCULO AUTO-GUIADO;**

**ERP – PLANEJAMENTO DE RECURSOS EMPRESARIAIS;**

**SED – SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS;**

**RdP – REDES DE PETRI;**

**PMBOK – PROJECT PARA O GERENCIAMENTO DE PROJETOS GENÉRICOS;**

**PMI – PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE;**

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	13
1.2. IMPORTÂNCIA DO TRABALHO .....	15
1.3. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA .....	16
1.4. OBJETIVOS DO TRABALHO .....	17
1.4.1 Objetivos Gerais .....	17
1.4.2 Objetivos Específicos .....	17
1.5. METODOLOGIA DE PESQUISA .....	17
1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO .....	18
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>20</b>
2.1. GERENCIAMENTO DE PROJETOS .....	20
2.1.1. Aplicativos utilizados em Gerenciamento de Projetos.....	23
2.1.2. Metodologias de Gerenciamento de Projetos .....	25
2.2. SISTEMAS DE PRODUÇÃO .....	25
2.2.1. Componentes de um sistema.....	26
2.2.2. Produção .....	27
2.2.3. Componentes de um Sistema de Produção .....	29
2.2.4. Tipos de Sistemas de Produção .....	29
2.2.5. Sistemas Flexíveis de Manufatura (FMS).....	32
2.2.6. Planejamento e Controle da Produção.....	35
2.2.7. Planejamento de Recursos Empresariais (ERP).....	37
2.3. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS .....	38
2.3.1. Simulação a Eventos Discretos (SED).....	40
2.3.2. Aplicações .....	41
2.3.3. Etapas de um Projeto de Simulação .....	42
2.4. REDES DE PETRI.....	43
2.4.1 Introdução.....	43
2.4.2. Execução das Redes de Petri.....	44
2.4.3. Propriedades de desempenho .....	45
2.4.4. Características da Rede de Petri .....	47
2.4.6. Extensões .....	48
2.4.7. Redes de Petri e sua relação com os Sistemas de Manufatura .....	50
2.4.8. Aplicação das Redes de Petri em FMS.....	54
2.4.9. Detecção de situações de Deadlock utilizando Redes de Petri .....	56

<b>CAPÍTULO 3 – MODELO PROPOSTO .....</b>	<b>58</b>
<b>3.1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>58</b>
<b>3.1.1. Apresentação da Empresa.....</b>	<b>58</b>
<b>3.1.2. Desenvolvimento do projeto e planejamento da Produção.....</b>	<b>59</b>
<b>3.2. DESENVOLVIMENTO E IMPLANTAÇÃO DE MODELOS PARA GERENCIAMENTO DE PROJETOS.....</b>	<b>60</b>
<b>3.2.1. Proposta.....</b>	<b>62</b>
<b>3.2.2. Orçamento .....</b>	<b>63</b>
<b>3.2.3. Abertura do Projeto.....</b>	<b>63</b>
<b>3.2.4. Planejamento.....</b>	<b>64</b>
<b>3.2.5. Desenvolvimento do Cronograma do projeto .....</b>	<b>65</b>
<b>3.2.6. Cronograma dos Recursos.....</b>	<b>66</b>
<b>3.2.7. Plano de projeto.....</b>	<b>66</b>
<b>3.2.8. Execução .....</b>	<b>66</b>
<b>3.2.9. Encerramento.....</b>	<b>68</b>
<b>3.3. APLICAÇÃO DO MODELO DE GERENCIAMENTO: ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>68</b>
<b>3.3.1. Análise da situação atual.....</b>	<b>69</b>
<b>3.3.2. Indicadores de desempenho .....</b>	<b>70</b>
<b>3.3.3. Treinamento.....</b>	<b>71</b>
<b>3.3.4. Ajuste do método .....</b>	<b>72</b>
<b>3.3.5. Implantação do método.....</b>	<b>72</b>
<b>3.3.6. Análise dos Resultados da Implantação da Metodologia de Gerenciamento de     Projetos.....</b>	<b>75</b>
<b>3.4. METODOLOGIA PARA MODELAGEM UTILIZANDO REDES DE PETRI E SIMULAÇÃO A EVENTOS   DISCRETOS.....</b>	<b>78</b>
<b>3.4.1. Atribuição de Recursos.....</b>	<b>83</b>
<b>3.4.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO .....</b>	<b>93</b>
<b>CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>97</b>
<b>4.1. CONCLUSÕES .....</b>	<b>97</b>
<b>4.2. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>98</b>
<b>4.3. CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO.....</b>	<b>98</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>100</b>

<b>APÊNDICE A – TERMO DE ABERTURA DO PROJETO.....</b>	<b>103</b>
<b>APÊNDICE B – LIÇÕES APRENDIDAS.....</b>	<b>104</b>
<b>APÊNDICE C – FORMULÁRIO PARA DOCUMENTAR MUDANÇAS.....</b>	<b>105</b>
<b>APÊNDICE D – FOLHA DE PROCESSO.....</b>	<b>106</b>
<b>APÊNDICE E – QUESTIONÁRIO PARA COLETA DE DADOS.....</b>	<b>107</b>
<b>APÊNDICE F – MELHORIAS NOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO.....</b>	<b>109</b>
<b>APÊNDICE G – MODELAGEM DE SISTEMAS PRODUTIVOS.....</b>	<b>118</b>
<b>APÊNDICE H – NOVO LAYOUT DA FÁBRICA.....</b>	<b>129</b>
<b>ANEXO A – REDES DE PETRI.....</b>	<b>130</b>

# CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

## 1.1. Considerações Iniciais

Um fator importante para o sucesso de uma indústria no mundo contemporâneo é sua capacidade de lançar produtos de alta qualidade, com o menor custo que o concorrente. Para tal tarefa duas características são importantes: o gerenciamento de projetos, o qual auxilia o desenvolvimento de novos produtos em um período de tempo mais curto, e a otimização de recursos (pessoal, material e financeiro) e da fabricação do produto em um sistema de manufatura eficaz.

O gerenciamento de projetos tem grande importância na indústria contemporânea, pois com um gerenciamento eficaz do tempo de criação, o tempo para lançamento do produto no mercado é reduzido, aumentando a competitividade das empresas.

Para que um projeto seja bem sucedido, é necessário que alguns parâmetros sejam corretamente analisados, como por exemplo, os riscos envolvidos, os recursos necessários, as tarefas a serem realizadas, os marcos de referência a serem acompanhados, os esforços, custos aplicados e a sistemática a ser seguida.

A análise de todos estes parâmetros, segundo uma metodologia para cada setor de atividade industrial, é a função típica do gerenciamento de projetos. Função esta, que se inicia antes do trabalho técnico e que prossegue à medida que o projeto vai se concretizando na forma de um produto, resultando na melhoria de qualidade e diminuição de custos e prazos de entrega.

No âmbito do sistema produtivo nas últimas décadas ocorreram mudanças profundas. A concorrência entre as empresas está cada vez maior, principalmente devido à globalização e ao aparecimento de novos concorrentes em nível mundial. Para se manter no mercado, as empresas tem dado maior importância aos seus sistemas produtivos, implementando novas metodologias de otimização objetivando a redução dos custos industriais.

Neste contexto os sistemas de produção passaram a ter grande importância, sendo objeto de estudos para aperfeiçoamento e melhoria de qualidade dos produtos e processos produtivos, bem como sua eficiência.

Diversas técnicas foram elaboradas visando à melhoria dos sistemas produtivos, sendo que a técnica de modelagem de sistemas passou a ser muito utilizada, devido à facilidade de desenvolvimento e custo reduzido, pois não é necessária nenhuma modificação física na planta produtiva para avaliar as mudanças a serem implantadas.

A modelagem de sistemas é uma técnica que pode utilizar as Redes de Petri para a modelagem do sistema produtivo e a simulação de eventos discretos para obter resultados precisos sobre o desempenho do sistema, o que permite realizar uma análise correta sobre o processo produtivo.

A modelagem de sistemas permite verificar as características do processo produtivo e verificar suas principais medidas de desempenho, tais como:

- Volume de produção;
- Tempo de passagem;
- Estoque em processo;
- Taxa de ocupação das máquinas;
- Taxa de utilização de mão-de-obra;
- Taxa de utilização de espaço físico;

Por meio da simulação de eventos discretos é possível mensurar quantitativamente os índices de desempenho e avaliá-los.

A simulação pode reduzir os riscos para as empresas nas modificações de *layout*, nas ampliações de fábricas, nas aquisições de máquinas. A simulação pode, ainda, fornecer estimativas confiáveis das conseqüências no desempenho do chão de fábrica.

Neste contexto, torna-se necessária a criação de um modelo que proporcione às empresas utilizarem técnica de modelagem para desenvolver seus sistemas de produção com maior eficiência, tanto no desenvolvimento de novas células de produção, quanto na melhoria das células existentes.

O modelo proposto neste trabalho é adequado para processos repetitivos em lotes. Em processos sob encomenda, poder-se-á aplicar naqueles produtos que tiver maior demanda.

Pretende-se difundir mais a utilização da simulação computacional nas empresas, visando acompanhar as mudanças nos processos produtivos, melhoria nos processos produtivos, informações para tomada de decisões no que diz respeito à aquisição de novos equipamentos.

## **1.2. Importância do Trabalho**

Em um mercado globalizado, as empresas são obrigadas a aperfeiçoarem o desenvolvimento de seus produtos e sistemas produtivos, buscando técnicas mais modernas de qualidade e de produtividade.

Desta forma, terão maiores condições de sobreviver e crescer aquelas empresas que possuem maior flexibilidade para se adequarem às mudanças, aplicando técnicas de melhoria contínua de produção e motivando seus funcionários, base maior de toda empresa sólida e com perspectiva de obterem maiores sucessos.

As indústrias nacionais do setor de infra-estrutura para telecomunicações, não exploram o uso de uma metodologia de gerenciamento de projetos para o desenvolvimento de novos produtos, ocasionando uma defasagem com relação aos competidores internacionais, pois como o tempo de desenvolvimento de novos produtos é muito grande, fica impossível concorrer com prazos de entrega e custos, ocasionando uma defasagem tecnológica cada vez maior por parte dessas indústrias.

A melhoria contínua nos processos de produção também não é uma ferramenta norteadora nessas empresas, pois há uma considerável defasagem no sistema produtivo, não apenas na questão tecnológica, mas também na questão de alocação e otimização dos recursos, o que torna a empresa menos eficiente e menos competitiva perante aos concorrentes.

### **1.3. Definição do Problema**

A base dos motivos que levou ao desenvolvimento deste trabalho pode ser definida por alguns problemas essenciais a serem tratados, os quais foram detectados ao longo de cinco anos de trabalho pelo autor:

- Não utilização de uma metodologia de gerenciamento de projeto, que auxilia nas atividades de desenvolvimento de novos produtos que serão lançados, reduzindo os custos de desenvolvimento e principalmente os prazos de entrega;
- Pouca competitividade das indústrias nacionais do setor de infra-estrutura para telecomunicações, frente aos concorrentes internacionais, pois vêm operando com sistemas de produção defasados, principalmente na questão organizacional dos sistemas produtivos, desenvolvimento de novos produtos e processos de fabricação;
- Não utilização da modelagem de sistemas como uma ferramenta de auxílio. Utilizando a modelagem, a empresa pode desenvolver suas células de manufatura otimizando ao máximo a utilização de equipamentos, funcionários e insumos, verificando os pontos de gargalo e desta forma prever investimentos ou melhorias no processo de fabricação;
- Não utilização da simulação por eventos discretos do como uma ferramenta computacional de auxílio. Utilizando a simulação, a empresa pode avaliar quantitativamente o novo sistema produtivo, reduzindo ou eliminando atividades que não agregam valor ao produto. Também as melhorias nas instalações de processamento industrial;

## **1.4. Objetivos do Trabalho**

### **1.4.1 Objetivos Gerais**

- Implantar o sistema de gerenciamento de projetos para auxiliar no desenvolvimento de novos produtos e mostrar, com resultados, como é possível melhorar a qualidade do produto e diminuir o tempo de desenvolvimento.

- Propor um modelo para avaliação, empregando a modelagem de sistemas, analisar gargalos e problemas nos processos produtivos. Propor melhorias, analisá-las, por meio dos resultados obtidos na simulação de eventos discretos, e decidir qual a melhor opção que otimize o sistema produtivo.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Desenvolver uma metodologia de gerenciamento de projetos, implantá-la e obter resultados para verificar se houve redução no custo de desenvolvimento de novos produtos.

- Modelar as células de manufatura atuais, simulando os seus processos produtivos, confrontando os seus resultados com a produção real.

## **1.5. Metodologia de Pesquisa**

A pesquisa não é um trabalho totalmente controlável ou previsível. Por isso, a adoção de uma metodologia de pesquisa, com um planejamento cuidadoso, reflexões conceituais sólidas e alicerçados em conhecimentos já existentes torna-se necessária para que sejam obtidos resultados satisfatórios no seu decorrer.

O presente trabalho pode ser classificado como uma pesquisa-ação, pois há um envolvimento de modo participativo do pesquisador e dos participantes representativos do problema na atividade de pesquisa.

Assim, foram definidos a amostra da população a ser analisada e os instrumentos auxiliares, tais como pesquisa de satisfação, na realização desta pesquisa-ação. Como amostra optou-se por realizar o trabalho em uma empresa que bem representasse o universo aqui em questão, pois a implantação dos modelos

(propostas como estudo de caso) é complexa e demanda muito tempo, inviabilizando sua aplicação em várias empresas num curto período de tempo.

## 1.6. Estrutura do Trabalho

Este documento foi estruturado tendo em vista a estrutura exposta na Figura 1 abordando quatro capítulos, onde cada um constitui uma parte essencial do estudo realizado para a elaboração deste trabalho.

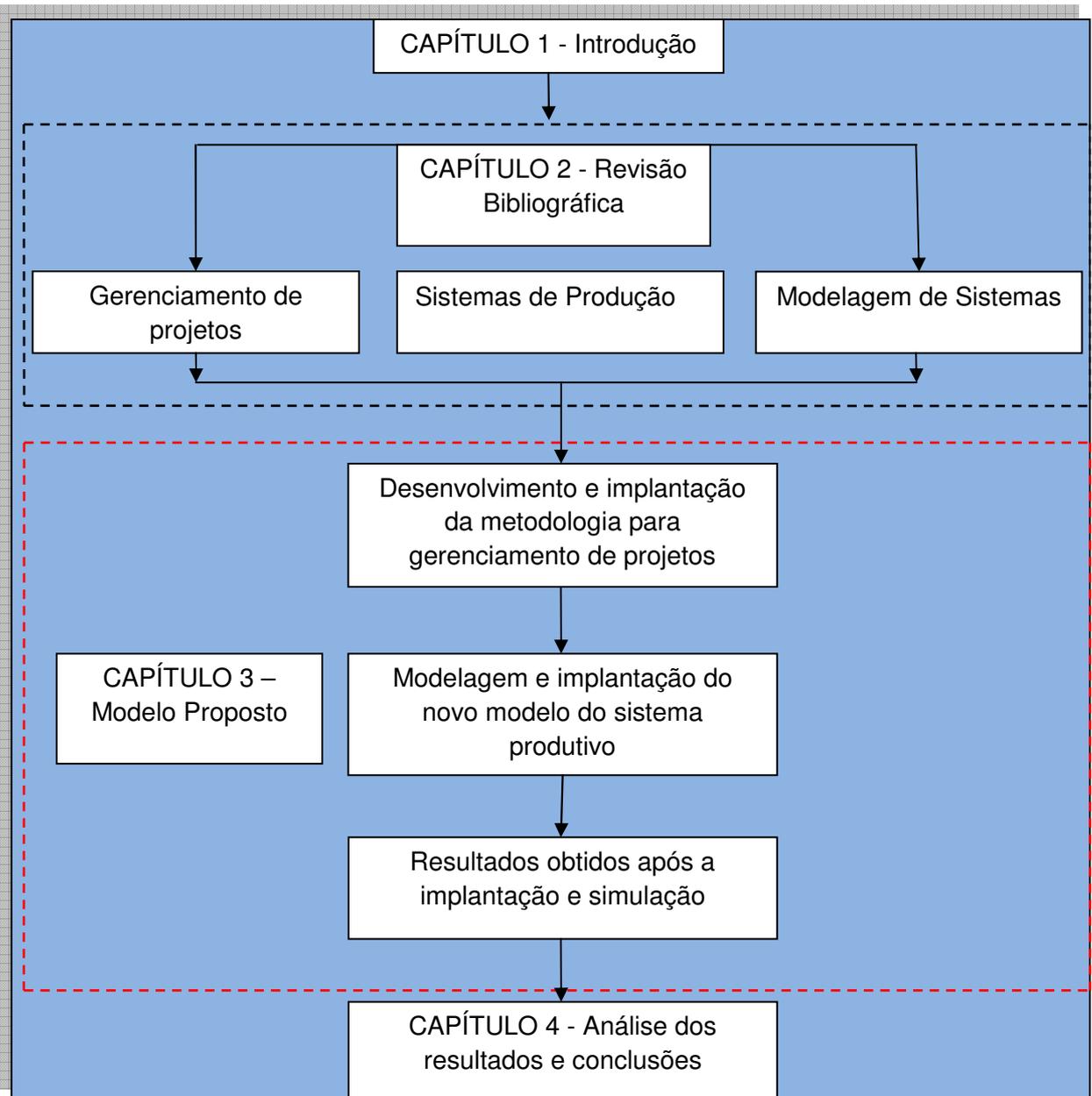


Figura 1- Estrutura do Trabalho

A partir do problema exposto no capítulo 1, evidencia-se a necessidade de ter uma metodologia para gerenciamento de novos produtos, através da modelagem por Redes de Petri será proposto um novo sistema produtivo para a introduzindo-se o conceito de sistemas flexíveis de manufatura, e efetuando a simulação deste novo ambiente para obter resultados a fim de compará-los com o sistema atual.

Uma vez contextualizada a proposta, o capítulo 2 versa sobre aspectos relevantes aos sistemas de produção, a modelagem de sistemas e o gerenciamento de projetos, incluindo a descrição dos principais modelos que serão utilizados no desenvolvimento do trabalho.

No capítulo 3 é desenvolvida uma metodologia para gerenciamento de projetos focado para empresas do setor de infra-estrutura de telecomunicações, e com a implantação realizada, obter resultados e poder compará-los com a prática adotada anteriormente. Também é desenvolvida a proposta do novo sistema produtivo, modelado por Redes de Petri e simulado a eventos discretos para obter informações sobre o sistema desenvolvido e poder realizar comparações com o sistema atual.

O capítulo 4 mostra a análise dos resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho, as conclusões obtidas a partir da análise dos resultados e propostas para trabalhos futuros.

Por fim, as referências bibliográficas utilizadas para embasar o presente trabalho são apresentadas, compondo o capítulo 5.

## **CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos e teorias obtidas por meio de uma revisão bibliográfica, tendo como finalidade dar suporte ao modelo e para a avaliação das mudanças no sistema de produção da empresa, objeto de estudo.

Revisam-se, também, os conceitos sobre gerenciamento de projetos, a fim de obter-se uma base teórica para o desenvolvimento de uma metodologia focada para empresas do setor de infra-estrutura de telecomunicações.

Revisam-se os conceitos sobre sistemas de produção, modelagem de sistemas baseados em Redes de petri para modelagem de sistemas de manufatura e simulação de eventos discretos.

### **2.1. Gerenciamento de Projetos**

Um projeto é um esforço temporário para criar um produto, serviço, ou resultado exclusivo (HELDMAN, 2005). Os projetos podem criar:

- Um produto ou objeto produzido, quantificável e que pode ser um item final ou um componente de algum outro produto;
- Uma capacidade de realizar um serviço, como funções de negócios que dão suporte à produção ou à distribuição;
- Um resultado, como resultados finais ou documentos. Por exemplo, um projeto de pesquisa desenvolve um conhecimento que pode ser usado para determinar se uma tendência está presente ou não ou se um novo processo irá beneficiar a sociedade.

A singularidade é uma característica muito importante das entregas do projeto. Por exemplo, muitos prédios são construídos, mas cada prédio em particular é único. A presença de elementos repetitivos não muda a singularidade fundamental do trabalho do projeto.

As organizações realizam um trabalho para atingir um conjunto de objetivos. Em geral, o trabalho pode ser categorizado por projetos ou operações, embora os dois ocasionalmente se sobreponham. Eles compartilham muitos das seguintes características:

- Realizados por pessoas;
- Restringido por recursos limitados;
- Planejado, executado e controlado;

Os projetos e operações diferem principalmente no fato de que as operações são contínuas e repetitivas, enquanto os projetos são temporários e exclusivos.

Os objetivos dos projetos e das operações são fundamentalmente diferentes. A finalidade de um projeto é atingir seu objetivo e, em seguida terminar. Por outro lado, o objetivo de uma operação contínua é manter o negócio.

Os projetos são normalmente executados para atender os seguintes aspectos:

- Uma demanda de mercado;
- Uma necessidade organizacional;
- Um avanço tecnológico;

O gerenciamento de projetos é: a aplicação de conhecimento, habilidades, ferramentas e técnicas às atividades do projeto a fim de atender aos seus requisitos. O gerenciamento de projetos é realizado através da aplicação e da integração dos seguintes processos de gerenciamento de projetos: iniciação, planejamento, execução, monitoramento, controle, e encerramento. Gerenciar um projeto inclui:

- Identificação das necessidades;
- Estabelecimento de objetivos claros e alcançáveis;
- Balanceamento das demandas conflitantes de qualidade, escopo, tempo e custo;

• Adaptação das especificações, dos planos e da abordagem às diferentes preocupações e expectativas das diversas partes interessadas.

O sistema de gerenciamento de projetos é o conjunto de ferramentas, técnicas, metodologias, recursos e procedimentos usados para gerenciar um projeto. O sistema é um conjunto de processos e funções de controle relacionadas que são consolidados e combinados para formar um todo funcional e unificado.

O plano de gerenciamento do projeto descreve como o sistema de gerenciamento de projetos será usado. O conteúdo do sistema de gerenciamento irá variar conforme a área de aplicação, da complexidade do projeto e da disponibilidade dos sistemas existentes, o sistema será ajustado para se adequar ao projeto.

O plano de gerenciamento é composto por grupo de processos, dos quais os mais importantes são:

- Grupo de processos de iniciação: define e autoriza o projeto ou uma fase do projeto;
- Grupo de processos de planejamento define e refina os objetivos e planeja as ações necessárias para alcançar os objetivos para os quais o projeto foi planejado;
- Grupo de processos de execução: integra pessoas e outros recursos para realizar o plano de gerenciamento para projeto;
- Grupo de processos de monitoramento e controle: mede e monitora regularmente o progresso para identificar variações em relação ao plano de gerenciamento do projeto, de forma que possam ser tomadas ações corretivas quando necessário para atender os objetivos do projeto;
- Grupo de processos de encerramento: formaliza a aceitação do produto, serviço ou resultado e conduz o projeto ou uma fase do projeto a um final ordenado;

Os processos de gerenciamento são apresentados como elementos distintos, mas na prática eles interagem entre si conforme a Figura 2.

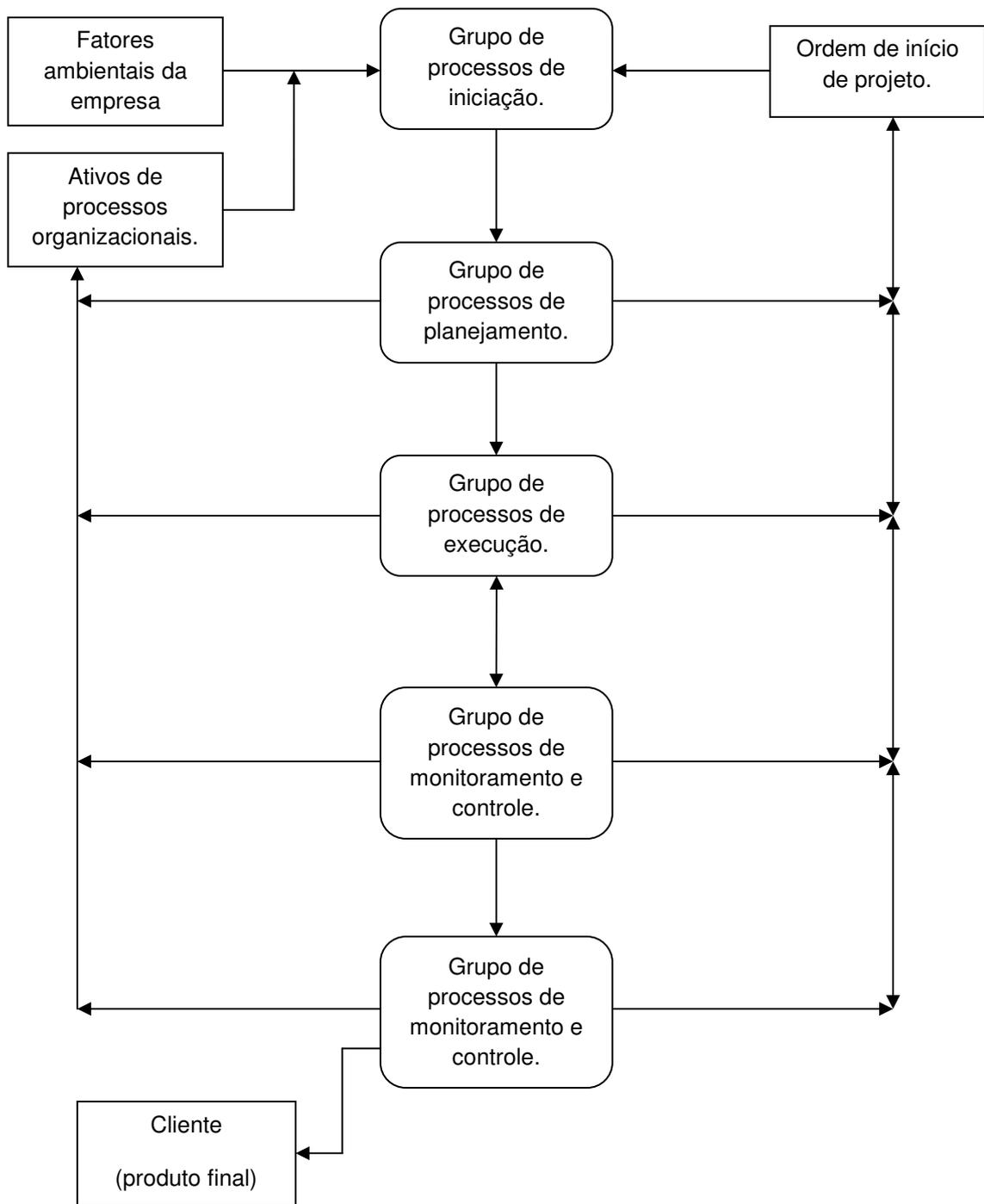


Figura 2- Resumo das interações entre os grupos de processos (PMBOOK, 2004).

### 2.1.1. Aplicativos utilizados em Gerenciamento de Projetos

A principal função dos aplicativos é gerenciar as tarefas em função do tempo. Utiliza-se o “gráfico de Gantt” como o principal gráfico para visualizar tarefas. Através das linhas pode-se inserir e modificar as descrições, durações datas de início, datas de término e outras informações sobre as tarefas. As barras estão

preparadas para exibir graficamente as durações das tarefas em uma escala de tempo.

Para um modo diferente de visualização das tarefas pode-se utilizar o gráfico de PERT, que possui maior ênfase nas interdependências entre as tarefas. O aplicativo disponibiliza um gráfico de recursos, sendo possível através deste verificar se não há alguém com muitas tarefas, ou seja, se algum recurso é atribuído para trabalhar mais horas em determinado período de tempo do que está disponível em seu calendário, podendo assim, manter bem distribuídas as tarefas entre os seus funcionários.

Estes aplicativos implementam a funcionalidade de efetuar previsões e evitar problemas de agendamento antes que eles ocorram, considerando as tarefas que ameaçam “estourar” o orçamento e/ou conflitos de agendamento que possam ultrapassar o prazo do projeto.

Pode-se utilizar a linha de base (*baseline*) que contém estimativas originais de custos, recursos e agendamento. Ao comparar as estimativas de sua linha de base com as estimativas “atuais”, podem-se efetuar as alterações necessárias no plano do projeto.

Para receber e enviar mensagens do grupo de trabalho, os integrantes da equipe podem usar caixa de entrada eletrônica. A caixa de entrada é utilizada pelo gerente do grupo de trabalho para receber e armazenar respostas às mensagens de atribuição, atualização e *status* que são enviados aos integrantes da equipe. Essas caixas de entrada devem estar conectadas através de correio eletrônico, da Web ou rede interna (intranet ou web interna). O grupo de trabalho poderá usar mensagens especiais de atribuição, tais como:

- Atribuir tarefas;
- Aceitar ou recusar uma atribuição de tarefa;
- Solicitar e submeter relatórios de status;
- Enviar e receber atualizações de tarefas;

### **2.1.2. Metodologias de Gerenciamento de Projetos**

Uma metodologia de gerenciamento de projetos consiste em uma padronização no modo como os projetos são conduzidos. Assim, ela deve seguir alguns requisitos básicos como: ser ajustável às necessidades e à realidade da empresa, ser prática e não burocrática deve possuir uma linguagem comum, deve provocar o aumento, da eficiência, da produtividade da organização e melhorar a comunicação interna, assim como a comunicação com seus clientes.

Segundo (MENEZES, 2001) alguns benefícios relacionados à implementação de uma metodologia de gerenciamento de projetos devem ser observados:

- Diminuição do tempo de ciclo e custos reduzidos;
- Planejamentos mais realistas;
- Melhor comunicação quanto a prazos no escopo
- Redução dos riscos para os projetos;
- Ênfase na satisfação do cliente e valor agregado;
- Comparações de desempenho e aperfeiçoamento continuado;
- Aceitação, reconhecimento e aumento da confiança por parte dos clientes;

Além dos benefícios citados acima, devem ser utilizados modelos, listas de verificações, planilhas e outros documentos pré-formatados, diminuindo-se assim a quantidade de papel, melhorando a comunicação através de uma linguagem comum e tornando o processo mais ágil e eficaz.

## **2.2. Sistemas de Produção**

Para modelar um sistema é necessário entender o conceito de sistema, assim como o limite do mesmo. A seguir será definido o que se entende por sistema de um modo geral.

Sistema é qualquer coleção de interação de elementos que funciona para alcançar um objetivo comum e que evolui com o tempo (TUBINO , 2000).

A definição acima indica que aquilo que pode ser definido como sistema num contexto, pode ser apenas um componente em outro; dando origem, deste modo, aos subsistemas. Por exemplo, para um projetista de automóveis, o veículo é um sistema mecânico composto de eixos, bloco de cilindros, pistões, etc. Já para um engenheiro civil, projetando uma estrada, o veículo é apenas um componente desse sistema, o qual inclui caminhões, ônibus e outros usuários do sistema.

Assim o universo parece estar contido de sistemas, cada qual contido em outro ainda maior.

Já para (GREENWOOD, 1988) sistema é um complexo de coisas diversas que ordenadamente relacionadas entre si contribuem para determinado objetivo.

Sob o ponto de vista mais prático, define um sistema como um conjunto de elementos entre si, formando uma atividade para atingir um objetivo, operando um objetivo, operando sobre entradas (informação, energia e matéria-prima) e fornecem saídas (informação e matéria processada) (CHIAVENATO, 1992).

### **2.2.1. Componentes de um sistema**

Segundo (CHIAVENATO, 1992) todo sistema apresenta os seguintes componentes listados a seguir e podem ser vistos na Figura 3.

Fronteiras: São os limites do sistema, que podem ter existência física ou apenas uma delimitação imaginária para efeito de estudo;

Subsistemas: São elementos que compõem o sistema;

Entradas (Inputs): Representam os insumos ou variáveis independentes;

Saídas (Outputs): Representam os produtos ou variáveis dependentes ;

Processamento: Engloba as atividades desenvolvidas pelos subsistemas que interagem entre si para converter as entradas em saídas;

Retroação (Feedback): É a influência que as saídas do sistema exercem sobre as entradas no sentido de ajustá-las ao funcionamento do sistema.

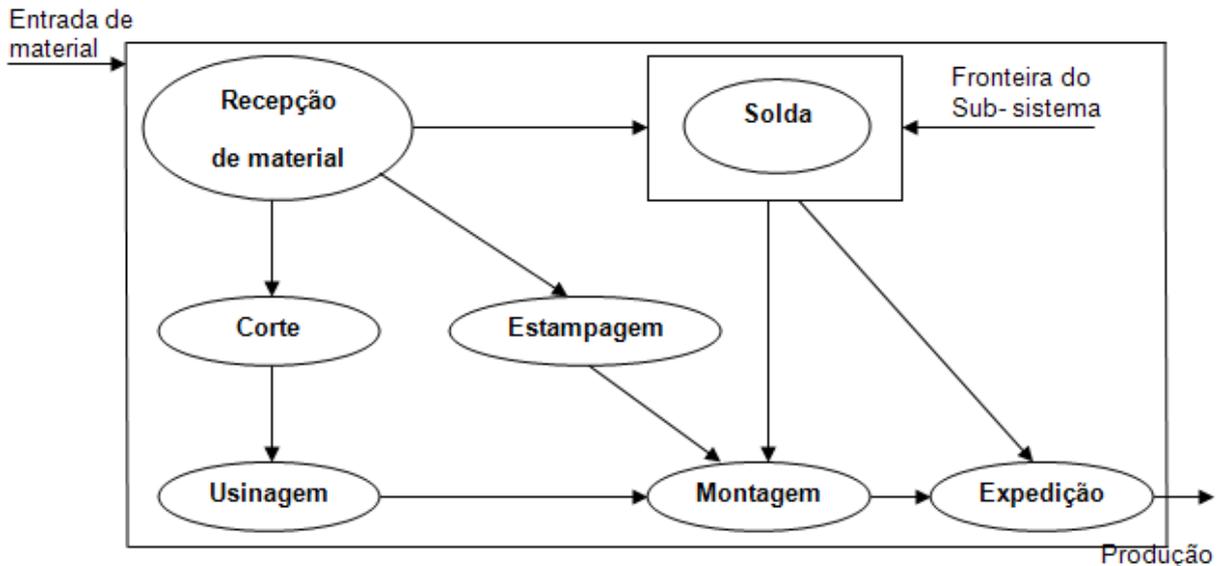


Figura 3- Componentes de um sistema de produção (CHIAVENATO, 1992).

## 2.2.2. Produção

Produção é definida como o incremento da utilidade de um objeto ou um serviço (TUBINO, 2000). Na prática entende-se produção de outro modo, como à adição ou incremento de valor a um bem (produto ou serviço) por efeito de uma transformação, conforme a Figura 4.

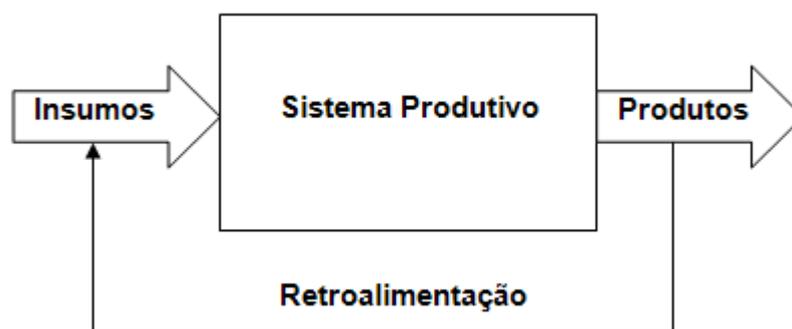


Figura 4- Efeito da Transformação (CHIAVENATO, 1992).

Ampliando um pouco mais o conceito de produção, esta pode ser definida como um processo que permite a transformação de insumos num determinado produto e/ou serviço, o qual por sua vez pode representar um insumo para outro processo. Para permitir esta transformação usa-se um conjunto de elementos

(máquinas, mão-de-obra, ferramentas, meio de transporte, etc.), que em conjunto vêm a compor o chamado sistema de produção (GAITHER, 2001).

Toda empresa, para poder funcionar, adota um sistema de produção com vistas a realizar suas operações e produzir seus produtos e/ou serviços da melhor maneira possível, e com isso garantir sua eficiência e eficácia.

Assim, (PAIVA, 2000) define um sistema de produção como: um processo planejado pelos quais os elementos são transformados em produtos úteis, isto é, um procedimento organizado para se conseguir a conversão de entradas (insumos) em saídas (produtos acabados), como mostra a Tabela 1.

**Tabela 1- Transformação dos elementos de um sistema de Produção (PAIVA, 2000).**

Entrada (Insumos)	Processos de transformação	Saídas (produtos úteis)
Materiais	Máquinas	Produtos
Dados	Interpretação	Conhecimento
Custos variáveis	Custos fixos	Lucro

Um sistema de produção, portanto, começa a tomar forma desde que se formula um objetivo e se define o produto que será comercializado.

Deste modo, toda empresa, tem por finalidade organizar todos os setores que fazem parte do sistema produtivo para realizar suas operações de produção, adotando uma interdependência lógica entre todas as etapas do processo produtivo, desde que a matéria-prima chega ao almoxarifado até chegar ao depósito de produtos acabados, após passar por todos os processos de fabricação necessários, conforme pode ser observado na Figura 5.

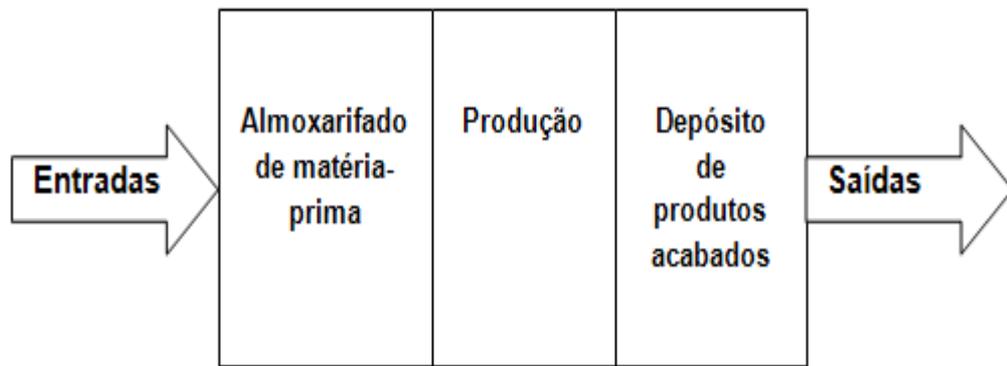


Figura 5- Sistema de Produção (CHIAVENATO, 1992).

### 2.2.3. Componentes de um Sistema de Produção

Os sistemas de produção são compostos de elementos (peças a fabricar, máquinas, etc.) e das relações entre si (interconexão física, operações, etc.). A idéia de elemento ou objeto físico pode ser associada a um conjunto de atributos mensuráveis pertinentes ao fim para o qual foi previsto o referido elemento. Estes atributos podem ser constantes ou variáveis e serão descritos a seguir:

- Atributos constantes: são os que definem a natureza perene do elemento (tipo de elemento, parâmetros,...) e suas características (taxa de falhas, dimensões,...);
- Atributos variáveis: são aqueles que evoluem com o tempo (estado de ocupação de uma máquina, o estado operacional de uma peça no posto de trabalho, período em stand by,...);

O modelo de um sistema de produção poderá ser considerado como a representação do conjunto de elementos e das relações qualificadas por seus atributos (KELTON, 2006).

### 2.2.4. Tipos de Sistemas de Produção

Segundo (PAIVA, 2000) os sistemas de produção podem ser divididos da seguinte maneira:

- **Sistema de Produção Contínua:** Este tipo de produção é caracterizado pelo grande volume de produção, produto padronizado e produção de grandes lotes de cada vez. O ritmo de produção é acelerado e as operações são executadas sem interrupção ou mudança.

Como o produto é sempre o mesmo ao longo do tempo e os processos produtivos não sofrem mudanças, o sistema pode ser aperfeiçoado continuamente. Assim o que se procura com este tipo de produção é precisamente alcançar o baixo custo, grande volume e produção em massa.

Na prática os modelos contínuos estão representados por linhas de montagem, fabricação de produtos químicos e refinação de petróleo, enfim, produtos que são mantidos em linha por um longo tempo e sem modificação.

- **Sistema de Produção Intermitente:** as situações intermitentes de produção são aquelas nas quais as instalações devem ser suficientemente flexíveis para manejar uma ampla variedade de produtos e tamanhos, ou onde a natureza básica da atividade impõe mudanças importantes dos insumos.

- **Sistema de Produção em Lotes:** é caracterizado por produzir uma quantidade limitada de um tipo de produto de cada vez (denominado lote de produção). Cada lote é previamente dimensionado para assim poder atender a um determinado volume de vendas previsto para um dado período de tempo.

Desse modo, os lotes de produção são produzidos um a seguir do outro. Neste tipo de produção o plano de produção é feito antecipadamente, podendo assim a empresa melhor aproveitar seus recursos com maior grau de liberdade, ao contrário do que ocorre no sistema de produção sob encomenda, no qual o plano de produção é feito após o recebimento do pedido ou encomenda.

Este tipo de produção em lotes é utilizado por uma infinidade de indústrias, a saber: têxteis, de cerâmica, de eletrodomésticos, de materiais elétricos, etc.

- **Sistema de Produção sob Encomenda:** este tipo de fabricação é feito sob encomenda e produzida especialmente a pedido de um cliente como turbinas, ferramentas, matrizes e maquinário especial, navios, etc. Os pedidos são em geral de natureza não repetitiva e as quantidades podem variar de uma a centenas de unidades.

Neste tipo de produção, cada pedido usualmente acarreta uma grande variedade de operações, e o andamento em geral não segue nenhum plano padronizado ou rotineiro. A encomenda ou o pedido efetuado é que vai definir como a produção deverá ser planejada e controlada, sendo, portanto esta etapa do planejamento e controle de produção muito complexa.

- **Comparativo entre os Três Sistemas de Produção:** como se pode observar no descrito acima, o tipo de produto que vai ser produzido é o que determina o sistema de produção a ser adotada pela empresa, em muitos casos dada a diversidade de produtos que uma empresa fabrica ou produzem, estas empresas apresentam misturas desses sistemas de produção.

Se o produto é de grande porte e depende da encomenda do cliente, então o sistema adotado será a produção sob encomenda. Se por outro lado, há uma grande variedade de produtos que entram e saem da produção, e que a empresa vende após estocar, então o sistema adotado será a produção em lotes.

Já se há um ou mais produtos que permanecem em produção por um longo tempo e que a empresa os vende após estocá-los, certamente o sistema adotado será de produção contínua.

Obviamente a adoção de um determinado sistema de produção apresenta certas vantagens como desvantagens.

Assim, a produção por encomenda é o sistema onde ocorre maior descontinuidade na produção, enquanto a produção contínua é o sistema onde há maior continuidade no processo produtivo, já a produção por lotes representa o

sistema intermediário, onde a continuidade e a descontinuidade se alternam como mostrado pela Figura 6.

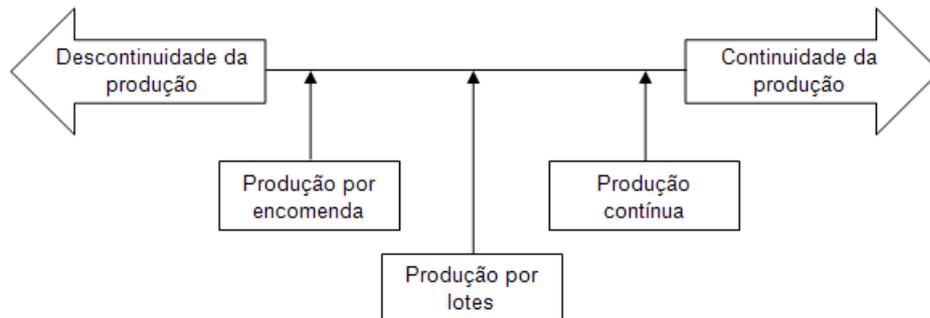


Figura 6- Comparativo entre os Sistemas de Produção (CHIAVENATO, 1992).

### 2.2.5. Sistemas Flexíveis de Manufatura (FMS)

Um sistema flexível de manufatura pode ser definido como “uma configuração controlada por computador, estações de trabalho semi-independentes, conectadas por manuseio de materiais e carregamento de máquinas automatizadas” (WILLIAMS, 1988). Essa definição mostra uma idéia das partes que compõem um sistema flexível de manufatura, conforme a Figura 7.

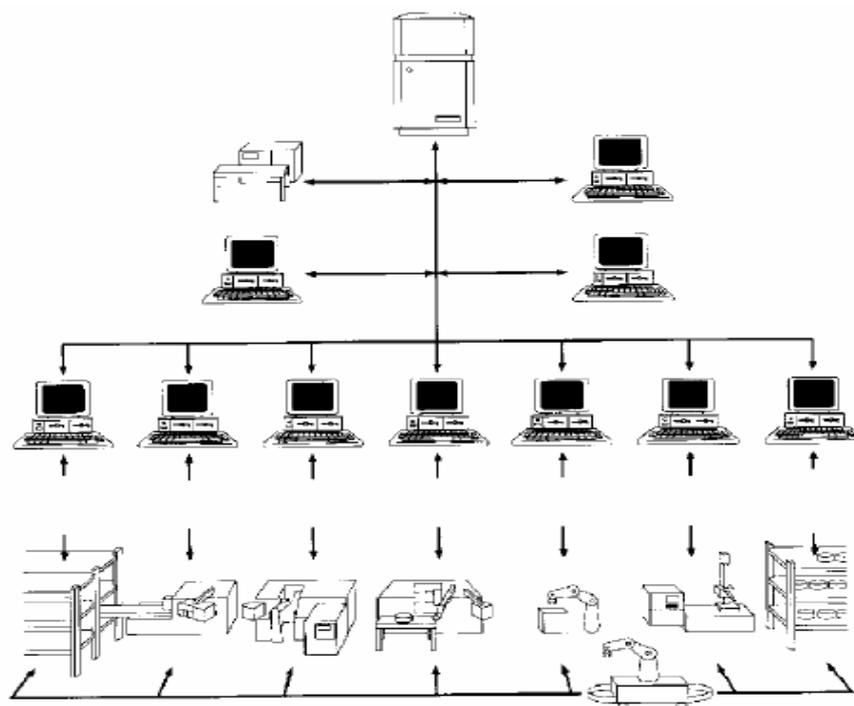


Figura 7- Arquitetura básica de um Sistema Flexível de Manufatura (WILLIAMS, 1988).

- Estações de trabalho CNC sejam máquinas-ferramentas ou centros de trabalho mais sofisticados, automatizados;
- Instalações de transporte/manuseio de materiais, que movem peças entre posições de trabalho (podem ser agvs, esteiras ou trilhos transportadores, ou robôs);
- Um sistema central de controle por computador, que controla e coordena as atividades do sistema (estações de trabalho, avg<sub>s</sub> e robôs) e também o planejamento e o seqüenciamento da produção;

Um sistema flexível de manufatura é mais do que uma tecnologia. Ele tem tecnologias integradas em um sistema, que tem potencial para ser melhor que a soma de suas partes. Como efeito, um sistema flexível de manufatura é uma operação que é capaz de manufaturar um componente completo desde o início ao fim. Além disso, a flexibilidade de cada uma das tecnologias individuais combina-se para fazer uma tecnologia de manufatura extremamente flexível.

Uma seqüência de produtos, todos diferentes, mas dentro do pacote de capacitação do sistema, poderia ser processada no sistema em qualquer ordem, e sem demora para a troca entre produtos.

Qualquer conjunto de máquinas dentro do sistema flexível de manufatura tem limitações no tamanho e na forma dos materiais que pode processar. A implicação disso é que os sistemas flexíveis de manufatura são bem adaptados para aplicações de manufatura em que os projetos das peças são similares e o tamanho dos lotes é pequeno.

Os sistemas flexíveis de manufatura variam consideravelmente em sua complexidade e tamanho. A Tabela 2 mostra uma indicação das faixas do sistema:

**Tabela 2- Comparação dos Sistemas Flexíveis de Manufatura (WILLIAMS, 1988).**

Sistema Compacto	Sistema Complexo
2-4 máquinas-ferramenta	15-30 máquinas-ferramenta
Transporte por esteira	Transporte por AVG's
Armazenagem e recuperação possivelmente automatizadas.	Armazenagem e recuperação automatizadas.
Controlador microprocessado local ligado via LAN.	Mainframe ou microcomputador, possivelmente com computador de reserva.
Dois robôs	Múltiplos robôs
Investimento: 50 a 55% em máquinas e ferramentas, 15 a 20% em manuseio e transporte, 20 a 25% em controle e comunicação e 10% em planejamento.	Investimento: 35 a 40% em máquinas e ferramentas, 15% em manuseio e transporte, 25 a 30% em controle e comunicação e 15 a 20% em planejamento.
Expansão relativamente limitada.	Potencial de expansão aberto.

### **Vantagens do Sistema Flexível de Manufatura**

Uma das principais vantagens dos sistemas flexíveis de manufatura é o que se chama de flexibilidade de produto, isto é, a habilidade de introduzir mudanças no projeto do produto. O controle integrado e a flexibilidade dos sistemas flexíveis de manufatura fazem disto uma tarefa relativamente simples, quando comparado a sistemas convencionais. Principais vantagens:

- Redução do lead time e do tempo de travessia (porta a porta da fábrica);
- Economia de estoque (especialmente de material em processo);
- Utilização aumentada;
- Redução dos tempos de preparação;
- Número de máquinas e operações reduzidas;
- Aumento da qualidade;

- Economia de espaço;
- Dependência de subcontratados reduzida;
- Economia no uso de mão-de-obra especializada;
- Ciclos de inovação da produção mais rápidos;

### **2.2.6. Planejamento e Controle da Produção**

O planejamento e controle da produção (PCP) é uma função administrativa que tem por objetivo fazer os planos que orientarão a produção e servirão de guia para o seu controle, que também é feito pelo PCP. Em termos simples, o PCP determina o que vai ser produzido, como vai ser produzido, onde vai ser produzido, quem vai produzir, quando vai ser produzido e a quantidade a ser produzida.

Para que possa atingir os objetivos, o PCP deve ser permanentemente suprido de informações das áreas mais diretamente ligadas ao sistema produtivo, tais como: engenharia do produto, engenharia de processo, *marketing*, manutenção, compra/suprimentos, entre outras. Essas áreas também recebem informações do PCP, para que possam melhorar o desempenho de suas atividades (TUBINO, 2000).

As atividades do PCP são exercidas nos três níveis hierárquicos do planejamento das atividades produtivas. No nível estratégico, são definidas as políticas estratégicas de longo prazo da empresa. No nível tático, são estabelecidas as políticas de médio prazo. No nível operacional, são preparados os programas de produção de curto prazo e o acompanhamento dos mesmos.

A seguir será apresentada uma descrição das atividades desenvolvidas pelo PCP (TUBINO, 2000), e são mostradas esquematicamente na Figura 8:

- Planejamento Estratégico da Produção: Consiste em estabelecer uma programação da produção (PP) de longo prazo que é definido em função do plano de vendas e disponibilidade de recursos da empresa. A programação da produção deverá ser compatível com o planejamento estratégico de *marketing* e finanças;
- Planejamento Mestre da Produção (PMP): Consiste em estabelecer, a partir da programação da produção, um planejamento mestre de produção de

produtos finais, detalhado em médio prazo, período a período. Enquanto a programação da produção considera famílias de produtos, o Planejamento Mestre da Produção leva em conta produtos finais que fazem parte destas famílias;

- Programação da Produção: Com base no planejamento mestre da produção e nas informações de estoque, estabelece, em curto prazo, quando e quanto comprar, fabricar ou montar cada item que compõe um produto final. Na programação da produção são emitidas as ordens de compra, de fabricação e montagem.

- Acompanhamento e Controle da Produção: Consiste na verificação se a execução está de acordo com o planejado;

Uma visão geral das atividades do PCP é mostrada na Figura.

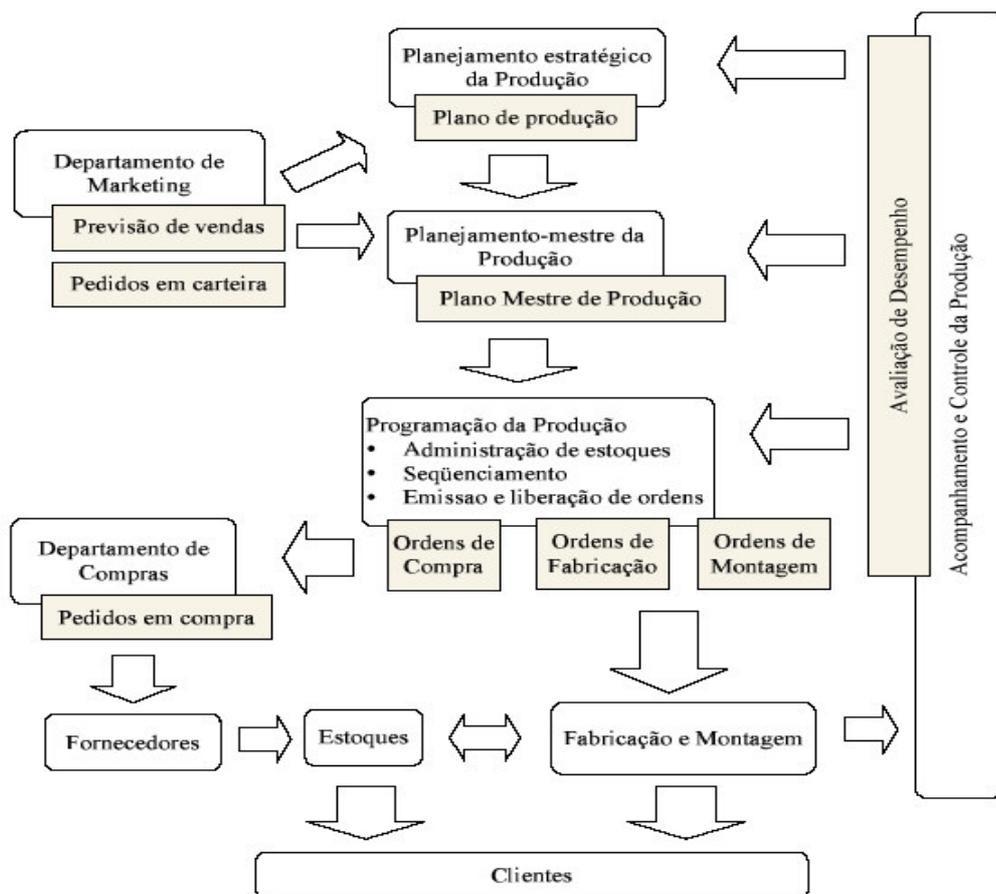


Figura 8- Visão geral das atividades PCP (TUBINO, 2000).

As informações dentro dos três níveis hierárquicos do planejamento das atividades devem estar consolidadas, ou seja, o plano mestre da produção deve estar compatível com as decisões tomadas em longo prazo, previstas no planejamento estratégico da produção.

Da mesma forma, a programação da produção de um dado componente será eficiente se a capacidade produtiva do sistema tiver sido bem equacionada pelo planejamento estratégico da produção.

### **2.2.7. Planejamento de Recursos Empresariais (ERP)**

ERP é uma solução que integra todos os subsistemas existentes em uma empresa, tais como engenharia, recursos humanos, serviços, etc. Ao integrarem todos os subsistemas, os ERP conseguem resultados melhores que o total dos subsistemas em separado.

Os sistemas de aplicação tradicionais tratam todas as transações isoladamente. Elas são feitas e usadas para dar resposta a funções específicas para as quais foram destinadas. Os ERP deixaram de olhar para uma transação como sendo um processo isolado, mas parte de todo um conjunto de processos interligados que perfazem toda a existência de uma empresa.

Os sistemas ERP não servem apenas para integrar os vários organismos de uma empresa. Para ser considerado como ERP, o sistema deve possuir algumas das seguintes características (HABERKORN, 2005):

- Modularidade: O sistema ERP é um sistema de arquitetura aberta, isto é, pode usar um módulo livremente sem que este afete os restantes;
- Compreensivo: O sistema está apto a suportar diferentes estruturas;
- Conectividade: O sistema não deve confinar ao espaço físico da empresa, mas permitir a ligação com outras entidades pertencentes ao mesmo grupo empresarial;
- Seleção de diferentes formas de negócios: Deve conter uma seleção das melhores práticas negociais em todo o planeta;

- Simulação da realidade: Deve permitir a simulação da realidade da empresa em computador;

Devido à sua complexidade, os sistemas ERP são compostos por módulos, parametrizáveis em função de um cliente específico:

- Vendas, distribuição e *marketing*;
- Planejamento de capacidades;
- Gestão financeira;
- Contabilidade;
- Recursos humanos;
- *E-Business*;

O sistema MRP2 primitivo era direcionado apenas para as indústrias. Os sistemas ERP atuais podem ser utilizados nas empresas independentemente da sua estrutura orgânica, tamanho, distribuição física, ramo de negócio, etc.

O ERP automatiza os processos de uma empresa, com a meta de integrar as informações através da organização, eliminando interfaces complexas e caras entre os sistemas heterogêneos. Por integrarem todos os organismos de uma empresa, os ERPs são normalmente sistemas grandes e complexos.

Para adequar estes sistemas às suas necessidades particulares, as empresas recorrem à customização. Este processo de customização torna a atualização do sistema cara e difícil.

Para evitar a armadilha da customização, muitos ERPs tornaram-se parametrizáveis. Entretanto, quanto mais parametrizável, mais complexo se torna o sistema. Como nunca é possível tornar todos os casos totalmente parametrizáveis, a necessidade de customização continua a existir.

### **2.3. Modelagem e Simulação de Sistemas**

Sistema é uma coleção de itens, entre os quais se encontra ou define-se uma relação, que é objeto de estudo ou interesse (KELTON, 2006).

Os modelos podem ser analíticos ou discretos. Os modelos do tipo analítico são formados por uma série de equações matemáticas usadas para prever o comportamento do sistema pela atribuição de valores aos parâmetros do modelo e a solução repetida das equações para cada conjunto de valores. Os modelos do tipo discretos são representados por uma estrutura matemática ou lógica que pode ser exercitada utilizando-se um computador, para simular o comportamento do sistema (PRADO, 1999).

As simulações permitem inferências sobre os sistemas modelados sem a necessidade de construí-los fisicamente no caso de sistemas de manufatura, quando eles ainda apenas propostas de novos sistemas, sem a necessidade de perturbá-los, quando seu custo operacional é alto ou seus requisitos de segurança impedem ou desaconselham experimentos, e sem o risco de destruí-los, quando se tem que definir o limite do sistema (PRADO, 1999).

Ao se fazer certos tipos de estudos de planejamento, é comum encontrar problemas de dimensionamento ou fluxo cuja solução é aparentemente complexa. O cenário pode ser uma fábrica, o trânsito de uma cidade, um escritório, etc. Geralmente estamos interessados em saber:

- Qual a quantidade correta de equipamentos (sejam eles máquinas, ferramentas, veículos, etc.) e pessoas;
- Qual o melhor layout e o melhor roteiro de fluxo dentro do sistema que está sendo analisado;

Ou seja, deseja-se que o sistema tenha um funcionamento eficiente ou otimizado. Os principais objetivos desse sistema é que ele seja otimizado e balanceado proporcionando um custo adequado e usuários satisfeitos. Esses aspectos são estudados em modelagem de sistemas.

O estudo de modelagem de sistemas pode envolver reengenharia, automatização, ampliações ou mudanças da planta produtiva. Dessa maneira, um determinado objetivo de produção, o estudo irá definir o melhor layout e o melhor

fluxo. Para dimensionar adequadamente um sistema devemos dedicar uma grande atenção aos gargalos, ou seja, pontos onde ocorrem filas.

Dentre as técnicas difundidas para modelagem de sistemas temos a teoria das filas e a simulação, sendo que esta última é a mais utilizada. A teoria das filas é um método analítico que aborda o assunto matematicamente, já a simulação é uma técnica que procura montar um modelo que melhor representa o sistema a ser estudado, ou seja, antes de efetuarmos alguma alteração na fábrica real, podemos interagir com uma fábrica virtual observando todos os aspectos pertinentes ao sistema.

### **2.3.1. Simulação a Eventos Discretos (SED)**

No estudo de sistemas dinâmicos, o primeiro objetivo é a modelagem. Um modelo é formado por um conjunto de equações que descrevem o comportamento do sistema, para que dessa forma possa ser encontrada sua resposta a uma dada entrada. Acontece que, muitas vezes os sistemas com os quais se trabalham não admitem simplificações, de modo a facilitar a obtenção analítica dessa resposta, ou os sistemas podem ser tão complexos que não possuem uma solução analítica para suas equações. O modelo matemático ainda é válido, o problema é que normalmente não se dispõe de ferramentas para resolver as equações que o compõe.

Neste conjunto de sistemas se encontram os sistemas a eventos discretos (SED), cujas soluções analíticas para seus modelos matemáticos são muito difíceis de encontrar. Para tais sistemas um mecanismo empregado para o seu estudo é a simulação, que vem a ser um processo no qual um sistema é resolvido numericamente, e os dados obtidos por esse processo são empregados para estimar o comportamento de várias variáveis de interesse do sistema (KELTON, 2006).

Simulação é a imitação da operação de um processo ou sistema ao longo do tempo. Seja feita manualmente ou através de um computador, a simulação envolve

a geração de uma história artificial do sistema, e a observação desta história permite criar inferências a respeito das características de operação do sistema real.

A observação do sistema à medida que ele evolui é estudada através do desenvolvimento do modelo. Este modelo geralmente é obtido fazendo-se uma série de considerações a respeito do comportamento do sistema. Estas considerações são expressas através de relações matemáticas, lógicas e simbólicas entre as entidades, ou outros componentes do sistema (KELTON, 2006).

Uma vez desenvolvido e validado, um modelo pode ser usado para investigar uma grande variedade de perguntas tipo “e se” sobre o sistema real, ou seja, mudanças no sistema poderiam ser primeiramente simuladas com o objetivo de se prever o impacto destas mudanças no sistema real.

A simulação também pode ser usada para estudar sistemas durante a fase de desenvolvimento do mesmo, antes mesmo de terem sido construídos fisicamente. Portanto, a simulação pode ser usada tanto para prever o efeito de uma alteração em sistemas existentes, ou como uma ferramenta de desenvolvimento que permite prever o desempenho de novos sistemas sob um conjunto variado de circunstâncias.

### **2.3.2. Aplicações**

A simulação tem inúmeras aplicações atualmente, nas mais diversas áreas, que vão desde a produção em uma manufatura até a prospecção de petróleo, mas para este trabalho limita-se a citar a produção em uma manufatura.

Linhas de Produção: A área que tem apresentado maior aplicação são as linhas de produção, pois inúmeros cenários podem ser analisados os seguintes casos:

- Modificações em sistemas existentes, tais como troca de equipamentos, adição de novos produtos que irão afetar a dinâmica atual do processo. Pode-se então antecipar onde serão formados oriundos das modificações atuais. A introdução de modificações apropriadas, tais como modificações no fluxo, na

programação das atividades ou adição de novos recursos pode-se chegar ao melhor modelo que incorpore as modificações requeridas;

- Um setor de produção totalmente novo pode ser planejado obtendo-se o melhor fluxo desde o início do investimento:

- A melhor política de estoques pode ser obtida por meio da simulação. O modelo deve incluir a função de solicitação de material e a função atendimento aos fornecedores. Como resultado obtém-se o ponto e quantidade de pedido;

### **2.3.3. Etapas de um Projeto de Simulação**

As etapas de um projeto de simulação são apresentadas a seguir segundo (PRADO, 1999):

1- Identificação do problema. O que se espera resolver com o projeto de simulação?

2- Observação do problema:

Coleta de dados do sistema a ser simulado, constituído de:

- Layout em *AutoCAD* ou *Visio*;
- Identificação dos equipamentos e seus tempos de processamento;
- Identificação dos fluxos produtivos no sistema, suas distâncias e suas

durações;

- Identificação dos transportadores;
- Produção e produtividade do cenário atual;

3- Modelagem

- Gerar a modelagem da situação atual;
- Gerar a modelagem da situação do novo cenário;

4- Validação dos resultados (análise e confronto dos resultados);

5- Apresentação dos resultados;

6- Confeção da documentação final;

## 2.4. Redes de Petri

### 2.4.1 Introdução

Carl Adam Petri criou esse método de estudo para sistemas dinâmicos a eventos discretos, em uma tese de doutoramento dedicada às Comunicações com Autômatos (1962). Depois, duas linhas de desenvolvimento se estabeleceram, em Ciências da Computação e em Engenharia de Sistemas.

As Redes de Petri se destacam na engenharia atual pelas seguintes qualidades:

- Capturam as relações de precedência e os vínculos estruturais dos sistemas reais;
- São graficamente expressivas;
- Modelam conflitos e filas;
- Têm fundamento matemático e prático;
- Admitem várias abreviações e extensões;

As redes originalmente definidas por Petri diferem das atuais em vários aspectos. A partir dos trabalhos de Holt e Commoner em 1970, sua definição ficou praticamente padronizada (CASTRUCCI, 2001).

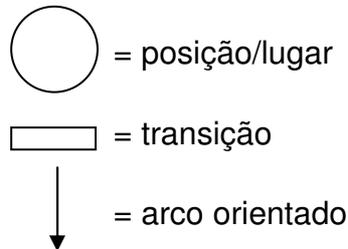
As Redes de Petri são definidas por meio de conjuntos, funções e por grafos, de maneira que suas propriedades possam ser obtidas pela teoria dos conjuntos e/ou pela teoria dos grafos e suas propriedades podem ser verificadas por álgebra ou por simulação (CASTRUCCI, 2001).

Uma rede de Petri é um grafo orientado que tem dois tipos de nós: transições e posições. Os arcos do grafo partem de algumas posições para algumas transições ou vice-versa; aos arcos associam-se números (inteiros) fixos, que são seus pesos. Cada posição pode contar um número (inteiro) de marcas (*tokens*), e estas, sob certas condições, podem mover-se ao longo de arcos, respeitados os sentidos destes (VALETTE, 1990).

Definição. Uma rede de Petri é uma quintupla  $(P, T, A, W, m_0)$  em que:

- $P = (p_1 \dots p_n)$  é um conjunto finito de posições ou lugares;
- $T = (t_1 \dots t_m)$  é um conjunto finito de transições;
- $A$  é um conjunto finito de arcos pertencentes ao conjunto  $(P \times T) \cup (T \times P)$ , em que  $(P \times T)$  representa o conjunto dos arcos orientados de  $p_i$  para  $t_j$ , também designados por  $(p_i, t_j)$ , e  $(T \times P)$  representa o conjunto dos arcos orientados de  $t_i$  para  $p_j$  ou  $(t_i, p_j)$ ;
- $W$  é a função que atribui um peso  $w$  (um número inteiro) a cada arco;
- $m_0$  é um vetor cuja  $i$ -ésima coordenada define o número de marcas (*tokens*) na posição  $p_i$ , no início da evolução da rede;
- Os conjuntos  $T$  e  $P$  são disjuntos, isto é,  $T \cap P = \emptyset$ ;
- $n = |P|$  é a cardinalidade do conjunto  $P$ , o número de posições da rede de Petri;
- $m = |T|$  é o número de transições da rede de Petri. (PETERSON, 1981).

Na versão gráfica são usuais os seguintes símbolos:



As marcas (*tokens*) são utilizadas para representar quantidades de entidades, recursos ou peças, “residentes” nas posições ou “movidas” através das transições. Adota-se escrever no interior do disco representativo de cada posição o número de marcas, ou um ponto para cada marca, quando em número reduzido.

## 2.4.2. Execução das Redes de Petri

Chama-se de execução da rede de Petri a movimentação das marcas pela rede de acordo com certas regras; ocorre em duas fases: habilitação e disparo de transição.

Uma transição  $t_j \in T$  numa rede de Petri habilitada por uma marcação  $m$  se ocorre que, para todo  $p_i \in t$ ,  $m(p_i) \geq (p_i, t_j)$ , isto é, (marcação em  $p_i$ )  $\geq$  (peso do arco de  $p_i$  a  $t_j$ ).

Uma transição é disparada por meio de duas operações:

- a) remover marcas das posições do pré-set ( tantas marcas quanto for o peso do arco correspondente e;
- b) depositar em cada uma das posições do pós-set tantas marcas quanto for o peso do arco correspondente.

### 2.4.3. Propriedades de desempenho

Neste tópico revisam-se as seguintes propriedades segundo (CASTRUCCI, 2001):

- Limitação;
- Conservação;
- Vivacidade, conflitos e conflitos mortais (*deadlocks*);
- Alcançabilidade;
- Persistência;
- Reversibilidade;

As qualidades de vivacidade, segurança e reversibilidade são fundamentais para que um sistema automático atenda às necessidades dos usuários; por isso, não podem ser ignoradas nos projetos.

As propriedades de desempenho usualmente dependem da sua marcação inicial, ou seja, depende de seu desempenho dinâmico no sistema.

- Limitação: ao modelar um sistema de manufatura, as marcas representam peças produzidas. Se o aumento de marcas tende, ao infinito, evidentemente tem-se uma condição inviável para o sistema real. Na teoria geral dos sistemas dinâmicos, isso caracterizaria uma instabilidade; nas Redes de Petri diz-se que inexistente a propriedade de limitação (CASTRUCCI, 2001).

- **Conservação:** Uma rede de Petri em que a soma total das marcas permanecem constante na sua execução é dita conservativa. Essa exigência é demasiadamente forte, porque a execução de determinadas posições da rede de Petri pode ampliar o número de marcas imediatamente subseqüentes, e a execução de outras pode diminuir o número de marcas. Por isso existe uma definição mais geral:

Uma rede de Petri com um dado estado inicial  $x_0$  é conservativa com respeito ao vetor de pesos  $w = [w_1, \dots, w_n]$  se:

$\sum_{i=1}^n w_i \cdot x(p_i) - w \cdot x_0 = \text{constante}$ , em que  $w_i > 0, n = |P|$ , em todas as possíveis execuções decorrentes do estado inicial  $x_0$  (CASTRUCCI, 2001).

- **Vivacidade e conflito mortal:** a motivação deste conceito é a preocupação com posições ou transições da rede que nunca são visitadas durante a execução, pode ser simples consequência da modelagem incorreta dos sistemas, mas pode também apontar um gravíssimo problema no sistema real.

Uma transição é viva, dado um estado inicial  $x_0$ , se e somente se ela é habilitada a partir de algum estado decorrente de  $x_0$ . Uma rede de petri é viva, dado um estado inicial  $x_0$ , se e somente se todas as suas transições são vivas.

O principal problema operacional, oposto à vivacidade, é o conflito mortal. Evitar conflitos mortais requer usualmente modificar o sistema e a rede, com estados e transições adicionais (CASTRUCCI, 2001).

- **Alcançabilidade:** o estado  $x$  é alcançável a partir de um estado inicial  $x_0$  se  $x$  pode resultar de uma ou mais transições executadas a partir de  $x_0$ . O conjunto de todos os estados alcançável a partir de  $x_0$  é o conjunto de alcançabilidade  $R(x_0)$  (CASTRUCCI, 2001).

- **Persistência (não-interruptibilidade):** uma rede é persistente se para qualquer duas transições habilitadas simultaneamente a execução de uma não inabilita a outra (CASTRUCCI, 2001).

- Reversibilidade: uma propriedade importante dos sistemas é a recuperação automática a partir de eventos perturbadores do funcionamento de seus elementos, tais como, quebra de máquina, retrabalhos inesperados, defeitos no sistema. Por recuperação entende-se que o sistema retorne por si a um estado específico (CASTRUCCI, 2001).
- Conflito mortal: é a propriedade do sistema em que a marcação não consegue alcançar nenhum outro estado da rede (CASTRUCCI, 2001).

#### **2.4.4. Características da Rede de Petri**

As Redes de Petri em sua forma original, desenvolvida por Carl Adam Petri, são conhecidas como ordinárias também chamadas de primitivas ou autônomas, pois possuem um baixo poder de modelagem por representarem apenas relações de causa e efeito entre os eventos e as condições. A sua utilização é restringida, portanto, a diversos tipos de sistemas pertencentes às classes de sistemas (dinâmicos) de eventos discretos, onde a sincronização externa e o tempo não interferem (DAVID , 1994).

Vários autores dividem as Redes de Petri em três classes principais: Redes de Petri Ordinárias (modelo básico), abreviações e extensões.

Nas Redes de Petri ordinárias todos os arcos têm o mesmo peso igual a um, existindo apenas somente um tipo de ficha, a capacidade dos lugares é infinita (isto é, o número de marcas não é limitado pela capacidade dos lugares), e o disparo de uma transição acontece se cada lugar precedente tiver no mínimo uma marca, e nenhum tempo envolvido (DAVID , 1994).

As abreviações correspondem às representações simplificadas que têm por finalidade facilitar a representação gráfica e possuem o mesmo poder de modelagem das Redes de Petri ordinárias. Dentro desta classe as Redes de Petri generalizadas, as com capacidade finita e as coloridas e possuem as mesmas características das Redes de Petri ordinárias com poucas adaptações (DAVID , 1994).

As extensões correspondem aos modelos para os quais as regras de funcionamento sofram alguma alteração com a finalidade de enriquecer a capacidade de representação do modelo principal. Nas extensões podem-se considerar três subclasses, que são as seguintes (DAVID , 1994):

- Redes de Petri para a representação de máquinas de Turing, com arcos inibidores e Redes de Petri prioritárias;
- Extensões que permitem a modelagem de Redes de Petri híbridas e contínuas;
- Extensões para o desenvolvimento de modelos que descrevem o funcionamento de sistemas cuja evolução depende de eventos externos e/ou tempo, e são basicamente as Redes de Petri sincronizadas, as temporizadas e as estocásticas.

#### **2.4.5. Abreviações**

- Redes de Petri generalizadas: é uma rede de Petri onde pesos (inteiros estritamente positivos) são associados aos arcos. Em geral todas as Redes de Petri generalizadas podem ser transformadas em ordinárias;
- Redes de Petri coloridas: são Redes onde é atribuída uma cor diferente a cada ficha (JENSEN, 1986). Elas formam uma categoria de redes cuja percepção intuitiva é menos clara do que as Redes de Petri generalizadas. Elas são de grande valor para a modelagem de sistemas complexos;
- Redes de Petri com capacidade finita: é uma rede onde cada lugar é associado uma capacidade de marcas. O disparo de uma transição de entrada, cuja capacidade é somente possível se o disparo desta transição não resulta em um número de marcas que exceda esta capacidade;

#### **2.4.6. Extensões**

Redes de Petri com arcos inibidores: quando duas transições estão em conflito, a priorização é um problema comum em uma rede de Petri. Para dar

solução a este problema, aumentando assim o poder de modelagem das Redes de Petri (PETERSON, 1981) foram criados os arcos inibidores. Um arco inibidor é um arco dirigido que une um lugar a uma transição.

Redes de Petri contínuas: a principal característica é que a marcação de uma posição é um número real (positivo) e não mais um número inteiro. Sendo o disparo de uma transição realizada como um fluxo contínuo. Estas redes representam sistemas que não podem ser modelados por Redes de Petri ordinárias, obtendo um modelo muito apropriado também quando o número de marcações de uma rede de Petri Ordinária torna-se muito grande.

Rede de Petri híbrida: é um novo modelo apresentado pela primeira vez por (DAVID , 1994). Esta rede é formada tanto por lugares e transições discretas quanto lugares e transições contínuas.

As abreviações e extensões mostradas até aqui são Redes de Petri, as quais só permitem uma abordagem qualitativa. As seguintes extensões que serão vistas que permitem descrever, não só o que acontece no sistema modelado, mas também quando os eventos acontecem. Estas Redes de Petri permitem, portanto que sistemas sejam modelados quando os disparos das transições são sincronizados por eventos externos, e/ou cujas evoluções são dependentes do tempo (CASTRUCCI, 2001).

Redes de Petri sincronizadas: em uma rede de Petri autônoma, sabe-se que uma transição pode ser disparada se ela é habilitada, mas não se sabe quando ela será disparada. Numa rede de Petri sincronizada, um evento é associado a cada transição, e o disparo desta transição acontecerá se a transição estiver habilitada e quando o evento associado ocorrer.

Redes de Petri T-Temporizada: apresentada por Ranchandani em sua tese de Doutorado em 1973 no MIT, e associa a cada transição da rede um único parâmetro temporal (sua duração de disparo).

Desde que uma transição torne-se habilitada, seu disparo absorve os *tokens* correspondentes, desde cada um dos seus lugares de entrada, permanecem na

transição durante o tempo da execução do disparo. Quando a duração do disparo termina, então os *tokens* são depositados em cada lugar de saída da transição.

Redes de Petri P-Temporizada: contrário ao modelo de Ranchandani associa a cada lugar um tempo possivelmente de valor zero.

Quando um *token* é depositado em um lugar, a mesma deverá permanecer no mínimo um tempo neste lugar (este *token* é dito indisponível por este tempo). Quando o tempo decorreu, as fichas então se tornam disponíveis. Somente as fichas disponíveis são consideradas para habilitar condições (verificar diferenças entre  $p$  e  $t$ ).

Redes de Petri estocásticas: em Redes temporizadas, uma duração fixa (geralmente constante, podendo ser também variável), é associada com cada lugar ou transição da rede, é o caso, por exemplo, dos sistemas de produção, onde o tempo de trabalho de uma máquina para realizar uma determinada operação.

Porém existem casos, onde ela não pode ser modelada com durações constantes; sendo este caso por ex.: o tempo de funcionamento real entre dois *Breakdowns* de uma máquina.

Esta duração pode ser modelada por uma variável random. Redes de Petri Estocásticas podem ser usadas neste caso (HATONO, 1991). Aqui um tempo random é associado com o disparo de cada transição, onde o tempo é geralmente distribuído segundo uma distribuição (MOLLOY, 1985).

#### **2.4.7. Redes de Petri e sua relação com os Sistemas de Manufatura**

Como visto anteriormente, as Redes de Petri constituem-se uma ferramenta matemática e gráfica de representação formal de sistemas de eventos discretos (um sistema de manufatura é um sistema discreto), sendo esta a razão de sua importância na automação industrial.

A sua facilidade para modelar situações que dificilmente são representadas por outros modelos como concorrência, paralelismo, sincronização entre vários

processos e competição por um recurso fazem das Redes de Petri uma ferramenta muito importante.

Por exemplo, os modelos de filas são usados com muita freqüência para avaliar o desempenho, mas sincronizações são difíceis (impossíveis) de se representar. Neste e em outros casos, as Redes de Petri são mais apropriadas para representar formalmente paralelismo e sincronizações em ambientes de Engenharia (VALETTE, 1990).

A estrutura de uma Rede de Petri, vista como uma ordem parcial de transições descreve a coordenação entre eventos concorrentes que não têm uma relação de precedência rigorosa. A alocação de recursos é um exemplo. Outro exemplo é fazer uma escolha entre ações alternativas para solucionar conflitos entre dois eventos competindo pelo mesmo recurso.

Em sistemas flexíveis de manufatura geralmente aparecem situações tais como (VALETTE, 1990):

- Processos tendo relação de precedência entre si;
- Processos sendo executados ao mesmo tempo (paralelismo);
- Processos que não podem ser realizados até que outro processo alcance certo estado (sincronização);
- Processos a serem seguidos não são determinados, o que mostra uma escolha entre alternativas (não determinismo);
- Processos possuindo conflitos entre competição e coordenação de atividades (alocação de recursos).

Assim sendo, o uso das Redes de Petri para a modelagem, análise e controle de eventos discretos de sistemas flexíveis de manufatura estão recebendo maior atenção nestes últimos anos por diversas razões (VALETTE, 1990):

- Possuem uma forma gráfica fácil de entender na qual é possível visualizar sistemas complexos;
- Podem modelar concorrência, eventos assíncronos, relações de precedência lógica e interações estruturais numa maneira simples e natural.

Conflitos, bloqueios, buffers finitos, sincronizações, prioridades, e operações de montagem e desmontagem podem ser facilmente modeladas com eficiência;

- Representam uma ferramenta de modelagem hierárquica, com uma base matemática e prática bem desenvolvida. Análise estrutural e temporal pode ser executada usando Redes de Petri estocásticas;

- Apresentam propriedades de decomposição permitindo assim uma representação modular (RIGHINI, 1993);

- Mudanças num modelo de Redes de Petri são feitas simplesmente pela adição de fichas, posições ou transições. Por outro lado, mudanças num modelo de cadeias de Markov usualmente requerem uma redefinição de todos os estados no modelo (Al-JAAR, 1990).

- É um modelo abstrato, o que permite a representação de diferentes tipos de sistemas;

- É um modelo que permite diversos níveis de abstração na representação de um mesmo sistema;

- Permitem a descrição dos aspectos estáticos e dinâmicos do sistema a ser representado;

- Contêm o conceito de estado parcial (RILLO, 1988);

- Podem ser usados também para implementar sistemas em tempo real (VALETTE , 1990);

- É um modelo de fácil aprendizado, podendo funcionar como linguagem de comunicação entre especialistas de diversas áreas;

- Possuem métodos de análise, existindo atualmente ferramentas comerciais para sua análise dos tipos mais simples de redes.

Na literatura atual, as Redes de Petri voltadas para Sistemas de Produção, mais especificamente em sistemas flexíveis de manufatura, podem ser classificadas nas seguintes categorias (Al-JAAR, 1990):

- Modelagem e análise;

- Avaliação do desempenho de Sistemas de Manufatura;

- Implementação do controle em tempo real;
- Simulação e ferramentas de software;

Modelagem e análise: Um sistema flexível de manufatura pode ser visto como dois sistemas (FAVREL, 1984): um sistema físico e um sistema lógico. Do ponto de vista físico, é um conjunto de máquinas, ferramentas, matérias-primas e produtos. Do ponto de vista lógico, é um conjunto de processos, assim como o estado das máquinas e materiais num job-shop. O processo de manufatura significa, portanto a evolução do sistema, o qual pode ser estudado pela árvore de alcançabilidade.

Entretanto, a complexidade do modelo aumenta quando ela é muito grande (especialmente quando se deseja um modelo mais detalhado), devido à explosão combinatória de estados. Neste caso, uma abordagem modular é a maneira mais adequada de analisar uma rede de Petri. Em Rede de Petri, uma sub-rede inteira pode ser substituída por uma simples posição ou transição para a modelagem num nível de abstração maior. Por outro lado, também podemos substituir um lugar ou uma transição por uma sub-rede para prover uma modelagem mais detalhada, o que é feita através de blocos bem formados.

Para solucionar, portanto, o problema da explosão combinatória de estados ao efetuar a análise de uma Rede de Petri, existe algumas abordagens: uma delas é por simulação (RIGHINI, 1993), e outra por redução (GREENWOOD, 1988).

Avaliação de desempenho de sistemas de manufatura: a adição de tempo nas Redes de Petri permitiu o cálculo da avaliação da eficiência temporal dos sistemas. Redes de petri temporizadas e Redes de Petri estocásticas são usadas neste contexto. Essas últimas têm recebido muita atenção no campo de ciência de computação (MOLLOY, 1985), e na avaliação da eficiência de sistemas flexíveis de manufatura (AI-JAAR, 1990).

Modelos de Redes de Petri estocásticas, por exemplo, mostram-se superiores no cálculo do desempenho de sistemas sobre os modelos tais como rede de filas, cadeia de Markov, simulação e análise de perturbação (AI-JAAR, 1990).

Redes de Petri são, por exemplo, mais apropriadas do que redes de filas quando se modela um sistema com buffer finito, sincronização, prioridades e operações de montagem e desmontagem. Entretanto, quando a capacidade dos buffers é relativamente grande, então redes de filas e não Redes de Petri devem ser usadas.

Implementação de controle em tempo real: paralelamente à modelagem e análise, assim como à avaliação do desempenho de um sistema flexível de manufatura, a implementação de controladores baseada em Redes de Petri em tempo real tem recebido considerável atenção.

Um aspecto importante das Redes de Petri em Manufatura é seu uso nas várias etapas do projeto (desde as especificações funcionais até a implementação final) de um FMS para a implementação de um Sistema de Controle (RILLO, 1988) (Al-JAAR, 1990). Esta implementação direta dos programas de controle a partir das especificações permite uma acentuada queda no número de erros introduzidos quando não existe esta passagem direta entre estas duas fases.

Uma aplicação de Redes de Petri e sistemas baseados em regras como metodologia para a especificação e implementação de sistemas de controle para sistemas de manufatura pode ser vista melhor em (RILLO, 1988), em (VALETTE , 1990), por exemplo, podemos apreciar uma visão sobre o uso de Rede de Petri no desenho e implementação do controle de sistemas flexíveis de manufatura. O mesmo que é discutido usando dois níveis de decomposição, controle local e o nível de coordenação e monitoramento. Por outro lado, (CASTRUCCI , 2001) apresenta a técnica de "*Mark Flow Graph*" estendido, que é um derivado da Rede de Petri para a modelagem e controle de sistemas de eventos discretos.

#### **2.4.8. Aplicação das Redes de Petri em FMS**

Para a especificação de um sistema em ambientes de manufatura utiliza-se uma lista de recursos, operações a serem executadas, assim como as relações de precedência, descrevendo desse modo o comportamento do mesmo.

Podem ser considerados como recursos: máquinas, buffers, partes, robôs, esteiras, etc, as quais podem ser divididas em duas classes:

- Aqueles que são fixas como máquinas, robôs, esteiras, etc;
- Aqueles que têm seu número variado como pallets, acessórios, partes a serem processadas, etc.

Para a execução de operações de produção é necessária a utilização de ambos os tipos de recursos.

São usados lugares para modelar operações e recursos em uma rede de Petri. Uma ficha (marcação) num lugar que representa um recurso (lugar-recurso) vai significar, portanto a disponibilidade do recurso para a execução de uma operação, enquanto que a ficha num lugar representa uma operação (lugar-operação) vai significar que a operação naquele lugar está sendo executada (atividade em processo).

A habilitação de uma transição numa Rede de Petri vai resultar, portanto da satisfação de certas pré-condições (conclusão de uma operação com sucesso e/ou a disponibilidade de um recurso). Satisfeitas estas pré-condições, o disparo de uma transição significará assim o início ou fim de uma operação (VALETTE, 1990).

Para evitar que o sistema não entre num estado de *deadlock*, ou ele seja potencialmente morto (que não evolua) faz-se necessário, portanto determinar o número necessário de fichas na marcação inicial dos lugares-recurso-variado.

a) Vivacidade: que vai implicar a ausência de algum possível bloqueio (*deadlock*). Noutras palavras esta propriedade garante que o sistema opere com sucesso;

b) Limitação (*boundedness*) ou seguro (*safeness*): que vai implicar ausência de excesso de fichas. Safeness de um lugar-recurso indica a disponibilidade de só um único recurso, e é freqüentemente usado para garantir a *safeness* de alguns lugares-operação afins;

c) Reversibilidade: implica a execução do comportamento cíclico do sistema que realiza suas funções repetidamente, implicando também a recuperação de erros no contexto de manufatura.

Portanto para modelar um sistema de manufatura usando Redes de Petri e garantir seu funcionamento correto é preciso que sua estrutura e a sua marcação inicial tornem o sistema limitado, vivo e reinicializável.

#### **2.4.9. Detecção de situações de Deadlock utilizando Redes de Petri**

Em sistemas flexíveis de manufatura existem diversas situações onde vários processos competem por um único recurso o qual é compartilhado. Assim, temos, por exemplo, máquinas numa célula de manufatura flexível (mesma máquina realizando atividades diferentes) ou sistemas de manuseio de material (robôs ou esteiras) sendo compartilhados por partes em um sistema flexível de manufatura.

Em sistemas em tempo real, onde recursos são compartilhados por diversos processos, uma das maiores preocupações é justamente evitar o aparecimento de *Deadlocks*. Assim, os modelos de Redes de Petri têm sido muito utilizados para a detecção destas situações desfavoráveis ao funcionamento normal de tais sistemas (JENSEN, 1986). Se durante a análise de um modelo de rede de Petri é encontrado um sistema vivo, isto vai indicar que o sistema é livre de *deadlock*. Por outro lado, se o modelo não é vivo, quer dizer que uma situação de *deadlock* pode existir.

A Figura 9 ilustra a ocorrência de um *deadlock* numa estação de trabalho composta por duas esteiras, um robô e uma máquina ferramenta. Pode-se ver claramente que enquanto a máquina está processando uma peça, o robô inicia o processo de carga de uma nova peça que chegou. Desta forma, mesmo que a máquina-ferramenta conclua o processo, não há como descarregar a peça pronta concretizando-se deste modo o *deadlock*.

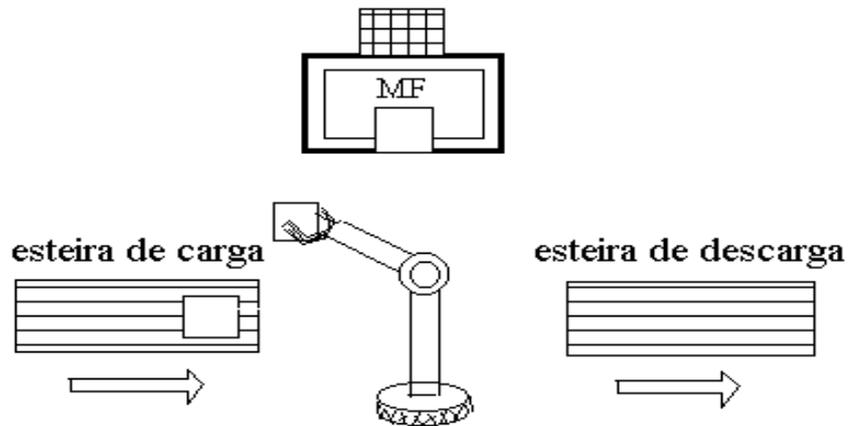


Figura 9- Ocorrência de um Deadlock (FAVREL, 1990).

Assim, para evitar estas situações de *deadlock* é requerido o uso suficiente de uma política de alocação de recursos. Várias abordagens baseadas em Redes de Petri foram feitas para eliminar, assim como para evitar estas situações de *deadlock*.

A eliminação de um *deadlock* refere-se a políticas de alocação de recursos estáticos. Por outro lado, evitar uma situação de *deadlock* é referido a políticas de alocação de recursos dinâmicos. Para mais detalhes sobre aplicação de Redes de Petri em sistemas flexíveis de manufatura.

## **CAPÍTULO 3 – MODELO PROPOSTO**

### **3.1. Introdução**

Apresentam-se, neste capítulo, o modelo para melhoria de gerenciamento de projetos e a metodologia para modelagem, simulação e implantação do novo sistema produtivo utilizando Redes de Petri auxiliada por simulação discreta, baseado em um caso real realizado em uma empresa do setor metal-mecânico.

O modelo para melhoria de gerenciamento de projetos foi desenvolvido para estabelecer uma metodologia compatível com a necessidade da empresa, visando facilitar o gerenciamento do desenvolvimento de novos produtos e a redução de custos, utilizando-se de uma metodologia otimizado à realidade da empresa.

A modelagem, simulação e implantação do novo sistema produtivo utilizando Redes de Petri com auxílio de simulação discreta foi desenvolvida para melhorar o sistema produtivo visando aumentar a produtividade, qualidade e redução dos custos de produção utilizando-se ferramentas de modelagem e simulação para obter resultados e posteriormente realizar a implantação no chão de fábrica.

#### **3.1.1. Apresentação da Empresa**

O ramo de atividade da empresa Womer Ind. E Com. Ltda é o metal-mecânico, dedicando-se principalmente ao setor de telecomunicações, fabricante de equipamentos para infra-estrutura de telecomunicações. A linha de produtos da empresa baseia-se principalmente de três produtos básicos: armários outdoor, armários indoor e servidores bancários. Destes pode haver a necessidade de produtos com características e modelos diferentes.

A demanda anual para o ano de 2006 para os principais produtos manufaturados pela empresa é mostrada na Figura 10:

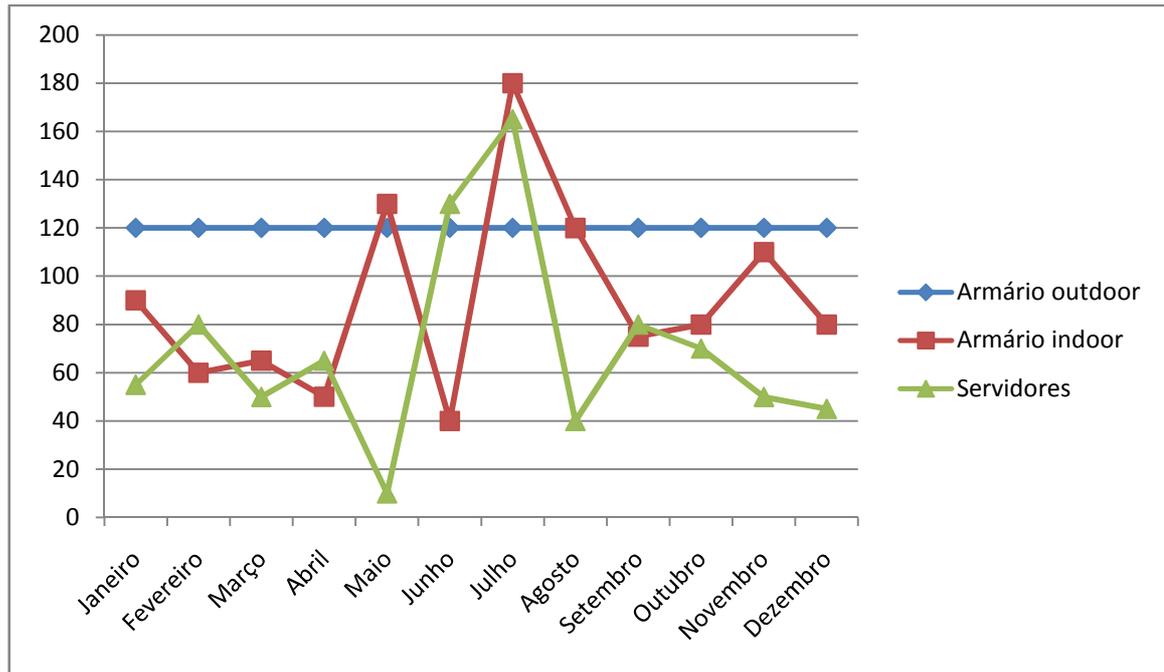


Figura 10- Demanda de produção do ano de 2006.

### 3.1.2. Desenvolvimento do projeto e planejamento da Produção

O departamento de projetos da empresa conta com quatro funcionários que são os responsáveis diretos por cada projeto que lhes é atribuído, contando principalmente com uma ferramenta avançada de CAD, ferramentas para gerenciamento do projeto tais como os aplicativos Microsoft Office®, Microsoft MS-Project® e o sistema ERP Microsiga®, mas apesar dessas ferramentas adequadas para o gerenciamento não há uma padronização de quais documentos sejam necessários para a realização do desenvolvimento do projeto.

No que diz respeito ao setor de planejamento e controle de produção que conta com três funcionários, não há um trabalho de otimização do sistema produtivo, melhorias nos processos e melhorias de âmbito geral que são inerentes ao departamento de PCP. Na verdade há apenas um setor que imprime ordens de produção sem qualquer critério ou metodologia para alocação de recursos, tanto material, máquinas e mão-de-obra.

Os pedidos de compra efetuados pelos clientes passam pelos seguintes setores da empresa antes de serem liberados para a produção: vendas, projetos e

planejamento e controle da produção. Devido a grande quantidade de projetos alguns problemas ocorrem no decorrer do desenvolvimento, por falta de um gerenciamento de projeto efetivo, dentre eles podemos citar os principais:

- Muitos projetos diferentes ocorrendo em paralelo;
- Projetos com duração e semelhanças construtivas entre eles, mas não há um aproveitamento da experiência anterior, ou seja, inicia-se tudo do zero;
- Custo relativamente baixo por projeto, mas encarecido pela falta de organização;

As características destes tipos de projetos tornam o seu gerenciamento muito mais difícil, principalmente pelo grande número de projetos diferentes sendo desenvolvidos simultaneamente, entretanto a semelhança entre eles é um ponto a favor no desenvolvimento do padrão para seu gerenciamento.

### **3.2. Desenvolvimento e implantação de modelos para gerenciamento de projetos**

O desenvolvimento de um modelo para o gerenciamento otimizado para as necessidades da empresa foi resultado de um trabalho em conjunto entre o departamento de PCP e projetos, já que o gerenciamento dar-se-á em conjunto e após algumas reuniões chegou-se ao consenso que o modelo que atende as necessidades é o modelo que está apresentado na Figura 11 e será detalhado a seguir:

- **Ánalyse de propostas:** processos relacionados com o recebimento das propostas e iniciação de projetos, incluindo análise de viabilidade;
- **Planejamento:** processos que configuram quais as melhores formas de se executar o projeto, com o máximo de eficiência;
- **Execução:** processos relacionados à manufatura e entrega do produto;
- **Controle:** processos que realizam o monitoramento do progresso do projeto;
- **Encerramento:** cuidam da finalização do projeto;

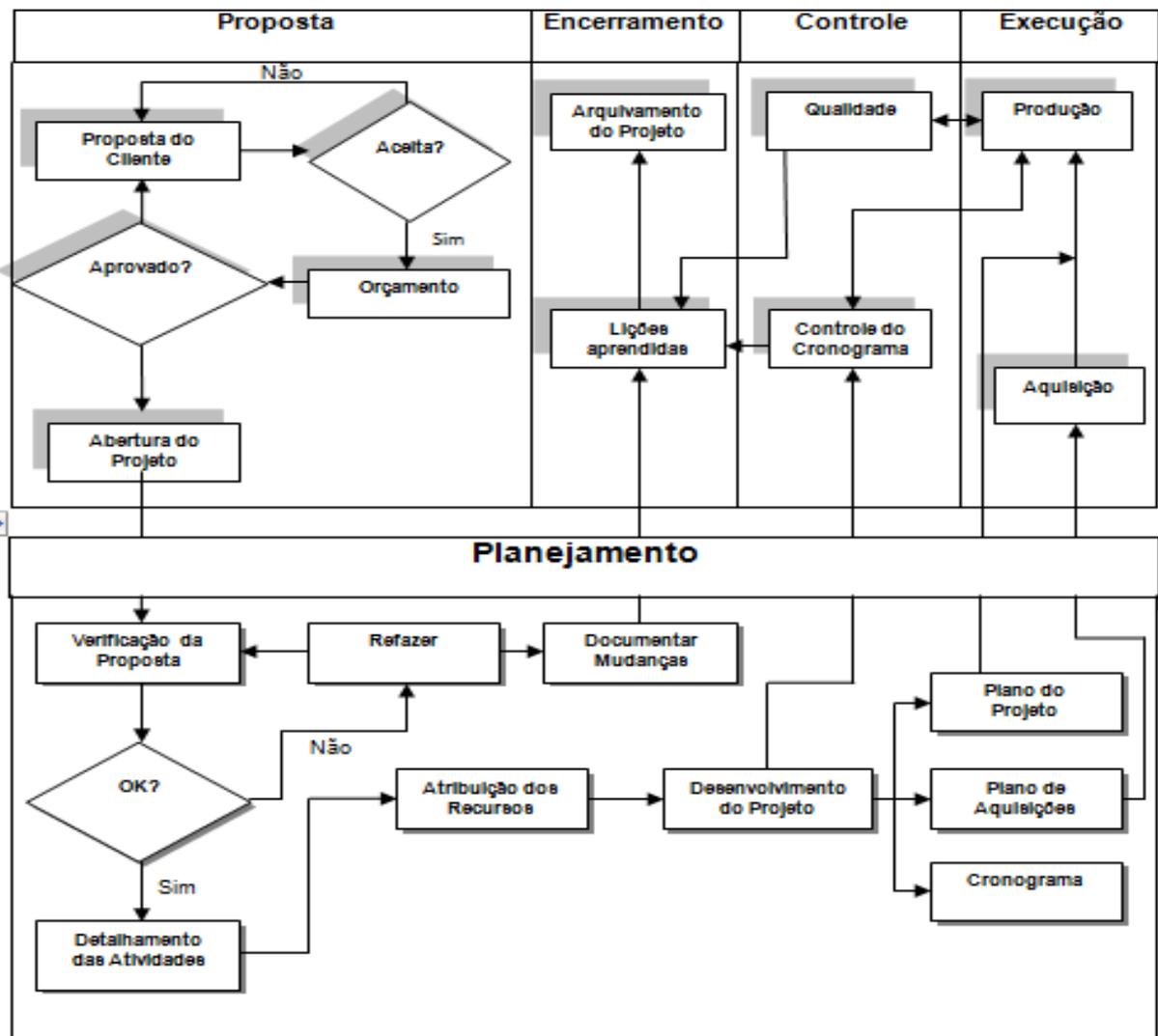


Figura 11- Fluxograma do método de gerenciamento proposto.

A sua construção foi baseada na metodologia de gerenciamento de projetos do PMI® (Project Management Institute). Assim levam em consideração os passos propostos pelo PMBOK® (Project para o gerenciamento de projetos genéricos). Entretanto, foram feitas modificações no sentido da adaptação dos processos para o gerenciamento de projetos em um ambiente de desenvolvimento e manufatura.

### 3.2.1. Proposta

As empresas que trabalham sob encomenda, caso da empresa estudada, é comum o recebimento de um termo com a descrição do produto requerido, assim como suas especificações técnicas. Tal termo é chamado de proposta comercial. Assim que a proposta comercial é recebida, é necessário que se faça um estudo de viabilidade para verificar se ela pode ser atendida dentro de parâmetros e prazos, custos e desempenhos requeridos. As seguintes ações devem ser cumpridas:

- Análise de viabilidade do projeto: esta análise deve ser feita tanto do ponto de vista econômico quanto do ponto de vista técnico. A análise econômica verifica sua viabilidade quanto aos custos de fabricação do produto em comparação ao retorno esperado (retorno sobre investimento); caso o retorno sobre projeto esteja abaixo do patamar colocado pela empresa, deve-se declinar do projeto e investir recursos em outros projetos. Na análise técnica, os principais itens a serem analisados são as tecnologias necessárias para a fabricação e materiais;
- Verificar similaridade com projetos anteriores: novos projetos podem ser similares a projetos já executados, beneficiando-se assim da experiência e dados similares anteriormente registrados;
- Análise da capacidade de produção: é somente através desta análise que se pode prever se o produto requisitado poderá ser feito na data estipulada pelo cliente;
- Análise de riscos: o risco é inerente ao processo. Por isso, deve-se fazer uma análise dos riscos envolvidos quando se aceita a proposta do cliente, tais como a não entrega do pedido no prazo, qualidade abaixo do que o esperado pelo cliente<sup>1</sup>.

As pessoas envolvidas neste processo são o gerente de engenharia e o gerente comercial. A entrega deste processo é a declinação ou aceitação da proposta.

---

<sup>1</sup> Também devem ser considerados os riscos de cancelamento do pedido e prorrogação do prazo de entrega por parte do cliente;

### **3.2.2. Orçamento**

O processo de orçamento tem a função de refazer a proposta recebida do cliente, retirando ou acrescentando itens do escopo que não poderão ser conduzidos pela empresa, seja por falta de infra-estrutura ou por incapacidade do processo. Além disso, deve-se aceitar ou propor uma mudança na data de entrega imposta pelo cliente (se for o caso) e fornecer o valor cobrado pela empresa para a realização do projeto. O conjunto de atividades para a realização deste processo inclui:

- Fazer declaração de escopo: é necessária a inclusão de todas as “entregas”, com suas respectivas descrições detalhadas, incluindo material, níveis de tolerância, tratamentos térmicos e superficiais, testes que serão realizados, etc. Além disso, é importante também que se inclua o que não faz parte do escopo do projeto.

- Estimar valor final do produto: para tal estimativa necessita-se de dados sobre material necessário, processos de fabricação com seus respectivos tempos, além de custos dos recursos por unidade de tempo. O uso de planilhas eletrônicas com campos previamente inseridos facilita o trabalho de cálculo, fazendo com que ele seja fácil e ágil.

- Estimar prazo de entrega: o prazo final pode ser estimado através da soma dos tempos históricos nas filas dos recursos que são alocados no projeto, acrescido de um fator de segurança.

A entrega deste processo é o orçamento detalhado, com o preço final para o cliente e prazo de entrega. Além disso, este documento deve conter também a declaração do escopo.

### **3.2.3. Abertura do Projeto**

A formalização do início do projeto é feita através do termo de abertura do projeto. É nesta fase que se define o gerente do projeto. Entretanto, para empresas pequenas, cujo tempo de duração dos projetos é reduzido, e o número de projetos é

muito elevado, a atribuição de um gerente para cada projeto é inviável. A melhor solução é a nomeação de um ou dois responsáveis pelos projetos, foi o caso adotado pela empresa em estudo.

O modelo adotado é apresentado no apêndice A com campos sugeridos para melhor compreensão das atividades que devem ser desenvolvidas neste processo. Além disso, é de grande importância que se detalhe a comunicação realizada como cliente, para que qualquer integrante da equipe de trabalho tenha acesso a todas as informações.

O resultado deste processo é a abertura da pasta de projeto, para arquivamento das informações do projeto, contendo o termo de abertura, o orçamento e todas as informações trocadas com o cliente até o momento.

### **3.2.4. Planejamento**

- Verificação da proposta: Nesta fase, deve-se verificar qualquer alteração na proposta aceita pelo cliente. Este processo se justifica devido ao tempo de resposta do cliente, que algumas vezes pode não ser imediato. Assim, é possível que ocorram mudanças nos valores cobrados pela utilização dos equipamentos, etc. Como resultado deste processo tem-se uma lista de alterações e aceitações da proposta.

- Refazer: Este processo somente será necessário caso alterações tenham sido feitas na proposta original, ou mesmo quando os tempos de orçamento não condizem com a realidade de produção. Além disso, detalhes de suporte podem ser adicionados nesta fase. Entretanto, em empresas que possuem um processo de orçamento eficiente, esta fase não será necessária. O resultado deste processo é uma lista de alterações, e a responsabilidade deste processo é do gerente do projeto.

- Documentar mudanças: as mudanças realizadas no processo anterior devem ser documentadas para que possam ser utilizadas em propostas futuras. No

apêndice C tem-se um modelo de formulário para documentar mudanças feitas e ações tomadas.

- **Detalhamento de atividades:** refere-se ao processo de detalhamento das atividades de fabricação do produto. Este processo trata dos aspectos técnicos, imprescindíveis à correta manufatura do produto, por isso deve ser feita em conjunto com o departamento de engenharia de produto. As atividades a serem realizadas compreendem as seguintes atividades:

- **Desenvolver atividades:** Desenvolvimento do roteiro de fabricação. O objetivo deste roteiro é definir como o produto será produzido, ou seja, quais atividades de manufatura devem ser realizadas e em qual seqüência. A seqüência deve ser detalhada, diferentemente da etapa de orçamento;

- **Detalhes de suporte:** em projetos de manufatura os principais detalhes da fabricação dos produtos são os desenhos de fabricação e as folhas de processos com a estimativa de tempos. As folhas de processos servem para orientar os operadores, principalmente em produtos que requerem muitas atividades. No apêndice C há o modelo utilizado na empresa estudada.

- **Definir aquisições necessárias:** materiais, ferramentas ou outras aquisições deve ser previsto aqui. A manutenção de um estoque atualizado é de extrema importância para a organização e conseqüentemente para o gerenciamento de seus projetos, pois assim pode-se prever a necessidade de compra de ferramentas, matéria-prima para a fabricação de produtos.

Este processo tem como resultados a seqüência de atividades da parte de manufatura do produto (roteiro de fabricação) juntamente com os detalhes do suporte (folha de processo) e necessidades de compra e itens que deverão ser analisados para posterior pedido de compra.

### **3.2.5. Desenvolvimento do Cronograma do projeto**

O desenvolvimento do cronograma é a determinação das datas de início e término do projeto. A ferramenta mais utilizada na construção e visualização de

cronogramas é o gráfico de Gantt. Assim, em projetos de manufatura sob encomenda, geralmente a data de término ou entrega é imposta pelo cliente, diversas vezes como restrição ao contrato. Conseqüentemente deve-se planejar as atividades do projeto com base nesta data, ou seja, do término para o início.

### **3.2.6. Cronograma dos Recursos**

Em projetos que incluem principalmente atividades de manufatura, o desenvolvimento de um cronograma para cada recurso torna-se tão importante quanto o cronograma de cada projeto. O cronograma dos recursos mostra quando cada recurso deve realizar as tarefas atribuídas a ele em cada projeto.

Entretanto, este processo é realizado para todos os projetos da empresa e não para um projeto específico, pois deve ser testada para cada organização, dependendo da forma de comunicação (impressa ou via computador) e do número de projetos novos recebidos.

### **3.2.7. Plano de projeto**

Com o cronograma de projeto pronto, deve-se enviar a documentação do projeto para a produção. Assim, este processo consiste basicamente em reunir todas as informações necessárias à fabricação do produto, ou seja, cronograma do projeto, roteiro de fabricação detalhado, folhas de processo e outros detalhes técnicos necessários.

### **3.2.8. Execução**

- **Aquisição**

Em projetos de manufatura com as características aqui estudadas, as principais aquisições são compostas de materiais para a fabricação de produtos, ferramentas não disponíveis na fábrica e serviços terceirizados. As tarefas necessárias para completar este processo são:

- Avaliação de fornecedores: devido à uniformidade das aquisições necessárias aos projetos aqui tratados, o trabalho de avaliação dos fornecedores não deve ser feito para um projeto, mas sim para o conjunto dos projetos da empresa. Por isso, devem-se certificar fornecedores que tenham boa relação de preço, qualidade, confiabilidade e rapidez na entrega dos produtos;

- Adquirir material: a aquisição dos materiais deve ser feita somente de fornecedores qualificados pela área comercial conforme os critérios da empresa;

- Verificar material: a verificação dos materiais na entrega deve ser feita seguindo os padrões da empresa;

### ▪ **Produção**

O processo de produção deve ocorrer conforme o roteiro de fabricação, composto de várias atividades produtivas. Assim este processo é composto pelo revezamento destas atividades, conforme mostrado a seguir:

- Esperar na fila: refere-se à atividade não produtiva de espera até que o recurso fique disponível. Esta atividade recebe influência do processo de controle de cronograma, que pode ser alterado para fazer mudanças na fila para acomodar atividades que estão atrasadas;

- Apontar tempo de início: antes de iniciar a produção é necessário que se aponte à hora de início, para se ter o controle efetivo do cronograma.

- Produzir: esta atividade ocorre fisicamente nos postos de trabalho, e é nela que se efetiva a manufatura do produto. A interação desta atividade com o processo de controle de qualidade garante ao produto a qualidade necessária definida no projeto.

- Apontar tempo de término: ao final da produção deve-se apontar a hora de término da atividade produtiva. A partir da marcação dos horários de início e término da atividade produtiva obtém-se um dado real da duração da tarefa, que pode ser comparado pelo estimado, e usado como histórico para projetos futuros.

### ▪ Controle do Cronograma

O controle é feito com base nas filas dos recursos, nos cronogramas dos projetos e nos apontamentos que são lançados diretamente ao sistema ERP, que monitora o andamento do projeto. Dentro da fábrica deve-se sinalizar os processos atrasados com relação ao cronograma com uma etiqueta.

### 3.2.9. Encerramento

Nesta fase, devem ser documentados todos os desvios ou falhas ocorridos, assim como as ações tomadas. Um questionário de avaliação deve ser enviado ao cliente para registrar falhas e oportunidades de melhoria nos próximos projetos (Apêndice E).

O processo de arquivamento do projeto cuida do correto armazenamento dos documentos gerados em todo processo de desenvolvimento e produção, o fechamento formal do projeto deve ser feito após o aceite final do cliente. Caso seja necessário retrabalho, o projeto não deverá ser encerrado

### 3.3. Aplicação do modelo de gerenciamento: estudo de caso

Para o sucesso da implantação do modelo, alguns passos foram acompanhados conforme o fluxograma da Figura 12. O detalhamento dos passos está descrito nos itens que seguem:

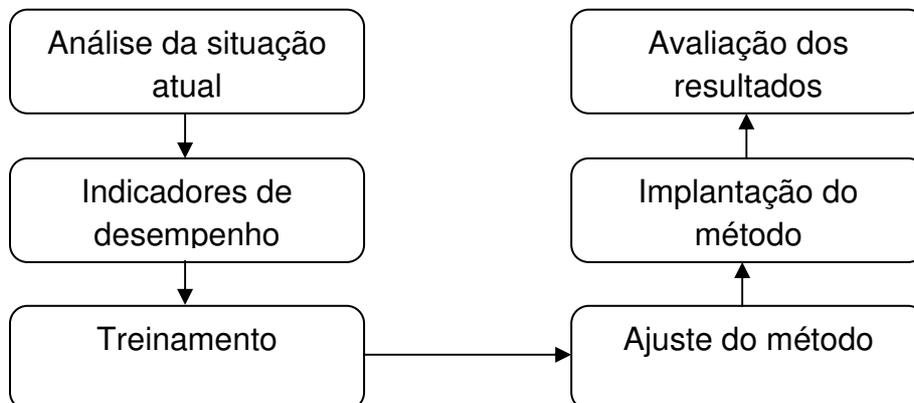


Figura 12- Fluxograma para implantação do método.

### 3.3.1. Análise da situação atual

A análise da situação atual deve ser feita para diagnosticar as necessidades reais da empresa. Assim, deve ser traçado o mapa de como a organização está operando, para que sejam identificados os problemas e os pontos de melhoria. As atividades desenvolvidas nesta fase foram:

- Preparação do questionário de avaliação: optou-se pelo uso de questionários como a principal forma de coleta de dados. Assim, foi preparado um questionário com grande abrangência, devido ao porte da empresa, esse questionário está no Apêndice E;
- Entrevistas e coleta de dados: entrevistas com pessoas-chave da empresa e coleta de dados importantes, tais como planilhas, bancos de dados, sistema ERP, etc.

Nesta fase também foram apurados todos os processos concorrentes na fábrica, desde o início de um projeto até o seu fechamento, esses dados serão utilizados para a modelagem de arranjo fabril, e todas as etapas foram descritas em um mapa conforme pode ser observado na Figura 13.

Mapa do Processo		
Local:	Linha de Manufatura dos armários	
Data:		
Tempo (min)	Símbolo	Descrição
	○ → □ ▽	
	○ → □ ▽	
	○ → □ ▽	

**Figura 13- Modelo de mapa de processos.**

Análise dos dados obtidos: foram analisados os dados obtidos nas atividades de entrevista e coleta de dados. Assim, os principais dados a serem

analisados estão resumidos na Tabela 3, a qual mostra a duração média dos projetos, índice de sucesso dos projetos, entre outros dados.

**Tabela 3- Resumo da análise dos dados obtidos.**

Tempo médio de duração dos projetos	- Somente fabricação: 30 dias; - Desenvolvimento e fabricação: 60 dias;
Sistemática no gerenciamento dos projetos	- Procedimento adaptado a cada projeto;
Ferramentas utilizadas atualmente no gerenciamento dos projetos	- Base de dados em Microsoft Access; - Planilhas internas de controle;
Índice de sucesso nos projetos	- Custo: 85% - Prazo: 45% - Qualidade: 90% - Escopo: 70% - Satisfação do cliente: 75%
Responsável pelos projetos	- Gerente industrial;
Documentação	- Não é documentado em nenhuma fase do projeto;
Produtos principais	- Equipamentos especiais para telecomunicações;

### 3.3.2. Indicadores de desempenho

A atribuição de indicadores de desempenho é muito importante para uma análise dos benefícios trazidos pela implantação do método. A Tabela 4 mostra os indicadores de desempenho, assim como: sua forma de cálculo, uma breve descrição de sua finalidade e os valores atuais para posterior comparação.

Tabela 4- Indicadores de desempenho.

<b>Indicador</b>	<b>Descrição</b>	<b>Cálculo</b>
Atendimento do custo do projeto	Porcentagem dos projetos atendidos dentro do custo orçado	Projeto dentro do custo/totalidade dos projetos
Atendimento do prazo do projeto	Porcentagem dos projetos atendidos dentro do prazo estipulado	Projetos dentro do prazo/totalidade de projetos
Atendimento do escopo planejado	Porcentagem dos projetos que atenderam o escopo acordado	Projeto dentro do escopo/totalidade dos projetos
Satisfação do cliente	Porcentagem dos projetos que obtiveram avaliação positiva do cliente	Avaliação do cliente boa ou ótima/totalidade dos projetos
Qualidade do produto	Porcentagem dos projetos que atenderam aos requisitos da qualidade do produto	Total de projetos com reclamação/ total de projetos

### 3.3.3. Treinamento

O treinamento visa o nivelamento do conhecimento tanto por parte das pessoas que participarão diretamente do processo de implementação do método, quanto das pessoas que sofrerão as conseqüências. O objetivo é diminuir a resistência a mudanças através da conscientização das necessidades de organização, e dos benefícios que a mudança trará para o trabalho das pessoas.

Na empresa estudada foram feitos dois treinamentos, o primeiro foi realizado com a diretoria e gerência, as pessoas que trabalham diretamente com o gerenciamento, com a finalidade de ressaltar a importância da metodologia de trabalho para a melhoria da empresa. Os tópicos ministrados neste treinamento foram: aspectos gerais do projeto, processos de gerenciamento de projetos, importância e metodologia do gerenciamento do projeto.

O segundo treinamento foi realizado com as pessoas diretamente ligadas aos projetos, no qual os tópicos relacionados no primeiro treinamento foram incluídos tópicos mais avançados de gerenciamento de projetos e ferramentas utilizadas em projetos.

### **3.3.4. Ajuste do método**

O objetivo do ajuste do método é estruturá-lo de acordo com as necessidades da empresa, pois entre as empresas de manufatura que trabalham sob encomenda há diferenças, principalmente segundo a quantidade de projetos e a duração de cada um deles. Assim, deve-se fazer com que o método se adapte à realidade da empresa, aumentando as chances de sucesso na sua implantação.

Na empresa em estudo, o ajuste do método foi de vital importância, pois alguns aspectos são característicos de seus projetos. Um dos aspectos mais importantes é com relação aos produtos manufaturados pela empresa, geralmente compostos por montagens, o que dificulta ainda mais qualquer tipo de implantação. No item 3.4.5. dar-se-á a implantação do método de gerenciamento de projetos.

### **3.3.5. Implantação do método**

O método de gerenciamento de projetos será implantado e para evidenciar e exemplificar a sua aplicação optou-se por acompanhar os passos de um projeto da empresa em estudo. A escolha do projeto foi feita com base na sua importância para a empresa, tanto no retorno financeiro esperado para o projeto, quanto no retorno em forma de mais projetos por parte do cliente. O projeto piloto para a implantação do método foi o armário indoor 6745.

- Proposta do cliente: foi recebida uma proposta de um importante cliente, para a fabricação de um tipo de “armário indoor especial”. Assim, foi feita uma análise de viabilidade de atendimento do pedido por parte do gerente comercial, seguida de uma análise técnica. Foi evidenciado que não existe nenhum impedimento técnico para atendimento do pedido;

- Orçamento: os prazos de entrega requeridos pelo cliente foram que a cada mês serem entregues 120 unidades do produto, num período de 12 meses, totalizando 1440 unidades durante o ano. Após o estudo de viabilidade desta proposta a empresa aceitou o contrato sabendo dos riscos que poderiam ocorrer caso os produtos não fossem entregues no prazo;

- Abertura do projeto: com a aceitação do orçamento e prazos de entrega aceitos pelo cliente, deu-se início à abertura da pasta do projeto e do termo de abertura do projeto, que está ilustrado na Figura 14.

<b>Termo de Abertura do Projeto</b>	
Projeto:	Custo estimado por unidade:
Armário indoor 6745 (Alcatel)	R\$ 4600,00
Gerente do Projeto:	
Gerente da Manufatura:	
Contato (cliente): Engenheiro de Compras	
Declaração do escopo: Entrega do produto especificado conforme projeto enviado, embalado adequadamente, entregue ao cliente em local especificado pelo mesmo, com todos os acessórios necessários para instalação.	
Declaração do que não faz parte do escopo: As ferramentas e dispositivos necessários para a instalação do produto, assim como a mão-de-obra.	
Ultima comunicação com o cliente:	
Data: 07/06/2006	Primeiro prazo de entrega: 30 dias
Potenciais riscos:	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Folhas de processos incorretas levando a erros na fabricação e montagem do produto;</li> <li>• Ferramentas e dispositivos inadequados ocasionando falhas nos produtos, desta forma atrasando o projeto;</li> <li>• Entrega atrasada do produto por erro de especificação e capacidade produtiva da fábrica, ocasionando o atraso no prazo de entrega e eventual pagamento de multa.</li> </ul>	

Figura 14- Termo de abertura do projeto.

- Verificação da proposta: o tempo de aceitação da proposta por parte do cliente ocorreu em menos de uma semana, por isso não houve mudanças na proposta original, não sendo necessária nenhuma correção;

- Detalhamento das atividades: o assistente de PCP com o auxílio do projetista elabora as atividades que são pertinentes à atividade que são listadas abaixo:

- Escopo do projeto alinhado à necessidade do cliente;
- Planejamento das atividades em ferramenta de gestão de projetos;
- Desenvolvimento do projeto com auxílio de uma ferramenta CAD adequada;
- Listagem dos componentes de montagem para que possam ser providenciados os fornecedores de material de consumo e serviços a serem terceirizados;

Todo o controle do tempo de desenvolvimento do projeto é efetuado por meio do sistema ERP, ou seja, o apontamento do início da tarefa e finalização da mesma é executado pelo projetista e é realizada no terminal, e esses dados são armazenados como uma futura referência para novos projetos.

O processo de encerramento do desenvolvimento do projeto é composto pelas seguintes tarefas:

Lições aprendidas no desenvolvimento: esta fase consiste em documentar todos os desvios e falhas ocorridas, assim como as ações tomadas. Um questionário de avaliação deve ser respondido pelo cliente para registrar falhas e oportunidades de melhoria nos próximos projetos, sendo que no Apêndice B há um modelo a ser utilizado.

Arquivamento do projeto: esse processo cuida do correto arquivamento da documentação gerada pelo projeto. Portanto, deve-se registrar toda a comunicação e conhecimento gerado durante o projeto. Além disso, o fechamento formal do projeto deve ser feito após o aceite final do cliente. Caso seja necessária alguma alteração o projeto não poderá ser encerrado.

Após todas essas etapas o projeto está liberado para a produção, aguardando apenas ordens de compra por parte do cliente para ser produzido.

### 3.3.6. Análise dos Resultados da Implantação da Metodologia de Gerenciamento de Projetos

Neste item são apresentados os resultados da implantação da Metodologia de Gerenciamento de projetos.

A implantação da metodologia de gerenciamento de projetos foi um passo importante para a reestruturação da empresa, e os resultados desta implantação são mostrados Tabela 5, sendo que os valores mostrados foram extraídos do sistema ERP da empresa.

**Tabela 5- Comparação do custo de projeto.**

Recursos	Projeto sem implantação da metodologia	Projeto com implantação da metodologia
Despesas de viagens	R\$ 1923,50	R\$1923,50
Treinamento	R\$ 560,00	R\$ 560,00
Desenvolvimento	R\$ 13000,00	R\$ 8200,00
Infra-estrutura	R\$3600,00	R\$3600,00
Equipamentos	R\$ 4968,00	R\$ 3672,00
Material e suprimentos	R\$8245,36	R\$7231,29
Tempo total	6 semanas	4 semanas e três dias
Custo Total	R\$ 32296,96	R\$ 25186,79

Podê-se constatar na Tabela 5 que a metodologia desenvolvida e implantada afeta os seguintes recursos:

- Desenvolvimento;
- Equipamentos;
- Material de consumo;

O tempo de desenvolvimento foi reduzido em 23,3%, uma diferença bem considerável para os padrões atuais da empresa<sup>2</sup>.

Na questão do custo do desenvolvimento houve uma redução de 22,01% no custo, o que posiciona a empresa como competitiva na questão do desenvolvimento do projeto, onde o custo de desenvolvimento é um item muito importante, sendo que os itens que compõem a tabela para a comparação são as seguintes:

- Hardware e software: são os recursos utilizados para a execução de projetos, tais como computadores, impressoras e softwares utilizados para o desenvolvimento do projeto.

- Despesas de viagens: são as despesas de visitas técnicas ao cliente para a definição e aprovação do projeto;

- Treinamento: é custo da empresa com o treinamento dos usuários do equipamento desenvolvido e custa R\$70,00 por hora;

- Desenvolvimento: é o valor cobrado do cliente para o desenvolvimento de novos produtos, que engloba o custo da mão de obra da equipe de projetos e um valor agregado relativo ao desenvolvimento e tem um custo fixo por hora de R\$100,00;

- Infra-estrutura: além das instalações da empresa, muitas vezes é necessário o desenvolvimento de algum dispositivo, principalmente para teste, e esse custo varia de acordo com as especificações técnicas;

- Equipamentos: são os equipamentos instalados na empresa que são utilizados na fabricação dos protótipos e tem um custo fixo por hora, e variam de acordo com o equipamento como mostra a Tabela 6:

---

<sup>2</sup> Os recursos, tais como: viagens, treinamentos e infra-estrutura variam de acordo com cada projeto. Para o estudo deste projeto estes custos são iguais em ambas as situações.

**Tabela 6- Custo por hora dos recursos.**

Processo	Custo (R\$)
Usinagem CNC	110,00
Usinagem convencional	60,00
Estamparia CNC	120,00
Dobradeira CNC	120,00
Soldagem	70,00
Pintura	90,00
Montagem	70,00

- Materiais e suprimentos: é o custo da matéria-prima e de todos os suprimentos utilizados para a fabricação, tais como parafusos, rebites e outros;
- Tempo total: é o tempo total gasto desde o início do projeto até a aprovação do produto pelo cliente, para que possa ser efetivamente produzido;

O resultado das entrevistas realizadas com os clientes após a implantação do método é mostrado na Tabela 7:

**Tabela 7- Indicadores de satisfação dos clientes.**

<b>Indicador</b>	<b>Índice antes da implantação do método</b>	<b>Índice após da implantação do método</b>
Atendimento do custo do projeto	67%	88%
Atendimento do prazo do projeto	42%	75,6%
Atendimento do escopo planejado	74%	85,6%
Satisfação do cliente	62%	91%
Qualidade do produto	87%	93%

### 3.4. Metodologia para modelagem utilizando Redes de Petri e Simulação a eventos discretos

Este tópico busca apresentar a integração entre modelagem e a otimização do sistema de produção da empresa em estudo. Os dados de tempos e roteiros de fabricação são mostrados na Tabela 8, e serão utilizados nos modelos de otimização por Redes de Petri e o de simulação, como dados determinísticos, sendo que estes dados também foram extraídos do sistema ERP da empresa.

**Tabela 8- Roteiro de fabricação do armário indoor.**

<b>Roteiro de Fabricação</b>			
Projeto: Projeto indoor 6745 (Alcatel)			
Responsável: Analista de PCP		Data: 12/06/2006	
Operação	Instrução	Recurso	Duração
010	Preparação dos materiais a serem usinados;	Serra	23 minutos
015	Estampagem da estrutura principal, tampas, portas e demais itens que necessitem deste processo;	Puncionadeiras	482 minutos
020	Usinagem da base;	Centro de Usinagem	196 minutos
025	Pinos, eixos e demais componentes que necessitam deste processo;	Torno CNC	19,3 minutos
030	Dobra da estrutura principal, tampas, portas e demais itens que necessitem deste processo;	Dobradeiras CNC	289 minutos
035	Solda da estrutura principal e componentes que necessitem deste processo;	Solda	126 minutos
040	Pintura dos conjuntos e peças que serão utilizadas na montagem do produto;	Cabine de Pintura	88 minutos
045	Montagem do produto final, check-list e controle de qualidade;	Montagem Final	360 minutos
050	Expedição;	Expedição	

Com a simulação a eventos discretos é possível prever e visualizar as conseqüências nos modelos proporcionadas por determinadas variáveis, por

exemplo, em uma linha de manufatura. Porém não é possível dizer se tais valores são os ótimos para, por exemplo, maximização da produtividade da linha e muito menos a modelagem do sistema. Neste caso a maximização será realizada com Redes de Petri, que é uma ferramenta apropriada para a modelagem de eventos que possuem paralelismos e concorrência por recursos.

Métodos de tentativa e erro são muito cansativos, demorados e, além disso, o resultado encontrado pode não representar a melhor solução, esta limitação da simulação a eventos discretos pode ser superada com a integração da modelagem de sistemas baseadas por Redes de Petri. O grande problema é que ainda não existe uma ferramenta computacional que trabalhe com as duas ferramentas, e por esse motivo utilizar-se-á duas ferramentas computacionais, o Arena Simulation® para a simulação de eventos discretos e o HPsim® utilizado para a modelagem do sistema de manufatura por Redes de Petri.

Na interação entre simulação e otimização, a última deve ser vista como uma ferramenta complementar à simulação. Neste processo, a modelagem do sistema fornece as possíveis melhorias no sistema, tais como a quantidade de equipamentos adequada, quantidade de funcionários por posto de trabalho, etc. Após este processo é realizado o processo de simulação para a situação proposta pela modelagem. Para cada modificação na modelagem do sistema deve se mudar o modelo de simulação, até encontrar-se um modelo para o sistema de manufatura que aperfeiçoe a utilização dos recursos disponíveis com a máxima eficiência e produtividade e que consiga atender a todos os projetos que estejam em trabalho na fábrica.

Não existe uma metodologia simples ou padrão para otimizar um sistema onde os dados são baseados em experimentos conduzidos com um modelo de simulação. A grande parte das metodologias foca em um processo de busca que envolve múltiplas rodadas de simulação.

Em geral, as metodologias de otimização em simulação partem de um modelo já existente e validado. O primeiro passo é a definição das variáveis de

decisão, ou seja, as variáveis que afetam o objetivo final do problema. Após isso, define-se a função objetivo, que pode ser a maximização ou minimização de uma função pré-definida. É o resultado desta função que será avaliado pelos algoritmos de otimização na busca de um valor ótimo. O próximo passo é a definição das restrições do problema seguido do estabelecimento de alguns parâmetros, como: número de replicações, precisão e critério de parada. Para o modelo aplicado na empresa estudada foram adotados os seguintes passos:

- 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;

- Definir o tipo de variável (real ou inteira) e limites inferiores e superiores. Durante a busca, a modelagem 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. É por isso que se recomenda que somente as variáveis que afetem significativamente o modelo sejam usadas;

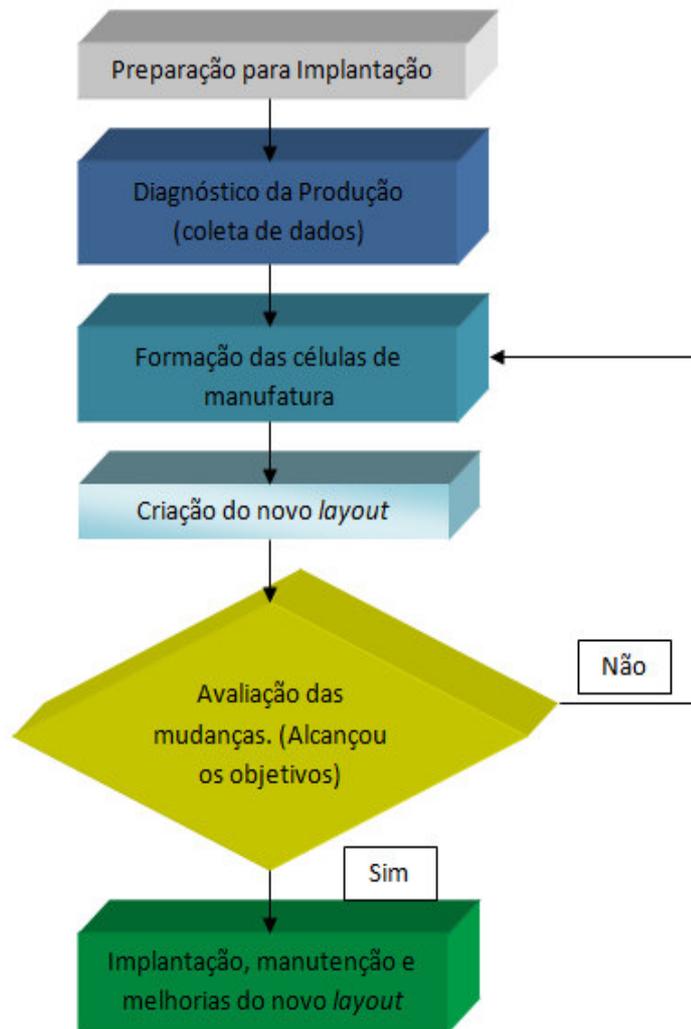
- Definir a função objetivo para avaliar as soluções testadas pelo modelo. Na verdade, a função objetivo já poderia ter sido estabelecida durante a fase de projeto do estudo de simulação. Esta função pode ser construída tendo por base peças (*entities*), equipamentos (*locations*), operários (*resources*) entre outros, buscando minimizar, maximizar ou fazer uso de ambos em diferentes variáveis, dando inclusive pesos diferentes para compor a função objetivo;

- Selecionar a quantidade de replicações necessárias. A quantidade de replicações utilizada para conduzir o estudo afeta a confiabilidade, assim é necessário que haja um equilíbrio entre a quantidade de replicações e o resultado esperado do modelo. Nesta fase também é importante definir outros parâmetros como: precisão requerida e nível de significância;

- Após a conclusão do modelo, um analista deve analisar 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 objetiva.

A Figura 15 mostra o fluxograma das tarefas a serem realizadas ao desenvolver um modelo de simulação.



**Figura 15- Fluxograma do modelo proposto.**

Para a implantação do modelo foi elaborado um cronograma com as etapas a serem seguidas, conforme as seguintes diretrizes:

- Elaboração das etapas da implantação;
- Determinação do tempo que cada etapa levou para ser executada;
- Indicação de quem irá executar cada etapa (responsabilidade);
- Direcionar quem irá trabalhar no processo de disseminação e conscientização das novas teorias que serão aplicadas;

Outro ponto importante para a implantação são os índices de desempenho que devem ser medidos antes e após a aplicação desta metodologia e em seguida serem confrontados.

A escolha por utilizar as Redes de Petri como ferramenta para a otimização do sistema de produção decorre dos seguintes fatos descritos abaixo:

- Melhoria no fluxo de materiais no processo de fabricação;
- Processos possuindo conflitos entre competição e coordenação de atividades (alocação de recursos);
- Processos que não podem ser realizados até que outro processo alcance certo estado (sincronização);
- Identificação de paralelismos nos processos de fabricação;
- Processos a serem seguidos não são determinados, o que mostra uma escolha entre alternativas (não determinismo);

Os índices de desempenho a serem verificados são referentes à produção e serão mostrados na Tabela 9.

**Tabela 9- Índices para medição da produtividade.**

<b>Indicador</b>	<b>Descrição</b>	<b>Cálculo</b>
Volume de Produção	Produção no Período de um ano	Quantidade de produtos produzidos em um ano
Lead Time	Tempo de passagem desde a abertura do projeto	Tempo em que cada produto permanece dentro do sistema
Estoque em processo	Quantidade de peças em processo	Quantidade de produtos em produção
Taxa de utilização dos operadores	Porcentagem de tempo que os operadores estão trabalhando efetivamente	Horas trabalhadas/ volume total produzido
Tempo produtivo das máquinas	Porcentagem de tempo que as máquinas estão trabalhando efetivamente	Tempo produtivo da máquina/ tempo disponível da máquina

Por meio destes índices será possível fazer comparações entre o sistema instalado e o sistema simulado e verificar qual o melhor modelo para a implantação na fábrica.

### **3.4.1. Atribuição de Recursos**

A etapa de atribuição dos recursos é a tarefa mais difícil do trabalho, pois nesta etapa é necessário modelar o sistema de manufatura para trabalhar simultaneamente com diversos produtos sendo produzidos, e desta maneira foi necessária a utilização de Redes de Petri encontrar a melhor situação do sistema de produção, nesta etapa foi utilizado o software HPsim®.

No processo de modelagem foram identificados no processo de fabricação os setores que possuem concorrência por recursos, e os setores em que ocorre o paralelismo das tarefas, com essa forma de modelagem se obtêm também informações sobre gargalos e formação de filas já que o modelo é temporizado, ou seja, todas as tarefas têm um tempo atribuído, esse tempo é determinístico, já que esse é o tempo de processamento real do processo de acordo com os dados do produto que são apresentados na Tabela 8.

A modelagem do sistema foi desenvolvida utilizando-se o conceito de sistemas flexíveis de manufatura, levando-se em consideração a seqüência de produção fabricação para a formação do sistema que é mostrado na Figura 17.

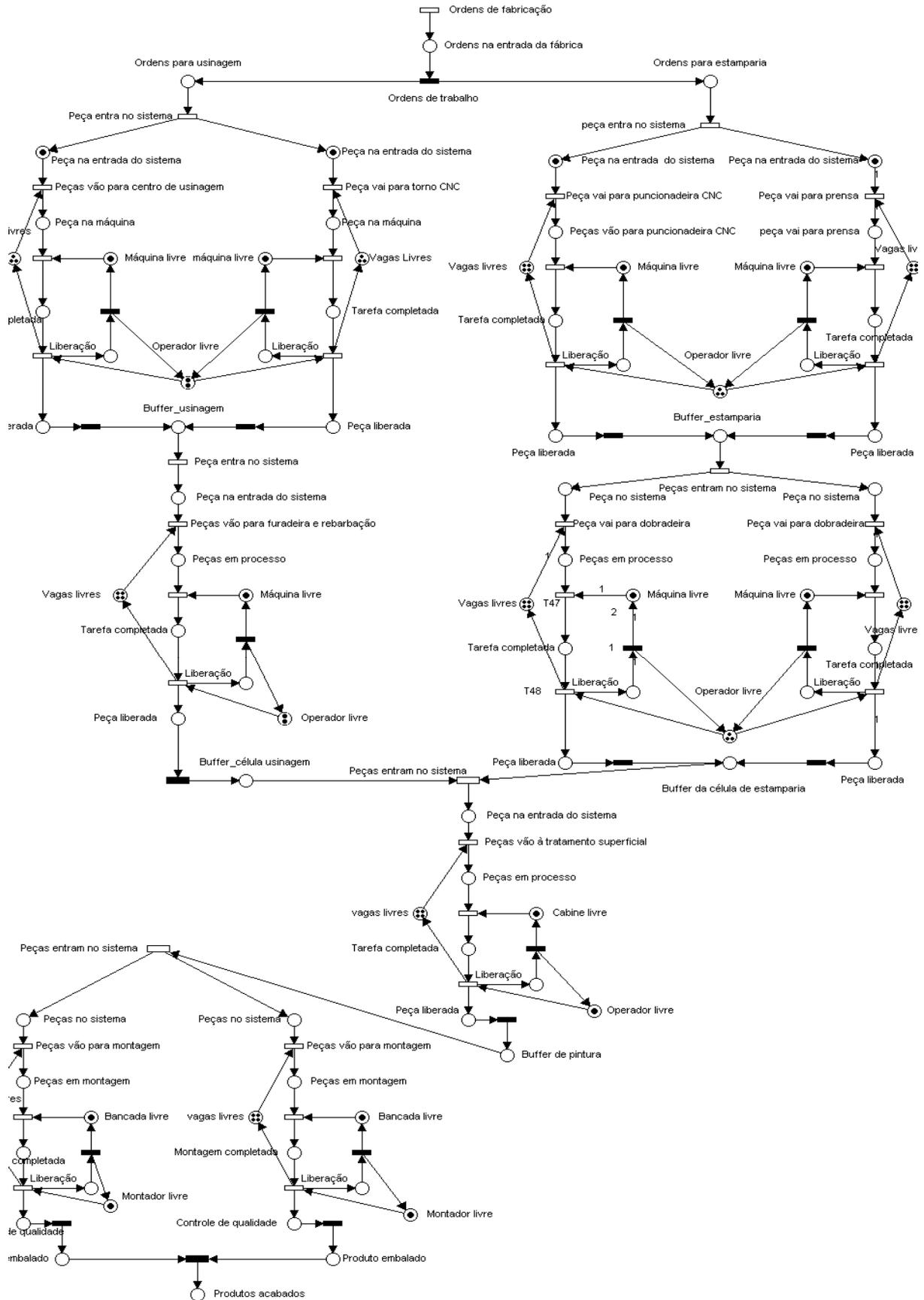


Figura 16- Modelo do sistema de produção em Redes de Petri utilizando HPSim®.

O processo de simulação por Redes de Petri possibilitou a análise de pontos de melhoria nos processos de produção, e dentre os processos mais críticos foi percebido uma necessidade de melhoria no processo de estamparia por puncionadeira, e a partir desta necessidade foi desenvolvido um trabalho no sentido de melhorar o tempo de processamento e a qualidade do produto, o que resultou no artigo “MELHORIA DA QUALIDADE E PRODUTIVIDADE DE PRODUTOS ESTAMPADOS EM PUNCIÓNADEIRA CNC” e é mostrado no Apêndice F e foi publicado no 4º Congresso Brasileiro de Fabricação, nele dar-se-á todo detalhamento das melhorias realizadas no setor de estamparia (LINS, 2007) e um resumo deste trabalho é mostrado a seguir:

### **Resumo**

*Neste trabalho, foi realizado o estudo e o desenvolvimento de novas formas de ferramentas para otimização do tempo de estampagem e melhoria da qualidade para puncionadeira CNC. Numa primeira etapa foi descrito o processo de estampagem, descrevendo-o como se realiza e quais fenômenos envolvidos neste processo. Posteriormente fez-se uma análise para determinar as técnicas empregadas para solucionar problemas enfrentados nos ensaios, o emprego de novos materiais e revestimentos voltados à fabricação de ferramentas, e a influência dos parâmetros de processo (força de corte, geometria de corte no punção e do prensa chapas) na qualidade do produto e no tempo de processamento. O trabalho apresenta, com detalhes, o desenvolvimento da solução e os resultados obtidos através da implantação no chão de fábrica e seus resultados técnicos e econômicos. Para tal abordagem, utilizou-se como trabalho prático o caso da estampagem de uma porta perfurada que possui dezessete mil furos de Ø 6 mm em chapa de aço carbono AISI 1010. Os resultados obtidos foram à melhoria de qualidade dos produtos fabricados, bem como a redução dos custos de fabricação conforme será apresentado no trabalho.*

**Palavras-chave:** *puncionadeira CNC, custos, produção, produtividade, qualidade.*

O modelo do sistema de produção permitiu a montagem das células de manufatura que ficaram definidas da seguinte maneira:

- Célula de usinagem CNC: composta por centro de usinagem e torno CNC é responsável pela usinagem da base dos armários, seu tempo de usinagem é uma informação determinística colhida do sistema ERP.
- Célula de usinagem convencional: composta por máquinas operatrizes convencionais utilizadas para usinagens de pequenos lotes onde não é viável a utilização de máquinas CNC, devido ao custo;
- Célula de estamparia: é composta por máquinas puncionadeiras e dobradeiras CNC, além de prensas mecânicas que executam a estamparia dos itens que serão montados posteriormente no armário;
- Célula de soldagem: é composto por máquinas de solda pra diversos tipos de materiais, esse é o setor onde são feitas as montagens dos conjuntos que darão origem ao produto final posteriormente;
- Célula de pintura: é o setor onde é feito o tratamento superficial dos itens, tais como revestimentos e pinturas conforme especificação de projeto;
- Célula de montagem: é a ultima etapa de fabricação, onde todos os itens devem estar disponíveis para montagem, caso falte itens nesta fase haverá uma formação de uma fila de espera ocasionando um maior custo de produção;

A transformação do modelo conceitual (Redes de Petri) em modelo computacional foi realizada com o auxílio do *software* de simulação de eventos discretos ARENA SIMULATION 11.0®. A escolha foi baseada nos seguintes aspectos:

- Possibilidade de análises com uso de animação gráfica.
- Fácil integração com o sistema *ERP* com o uso de planilhas eletrônicas.
- Conhecimento do pesquisador sobre o desenvolvimento e otimização de modelos utilizando o ARENA SIMULATION 11.0®.

O modelo foi construído partindo-se de uma configuração simplificada, com apenas alguns recursos representando parte do sistema. Inicialmente verificou-se a lógica de movimentação das peças entre os recursos.

A entrada de dados foi alterada para que o modelo realizasse a leitura de informações relativas às entidades diretamente de planilhas eletrônicas. Os principais dados de entrada do sistema modelado são os códigos das partes a serem produzidas, ordenadas conforme uma prioridade pré-estabelecida, os recursos a serem utilizados e os tempos de processo em cada recurso.

Finalmente desenvolveu-se uma rotina que permitiu a obtenção de um relatório de saída com dados relativos a cada peça (entidade) do sistema. A principal informação obtida foi à data e hora estimada para a finalização de cada um dos itens processados no sistema modelado. A Figura 17 apresenta a tela de animação do sistema no ARENA SIMULATION 11.0®.

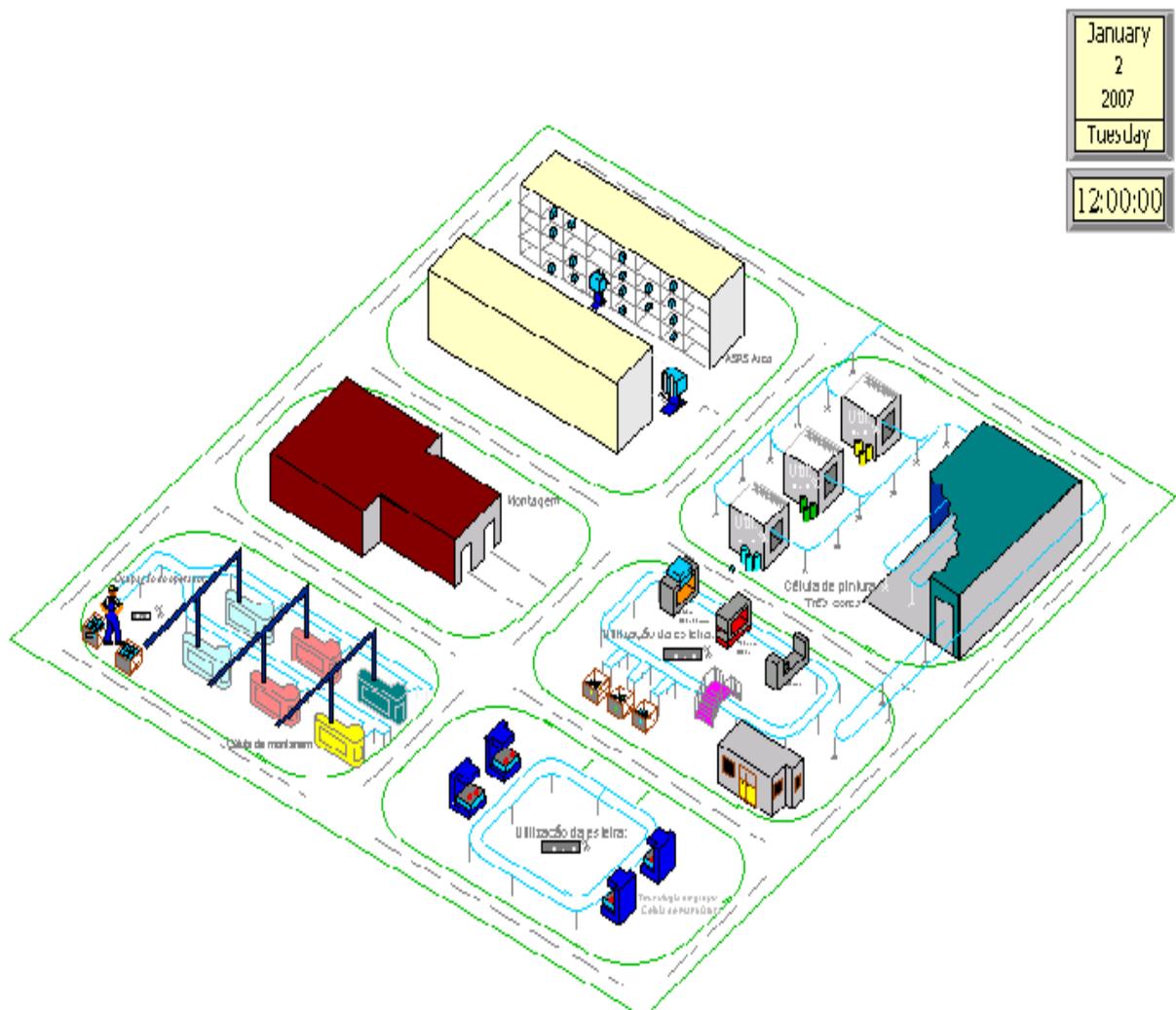


Figura 17- Modelo do sistema no ARENA.

Para facilitar o processo de modelagem na simulação do sistema, algumas suposições foram feitas na construção do modelo. Todas elas são verdadeiras, o que não atrapalhou a precisão do modelo.

- Não há falta de peças no início do fluxo, ou seja, antes da operação 01. As peças que entram são provenientes dos fornecedores e chegam sempre em sua respectiva data de entrega gerada pelo sistema ERP;

- A disposição dos operadores na simulação é total, isto é, o tempo considerado é corrido;

- Os tempos de preparação de máquinas são importantes apenas para um grupo de máquinas onde há variação das operações. Nas demais, as operações permanecem praticamente inalteradas;

- Pelo fato das peças ocuparem um grande volume, o foi considerado um limite para o tamanho das filas (ou buffers) nas máquinas;

- Não se considerou a disponibilidade de pessoal para transportar as peças entre as máquinas, exatamente pelo fato delas estarem próximas;

O modelo desenvolvido está dividido em dois sistemas que é resultado da própria arquitetura do software. O modelo lógico é o sistema onde são atribuídos todos os parâmetros relacionados ao sistema físico, ou, seja, é nesta etapa onde informa-se todos os elementos que englobam o sistema, tais como os tempos, quantidade de operadores, caminho que os materiais percorrem e demais parâmetros do sistema. O modelo de animação é o modelo que está ligado ao modelo lógico do sistema e mostra uma animação ao usuário.

Os detalhes do modelo desenvolvido, tais como os setores, tipo e quantidade de equipamentos, quantidade de operadores, operações realizadas, o tempo e o tipo de distribuição utilizada são mostrados na Tabela 10:

Tabela 10- Setores do modelo de Simulação.

<b>Setor</b>	<b>Equipamentos (quantidade)</b>	<b>Número de operadores</b>	<b>Operações realizadas</b>	<b>Tipo de distribuição utilizada para modelagem</b>
<b>Célula de Usinagem CNC</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Centro de usinagem (2);</li> <li>• Torno CNC (1);</li> </ul>	2 operadores por turno;	Usinagem de componentes em geral.	Exponencial 1.16e+003 + EXPO(340)
<b>Célula de Usinagem Convencional</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Torno automático (2);</li> <li>• Fresadora (2);</li> <li>• Furadeiras (5);</li> <li>• Rosqueadeira (3);</li> </ul>	5 operadores por turno	Usinagem de componentes em pequenas quantidades.	Exponencial 1.16e+003 + EXPO(340)
<b>Estamparia</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puncionadeira (3);</li> <li>• Dobradeira (4);</li> </ul>	6 operadores por turno	Peças estampadas e dobradas.	Exponencial 1.16e+003 + EXPO(340)
<b>Soldagem</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Máquinas de Soldagem Mig/Mag e Tig (6);</li> <li>• Máquinas de Solda a ponto</li> </ul>	4 operadores por turno	Soldagem a ponto, Mig/Mag e Tig.	Exponencial 1.16e+003 + EXPO(340)
<b>Pintura</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cabine de Pintura (1);</li> </ul>	2 operadores por turno	Pintura a pó dos componentes.	Exponencial 1.16e+003 + EXPO(340)
<b>Montagem</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bancadas para montagem (5);</li> <li>Equipamento para teste de estanqueidade (1);</li> </ul>	8 operadores por turno	Montagem do produto final.	Exponencial 1.16e+003 + EXPO(340)

A Figura 18 mostra a modelagem da célula de usinagem CNC e seus respectivos atributos, tais como número de máquinas, tempos e quantidade de operadores:

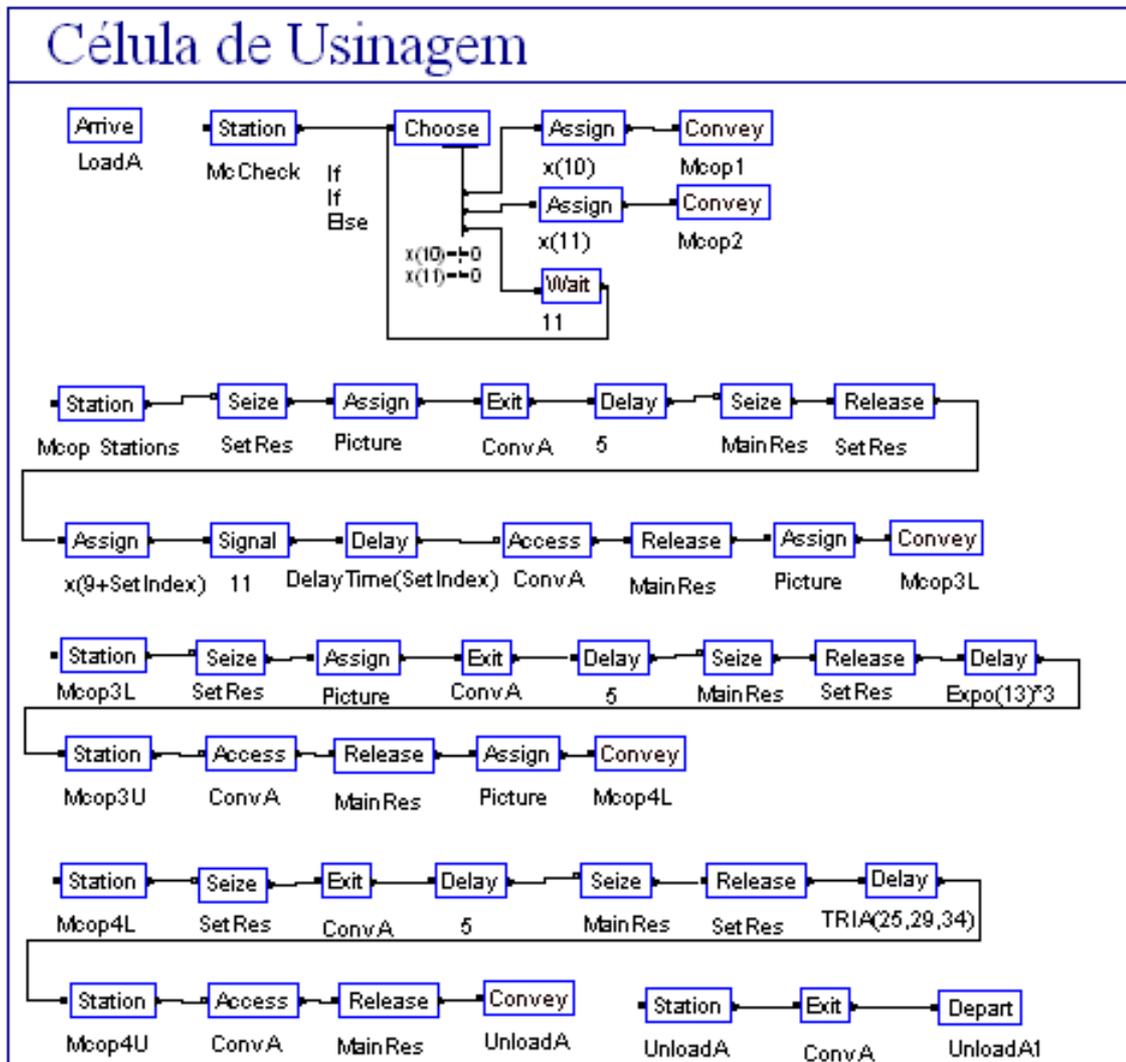


Figura 18- Modelo lógico do sistema.

Realizou-se a verificação do modelo em cada uma das etapas de desenvolvimento com as seguintes técnicas:

- Animação: verificou-se com esta técnica o correto direcionamento de cada entidade ao recurso indicado no roteiro de operações.
- Validação face-a-face: especialistas ligados às áreas simuladas no modelo foram consultados sobre a validade dos eventos verificados.
- Rastreamento: foram selecionadas entidades, ao acaso, que passaram a ser rastreadas ao longo do modelo. O comportamento das entidades foi comparado ao previsto no roteiro de operações.

- Validação preditiva: realizou-se a comparação entre os resultados de saída e a previsão fornecida pelo modelo e o comportamento real do sistema. A comparação não foi realizada em sua totalidade em função da ausência de dados precisos relativos à coleta de informações na produção. Esta validação foi complementada pela validação face-a-face.

O resultado obtido em cada técnica de validação foi decisivo à continuidade do desenvolvimento do modelo até a obtenção final, considerado completo o suficiente para atender aos objetivos do estudo em processo.

Os resultados obtidos com o modelo de simulação permitem a análise de diferentes cenários e fornecem um importante suporte às decisões que serão tomadas sobre a priorização da fabricação de cada item em produção. O uso da simulação provou que sempre que uma decisão estratégica está para ser tomada e assim tomá-la com segurança nos resultados e em seguida implementá-la com o menor tempo de parada.

O objetivo de se realizar a otimização no modelo de simulação é conseguir algo além da previsão futura de cenários que permitam a tomada de decisões sobre a política de produção a ser utilizada. A obtenção do melhor desempenho do sistema modelado, tendo como foco a elevação da velocidade de resposta frente às incertezas e constantes mudanças, comuns em um ambiente de manufatura.

Não há regra mágica que maximize o desempenho da unidade produtiva em todos os aspectos. O resultado de pesquisas sobre regras de seqüenciamento sinaliza para que, na escolha de regras, seja dada preferência a:

- regras dinâmicas em oposição às estáticas (que contemplem as alterações que as condições analisadas sofrem ao longo do tempo, como ordens que estão sendo gradualmente processadas, por exemplo);
- regras globais em oposição às locais (as que consideram o conjunto de operações em relação as que consideram só a operação local).

A simulação do sistema estudado permitiu a observação da formação de filas de peças que concorriam pelo mesmo recurso durante a execução do processo produtivo.

Cada recurso apresenta uma fila própria e esta se altera a cada movimento de uma peça entre os recursos do sistema. A complexidade de fatores que levam a uma determinada composição de fila, antes de cada recurso, torna quase impossível a elaboração de uma lógica que satisfaça à composição de uma fila ideal.

O processo de simulação resultou no artigo “UTILIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO DISCRETA COMO FERRAMENTA DECISÓRIA NA ANÁLISE DE PROJETO DE REESTRUTURAÇÃO DE UMA LINHA DE MANUFATURA DE PRODUTOS PARA TELECOMUNICAÇÕES” e é apresentado no Apêndice G e foi aprovado para apresentação no 5º Congresso Brasileiro de Fabricação, nele dar-se-á todo detalhamento de como desenvolver e validar um modelo de simulação (LINS, 2007) e um resumo deste trabalho é mostrado a seguir:

**Resumo:**

*Neste trabalho foi realizado o estudo com o objetivo de analisar como as ferramentas de simulação discreta podem ser confiáveis para a tomada de decisão em processos de fabricação, para tal tarefa a utilização de um estudo de caso foi fundamental, o caso prático será a reestruturação de um processo de manufatura em uma empresa de sistemas para telecomunicações na cidade de São Paulo. Para essa análise foram utilizados os conceitos de simulação discreta e o software Arena Simulation 11.0®. Simulando através de dados determinísticos, foram construídos modelos computacionais, os quais resultaram em uma série de dados sobre como o sistema de manufatura irá se comportar após sua implantação. Após as simulações, com os resultados obtidos é possível otimizar o processo, escolher os equipamentos e ferramentas adequadas e planejando a produção de acordo com a necessidade do cliente. Assim, a simulação discreta pode auxiliar na tomada de decisões, no desenvolvimento e planejamento da produção, antes mesmo da implantação das melhorias no sistema produtivo, reduzindo custos e corrigindo falhas, o que garante menor tempo e custo na implantação do sistema com máxima eficiência do sistema produtivo.*

*Palavras-chave: simulação discreta, sistemas de produção, otimização de processos.*

### 3.4.2. Análise dos Resultados da Simulação

Na questão do modelamento do sistema de produção a análise dos resultados dar-se-á em dois momentos, o primeiro é a questão da organização do sistema de manufatura baseado em sistemas flexíveis, e o segundo na questão da produtividade do sistema, sempre se comparando com o que havia instalado na empresa até o momento da implantação da metodologia.

O sistema de produção, baseado em células de manufaturas, foi modelado conforme citado anteriormente e desse modelo originou-se o novo layout fabril que é mostrado no Apêndice H, totalmente adequado com o modelo desenvolvido por Redes de Petri, customizado para a empresa em estudo e a partir disto foram realizadas as simulações a eventos discretos.

Para haver uma comparação do sistema é necessário entre o sistema novo e do antigo foi necessário o levantamento dos dados de produção que são mostrados na Tabela 11.

**Tabela 11- Medidas de desempenho do sistema instalado.**

Armário	Lead time (hora/50 unidades)	Volume de produção	Taxa de mão de obra	Estoque em processo	Tempo de utilização das máquinas
Armários outdoor	355,2	1440	5,2	88	0,649
Armários indoor	209,28	1080	6,933	83	0,695
Servidores bancários	176,64	860	8,706	63	0,667
Média	247,04		6,946		0,670

Analisando os resultados atuais dos itens da Tabela 11 alguns comentários podem ser citados:

- A taxa de utilização média de todas as máquinas é relativamente baixa a considerar o nível de automação dos equipamentos instalados, esse fato deve-se à falta de planejamento da produção, onde máquinas ficam aguardando peças de outros processos e acarreta uma baixa taxa de utilização, o que já era esperado;
- O volume de produção dos itens que compõem o produto é muito alto, o que gera um grande estoque de itens, mas que o volume de produtos acabados é sempre menor do que a demanda, gerando sempre atrasos na entrega;
- O *lead time* dos produtos está muito alto, e isso reflete um desperdício de tempo de operadores e equipamentos refletindo no custo final do produto, sendo que esse lead time tem um grande potencial de redução;
- O estoque em processo é outro item crítico, pois além de ocupar espaço físico, muitas vezes o mesmo produto que está sendo processado pode já estar pronto, e esse processamento acaba ocupando um recurso que poderia estar sendo utilizado para a manufatura de um item que não tem estoque.

Após a análise dos dados de produção procedeu-se as simulações, utilizando-se o modelo da Figura 17 realizando dezesseis simulações para obter-se uma média confiável dos resultados que são mostrados na Tabela 12.

A Tabela12 mostra a comparação dos resultados do sistema real, ou seja, a produção do sistema real em um ano comparando-se com os resultados do sistema simulado em termos de quantidade produzida e faturamento. A quantidade de equipamentos produzidos na simulação leva em consideração um crescimento da demanda por esses produtos

**Tabela 12- Medidas de desempenho simuladas.**

	Modelo			Média das medidas de desempenho				
	Outdoor	Indoor	Servidor	Lead time(hora)	Volume de produção	Mão-de-obra	Estoque	Utilização de máquinas
	1972,8	1425,6	1187,3	4,487	4585,7	1,632	36	0,841
	1894,7	1438,4	1127,6	4,453	4460,7	1,678	35	0,823
	1902,8	1392,3	1162,3	4,412	4457,4	1,679	34	0,822
	1912,3	1425,1	1167,4	4,423	4504,8	1,662	37	0,833
	1907,4	1406,7	1176,2	4,472	4490,3	1,667	34	0,838
	1887,3	1413,8	1145,3	4,463	4446,4	1,684	35	0,819
	1945,6	1364,8	1114,6	4,458	4425	1,692	38	0,812
	1967,5	1376,2	1175,3	4,482	4519	1,657	37	0,836
	1938,4	1402,4	1155,2	4,413	4496	1,665	34	0,835
	1946,8	1397,3	1178,6	4,435	4522,7	1,656	37	0,839
	1898,2	1412,8	1162,8	4,442	4473,8	1,674	37	0,828
	1919,6	1406,6	1149,7	4,462	4475,9	1,673	35	0,828
	1963,4	1439,1	1131,2	4,453	4533,7	1,651	34	0,839
	1932,8	1422,6	1128,7	4,481	4484,1	1,67	36	0,823
	1921,6	1414,3	1165,2	4,463	4501,1	1,664	36	0,835
	1904,5	1387,9	1171,6	4,452	4464	1,677	34	0,822
Média	1925,9	1407,8688	1156,1875	4,4531875	4490,0375	1,6675625	35,5625	0,8295625

Com os dados das simulações dar-se-á a análise dos resultados obtidos com o sistema produtivo instalado e a Tabela 13 mostra uma comparação em termos de faturamento e custo entre os dois sistemas.

**Tabela 13- Comparação dos sistemas em termos de faturamento.**

Sistema	Armários outdoor	Armários indoor	Servidores
Produção real	1440	1080	860
Produção simulada	1925,98	1407,869	1156,188
Faturamento atual	R\$7,29 milhões	R\$4,97 milhões	R\$4,47 milhões
Faturamento simulado	R\$12,33 milhões	R\$6,48 milhões	R\$6,01 milhões
Diferença entre o faturamento atual e o simulado	R\$5,03 milhões	R\$1,51 milhões	R\$1,54 milhões

Desta forma com os resultados da Tabela 13 é possível perceber uma melhoria nos índices de produção e no faturamento total da empresa

Os resultados obtidos com a comparação entre o sistema utilizado anteriormente e o sistema simulado (em processo de instalação) foram significativos, visto que com a melhoria do sistema, sem grandes investimentos em novos equipamentos, mas com as melhorias de processo houve um aumento de 32,55% no faturamento total da empresa, segundo a demanda de mercado.

## **CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

O presente capítulo tem por objetivo apresentar as conclusões sobre o trabalho. Serão feitos alguns comentários sobre os objetivos que nortearam o estudo e os resultados obtidos. Em seguida serão propostas algumas sugestões para trabalhos futuros.

### **4.1. Conclusões**

Os produtos citados neste trabalho, como estudo de caso, requerem uma metodologia de gerenciamento de projetos que seja capaz de controlar o tempo de desenvolvimento e a diminuição dos custos, e neste sentido conclui-se que:

- Os indicadores de desempenho monitorados mostraram uma considerável melhora quando comparados aos números anteriores à aplicação do método como mostra a Tabela 5.
- O indicador de atendimento do prazo passou para um patamar competitivo perante os seus concorrentes.
- O índice de atendimento do custo do projeto obteve uma considerável melhora, atendendo em grande parte os custos acordados no orçamento.
- No índice de satisfação dos clientes, índice mais importante do gerenciamento de projetos, houve uma melhora considerável, proporcionando novos clientes para a empresa.

Na questão do sistema produtivo a simulação computacional mostrou ser uma ferramenta eficaz para a previsão de resultados, reorganização de sistemas de manufatura, e neste sentido conclui-se que:

- Através da modelagem e simulação pode-se verificar erros de planejamento, estudo da capacidade produtiva, gargalos, melhorias de processos, sem ao menos efetuar alguma modificação no sistema.
- Desenvolvimento de melhorias nos processos de fabricação reduzindo o tempo de operação, melhoria da qualidade e redução de gargalo produtivo;

- Desenvolvimento de uma metodologia de otimização, alocação de recursos, máquinas, mão de obra, insumos e todos os componentes envolvidos no processo de produção;
- Desenvolvimento e implantação do novo layout da fábrica baseado nos conceitos de células de manufatura, onde o produto passa por diversos processos de fabricação num mesmo ambiente;

## 4.2. Propostas para trabalhos futuros

Como sugestão para a linha de estudo desenvolvida, pode-se citar:

- Integrar o sistema de planejamento com um sistema automático de coleta de dados na produção;
- Implementar dados estocásticos e eventos que ocorram no sistema para melhorar a previsibilidade das datas de entrega dos produtos.
- Desenvolvimento de métodos computacionais para acompanhamento dos projetos;
- Aspectos humanos e comportamentais da aplicação dos métodos, como conflitos e relações de influência e comunicação;
- Implementar uma rede industrial que integre 100% dos recursos de produção disponíveis na fábrica;

## 4.3. Contribuições deste Trabalho

Algumas contribuições deste à comunidade acadêmica:

- Artigo apresentado no 4º Congresso Brasileiro de Fabricação de título *“Melhoria da qualidade e produtividade de produtos estampados em punçoneira cnc”* e contribui com inovações tecnológicas em processos de fabricação.
- Artigo aceito no 5º Congresso Brasileiro de Fabricação de título *“Utilização da simulação discreta como ferramenta decisória na análise de projeto de reestruturação de uma linha de manufatura de produtos para telecomunicação”* e

contribui com uma metodologia para a validação de técnicas de simulação na tomada de decisão em sistemas produtivos.

- Artigo apresentado no Isa Show 2007 com o título “*Implantação de sistemas ERP: comparação entre a teoria e a prática*” e contribui com uma metodologia para escolha do aplicativo otimizado para sistemas de produção.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-JAAR, R. Y. (1990). Performance Evaluation of Automated Manufacturing Systems Using Generalized Stochastic Petri Net. . *IEEE Transaction on Robotic and Automation*, (pp. 621-639). New York.
- CASTRUCCI, P. B., & MORAES, C. C. (2001). *Engenharia de Automação Industrial*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos (LTC).
- CHIAVENATO, I. (1992). *Introdução à Teoria Geral da Administração*. Rio de Janeiro: Editora Campus.
- CORRÊA, C. A., & CORRÊA, H. L. (2005). *Administração de produção e operações*. São Paulo: Atlas.
- DAVID, R., & ALLA, H. (1994). Petri Nets for Modelling of Dynamic System. *A Survey. Automática*, vol. 30 , 175-202.
- FAVREL, J., & LEE, K. (1984). Modelling, Analyzing, Scheduling and Control of Flexible Manufacturing System by Petri Nets. *IFIP Conf. Production System*, (pp. 223-243). Amsterdam.
- GAITHER, N., & FRAZIER, G. (2001). *Administração da produção e operações*. Londres: Thomson Learning.
- GREENWOOD, N. R. (1988). *Implementing Flexible Manufacturing Systems*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- HABERKORN, E. (2005). *Gestão empresarial com ERP*. São Paulo: Microsig Intelligence.
- HELDMAN, K. (2005). *Gerência de Projetos - Guia para o Exame Oficial do PMI*. Rio de Janeiro: Campus.
- HUANG, H.-P., & CHANG, P.-C. (April de 2515-2543). Specification, modelling and control of a flexible manufacturing cell. *Int. J. Prod. Res.* , p. 1992.
- JENSEN, K. (1986). Coloured Petri Net. . *Lecture notes in Computer Science* , 248-299.

- JENSEN, K. (June de 1986). Coloured Petri Net. *Lecture notes in Computer Science* , pp. pp. 248-299.
- KELTON, D., STURROCK, D., & SADOWSKI, R. (2006). *Simulation with Arena*. Nova York: Prentice Hall.
- LINS, R. G., REIS, L. O., & SOUSA, J. S. (14, 15 e 16 de Abril de 2007). Melhoria de Qualidade e Produtividade de Produtos Estampados em Puncionadeira CNC. *4 Congresso Brasileiro de Fabricação.* , p. 42 e 43.
- MENEZES, L. C. (2001). *Gerência de Projetos*. São Paulo: Atlas.
- MOLLOY, M. (april de 1985). Discrete time stocastic Petri Nets vol. SE-11. *IEEE Transaction on Software Engineering* , pp. 50-72.
- PAIVA, E., JUNIOR, J. M., & FENSTERSEIFER, J. (2000). *Estratégia de Produção e Operações: Conceitos, Melhores Práticas*. São Paulo: Atlas.
- PETERSON, J. L. (1981). *Petri Net Theory and the modelling of system*. New York: Prentice-Hall Editions.
- PRADO, D. (1999). *Usando o Arena em Simulação*. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial.
- RIGHINI, G. (1993). Modular Petri Nets for Simulation of Flexible Production System . *Int. J. Prod. Res*, (pp. 2463-2477). New York.
- RILLO, M. (1988). Aplicações de Redes de Petri em sistemas de Manufatura. . *Tese de Doutorado apresentada à Escola Politécnica da USP* . São Paulo, São Paulo, Brasil.
- SPENCELEY, J. R., O'KANE, J. R., & TAYLOR, R. (07 de 2000). Simulation as an essential tool for advanced manufacturing technology problems. *Journal of Materials Processing Technology* , pp. pg. 412 - 424.
- TUBINO, D. F. (2000). *Manual de Planejamento e Controle de Produção*. Florianópolis: Atlas.
- TUBINO, D. F. (1999). *Sistemas de Produção*. Porto Alegre: Bookman.

VALETTE, R., & SILVA, M. (1990). A Rede de Petri: Uma Ferramenta para a Automação Fabril. *Anais do 4º Congresso Nacional de Automação Industrial*, (pp. 245-264). São Paulo.

WILLIAMS, DAVID JOHN (1988). *Manufacturing systems; an introduction to the technologies*. New York, John Wiley. 193 p.

## APÊNDICE A – TERMO DE ABERTURA DO PROJETO

<b>Termo de Abertura do Projeto</b>	
Projeto:	Custo estimado por unidade:
Armário indoor 6745 (Alcatel)	R\$ 4600,00
Gerente do Projeto:	
Gerente da Manufatura:	
Contato (cliente): Engenheiro de Compras	
Declaração do escopo: Entrega do produto especificado conforme projeto enviado, embalado adequadamente, entregue ao cliente em local especificado pelo mesmo, com todos os acessórios necessários para instalação.	
Declaração do que não faz parte do escopo: As ferramentas e dispositivos necessários para a instalação do produto, assim como a mão-de-obra.	
Última comunicação com o cliente:	
Data: 07/06/2006	Primeiro prazo de entrega: 30 dias
Potenciais riscos:	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Folhas de processos incorretas levando a erros na fabricação e montagem do produto;</li> <li>• Ferramentas e dispositivos inadequados ocasionando falhas nos produtos, desta forma atrasando o projeto;</li> <li>• Entrega atrasada do produto por erro de especificação e capacidade produtiva da fábrica, ocasionando o atraso no prazo de entrega e eventual pagamento de multa.</li> </ul>	

## APÊNDICE B – LIÇÕES APRENDIDAS

### Documentação das lições aprendidas

Projeto:

Gerente do Projeto:

Lição aprendida por:

Data:

Descrição do problema encontrado:

---

---

---

---

---

Ações tomadas para a resolução do problema:

---

---

---

---

---

Aprovação:

Data: \_\_\_\_\_

Gerente do Projeto

# APÊNDICE C - Formulário para documentar mudanças

## Documentação de mudanças

Projeto: \_\_\_\_\_

Gerente do Projeto: \_\_\_\_\_

Mudança requerida por: \_\_\_\_\_

Data: \_\_\_\_\_

Mudança de:  Escopo  Cronograma  Qualidade  Custo

Descrição das mudanças:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Efeito no cronograma:  Extensão  Redução  Nenhum

Previsão de conclusão (anterior): \_\_\_\_\_

Previsão de conclusão (nova): \_\_\_\_\_

Efeito no custo:  Aumento  Redução  Nenhum

Custo da mudança: \_\_\_\_\_

Variação no custo final: \_\_\_\_\_ ou \_\_\_\_\_%

Aprovação:

Data: \_\_\_\_\_

Gerente do Projeto

Data: \_\_\_\_\_

Gerente do Comercial<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Nenhum trabalho deve ser executado até que este documento seja aprovado.



## APÊNDICE E - Questionário para coleta de dados

### Gerenciamento de Projetos

1. Características da empresa
  - 1.1 Nome da empresa:
  - 1.2 Número de empregados:
  - 1.3 Atividade principal:
  - 1.4 Faturamento anual:
  - 1.5 Principais clientes:
  
2. Aspectos gerais dos projetos
  - 2.1 Quais os tipos de projetos tratados na empresa?
  - 2.2 Qual é o tempo médio de duração de cada projeto?
  - 2.3 Quais ferramentas são utilizadas no desenvolvimento e acompanhamento de projetos?
  
3. Gerenciamento de projetos
  - 3.1 Existe um procedimento ou sistemática no gerenciamento dos projetos?
  - 3.2 Qual é a composição da equipe de desenvolvimento de projetos?  
 Funcionário da empresa.  
 Estagiária da empresa.  
 Sub-contratados ou terceiros.
  - 3.3 Qual o regime de dedicação dos membros da equipe de projetos?
  - 3.4 Quais são as principais áreas funcionais dos membros da equipe de projetos?
  - 3.5 Como é feita a integração de todo o projeto? Descrever sistemática se houver.
  - 3.6 Preencher a seguinte planilha com dados referentes ao gerenciamento dos itens sinalizados nas linhas:

Gerenciamento	Quem faz? (responsável)	Quando faz?	Como faz? (método)

4. Desempenho de projetos

4.1 A empresa possui alguma certificação de qualidade (ISSO/QS/TS/outros), e como é o paralelo do sistema de qualidade frente à sistemática para gerenciamento de projetos?

4.2 Existe algum indicador de desempenho dos projetos?

4.3 Existe algum indicador de desempenho do gerenciamento de projetos?

4.4 Pelo histórico de projetos anteriores qual é a taxa de sucesso em relação

a:

Custo: \_\_\_\_\_% (custo estimado/realizado)

Prazo: \_\_\_\_\_% (prazo estimado/realizado)

Qualidade: \_\_\_\_\_% (Índices previamente estabelecidos)

Escopo: \_\_\_\_\_% (planejado/estimado)

Satisfação do cliente: \_\_\_\_\_%

4.5 Como é avaliado o impacto do projeto quanto ao “feedback” do cliente, no custo/prazo/qualidade.

4.6 Como são tratadas as lições aprendidas no projeto?Elas são comunicadas a todos do time?

**Data:**

**Entrevistador:** \_\_\_\_\_

# APÊNDICE F-Melhorias nos Processos de Fabricação

## MELHORIA DA QUALIDADE E PRODUTIVIDADE DE PRODUTOS ESTAMPADOS EM PUNCIONADEIRA CNC

### **Resumo**

*Neste trabalho, foi realizado o estudo e o desenvolvimento de novas formas de ferramentas para otimização do tempo de estampagem e melhoria da qualidade para puncionadeira CNC. Numa primeira etapa foi descrito o processo de estampagem, descrevendo-o como se realiza e quais fenômenos envolvidos neste processo. Posteriormente fez-se uma análise para determinar as técnicas empregadas para solucionar problemas enfrentados nos ensaios, o emprego de novos materiais e revestimentos voltados à fabricação de ferramentas, e a influência dos parâmetros de processo (força de corte, geometria de corte no punção e do prensa chapas) na qualidade do produto e no tempo de processamento. O trabalho apresenta, com detalhes, o desenvolvimento da solução e os resultados obtidos através da implantação no chão de fábrica e seus resultados técnicos e econômicos. Para tal abordagem, utilizou-se como trabalho prático o caso da estampagem de uma porta perfurada que possui dezessete mil furos de  $\varnothing$  6 mm em chapa de aço carbono AISI 1010. Os resultados obtidos foram à melhoria de qualidade dos produtos fabricados, bem como a redução dos custos de fabricação conforme será apresentado no trabalho.*

**Palavras-chave:** *puncionadeira CNC, custos, produção, produtividade, qualidade.*

### **1. INTRODUÇÃO**

Os processos de conformação mecânica, em especial a estampagem, estão se tornando um dos métodos de fabricação mais utilizados na obtenção de produtos na indústria. Segundo Voelkner (1) com a estampagem é possível obter componentes com alto índice de produtividade, baixo custo, menor desperdício de material pós-processo de fabricação, menor consumo de energia, e produtos com elevado valor agregado.

A geometria e o desenvolvimento das ferramentas utilizadas são os fatores que determinam a qualidade e o tempo de fabricação dos produtos obtidos pelo processo de estampagem por puncionadeira CNC, e aliadas a esses fatores há ainda a grande flexibilidade, pois com a mesma ferramenta é possível produzir inúmeros tipos de produtos e ou diferentes formas. A ferramenta, bem como sua forma, está entre os problemas mais importantes a serem abordados na otimização e na qualidade dos produtos obtidos do processo de estampagem por puncionadeira, pois ferramentas especificadas

inadequadamente provocam empenamentos, rebarbas excessivas devido ao cisalhamento inadequado, e maiores tempos de fabricação.

O estudo de caso analisa a produção de portas perfuradas, bem como a melhor situação e produtividade e qualidade a ser desenvolvida à aplicação.

## **2. OBJETIVO**

A produção de portas perfuradas vem apresentando defeitos no produto, como rebarba excessiva, empenamento maior que a tolerância de planicidade de 1 mm no comprimento total, devido a tensões provenientes do corte, e quanto ao processo de produção os problemas apresentados são o tempo excessivamente alto à fabricação, alto consumo de insumos como óleos de corte ,punções e matrizes de corte, devido ao método de produção utilizado, com uma ferramenta de único punção.

Este trabalho tem por objetivo fazer uma análise sobre alguns métodos disponíveis para geração da geometria da ferramenta e técnicas, com a finalidade de reduzir o tempo de fabricação, melhoria da qualidade e da produtividade, bem como a redução dos custos de produção em puncionadeira CNC.

Ao final, foram feitas comparações dos custos de produção e da qualidade do produto para avaliar qual a melhor solução adotada para resolver o problema.

## **3. ESTAMPAGEM**

No processo de estampagem por puncionadeira CNC alguns fatores devem ser observados, tais como a carga de corte máxima, as dimensões de trabalho da máquina e a quantidade de ferramentas no magazine.

Segundo Lim (2) as ferramentas também devem ter atenção especial, tanto na fabricação, com relação às dimensões estabelecidas pelo fabricante, bem como o seu desgaste quando em regime de trabalho, e os principais tipos de desgaste são: desgaste abrasivo, desgaste adesivo, lascamento, trinca catastrófica, deformação plástica, caldeamento.

### **3.1. Processo de estampagem**

A estampagem da porta ocorre na puncionadeira *trumpf* 3000R, com velocidade linear de 108 m/min, nos eixos X e Y ou simultaneamente, possuiu carga máxima de corte de 180kN, possui capacidade para 19 ferramentas no magazine, e 420 golpes por minuto para um incremento de 25 mm, e dimensões da mesa de 2500 x 1250 mm.

A chapa de aço AISI 1010 de dimensão 2000 x 1200 x 1,2 mm, é colocada sobre a mesa da puncionadeira e após a fixação cada ferramenta programada atua conforme a

seqüência pré-estabelecida pelo programa.



Figura 1. Máquina puncioneira CNC utilizada na produção

Após a fixação, a mesa da máquina desloca-se para a posição programada e ocorre a estampagem, para isto o punção superior é acionado contra a matriz inferior, formando a geometria da ferramenta na chapa. A força que a máquina utiliza na operação é mensurada por meio de células de carga e é enviada ao sistema de controle, caso a força utilizada ultrapasse a carga máxima de corte a máquina possui sistemas de segurança que proporcionam a parada da máquina para não ocasionar maiores danos.

### 3.2. Forças envolvidas na operação de corte

Segundo Provenza (3) a força de corte depende diretamente do tipo de material, da espessura da chapa “e” e do perímetro de corte “p”. A espessura da chapa e o perímetro de corte são grandezas conhecidas de projeto. A influência do material na força de corte vem por meio de um valor tabelado chamado Pressão Específica de Corte “kc”, que é uma função da tensão de ruptura. O valor de kc é determinado experimentalmente, e para o aço AISI 1010 o valor de kc é de 313,8 N/mm<sup>2</sup>. Desta forma a força de corte “Fc” é calculada a partir da equação abaixo:

$$F_c = e.p.kc \text{ [N]} \quad (1)$$

## 4. INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS IMPLANTADAS

### 4.1. Ferramenta multi punções

A fim de melhorar o tempo de fabricação foi desenvolvida uma geometria que possibilitou utilizar doze punções de corte em uma única ferramenta, e empregou-se a solução com rotação simétrica para otimizar os esforços de corte. As principais dimensões da ferramenta são mostradas na Figura 2b.

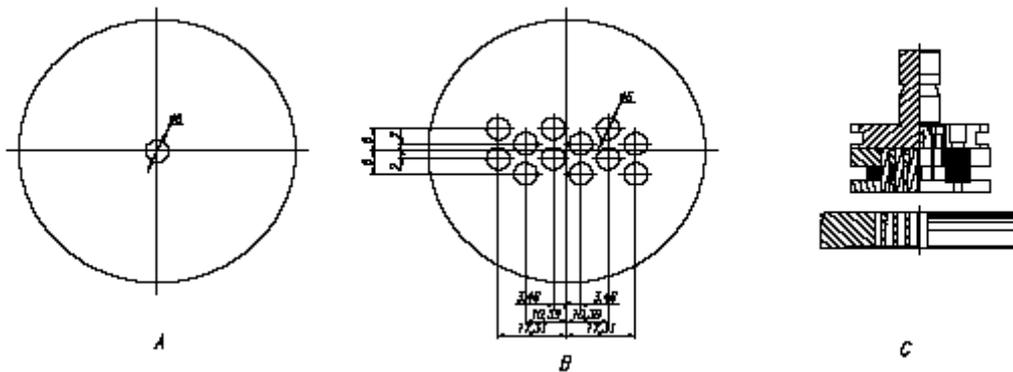


Figura 2. a- Punção único; b- geometria com doze punções; c- Ferramenta montada

#### 4.2. Prensa-chapa baseado em molas prato

Segundo Lim (2) o prensa-chapa é um dos itens mais importantes em estampas, pois além de manter a chapa presa sobre a matriz durante a operação, sua utilização também diminui tensões residuais de corte. Prensa-chapa de molas helicoidais é comum no desenvolvimento de estampo .

No processo de estampagem por puncionadeira torna-se muito complexo o desenvolvimento do prensa-chapa, pois o tamanho das molas helicoidais é um grande problema, e com o espaço reduzido a mola helicoidal a ser utilizada possui carga pequena, o que não proporcionará um bom desempenho.

O prensa-chapa desenvolvido utiliza molas tipo prato,  $\varnothing$  13 mm e espessura de 0,5 mm, montadas em arranjo simples, num total de noventa e seis molas, distribuídas em quatro conjuntos eqüidistantes, e a força de prensa-chapa “Fpc” é calculada em função do nº “n” de molas e da constante da mola “c” , que no caso da mola utilizada é de 225,4 N/mm<sup>2</sup> (4). Então a força do prensa-chapa é calculada por:

$$F_{pc} = n \cdot c \text{ [N]} \quad (2)$$

#### 4.3. Corte com arestas inclinadas

A prática de se construir as arestas de corte inclinadas, tanto para o punção como para a matriz, diminui a força de corte necessária por possibilitar um corte progressivo. Pode-se dispor arestas inclinadas tanto na matriz quanto no punção. Quando a parte cortada é a peça final, a inclinação deve ser feita na matriz, porém quando a parte cortada é retalho, a inclinação deve ser feita no punção. A Figura 3 mostra o gráfico comparativo das forças de corte quando as arestas de corte são inclinadas(5).

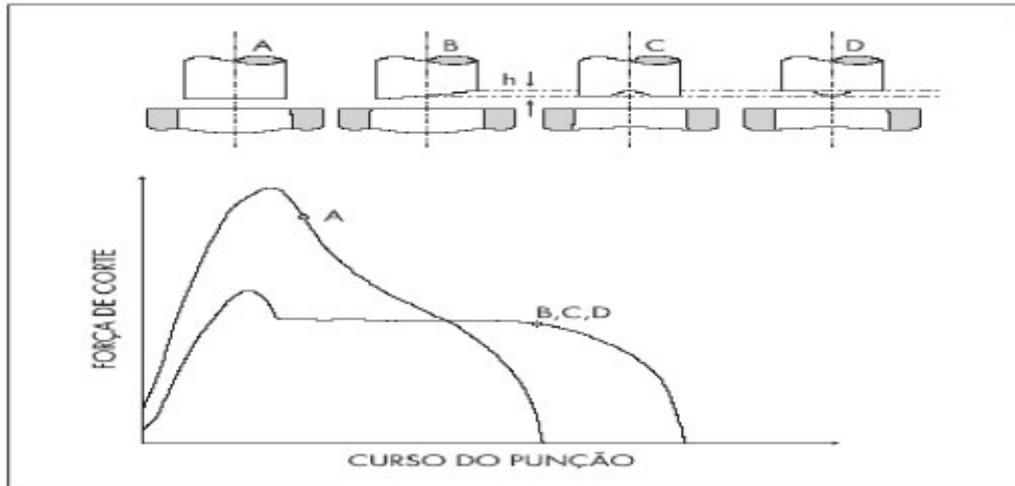


Figura 3. a- aresta reta; b- aresta inclinada; c- aresta côncava ; d- aresta com guia ;

Segundo dados experimentais de Provenza (3), a prática de construção de arestas inclinadas reduz, em média, 30% a força de corte. Com a diminuição da força de corte e o dimensionamento correto da folga entre punção e matriz de corte diminui sensivelmente a formação de rebarbas na saída do furo e também o empenamento devido ao corte. A força que a máquina utiliza para estampar mais a força do prensa-chapa é a força total “Ft” que a puncionadeira precisa para realizar o processo de estampagem :

$$F_t = e.p.k.c.0,7 + n.c \text{ [N]}$$

#### 4.4. Aplicação de revestimento

A questão do revestimento para ferramentas de conformação mecânica é um tema não muito difundido, pois aumentam os custos de produção, mas podem ser aplicados visando diminuir problemas no processo de produção, principalmente os fenômenos de desgaste, proporcionando uma vida útil maior à ferramenta (6).

O revestimento aplicado à ferramenta foi o Nitreto de cromo “CrN” aplicado pelo processo de deposição física de vapor “PVD” a arco. Esse revestimento possui características importantes para melhoria de desempenho das ferramentas, tais como, a baixa tensão residual de compressão, minimização do efeito de caldeamento entre a ferramenta e o material, principalmente em chapas de aço carbono, e grande resistência à corrosão.

Os principais fenômenos de desgaste são minimizados devido às propriedades dos revestimentos apresentados na Tabela 1. A adesão é minimizada em virtude da baixa inércia química do revestimento e do baixo coeficiente de atrito, o desgaste por abrasão é minimizado pela alta dureza do revestimento, e a deformação plástica é minimizada devido à diminuição dos esforços tangenciais na superfície da ferramenta por conta da redução do

coeficiente de atrito.

Tabela1. Propriedades das camadas depositadas no processo de PVD a arco

Camada	TiN	CrN	TiCN
Dureza [HV 1N]	2500	2300	2900
Carga crítica [N]	60	45	50
Temperatura de oxidação [°C]	550	650	450
Coeficiente de atrito	0,65	0,55	0,50

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Procedimentos de Estampagem

Os produtos foram estampados em três diferentes configurações de geometria, afiação do punção, revestimento e prensa-chapa.

A primeira configuração furo individual e punção reto não revestido sem prensa-chapa, o segundo caso com doze furos por golpe, punção reto revestido com prensa-chapa, e uma terceira configuração com doze furos por golpe, punção a 15º revestido com prensa-chapa, e após o processo de fabricação houve a medição da planicidade em máquina tridimensional conforme Figura 4:

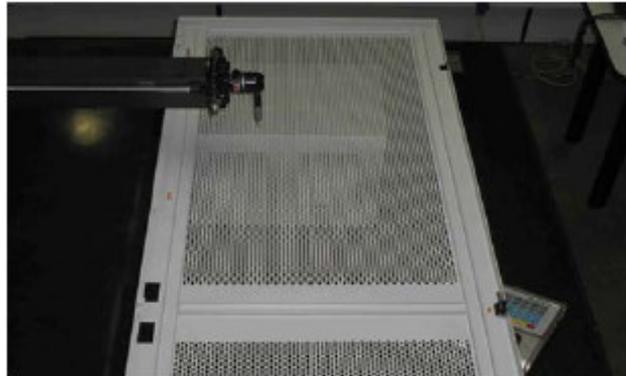
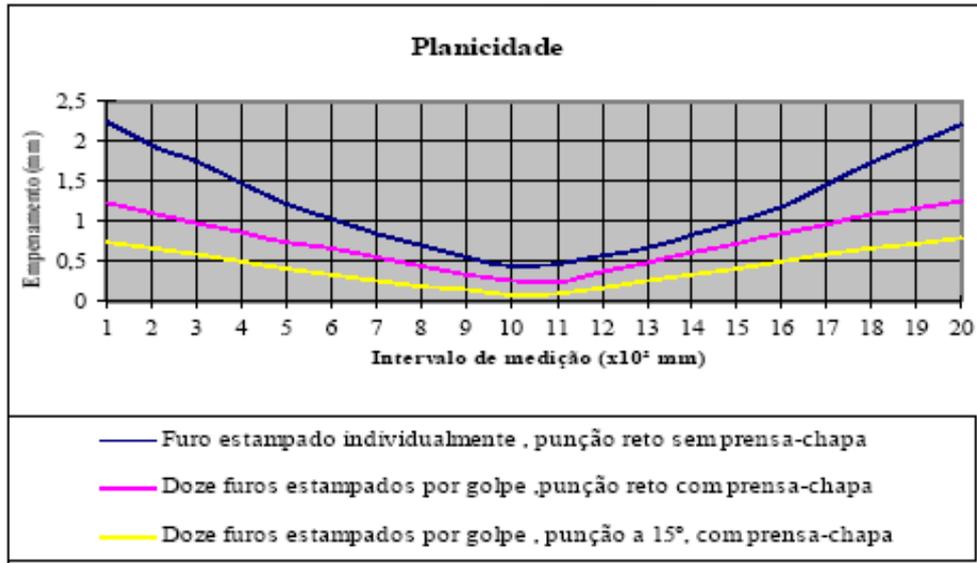


Figura 4. Medição da planicidade da porta perfurada

Os resultados experimentais foram obtidos a partir de medições realizadas no laboratório de metrologia, e das informações do sistema ERP “Planejamento de Recursos Empresariais”. A medição da planicidade foi realizada na máquina de medição tridimensional, conforme o controle estatístico do processo, e seus resultados são apresentados no Gráfico 1.

Gráfico1. Gráfico da medição da planicidade.



Observa-se que na primeira configuração houve um empenamento de 2,24 mm, ultrapassando a tolerância de planicidade exigida, na segunda configuração houve uma redução do empenamento devido à inclusão do prensa-chapa, mas ainda não foi obtida a tolerância desejada, somente na terceira configuração, com arestas inclinadas e com prensa-chapa é que houve uma do empenamento a um valor de 0,74 mm, dentro da tolerância especificada.

Os resultados da redução de custos são informações provenientes do processo de produção colhidos pelo sistema ERP "Planejamento de Recursos Empresariais" e são apresentados na Tabela 2:

Tabela 2. Custo de produção em punçoneira para lote de 100 unidades

Custos de fabricação	Configuração 1	Configuração 2	Configuração 3
Tempo de produção do produto (min)	48,32	7,75	7,75
Tempo de parada de máquina (min)	3,5	3,5	3,5
Tempo total de produção (min)	51,82	11,25	11,25
Custo de matéria-prima (R\$)	67,2	67,2	67,2
Custo total de produção (R\$)	103,64	22,5	22,5
Custo de insumos por unidade (R\$)	6,32	9,87	8,25
Custo total por unidade (R\$)	177,16	99,57	97,95
Custo de produção do lote (R\$)	17716	9957	9795

A tabela de custos de produção mostra que com a configuração com doze punções o tempo de fabricação foi reduzido aproximadamente seis vezes, comparando-se com a configuração com um único punção, porém o custo de insumos aumentou, devido ao custo do revestimento aplicado à ferramenta, mas esse custo é muito pequeno, comparando-se com o custo de produção, por isso é viável o uso de revestimentos.

## 6. CONCLUSÃO

As inovações tecnológicas implantadas, prensa-chapa, arestas inclinadas, revestimentos, e a ferramenta multi punções permitiram atingir a qualidade especificada, melhoria de produtividade e redução do tempo de fabricação, e mostraram-se viáveis quanto a sua implantação no chão de fábrica.

Dentre as inovações o revestimento aumentou a vida útil das ferramentas, reduzindo paradas de máquina indesejada, contribuindo à melhoria de produtividade.

O prensa-chapa desenvolvido contribuiu à diminuição do empenamento, contribuindo à melhoria da qualidade do produto, para padrões de planicidade dentro dos padrões especificados.

A ferramenta multi punções e as arestas de corte inclinadas foram de fundamental importância à redução do tempo de fabricação, com reflexos diretos sobre o custo de produção.

Com a implantação das melhorias foi possível reduzir o custo final de produção, melhorar a qualidade e produtividade em puncionadeira CNC, tornando o produto viável economicamente à venda.

## 7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) VOELKNER, W. Present and future developments of metal forming: select examples. In: *Journal of Materials Processing Technology*, volume 106, number 1, October 2000, pp 236-242.
- (2) LIM, T. C., RAMAKRISHNA, S., SHANG, H. M., 2000, "Simultaneous stretch forming and deep drawing in axisymmetrical sheet forming", *J. Mater. Proc. Technol* 97, pp82-87.
- (3) PROVENZA, Francisco. **Estampos III**. 2. ed. São Paulo: Protec , 1987. 258p.
- (4) "materials information resource.", <http://www.matweb.com> USA. Acesso em 20/06/2006.
- (5) EARY, D. F., REED, E. A., 1974, "Technique of design." 2<sup>o</sup> ed. Ed., Prentice-Hall. *pressworking sheet metal – An engineering approach to die*.
- (6) "Revestimentos"., <http://www.brasimet.com.br> Brasil. Acesso em 20/06/2006.

## **IMPROVEMENT OF THE QUALITY AND PRODUCTIVITY OF PRODUCTS PRINTED IN PUNCHING CNC**

### **Abstract**

In this work, it was carried through the study and the development of new forms of tools for optimization of the stamping time and improvement of the quality for punching CNC. In a first stage the stamping process was described, describing it as if it carries through and which involved phenomena in this process. Later an analysis became to determine the used techniques to solve problems faced in the assays, the job of new materials and coverings directed to the manufacture of tools, and the influence of the parameters of process (cut force, geometry of cut in the punção and the press plates) in the product quality and the time of processing. The work presents, with details, the development of the solution and the results gotten through the implantation in the economic soil of plant and its results technician and. For such boarding, it was used as practical work the case of the stamping of a perforated door that possesses dezessete a thousand punctures of Ø 6 mm in steel plate 1010. Os carbon AISI gotten results had been to the improvement of manufactured product quality, as well as the reduction of the costs of in agreement manufacture will be presented in the work.

Keywords: punching CNC, costs, production, productivity, quality.

## **APÊNDICE G – Modelagem de sistemas produtivos**

### **Utilização da simulação discreta como ferramenta decisória na análise de projeto de reestruturação de uma linha de manufatura de produtos para telecomunicação**

***Resumo:** Neste trabalho foi realizado o estudo com o objetivo de analisar como as ferramentas de simulação discreta podem ser confiáveis para a tomada de decisão em processos de fabricação, para tal tarefa a utilização de um estudo de caso foi fundamental, o caso prático será a reestruturação de um processo de manufatura em uma empresa de sistemas para telecomunicações na cidade de São Paulo. Para essa análise foram utilizados os conceitos de simulação discreta e o software Arena Simulation 11.0®. Simulando através de dados determinísticos, foram construídos modelos computacionais, os quais resultaram em uma série de dados sobre como o sistema de manufatura irá se comportar após sua implantação. Após as simulações, com os resultados obtidos é possível otimizar o processo, escolher os equipamentos e ferramentas adequadas e planejando a produção de acordo com a necessidade do cliente. Assim, a simulação discreta pode auxiliar na tomada de decisões, no desenvolvimento e planejamento da produção, antes mesmo da implantação das melhorias no sistema produtivo, reduzindo custos e corrigindo falhas, o que garante menor tempo e custo na implantação do sistema com máxima eficiência do sistema produtivo.*

*Palavras-chave:* simulação discreta, sistemas de produção, otimização de processos.

#### **1. INTRODUÇÃO**

A globalização da economia tem feito com que as empresas enfrentem cada vez mais um ambiente de alta competitividade no qual a sobrevivência está intimamente relacionada à fabricação de um produto de elevada qualidade, sendo entregue no menor prazo, a um preço competitivo.

Parece uma receita simples, porém, atingidas e pressionadas por uma concorrência global forte, as indústrias têm hoje como seu maior desafio a busca pelo ponto de equilíbrio entre esses três elementos: prazo, preço e qualidade. A dificuldade se depara justamente porque estes elementos são conflitantes e muitas vezes tendem a ser excludentes.

Conforme (Corrêa, 2005), diminuir preços pode aumentar a demanda por produtos, mas também reduz as margens de lucro se o produto não puder ser suprido a um custo menor. Portanto torna-se vital para as empresas a adoção de práticas que auxiliem na diminuição dos diversos custos incorridos, como custos de mão-de-obra, de materiais, administrativos e

outros, de maneira a obter uma diminuição do custo unitário do produto. Os autores afirmam ainda que, para suplantar seus concorrentes, as empresas devem oferecer vantagens operacionais, como flexibilidade, prazo de entrega rápido e entrega pontual a seus clientes.

Segundo (Gaither, 2004), o mercado mundial tornou-se muito dinâmico e turbulento, requerendo dos sistemas de manufatura respostas rápidas e flexibilidade para mudanças de cenários por parte do cliente. Desta forma, é fundamental que a empresa possua estratégias de controle da manufatura e da programação da produção que possibilitem uma resposta ágil e eficaz ao cliente, sem dar espaço ao concorrente.

O estudo de caso analisa a instalação de uma nova linha de produção de produtos para telecomunicação, objetivando a escolha dos equipamentos mais eficientes, a otimização dos recursos produtivos, tais como matéria-prima, mão-de-obra e todos os recursos envolvidos no processo produtivo.

## **2. OBJETIVO**

Neste mundo globalizado a produção de produtos para telecomunicações (Datacenter e Racks) tem sofrido sérios problemas na questão de custos, sendo cada vez mais difícil concorrer com os produtos de países como China, Índia, EUA e países da União Européia, principalmente as vendas destinadas a exportação, pois o custo do produto está muito alto.

Este trabalho tem como objetivo mostra a viabilidade da utilização de simulação discreta como ferramenta confiável para o estudo de melhorias nos processos de fabricação e a sua utilização quanto ferramenta de auxílio à tomada de decisão, no que diz respeito aos sistemas de produção, para tal comprovação será utilizado um estudo de caso para a obtenção de resultados e a partir disto definir os melhores equipamentos e a melhor otimização resultando num custo menor aumentando a competitividade da empresa. O trabalho prático trata-se de um sistema complexo com forte interação entre mão-de-obra, máquinas e equipamentos em processos de produção. Isto faz com que o trabalho de análise e interpretação de dados estatísticos obtidos e a proposição de melhor otimização do sistema sejam dificultados. A partir da simulação serão escolhidos os melhores processos de fabricação, máquinas, ferramentas e tipo de layout para a otimização dos custos.

## **3. SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS**

A simulação computacional de sistemas consiste na utilização de um conjunto de métodos e técnicas matemáticas, com o objetivo de imitar o comportamento de sistemas reais, geralmente utilizando-se computadores e softwares adequados (Kelton, 1998). Ela

pode ser definida como um processo de projetar um modelo de um sistema real, e de procedimentos de experimentos com este modelo, com o propósito de conhecer o comportamento do sistema e/ou avaliar estratégias para a sua operação (Pegden et al., 1995). Pode-se imitar o comportamento de, praticamente, qualquer tipo de operação ou processo do mundo real (Freitas Filho, 1997).

Uma das principais etapas de um estudo de simulação consiste na criação de um modelo lógico. Assim, um modelo lógico consiste em um conjunto de suposições e aproximações, devidamente quantificadas e estruturadas, que visam representar o comportamento do sistema real sob determinadas condições, utilizando-o para prever e comparar alternativas lógicas passíveis de serem simuladas.

Um modelo é utilizado também quando se deseja aprender alguma coisa sobre o sistema real que não se pode observar ou experimentar diretamente, ou pela inexistência do sistema real, ou pela dificuldade de manipulação do mesmo, ou pela impossibilidade de sujeitá-lo ao ensaio sem incorrer em custos elevados e gastos de tempo.

A quantidade de simplificações impostas ao modelo influenciará em razão direta na distorção entre os resultados obtidos pelo modelo e pelo sistema real. Os métodos matemáticos tradicionais como teoria de filas, equação diferencial e programação linear fornecem resultados para os sistemas modelados, entretanto a quantidade de simplificações impostas é bem maior do que quando se utiliza os métodos de simulação. Esta também permite a utilização de variáveis aleatórias, de modo a representar com maior veracidade o comportamento do sistema real. Portanto, este método se constitui numa das ferramentas de análise mais poderosas disponíveis para a representação de sistemas complexos (Kelton, 1998).

Segundo (Silva, 2005), a simulação computacional, que vem a ser a representação de um sistema real pela modelagem feita em computador, possibilita a análise de sistemas complexos, respondendo questões do tipo “*what if*” (“O que aconteceria se”). Outra grande vantagem da simulação computacional é obter a resposta sobre essas perguntas antes de se ter o sistema real funcionando, e com grande confiabilidade.

### **3.1. Processo de Fabricação dos Produtos**

A obtenção do produto final passa por algumas etapas de produção, desta forma, é necessária a elaboração das etapas de produção para o desenvolvimento do modelo de simulação, e para esta tarefa foram realizadas coletas de dados e chegou-se ao seguinte roteiro de produção e é detalhado a seguir:

- Planejamento e controle de produção: é responsável por receber as ordens de vendas e executar o plano de fabricação, sua freqüência de acontecimento é uma variável aleatória, por esse motivo utilizamos uma estatística baseada no histórico de vendas da empresa, conforme o gráfico da demanda mensal;
- Célula de usinagem CNC: composta por centro de usinagem e torno CNC é responsável pela usinagem da base dos armários, seu tempo de usinagem é uma informação determinística colhida do sistema ERP.
- Célula de usinagem convencional: composta por máquinas operatrizes convencionais utilizadas para usinagens de pequenos lotes onde não é viável a utilização de máquinas CNC, devido ao custo da hora máquina CNC;
- Célula de estamparia: é composta por máquinas puncionadeiras e dobradeiras CNC, além de prensas mecânicas que executam a estamparia dos itens que serão montados posteriormente no armário;
- Célula de soldagem: é composto por máquinas de solda pra diversos tipos de materiais, esse é o setor onde são feitas as montagens dos conjuntos que darão origem ao produto final posteriormente;
- Célula de pintura: é o setor onde é feito o tratamento superficial dos itens, tais como revestimentos e pinturas conforme especificação de projeto;
- Célula de montagem: é a ultima etapa de fabricação, onde todos os itens devem estar disponíveis para montagem. Os diversos itens que compõem o produto devem estar disponíveis á montagem, pois caso contrário haverá uma formação de uma fila de espera, por falta de um item, ocasionando um maior custo de produção;

A demanda de produtos é mostrada na Figura 1 e o desenvolvimento do sistema de produção dar-se-á sobre estes dados.

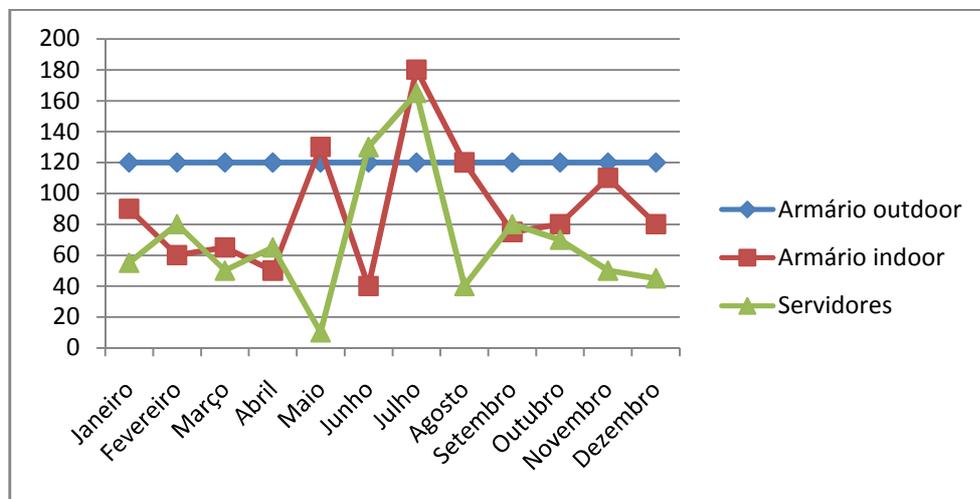


Figura 1. Demanda de produção para o desenvolvimento do novo sistema.

### 3.2. Desenvolvimento do Modelo Computacional

A programação foi realizada de forma compatível com os requisitos do software de simulação *ArenaSimulation®*, versão 11. Este *software* foi escolhido por possuir um ambiente agradável ao usuário, além de permitir a elaboração de animações gráficas que auxiliam no processo de confecção, validação e apresentação do modelo.

Os elementos básicos da modelagem utilizados neste artigo são: “*entities*” (entidades), “*locations*” (local/equipamento). Estes comandos podem ser acessados a partir do menu “*Built*” (construção), onde estão também os comandos “*arrivals*” (chegadas), “*processing*” (processamento), “*shifts*” (turnos), “*variables*” (variáveis) e “*attributes*” (atributos), utilizados na construção do modelo computacional.

A seguir, serão descritos cada um dos elementos e comandos citados. A partir do modelo básico de simulação que é mostrado na Figura 2 há uma necessidade de definir os indicadores de desempenho do sistema para que esses dados sejam utilizados para tomar decisões de questões como: anteriormente:

- *Entities*: objetivando a redução do tempo de processamento da simulação, foram utilizadas apenas duas entidades para representar as sete famílias distintas de chassis. Porém, para cada família em especial, é utilizado uma cor gráfica diferente. A primeira entidade é a longarina, matéria-prima, e a segunda entidade é o próprio chassi, produto acabado;
- *Locations*: são utilizadas oito estações para os diferentes estágios de produção. Há um estoque inicial, com capacidade relativamente alta, cinco esteiras de operação, área de pintura e zona de embalagem, cada uma destas com capacidade única. A partir daí, a entidade sai do sistema;
- *Arrivals*: existe uma única entrada de matéria-prima, localizada no estoque inicial. Esta entrada no sistema obedece a uma distribuição de probabilidades, que contem a porcentagem de longarinas de cada família que chegam ao estoque inicial. Estes dados foram observados em oito dias de programação da produção;
- *Processing*: nesta fase, é colocado o fluxo de operações ao qual o processo está submetido. A seqüência de operações pode ser vista no mapa de processo da linha de montagem. Cada uma das operações consome determinado tempo, também especificado como uma operação do processo;

- *Shifts*: para rodar a simulação, o modelo utiliza dois turnos de trabalho, cada um deles composto por oito horas. Estes turnos foram definidos para simular durante oito dias. Os turnos estão associados às estações de trabalho do modelo;

- *Variables*: foram utilizadas oito variáveis na formulação do modelo. Estas variáveis têm por finalidade medir a produção de cada uma das sete famílias de chassis, e também a produção total;

- *Attributes*: foi utilizado um atributo para especificar o tipo de longarina que entra no sistema, obedecendo à distribuição de probabilidades pré-definida;

A partir do modelo básico de simulação que é mostrado na Figura 2 há a necessidade de definir os indicadores de desempenho para o sistema e esses indicadores serão os norteadores para a tomada de decisões de questões como:

- Qual processo de fabricação é mais eficiente?
- Qual o melhor equipamento a ser utilizado?
- Qual o melhor layout a ser utilizado?

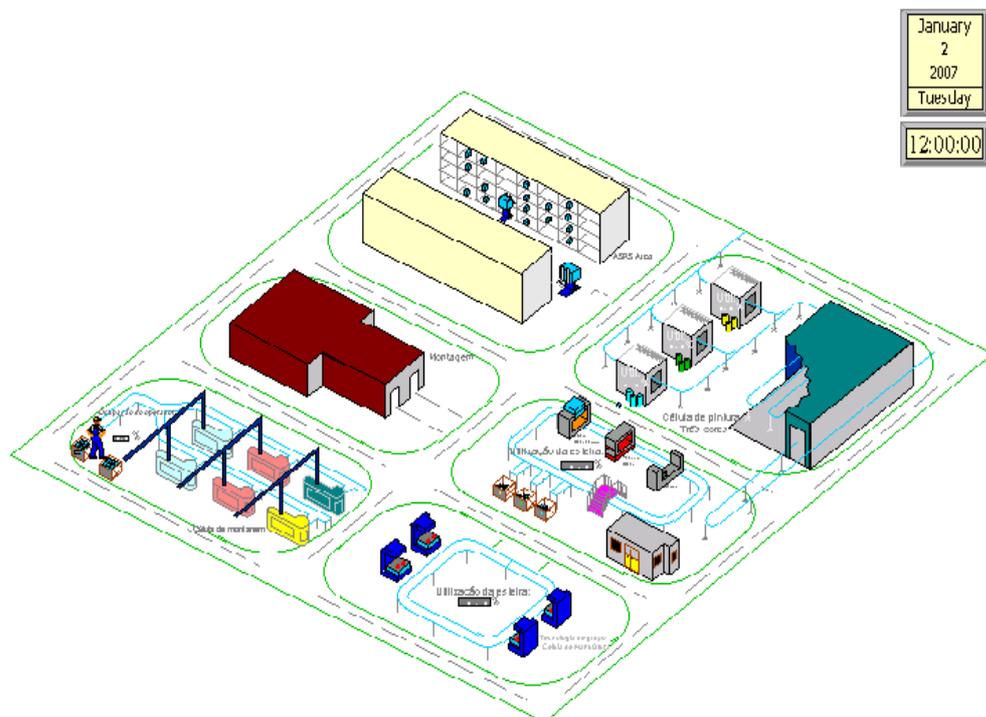


Figura 2. Modelo desenvolvido para a simulação do novo sistema.

Para responder essas questões os indicadores de desempenho utilizados são:

- Lead Time: É o tempo de passagem desde o início das operações do processo de fabricação. Neste sentido pode-se medir o lead time pela seguinte expressão:

$$LT = \text{Data de Entrega} - \text{Data do Pedido}; \quad (1)$$

- O volume de produção: é uma das medidas de desempenho mais empregadas na avaliação de sistemas produtivos, tendo como objetivo medir a quantidade de produtos fabricados num determinado período. O volume de produção deve ser visto como a quantidade de produtos fabricados e "vendidos", interna ou externamente dentro do conceito de produção puxada. Neste sentido, pode-se medir o volume de produção pela seguinte relação:

$$VP = \text{Quantidade Produzida} / \text{Quantidade Vendida}; \quad (2)$$

A meta desta medida de desempenho consiste em chegar-se ao valor 1. Quanto mais afasta-se deste valor, para baixo (não consegue-se atender a demanda) ou para cima (apenas gera-se estoques), pior o desempenho do sistema.

- Taxa de utilização da mão de obra: tradicionalmente, os sistemas de avaliação da mão-de-obra privilegiam o tempo total trabalhado comparado às horas pagas, sendo exigido dos empregados, assim como das máquinas, o máximo de tempo operando. A nova mentalidade de envolvimento dos empregados exige a participação dos mesmos não apenas na produção imediata de peças, mas também na manutenção preventiva das máquinas, limpeza e organização do ambiente de trabalho, análise e solução de problemas, etc. Logo, ao invés de medir-se a produtividade individual da mão-de-obra, deve-se analisar quanto de recursos humanos (operadores, ferramenteiros, manutenção, supervisores, etc.) foi despendido para uma dada produção. Neste sentido, pode-se avaliar a utilização da mão-de-obra pela seguinte relação:

$$MO = \text{Horas Totais Trabalhadas} / \text{Produção do Período}; \quad (3)$$

Na medida em que a equipe de trabalho produza uma quantidade maior de produtos dentro de um mesmo período, resguardada a questão do nivelamento da produção à demanda, ou que, para uma mesma produção seja empregada uma equipe menor de trabalho, a taxa de utilização da mão-de-obra se elevará, aumentando efetivamente a produtividade.

- Estoque em processo: A quantidade de estoques em processo necessários para atender uma determinada demanda relaciona-se de forma direta com a eficiência do sistema

produtivo, pois quanto maior o nível de estoques intermediários maiores os custos diretos e indiretos associados aos produtos fabricados.

$$EP = \text{Quantidade de Estoques em Processo}; \quad (4)$$

A quantidade de estoques em processo pode ser avaliada tanto em unidades como em valores monetários. Cabe salientar que a redução dos estoques em processo não deve ter um fim em si mesmo. Muito pelo contrário, esta redução deve ser vista como resultado de um processo contínuo de melhoramento do sistema produtivo.

- Taxa de utilização das máquinas: Empregar a taxa de utilização das máquinas isoladamente é inadequado porque resulta na formação de estoques acima das necessidades. O enfoque convencional de maximização da taxa de utilização das máquinas traz também problemas para a manutenção preventiva, dificuldades na mudança de programação da produção, e encoraja a compra de equipamentos modernos com base apenas na velocidade de fabricação, dificultando a formação de células. Dentro do enfoque do sistema, a taxa de utilização das máquinas deve estar associada ao desempenho global do sistema, ou seja, para alternativas com mesmo desempenho de produtividade e qualidade, a que tiver maior taxa de utilização das máquinas é a mais eficiente.

$$UM = \text{Tempo Produtivo da Máquina} / \text{Tempo Disponível da Máquina}; \quad (5)$$

Quanto mais próximo de 1 o valor do índice, maior a taxa de utilização das máquinas. Vale lembrar que o tempo gasto com a troca de ferramentas não deve ser computado como tempo produtivo da máquina, razão pela qual se deve reduzi-lo, ou se possível eliminá-lo.

A Tabela 1 mostra os índices de desempenho do sistema anterior para que os dados anteriores sejam comparados com os dados simulados:

Tabela 14. Indicadores de desempenho do sistema atual.

Armário	Lead time (hora)	Volume de produção	Taxa de mão de obra	Estoque em processo	Taxa de utilização das máquinas
Armários outdoor	355,2	1440	5,2	88	0,649
Armários indoor	209,28	1080	6,933	83	0,695
Servidores	176,64	860	8,706	63	0,667

### 3.3. Validação e verificação do modelo

A fim de se obter um modelo final correto, é necessário que seja feita validação do modelo de simulação. Um modelo deve ser desenvolvido para determinado propósito e sua

validação diz respeito ao atendimento deste propósito. Neste trabalho, a validação e verificação do modelo serão observadas pelos próprios membros do time de desenvolvimento, que inclui um usuário do modelo.

Segundo (Sargent, 2004), o processo para validação e verificação do modelo de simulação segue os passos esquematizados na Figura 3.

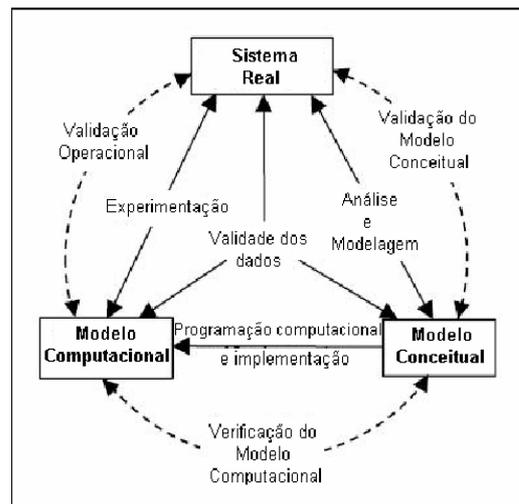


Figura 3. Processo de modelagem e verificação do modelo

A verificação do modelo computacional assegura que a implementação e a programação computacional do modelo estão corretas, e requer que as variáveis de saída do modelo sejam identificadas e que seja especificada sua precisão com relação ao sistema real.

Primeiramente, esta verificação foi estabelecida pela animação do modelo, na qual seu comportamento operacional é mostrado graficamente, no decorrer do tempo. Além disto, foi executada a verificação do modelo computacional através de gráfico operacional, cuja variável analisada foi o nível de produção total, observada de acordo com os dados da programação da produção coletados em determinado período de tempo. A validação operacional determina se o comportamento das respostas ou saídas do modelo tem precisão suficiente para seus propósitos, o que foi confirmada pelo usuário do modelo de simulação.

### 3.4. Resultados e Discussão

Como o principal objetivo deste trabalho é obter a melhor solução para a reestruturação do sistema produtivo, após o desenvolvimento do modelo e após as simulações e chegou-se aos seguintes resultados que são mostrados na Tabela 2:

Tabela 2. Indicadores de desempenho do sistema atual.

Armário	Lead time (hora)	Volume de produção	Taxa de mão de obra	Estoque em processo	Taxa de utilização das máquinas
Armários outdoor	289,6	1925,98	1,668	36	0,842
Armários indoor	188,14	1407,869	1,832	38	0,836
Servidores	142,8	1156,188	1,741	41	0,855

Com os dados obtidos da simulação analisaremos os resultados obtidos do sistema produtivo reestruturado comparando-o em termos de faturamento com o sistema de trabalho atual, sendo que os valores obtidos na tabela foram extraídos do sistema ERP da empresa, e os resultados são mostrados na Tabela 3:

Tabela 3. Resultados obtidos na simulação.

Sistema	Armários outdoor	Armários indoor	Servidores
Quantidade produzida atualmente	1440	1080	860
Quantidade produzida na simulação	1925,98	1407,869	1156,188
Faturamento atual	R\$7296000,00	R\$4968000,00	R\$4472000,00
Faturamento simulado	R\$12326280,00	R\$6476197,00	R\$6012175,00
Diferença entre o faturamento atual e o simulado	R\$5030280,00	R\$1508197,00	R\$1540175,00

No item 4 os resultados obtidos a partir das simulações serão analisados, mas podemos perceber que o sistema reestruturado tem um potencial de crescimento efetivo, basta analisar os resultados sobre o faturamento, claro que esses resultados são apenas modelos teóricos que se bem modelados e verificados servirão de base confiável para implementar as melhorias necessárias.

#### 4. CONCLUSÃO

A simulação discreta é uma ferramenta nova e importante para o desenvolvimento e melhoria de sistemas de fabricação, por meio de seus resultados é possível verificar qual o melhor processo de fabricação, em quais processos são necessárias melhorias e onde há

necessidade de concentrar esforços para adiminuição de tempos de processamento e mostrando exatamente as necessidades do sistema de fabricação.

O estudo de caso mostrou resultados excelentes, na simulação, isso não indica que não possa haver alguma diferença quando o sistema estiver implantado, mas de qualquer forma os resultados obtidos são expressivos e mostram um aumento na produção e no faturamento, necessidade de qualquer empresa que pretender sobreviver neste mundo globalizado.

## **5. REFERÊNCIAS**

Corrêa, C. A., & Corrêa, H. L., 2005." Administração de produção e operações". Ed. Atlas, São Paulo, Brazil, 382p.

Freitas Filho, P.J., 1999. "Simulação de Sistemas de Produção". Apostila do Curso de Simulação de Sistemas de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina.

Gaither, N., & Frazier, G. (2001). "Administração da produção e operações". Ed.Thomson Learning, Londres, 647 p.

Kelton, D., Sturrock, D., & Sadowski, R., 2006. "Simulation with Arena". Ed. Prentice Hall ,Nova York, 468 p.

Pegden, C.D. et al ., 2000. " Introduction to Simulation Using SIMAN". Mc Graw Hill, New York, 354p.

Souza, Priscila P. P., 1999. "Simulação de Sistemas de Manufatura Aplicada a um Ambiente Lean Manufacturing". Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

## **APÊNDICE H – NOVO LAYOUT DA FÁBRICA**

# ANEXO A – REDES DE PETRI

## EXTENSÃO DE REDES DE PETRI PARA SISTEMAS DE PRODUÇÃO

### 1. INTRODUÇÃO

Como visto anteriormente, as Redes de Petri são uma ferramenta matemática gráfica de representação formal de sistemas de eventos discretos (um sistema de manufatura é um sistema discreto), sendo esta a razão de sua importância na automação industrial.

A sua facilidade para modelar situações que dificilmente são representadas por outros modelos como concorrência, paralelismo, sincronização entre vários processos, competição por um recurso, etc fazem das Redes de Petri uma ferramenta muito importante.

Por exemplo, os modelos de filas são usados com muita frequência para avaliar o desempenho, mas sincronizações são difíceis (impossíveis) de se representar. Neste e em outros casos, as Redes de Petri são mais apropriadas para representar formalmente paralelismo e sincronizações em ambientes de engenharia.

As Redes de Petri, como uma ferramenta de uma ordem parcial de eventos, permite a análise e a avaliação de desempenho em vários níveis de controle de Sistemas Flexíveis de Manufatura (RAMAMOORTHY, 1980), sendo, portanto adequadas aos Sistemas de Produção.

Talvez um dos primeiros a utilizar as Redes de Petri para sistemas de produção foi o trabalho de (HACK, 1972) apresentado no MIT com o título de "*Analysis of Production Schemata by Petri Net*" onde trata da modelagem de um sistema de montagem, utilizando uma subclasse (de Redes de Petri) chamada "Rede de Petri livre de escolha".

A partir de então as Redes de Petri foram ganhando popularidade como uma ferramenta para modelar e analisar Sistemas Flexíveis de Manufatura. Logo, com o trabalho de (VALETTE, 1986), onde é incorporada a dimensão tempo às Redes de

Petri, as mesmas tornaram-se mais importantes para representar e analisar problemas ligados a atividades de produção, onde o tempo é um fator importante.

A estrutura de uma Rede de Petri, vista como uma ordem parcial de transições descreve a coordenação entre eventos concorrentes que não têm uma relação de precedência rigorosa. A alocação de recursos é um exemplo. Outro exemplo é fazer uma escolha entre ações alternativas para solucionar conflitos entre dois eventos competindo pelo mesmo recurso.

Em sistemas flexíveis de manufatura geralmente aparecem situações tais como:

- a) Processos tendo relações de precedência entre si;
- b) Processos sendo executados ao mesmo tempo (paralelismo);
- c) Processos que não podem ser realizados até que outro processo alcance certo estado (sincronização);
- d) Processos a serem seguidos não são determinados, o que mostra uma escolha entre alternativas (não determinismo);
- e) Processos possuindo conflitos entre competição e coordenação de atividades (alocação de recursos).

Assim sendo, o uso das Redes de Petri para a modelagem, análise e controle de eventos discretos de FMS estão recebendo maior atenção nestes últimos anos por diversas razões (FAVREL, 1984):

- 1.- Redes de Petri possuem uma forma gráfica fácil de entender na qual é possível visualizar sistemas complexos;
- 2.- Redes de Petri podem modelar concorrência, eventos assíncronos, relações de precedência lógica e interações estruturais numa maneira simples e natural. Conflitos, bloqueios, buffers finitos, sincronizações, prioridades, e operações de montagem e desmontagem podem ser modelados fácil e eficientemente;
- 3.- Redes de Petri representam uma ferramenta de modelagem hierárquica, com uma base matemática e prática bem desenvolvida. Análise estrutural e temporal pode ser executada usando Redes de Petri estocásticas;

4.- Redes de Petri apresentam propriedades de decomposição permitindo assim uma representação modular (RIGHINI, 1993);

5.- Mudanças num modelo de Redes de Petri são feitas simplesmente pela adição de fichas, posições ou transições. Por outro lado, mudanças num modelo de cadeias de Markov usualmente requerem uma redefinição de todos os estados no modelo (AI-JAAR, 1990).

6.- Redes de Petri é um modelo abstrato, o que permite a representação de diferentes tipos de sistemas;

7.- Redes de Petri é um modelo que permite diversos níveis de abstração na representação de um mesmo sistema,

8.- Redes de Petris permitem a descrição dos aspectos estáticos e dinâmicos do sistema a ser representado;

9.- Contêm o conceito de estado parcial (RILLO, 1988);

10.- Redes de Petri podem ser usados também para implementar sistemas em tempo real (VALETTE, 1986);

11.- É um modelo de fácil aprendizado, podendo funcionar como linguagem de comunicação entre especialistas de diversas áreas;

12.- Possuem métodos de análise, existindo atualmente ferramentas comerciais para sua análise dos tipos mais simples de redes.

Podemos ver claramente que as Redes de Petri se adaptam muito bem para especificar e implementar sistemas de controle de eventos discretos; justificando assim sua utilização em Sistemas de Manufatura.

Na literatura atual, as Redes de Petri voltadas para Sistemas de Produção, mais especificamente em FMSs, podem ser classificados nas seguintes categorias (AI-JAAR, 1990):

1.- Modelagem e análise;

2.- Avaliação do desempenho de Sistemas de Manufatura;

3.- Implementação do controle em tempo real;

4.- Simulação e ferramentas de software;

## 1.1. Modelagem e Análise

Um FMS pode ser visto como dois sistemas (FAVREL, 1984): um sistema físico e um sistema lógico. Do ponto de vista físico, um FMS é um conjunto de máquinas, ferramentas, matérias primas e produtos. Do ponto de vista lógico, um FMS é um conjunto de processos, assim como o estado das máquinas e materiais num job-shop.

O processo de manufatura significa, portanto a evolução do sistema, o qual pode ser estudado pela árvore de alcançabilidade. Ambos os aspectos, físico e lógico de um FMS podem ser descritos, portanto por uma só Rede de Petri.

Entretanto, a complexidade do modelo aumenta quando ela é muito grande (especialmente quando se deseja um modelo mais detalhado), devido à explosão combinatória de estados. Neste caso, uma abordagem modular é a maneira mais adequada para analisar uma Rede de Petri.

Em Rede de Petri, uma subrede inteira pode ser substituída por uma simples posição ou transição para a modelagem num nível de abstração maior. Por outro lado, também podemos substituir um lugar ou uma transição por uma subrede para prover uma modelagem mais detalhada, o que é feita através de blocos bem formados.

Para solucionar, portanto, o problema da explosão combinatória de estados ao efetuar a análise de uma Rede de Petri, existe algumas abordagens: uma delas é por simulação (RIGHINI, 1993), e outra por redução (FAVREL, 1984).

A redução de uma Rede de Petri é um procedimento que transforma homomórficamente uma Rede de Petri para sua rede reduzida, enquanto preserva algumas propriedades desejáveis da rede original. Como conseqüência, a análise da rede simplificada pode prover informação suficiente para entender a rede original. Do ponto de vista lógico, este procedimento reduz os lugares de estados alcançáveis, e do ponto de vista físico, reduz a estrutura da rede permitindo a análise da rede passo a passo.

## **1.2. Avaliação de Desempenho de Sistemas de Manufatura**

A adição do tempo nas RdPs, permitiram o cálculo da avaliação da eficiência temporal dos sistemas. RdPs temporizadas e RdPs estocásticas, são usadas neste contexto. Estas últimas têm recebido muita atenção no campo de ciências da computação (RAMAMOORTHY, 1980), e ultimamente na avaliação da eficiência (desempenho) em FMSs (AI-JAAR, 1990).

Modelos de RdPs estocásticas por exemplo, mostram-se superiores no cálculo da performance de sistemas sobre os modelos tais como Redes de Filas, Cadeias de Markov, Simulação, e, análise de perturbação (AI-JAAR, 1990). RdPs são por exemplo, mais apropriadas do que Redes de Filas quando se modela um sistema com buffer finito, sincronização, prioridades e operações de montagem e desmontagem. Entretanto, quando a capacidade dos buffers é relativamente grande, então Redes de filas e não RdPs devem ser usadas.

Utilizando o poder de modelagem das Redes de Petri estocásticas junto com as Redes de filas obtém-se uma ferramenta híbrida de análise mais precisa e eficiente para a avaliação do desempenho de sistemas complexos (DOS SANTOS, 1993).

Várias comparações têm sido feitas para o cálculo de desempenho de FMSs utilizando Redes de Petri estocásticas e Redes de filas, mostrando-se sempre que os resultados fornecidos são mais precisos quando se utilizam Redes de Petri estocásticas e não redes de filas de espera (VALETTE, 1986).

## **1.3. Implementação de Controle em Tempo Real**

Paralelamente à modelagem e análise, assim como à avaliação do desempenho de um FMS, a implementação de controladores baseada em Redes de Petri em tempo real tem recebido considerável atenção. Um aspecto importante das Redes de Petri em Manufatura é seu uso nas várias etapas do projeto (desde as especificações funcionais até a implementação final) de um FMS para a implementação de um Sistema de Controle (RILLO, 1988). Esta implementação

direta dos programas de controle a partir das especificações permite uma acentuada queda no número de erros introduzidos quando não existe esta passagem direta entre estas duas fases.

Uma aplicação de Redes de Petri e sistemas baseados em regras como metodologia para a especificação e implementação de sistemas de controle para sistemas de manufatura pode ser vista melhor em (RILLO, 1988), por exemplo, podemos apreciar uma visão sobre o uso de Rede de Petri no desenho e implementação do controle de FMS, o mesmo que é discutido usando dois níveis de decomposição, controle local e o nível de coordenação e monitoramento. Por outro lado, (DOS SANTOS, 1993) apresenta a técnica de "Mark Flow Graph" estendido, que é um derivado da Rede de Petri para a modelagem e controle de sistemas de eventos discretos.

Existem diversos trabalhos que tratam da implementação direta de uma especificação baseada em Redes de Petri. Dentre as principais formas de implementação podemos citar o jogador de fichas e as máquinas de inferência. O jogador de fichas é um programa que opera sobre o estado atual da rede, habilitando transições sensibilizadas e disparando as mesmas segundo o estado da rede e os eventos associados a ela.

A máquina de inferência opera as regras de produção de um sistema baseado em regras, onde a cada ciclo de operação a partir de fatos conhecidos como verdadeiros, a máquina de inferência calcula o conjunto de regras aplicáveis para as transições e em seguida aplica uma delas.

## 2.0 APLICAÇÕES DAS REDES DE PETRI A SISTEMAS FLEXÍVEIS DA MANUFATURA

Para a especificação de um sistema em ambientes de manufatura utiliza-se uma lista de recursos, operações a serem executadas, assim como as relações de precedência, descrevendo desse modo o comportamento do mesmo.

Podem ser considerados como recursos: máquinas, buffers, partes, robôs, etc. as quais por sua vez podem ser divididos em duas classes:

- a) Aqueles que são fixas como máquinas, robôs, esteiras, etc, e;
- b) Aqueles que têm seu número variado como pallet, acessórios, partes a serem processadas, etc.

É sabido, portanto que para a execução de operações de produção são utilizados ambos os tipos de recursos.

Como visto anteriormente, são usados lugares para modelar operações e recursos numa Rede de Petri. Uma ficha (marcação) num lugar que representa um recurso (lugar-recurso) vai significar, portanto a disponibilidade do recurso para a execução de uma operação, enquanto que uma ficha num lugar que representa uma operação (lugar-operação) vai significar que a operação naquele lugar está sendo executada (atividade em processo).

Uma operação numa Rede de Petri pode ser dividida em diversas sub-operações (refinamento sucessivo), portanto um lugar-operação pode ser substituído por uma subrede assegurando-se que o mesmo seja um lugar seguro (safe) no modelo de Rede de Petri, porque uma operação nunca pode ser executada mais do que uma vez ao mesmo tempo na mesma máquina.

A habilitação de uma transição numa Rede de Petri vai resultar, portanto da satisfação de certas pré-condições (conclusão de uma operação com sucesso e/ou a disponibilidade de um recurso). Satisfeitas estas pré-condições, o disparo de uma transição significará assim o início ou fim de uma operação.

Para evitar que o sistema não entre num estado de deadlock, ou ele seja potencialmente morto (que não evolua) faz-se necessário, portanto determinar o número necessário de fichas na marcação inicial dos lugares-recurso-variado.

Neste ponto, três propriedades das Redes de Petri são então importantes para implementar e operar um sistema físico:

c) *Vivacidade*: que vai implicar a ausência de algum possível bloqueio (deadlock). Noutras palavras esta propriedade garante que o sistema opere com sucesso;

d) *Limitação* (boundedness) ou seguro (safeness): que vai implicar ausência de excesso de fichas. Safeness de um lugar-recurso indica a disponibilidade de só um único recurso, e é freqüentemente usado para garantir a safeness de alguns lugares-operação afins;

e) *Reversibilidade*: implica a execução do comportamento cíclico do sistema que realiza suas funções repetidamente, implicando também a recuperação de erros no contexto de manufatura.

Portanto para modelar um sistema de manufatura usando Redes de Petri e garantir seu funcionamento correto é preciso que sua estrutura e a marcação inicial tornem o sistema limitado, vivo e reinicializável. Estas propriedades nas Redes de Petri têm sido muito exploradas em sistemas de manufatura.

Um estudo preliminar do uso das Redes de Petri temporizados no estudo do controle em tempo real e avaliação do desempenho de FMSs foi efetuado por (HACK, 1972). (RIGHINI, 1993) por outra parte deu uma breve revisão do uso de Redes de Petri em FMS, enfatizando a parte da modelagem e análise. Em (FAVREL, 1984) Redes de Petri e suas variantes são apresentadas como ferramentas para a modelagem, análise, programação e controle de FMS; alguns novos desenvolvimentos são também apresentados tais como:

a) elaboração hierárquica de Redes de Petri para a modelagem de FMS;

b) redução hierárquica e; c) um método de decomposição para reduzir a complexidade da análise dos FMS.

### 3. LIGAÇÃO ENTRE AS REDES DE PETRI E O GRAFO PERT

Redes PERT criadas em 1958 é uma teoria muito útil em situações onde os gerentes têm responsabilidade pelo planejamento, programação e controle de grandes projetos, contendo muitas atividades que são efetuadas por pessoas diferentes. Um grafo PERT é uma representação gráfica do relacionamento entre várias atividades, onde, as mesmas são operações que consomem tempo e recursos.

Os grafos PERT possuem um único nó inicial e um único nó final, o que indica que qualquer caminho que sigamos partindo do evento inicial, sempre nos conduzirá ao evento final. Assim, ao caminho de maior duração denomina-se caminho crítico o qual corresponde à seqüência de atividades em que mais se deve exercer controle, já que qualquer atraso no mesmo automaticamente determinará um atraso no projeto.

Existem duas maneiras de se representar uma rede PERT (GRISLAIN, 1979):

- a) Representação de atividades por arcos (A-on-A) ou método americano e;
- b) Representação de atividades por nós (A-on-N) ou método francês

Na Figura 1, mostra-se um grafo PERT do tipo A-on-A, onde cada atividade é representada por um arco e cada vértice representa um evento lógico.

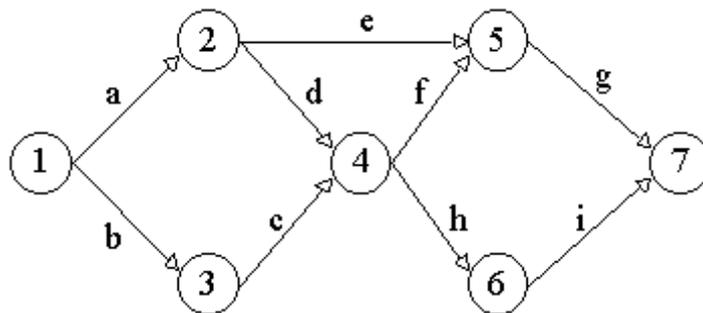
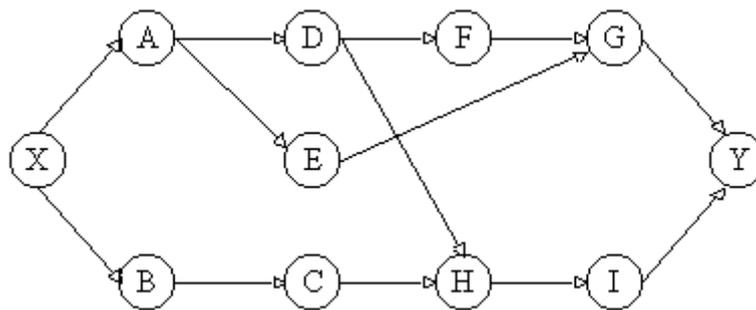


Figura 1 - Rede PERT A-on-A (GRISLAIN, 1979).

O acontecimento do evento 5 significa que as atividades "e" e "f" foram completadas e a atividade "g" só pode ser iniciada se e somente se "e" e "f" foram completadas.

Em alguns casos é necessário utilizar atividades fantasmas para representar certas relações de restrição entre os nós.

Por outro lado a Figura 2 representa à mesma Rede PERT da Figura 1 pelo método A-on-N; onde as atividades são representadas por nós, e arcos representam as relações de precedência entre as atividades. Uma característica importante neste tipo de rede é que aqui não são necessárias as atividades fantasmas ou fictícias; exceto para os nós iniciais e finais.

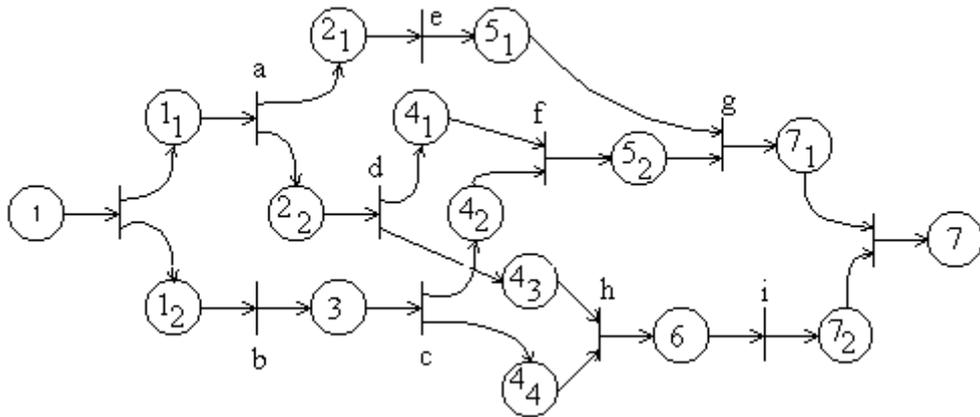


**Figura 2 - Rede PERT A-on-N (GRISLAIN, 1979).**

O uso principal das Redes PERT é a determinação do tempo de duração de um projeto pelo método do caminho crítico. A diferença fundamental entre o PERT e o CPM reside em que o primeiro estima a duração de cada tarefa ou operação dos projetos, baseando-se simplesmente num nível de custo; enquanto que o segundo relaciona duração com custo, do que se deriva uma diversidade de durações para cada atividade e elegendo a duração adequada fará com que o custo total do projeto seja mínimo.

Já que um grafo PERT está composto de atividades e eventos, ela pode facilmente ser convertida numa Rede de Petri.

Assim, numa rede PERT do tipo A-on-A a cada atividade pode-se associar uma transição, e a cada evento um lugar (duplo); sendo que cada transição numa Rede de Petri tem que ser precedida por uma posição que vai representar uma condição diferente para cada transição, como pode ser visto na Figura 2 a qual representa a RdP equivalente a Rede da Figura 3.



**Figura 3 - Rede de Petri equivalente a uma rede PERT (GRISLAIN, 1979).**

Por outro lado, para transformar uma rede PERT do tipo A-on-N numa Rede de Petri, basta substituir cada arco por uma posição e cada nó por uma transição; obtendo-se assim diretamente a Rede de Petri equivalente.

As Redes de Petri são, portanto um excelente veículo para representar as relações de precedência e concorrência das Redes PERT, sendo que a determinação do caminho crítico das operações é de particular importância nas Redes PERT/CPM, este caminho apenas restringe o programa total do projeto no sentido de que as operações que fazem parte do caminho crítico não têm folga, portanto, qualquer atraso do tempo em qualquer destas operações colocará em perigo o tempo de execução normal do projeto.

No caso das Redes de Petri, circuitos poderão ser usados para estudar o comportamento de disparo limitante. Os circuitos com período de tempo máximo são chamados de circuitos críticos. Portanto as operações associadas com estes circuitos restringiram a execução do sistema no sentido em que se a duração de qualquer operação do circuito crítico se incrementa, a duração do tempo de ciclo do sistema também se incrementará.

Assim como no PERT/CPM o caminho crítico pode mudar quando o tempo de certas atividades muda (atividades que correspondem ao caminho crítico), na Rede de Petri os circuitos críticos também podem mudar quando as durações das operações são mudadas. Portanto, um incremento na duração de uma operação

pode somente incrementar marginalmente o tempo de ciclo do sistema. Neste sentido, a noção de criticidade na Rede de Petri é também de vital importância.

Algumas outras vantagens das Redes de Petri sobre os grafos PERT são as seguintes:

a) O modelo PERT não pode descrever o não determinismo, tal como: escolha e repetição que são propriedades críticas de um FMS;

b) O PERT pode representar o procedimento (programação) de cada produto no nível de produto, mas não a evolução global do FMS no nível de fábrica, porque o PERT não pode sintetizar os procedimentos de produtos manufaturados no FMS;

c) O método do caminho crítico nos permite estudar o caminho crítico no processo de cada produto, mas é dificultoso analisar a sensibilidade de cada processo no nível de FMS com PERT/CPM;

d) As Redes de Petri admitem ciclos repetitivos, enquanto que nas Redes PERT/CPM ciclos não são admitidos;

e) Requerimento de recursos para a execução de atividades aparece explicitamente nas Redes de Petri, na representação através de fichas.

#### 4. ALOCAÇÃO DE RECURSOS EM REDES DE PETRI

Os recursos são os meios utilizados para a execução das tarefas podendo ser eles de dois tipos, a saber: recursos consumíveis (matéria-prima, por exemplo) e recursos não consumíveis (maquinaria, robôs, etc).

A principal desvantagem dos grafos PERT e outros modelos gráficos é sua incapacidade para representar unidades de recursos no modelo (no caso das Redes PERT é requerido um cronograma integrado ao grafo PERT-CPM que apresenta a distribuição de recursos). As Redes de Petri, devido a sua alta versatilidade, tornam-se bem apropriadas para representar unidades de recursos físicos.

A especificação de atividades numa Rede de Petri requer que os recursos necessários para executar uma dada atividade seja representada. Assim, para descrever recursos no processo de modelagem, utilizam-se elementos distribuidores (Santos F., 1993) de forma que o número de marcas contidas nestes elementos corresponda ao número de recursos alocados.

Os arcos de saída destes elementos são conectados às transições de entrada que indicam o início das respectivas atividades, e os arcos de entrada destes distribuidores de recursos originam-se das transições de saída das atividades correspondentes.

Desta forma, o início de uma atividade agrega recursos e o término de uma atividade os libera. Por exemplo, a Figura 4 mostra uma atividade de produção utilizando um operador.

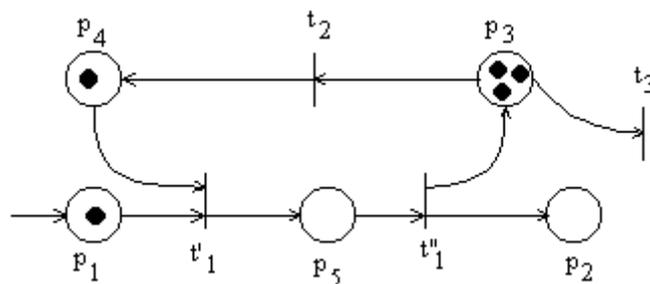


Figura 4 - Alocação de recursos em Redes de Petri (RIGHINI, 1993).

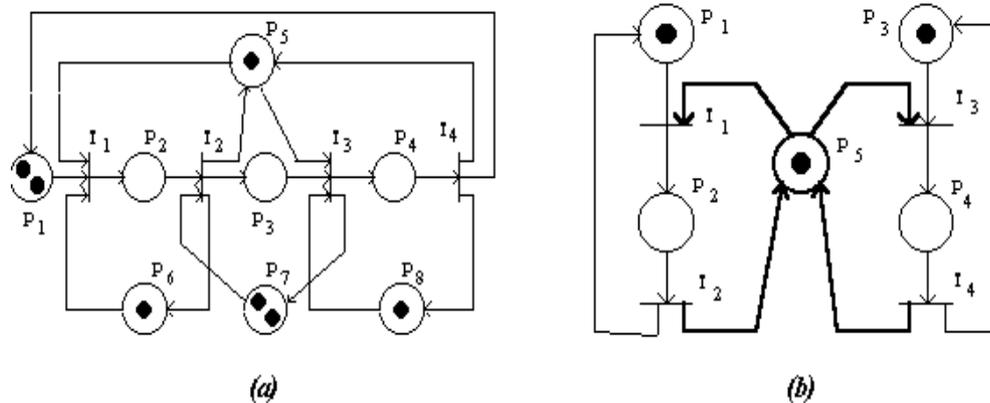
As transições  $t'_1$  e  $t''_1$  correspondem ao início e fim da atividade de manufatura que é representada por  $p_5$ , e  $t_2$  é uma atividade de alocação de recurso para a atividade  $p_5$ . As fichas em  $p_3$  e  $p_4$  representam operadores qualificados para realizar a atividade  $p_5$ .

Uma ficha em  $p_4$  permitirá a habilitação de  $t'_1$  quando  $p_1$  estiver marcada, representando assim o disparo de  $t'_1$ , (o operador realizando a atividade  $p_5$ ); logo após o término da atividade  $p_5$  o operador é liberado através do disparo de  $t''_1$ , estando pronto para ser alocado para outra atividade de manufatura. Assim, fichas em  $p_3$  irão representar, portanto unidades de recursos que estão disponíveis.

Os problemas de compartilhamento de recursos como máquinas e robôs levam a dois tipos de exclusão conhecidos como: exclusão mútua seqüencial e exclusão mútua paralela (VALETTE, 1986); os quais acontecem com muita frequência em ambientes de manufatura.

Estes dois conceitos podem ser vistos através da Figura 5, onde a Figura 5(a) representa uma linha de produção com duas máquinas, um robô, e um buffer. Aqui pode-se apreciar que o robô ( $p_5$ ) serve duas máquinas ( $p_6$  e  $p_8$ ). Fichas em  $p_1$  representam o número de partes no sistema, e fichas em  $p_7$  vão representar o número de buffers vazios. Os lugares  $p_6$  e  $p_8$  representam à disponibilidade das duas máquinas e os lugares  $p_2$  e  $p_4$  irão representar o processo de carga da máquina com uma parte e processamento, assim como a operação de descarga e  $p_3$  que representará um buffer ocupado. Quando  $m_0(p_1) > m_0(p_7)$  o sistema pode entrar num estado de deadlock com a seguinte seqüência de disparos efetuado  $s = t_1 t_2 t_1 t_2 t_1$ .

Por outro lado a Figura 5(b) mostra um robô ( $p_5$ ) servindo a duas estações paralelas ( $p_1$  e  $p_3$ ) transferindo partes para as operações ( $p_2$  e  $p_4$ ).



**Figura 5 - a) Compartilhamento de recursos exclusão mútua seqüencial, b) exclusão mútua paralela (RIGHINI, 1993).**

Em geral, num processo de manufatura somente recursos não consumíveis serão compartilhados por diferentes atividades numa maneira concorrente. Os recursos consumíveis, por outro lado, devem estar disponíveis em quantidades suficientes para evitar quebra no fluxo do produto.

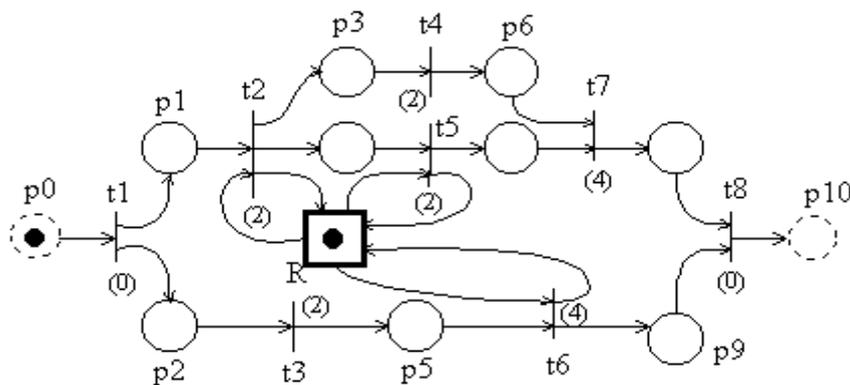
No caso de ter recursos não consumíveis limitados, e considerando que o processo de produção é representado por uma Rede de Petri temporizada, onde um número real positivo é atribuído à duração de cada atividade, a ordem de alocação de recursos influenciará na duração total do sistema. Assim, deve-se verificar a ordem de execução das atividades utilizando o mesmo recurso para se obter um tempo mínimo de operação.

Uma forma de se obter essa ordem é visto em (DOS SANTOS, 1993), onde utiliza uma árvore de estados rotulando os nós por um número real positivo que representará o intervalo de tempo mínimo de percurso entre o nó raiz e o nó final, obtém-se assim diversas seqüências que irão permitir saber a ordem de utilização do recurso único com um tempo mínimo de operação.

A Figura 6 representa uma Rede de Petri temporizada utilizando um único recurso "R" requerido para realizar três atividades diferentes. Para verificar a ordem de utilização deste recurso através da árvore de estados, assim como do grafo de caminhos e temporizações associados (DOS SANTOS, 1993), verifica-se que para

obter a operação em tempo mínimo do sistema é necessário destinar o recurso 'R' primeiro à atividade  $t_2$  e  $t_5$  (nessa ordem) e depois à atividade  $t_6$ , o que corresponde a um tempo de execução de 8 unidades de tempo. Sendo que se optamos por alocar o recurso primeiro à seqüência  $t_2$ ,  $t_6$  e  $t_5$  o tempo de execução aumentará para 12 unidades de tempo. Por outro lado, se a seqüência fosse primeiro  $t_6$  e logo  $t_2$  e  $t_5$  se obterá um tempo ainda maior, equivalente a 14 unidades de tempo.

Considerando que existissem duas unidades de recurso "R1", a duração mínima total de operação do sistema, seja qualquer que for a seqüência, será de 8 unidades de tempo. Portanto, não será necessário observar uma sincronização entre as atividades, já que se disporá de recursos suficientes para sua realização, como mostra a Figura 6.



**Figura 6 - Alocação de um único recurso em Rede de Petri (RIGHINI, 1993).**

Um aspecto importante em sistemas de manufatura é, portanto que muitos dos recursos são compartilhados; por essa razão uma alocação inadequada dos mesmos pode levar o sistema a situações de deadlock.

## 5. DETECÇÃO DE SITUAÇÕES DE DEADLOCK UTILIZANDO REDES DE PETRI

Como visto no item anterior, em sistemas de produção mais especificamente em FMSs, existem diversas situações onde vários processos (atividades) competem por um único recurso o qual é compartilhado. Assim, temos, por exemplo, máquinas numa célula de manufatura flexível (a mesma máquina realizando atividades diferentes) ou sistemas de manuseio de material (robôs) sendo compartilhados por partes num FMS.

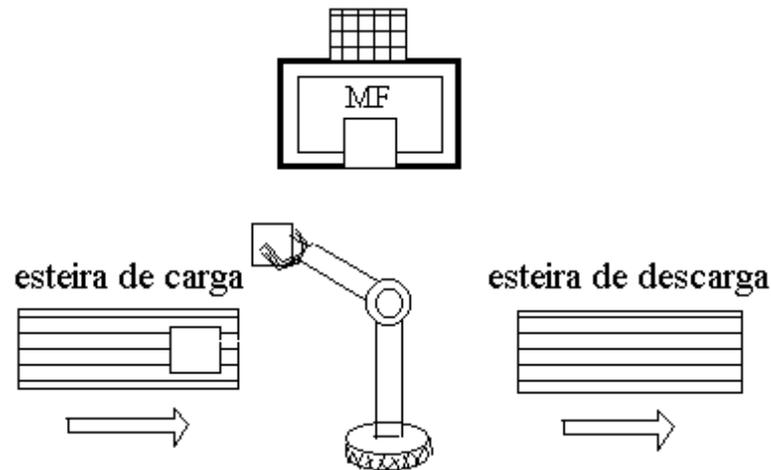
Em sistemas em tempo real, onde recursos são compartilhados por diversos processos, uma das maiores preocupações é justamente evitar o aparecimento de situações de Deadlock. Assim, os modelos de Redes de Petri têm sido muito usados para a detecção destas situações desfavoráveis ao funcionamento normal de tais sistemas (FAVREL, 1984).

Se durante a análise de um modelo de Rede de Petri é achado que o sistema é vivo (live), isto vai indicar que o sistema é livre de Deadlock. Por outro lado, se o modelo de Redes de Petri não é vivo, quer dizer que uma situação de Deadlock pode potencialmente existir no sistema.

A utilização de invariantes de lugar (L-invariantes) de uma RdP junto com a marcação inicial da rede facilita a investigação da propriedade de vivacidade, podendo assim detectar possíveis situações de Deadlock (RAMAMOORTHY, 1980).

A Figura 7 ilustra a ocorrência de um deadlock numa estação de trabalho composta por duas esteiras, um robô e uma máquina ferramenta. Aqui se pode ver claramente que enquanto a máquina está processando uma peça, o robô inicia o processo de carga de uma nova peça que chegou.

Desta forma, mesmo que a máquina-ferramenta conclua o processo, não há como descarregar a peça pronta concretizando-se deste modo o deadlock.



**Figura 7 - Ocorrência de um Deadlock (FAVREL, 1990).**

Outro caso muito comum é quando os depósitos intermediários (buffer limitados) ficam cheios, um bloqueio (deadlock) é de fato possível, já que as máquinas não podem ser liberadas porque não há lugar nos depósitos de saída para colocar o produto que acabou de ser processado e, portanto, nenhuma nova operação pode ser iniciada.

Assim, para evitar estas situações de deadlock é requerido o uso eficiente de uma política de alocação de recursos. Várias abordagens baseadas em Redes de Petri foram feitas tanto para eliminar, assim como para evitar estas situações de deadlock ( (RAMAMOORTHY, 1980).

Eliminação de deadlock refere-se a políticas de alocação de recursos estática. Por outro lado, evitar uma situação de deadlock é referido a políticas de alocação de recursos dinâmicos. No primeiro caso é utilizado geralmente o grafo de alcançabilidade das Redes de Petri para chegar a uma política de alocação de recursos estáticos, no segundo caso, propõe um sistema de controle e monitoramento on-line baseado em Redes de Petri. Já por outra parte, propõe um algoritmo chamado DAA (deadlock avoidance algorithm) sendo ambas as abordagens muito eficientes na detecção de deadlock.

## 6. SIGNIFICADO DAS FICHAS NUM SISTEMA DE MONTAGEM

Numa Rede de Petri o disparo de uma transição consiste em retirar (remover) uma ficha de cada lugar de entrada da transição e colocar (após o tempo de execução da atividade), uma ficha em cada lugar de saída da transição. Esta dependência dinâmica representa um fluxo de objetos na execução de um programa de produção, descrevendo, portanto operações sobre objetos.

No caso de uma operação de montagem, por exemplo, são tomadas como entradas da transição todas as partes necessárias para a montagem de um determinado objeto. A operação é efetivada neste caso, só quando todas as partes necessárias estão presentes, como visto na Figura 8:

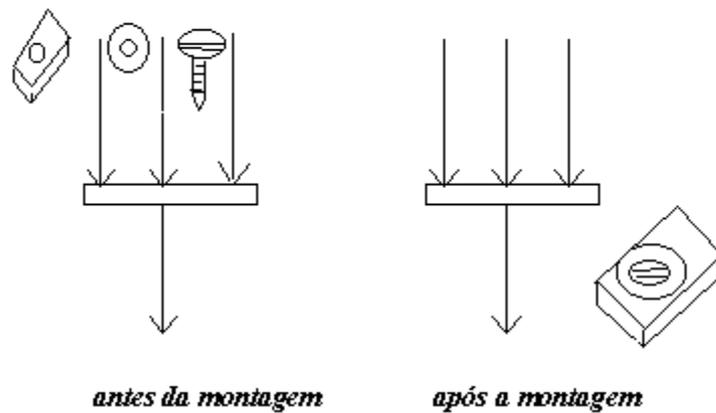


Figura 8 – Operação de montagem (RILLO, 1988).

Inversamente pode-se ter uma operação de desmontagem como na Figura 9:

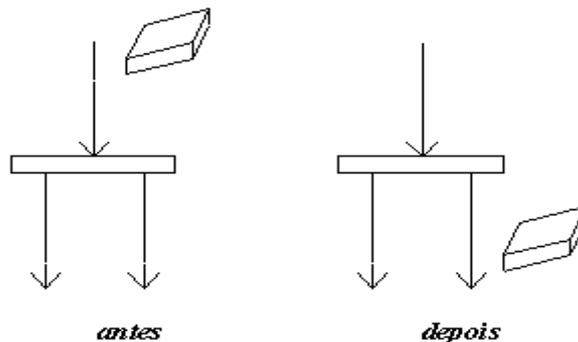
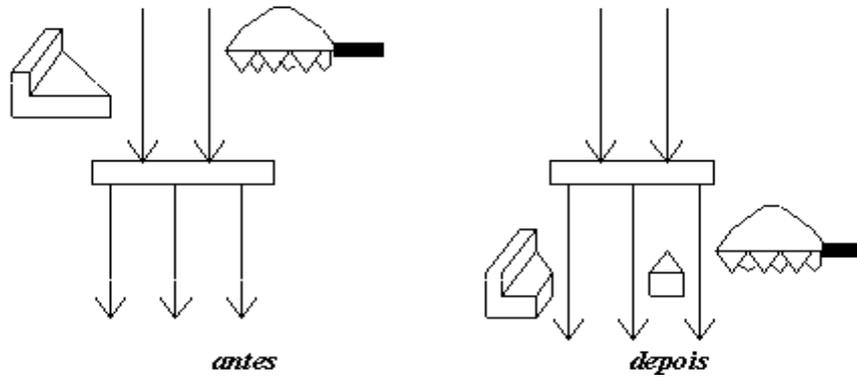


Figura 9 – Operação de desmontagem (RILLO, 1988).

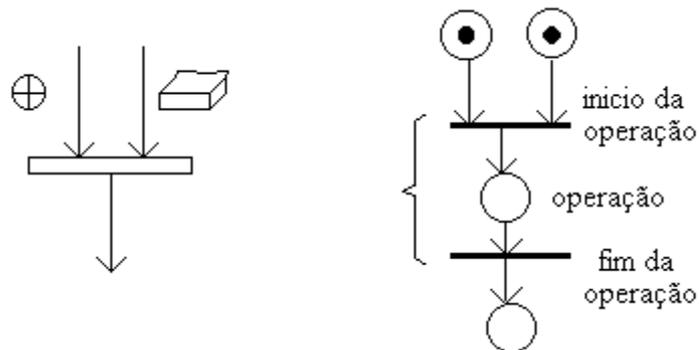
Num sentido mais geral podemos ter operações com diversas entradas e diversas saídas, como mostra a Figura 10:



**Figura 10 – Operações com diversas entradas e saídas (RILLO, 1988).**

Assim, estas operações de produção podem ser representadas por Redes de Petri da seguinte maneira:

Ou, como segue a Figura 11:



**Figura 11 – Operações de montagem e desmontagem representadas por Redes de Petri (RILLO, 1988).**

## 7. Síntese de Redes de Petri para FMS

Para problemas de síntese de Redes de Petri para um sistema de manufatura, um lugar na rede pode representar ou uma operação ou um recurso (HACK, 1972). Existem basicamente três tipos de lugares que dependem da marcação inicial de uma Rede de Petri.

Supondo que  $M$  é a marcação inicial de uma Rede de Petri "R" e "p" é um lugar em "R":

**Definição 1.** - Um lugar "p" é chamado de um lugar-"A" ou um lugar-operação se  $M_0(p) = 0$ .

Um lugar-A "p" freqüentemente representa um lugar-operação. Inicialmente não existe nenhuma operação no sistema. Ela pode também representar um ou dois lugares num Buffer, e  $M_0(P) = 0$  significará que o Buffer está vazio.

**Definição 2.** - Um lugar "p" é chamado de um lugar-"B" ou um lugar-recurso-fixo se  $M_0(P)$  é uma constante.

Um lugar-'B representa a disponibilidade de um número fixo de recursos. Por exemplo, o número de robôs ou máquinas são geralmente fixos para um certo sistema. Quando "p" representa a disponibilidade de um recurso,  $M_0(p) = 1$ . Quando "p" representa a disponibilidade de espaço vazio num Buffer,  $M_0(p)$  é a capacidade do Buffer que pode ser maior ou igual a 1.

**Definição 3.** - Um lugar "p" é chamado de um lugar-"C" ou um lugar-recurso-variável se "p" é inicialmente marcada com  $M_0(p) > 0$ , e o número de fichas inicial em "p" é variável ( $M_0(p)$  é variável).

Um lugar-"C" pode representar a disponibilidade de matéria prima, pallets, acessórios, etc. Geralmente um Sistema de Manufatura necessita ser projetado de maneira tal que o sistema tenha uma flexibilidade e eficiência muito grande, com o menor número de acessórios ou pallets. A distribuição inicial de fichas sobre todos

os lugares-"C" deverão ser determinados de modo tal que o sistema seja livre de Deadlock.

### 7.1. Metodologia para Síntese dos Modelos de Redes de Petri

A maior vantagem de utilizar uma metodologia para síntese de modelos de RdPs é que uma modelagem detalhada pode ser introduzida numa maneira incremental tal que a complexidade pode facilmente ser tratada (aliviada); e as propriedades importantes da RdP resultante podem ser garantidas de modo que o enorme esforço realizado para a análise matemática das propriedades pode ser evitado.

Este método de síntese (Al-JAAR, 1990), trata lugares-operação e lugares-recurso separadamente, sendo que no estágio inicial, pode-se construir uma RdP numa maneira top-down e numa maneira botton-up no estágio final.

Note-se que uma Exclusão Mútua Paralela (1-PME) modela um recurso compartilhado da seguinte maneira. Uma k-PME modela um recurso compartilhado por diferentes processos em paralelo.

**Teorema 1.** - Suponha que  $R' = (P'_A \cup P'_B \cup P'_C, T', I', O', M'_o)$  é uma sub-rede de  $R = (P, T, I, O, M_o)$ ,  $P = P' \cup (P'_B \cup \{p_E\}) \cup P_C$ ,  $T = T'$ , e  $D = \{(t_{ai}, t_{bi}), i \in N_k\}$ . Se  $(p_E, D)$  é uma k-PME de R, então:

- 1) R é limitada (safe) se R' é limitada;
- 2) R é viva se R' é viva;
- 3) R é reversível se R' é reversível.

A demonstração deste teorema pode ser visto em (FAVREL, 1984).

Por outro lado, uma SME modela um recurso compartilhado seqüencialmente em relação a grupo de processos.

**Definição 4.** - Dada uma Rede de Petri marcada  $R = (P, T, I, O, M_0)$  a capacidade de fichas  $C(t, t')$  entre as transições " $t$ " e " $t'$ " em " $R$ " é o número máximo de disparos de " $t$ " desde a marcação inicial sem disparar " $t'$ ".

Podemos definir, portanto a capacidade de fichas entre duas PMEs consecutivas numa SME e denotá-lo por  $C^i$  para  $1 \leq i \leq L-1$ .  $C^i$  pode entender-se como a capacidade de tarefas que permanecem entre dois grupos de processos.

Para cada RdP tendo uma SME podemos então definir  $\alpha^i(p)$ ,  $p \in P$ , para a  $i$ -ésima PME em sua SME e  $1 \leq i \leq L-1$  como o número mínimo de fichas em  $p$  tal que cada transição na SME possa ser habilitada. Então acharemos o número máximo de disparos da transição  $t$  para uma dada  $M_0(p)$ , assumindo que a outra  $p \in P_C$  tem suficientes fichas. Seja  $\delta^i(p, t)$  proporção mínima de disparos de transições para a marcação inicial  $M_0(p)$  para todos os valores de  $M_0(p)$ .  $\beta^i(p)$  é definido como o maior  $\delta^i(p, t)$  para todo  $t \in T_{ia}$ . Definições formais são achadas em (RAMAMOORTHY, 1980).

**Teorema 2.** - Suponha que  $R' = (P'_A \cup P'_B \cup P'_C, T', I', O', M'_0)$  é uma sub-rede de  $R = (P, T, I, O, M_0)$ ,  $P = P' \cup (P'_B \cup \{p_E\}) \cup P_C$ ,  $T = T'$ , e  $D = D^1 \cup D^2$ ,  $k_i = |D^i| \geq 1$ ,  $D^j = \{(t_{aj}^i, t_{bj}^i), j \in Nk_i\}$ . Seja  $T_a = \{t_{aj}^i, i \in \{1,2\}\}$  e  $T_b = \{t_{bj}^i, j \in Nk_i, i \in \{1,2\}\}$ . Se  $(p_E, D)$  é uma SME, então:

- 1)  $R$  é limitada (safe) se  $R'$  é limitada;
- 2)  $R$  é viva se  $R'$  é viva;
- 3)  $R$  é reversível se  $R'$  é reversível.

A demonstração deste teorema é também visto em (RAMAMOORTHY, 1980).

## 7.2. Módulos de Desenho Básico

O conceito de blocos bem formados proposto por (VALETTE, 1986) é muito importante para problemas de síntese de Redes de Petri. A partir deste conceito,

quatro modelos de desenho básico foram introduzidos por (FAVREL, 1984) para ajudar na síntese de Redes de Petri para sistemas de manufatura que são facilmente aceitos e aplicados quando um problema prático de síntese num contexto de manufatura é encontrado.

Seja  $SP = (P, T, I, O, M_0)$ , onde  $P = \{p_{in}, p_{out}\} \cup P_s$ , e  $p_{in}$  e  $p_{out}$  são dois lugares distintos.  $SP$  é chamado de um lugar "PN block".  $S_T = (P, T, I, O, M_{s0})$  é chamado de uma transição "PN block" se  $T = \{t_{in}, t_{out}\} \cup T_s$ , onde  $t_{in}$  e  $t_{out}$  são duas transições diferentes, como mostra a Figura 12.

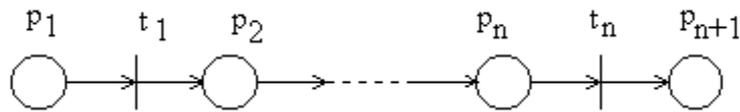


Figura 12 - Definição de uma seqüência PN ( $n > 0$ ) (FAVREL, 1984).

**Definição 5.** - Um módulo seqüencial PN é definido como uma Rede de Petri (Figura 12) se seu lugar "PN block" é formado por:

$$S_P = (\{p_1, p_2, \dots, p_{n+1}\}, \{t_1, \dots, t_n\}, I, O, 0_{n+1})$$

Onde:

$0_{n+1}$  é um vetor zero de dimensão  $n+1$ ,  $p_{in} = p_1$ ,  $p_{out} = p_{n+1}$ .

e sua transição "PN block" é formado por:

$$S_T = (\{p_2, \dots, p_n\}, \{t_1, \dots, t_n\}, I, O, 0_{n-1})$$

e ,  $t_{in} = t_1$ ,  $t_{out} = t_n$ ,  $n > 1$

No contexto de sistemas de manufatura, uma seqüência PN representa uma série de operações sucessivas.

**Definição 6.** - A substituição de um lugar "p" em  $R' = (P' \cup \{p\}, T', I', O', M_0)$  com um lugar "PN block"  $S_P = (\{p_{in}, p_{out}\} \cup P_s, T_s, I_s, O_s, M_{s0})$  resulta numa Rede de Petri refinada  $R = (P, T, I, O, M_0)$  onde:

$$P = \{p_{in}, p_{out}\} \cup P_s \cup P', \text{ e, } T = T_s \cup T'$$

Similarmente, a substituição de uma transição  $t$  em  $R' = (P', T' \cup \{t\}, I', O', M_0)$  com uma transição "PN block"  $S_T = (P_s, \{t_{in}, t_{out}\} \cup T_s, I_s, O_s, M_{s0})$  resulta numa Rede

de Petri refinada  $R = (P, T, I, O, M_0)$ . Assim um lugar ou transição é dita ser substituída por um "PN block".

**Teorema 3.** - (refinamento): Suponha que um lugar ou uma transição em  $R'$  é substituído por um módulo de desenho básico e  $R$  é a rede refinada. Então:

- 1)  $R$  é limitada (safe) se  $R'$  é limitada;
- 2)  $R$  é viva se  $R'$  é viva, e;
- 3)  $R$  é reversível se  $R'$  é reversível.

### 7.3. Descrição do Processo de Sínteses

**passo 1.-** Escolher uma Rede de Petri limitada, viva e reversível como modelo de primeiro nível de um sistema que é executável, quando a maioria dos recursos estão disponíveis, e determinar " $P_A$ ", " $P_B$ " e " $P_C$ ", onde " $P_A$ " e " $P_B$ " estão sujeitos a mudanças enquanto que " $P_C$ " é fixado e seus elementos têm um número variado de fichas inicialmente.

**passo 2.-** decompor o sistema em diversos subsistemas expressados como lugares, e substituir estas operações por módulos de desenhos básicos mais detalhados (refinamento), até que mais divisões sejam impossíveis ou sem necessidade. " $P_A$ " é estendido em cada passo.

**passo 3.-** Adicionar apropriadamente os lugares de recursos não compartilhados em cada estágio, quando uma ou mais operações requeiram os recursos. Os arcos são ligados para os lugares-recursos assim que as condições para uma exclusão mútua paralela sejam satisfeitas. Em cada adição, somente " $P_B$ " é acrescentada.

**passo 4.-** Adicionar os lugares que modelam os buffer (espaço do buffer livre) completando assim a existência dos mesmos no modelo. Cada lugar do buffer terá inicialmente fichas cujo número é igual à capacidade do buffer.

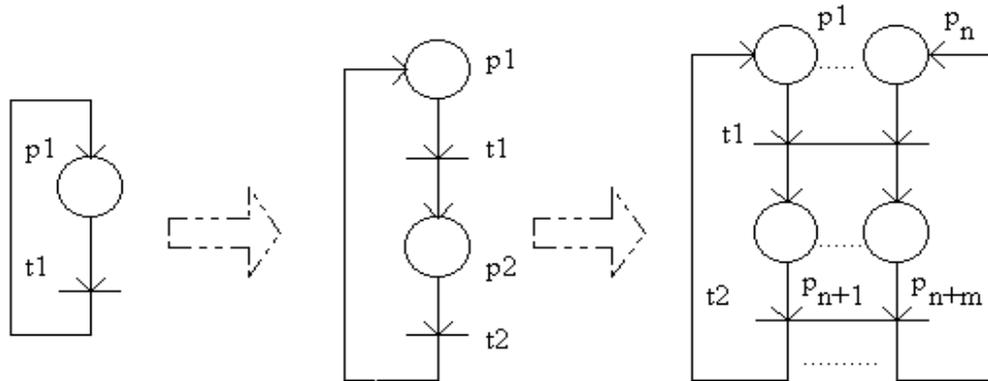
**passo 5.-** Adicionar os lugares-recursos compartilhados " $P_B$ " que formam uma exclusão mútua paralela segundo o teorema 1. Os lugares-recursos são lugares-"B".

**passo 6.-** Adicionar lugares-recursos compartilhados que formam uma exclusão mútua seqüencial e calcular a capacidade de fichas entre suas exclusões mútuas paralelas determinando também o número inicial de fichas em  $p$ ,  $\forall p \in P_c$ , segundo o teorema 2. Os lugares-recursos são adicionados para " $P_B$ ". Finalmente um modelo de Rede de Petri limitado, vivo e reinicializável é sintetizado.

#### **7.4. Desenho de Modelos de RdP de Primeiro Nível**

Para efetuar o procedimento do item anterior, o primeiro passo torna-se com frequência muito crítico, podendo, portanto, se usar uma das duas maneiras básicas de modelos de redes comumente usados para desenhar modelos de Redes de Petri de primeiro nível.

a) Muitos sistemas de manufatura produzem, em geral, diferentes tipos de partes, de diferentes tipos de material e/ou de diferentes entradas. As partes produzidas podem ser usadas, por exemplo, para a montagem em outros sistemas. Neste caso, o desenho da Rede de Petri para tal sistema pode iniciar com uma Rede de Petri simples que contenha um lugar e transição única como mostrado na Figura 13.



**Figura 13 - Dois modelos de RdPs de primeiro nível. a) Rede com uma única posição e transição. b) Rede com um único recurso e operação. c) Caso geral (FAVREL, 1984).**

A Figura 13(a) pode ser primeiro acrescentado para uma rede como na Figura 13(b), a qual modela um sistema com uma única operação e um único recurso. Quando diversos recursos são necessários para iniciar um sistema com diversas operações concorrentes, a extensão da rede anterior pode ser representada pela rede da Figura 13(c).

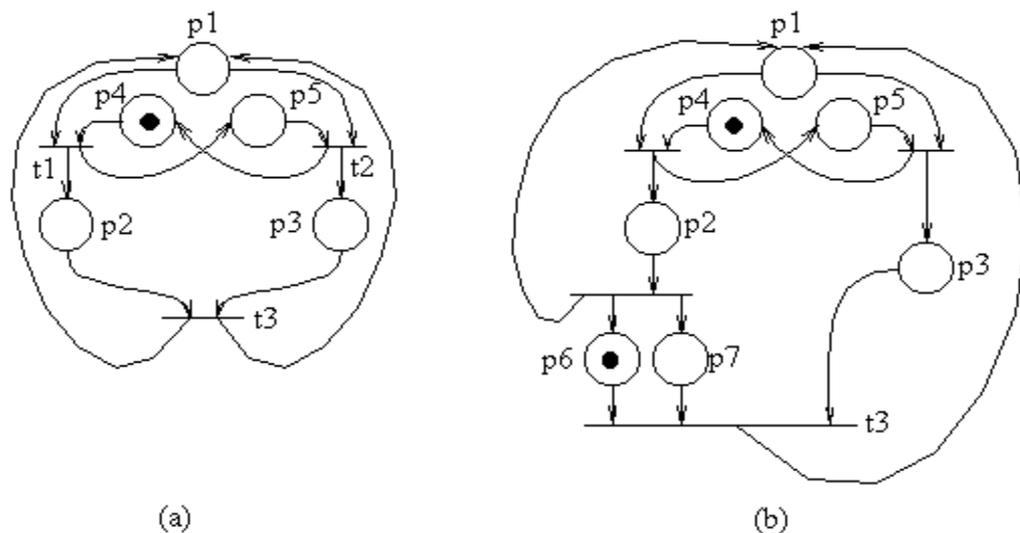
Pode mostrar-se facilmente que esta rede é limitada, viva e reinicializável com respeito à marcação inicial  $M_o(p_i) > 0$  para  $1 < i < n$ . Sendo assim, a rede pode ser interpretada como um sistema onde "m" operações paralelas iniciarão quando "n" recursos estiverem disponíveis, e após a sua finalização, o sistema retorna à condição inicial.

b) Por outro lado, quando um sistema envolve tarefas de montagem e as partes separadas são produzidas com o mesmo tipo de material e na mesma entrada, então a RdP de primeiro nível deverá conter uma estrutura *escolha-sincronização*. O modelo de RdP, portanto, pode ser desenhado como mostra a Figura 14(a) onde é de fato uma RdP generalizada desde que  $Pós(t_3, p_1) = 2$ .

Portanto, ela pode ser facilmente convertida a uma RdP ordinária inserindo um lugar e uma transição extra entre  $t_3$  e  $p_1$ . Deve-se observar aqui que dois lugares de controle,  $p_4$  e  $p_5$ , foram introduzidos para garantir que a transição  $t_1$  seja primeiro habilitada, e que  $t_1$  e  $t_2$  disparem alternativamente quando a marcação inicial for  $(m_o(p_1), 0, 0, 1, 0)^T$  e  $m_o(p_1) \geq 2$ . Esta rede pode ser mostrada como sendo limitada,

viva e reversível com a marcação inicial anterior. Sem os lugares de controle a rede conteria um deadlock.

Para alguns sistemas de manufatura, as partes acabadas têm que seguir uma certa ordem para entrar numa estação de montagem, assim o modelo da rede pode ser desenhado como na Figura 14(b), onde a primeira parte processada necessita entrar primeiro à estação de montagem. P6 pode ser interpretada como a disponibilidade de uma estação de montagem e p7 como a disponibilidade de uma parte na estação. Essa RdP pode ser facilmente modificada para satisfazer diferentes especificações. A RdP mostrada na Figura 14 (b) pode também ser mostrada como sendo limitada, viva e reversível quando  $m_o = (m_o(p_1), 0, 0, 1, 0)^T$  com  $m_o(p_1) \geq 2$ .



**Figura 14 - RdP de primeiro nível para sistemas com uma estrutura sincronização-escolha (FAVREL, 1984).**

Os dois tipos de estruturas básicas mostradas neste item podem, portanto ser utilizados juntos para desenhar uma RdP de primeiro nível e para modelar um sistema complicado.

## 8. ANÁLISE ESTRUTURAL DOS GRAFOS DE EVENTOS DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO

Um grafo de eventos temporizado é uma classe especial de RdP. Este tipo de grafo é geralmente usado para a modelagem e análise de sistemas job-shop. A modelagem nos permite avaliar o desempenho em estado constante de um sistema sob um processo de produção cíclico e determinístico.

Em vista de que os tempos de processamento de cada atividade são fixados previamente, a produtividade do sistema pode facilmente ser determinada desde o estado inicial.

Mostra-se também que, seja qual for a seqüência de tarefas sobre as máquinas, é possível utilizar totalmente alguma máquina em regime permanente com um número finito de tarefas em processo. Isto significa que a taxa de produção máxima é obtida quando essas máquinas (chamadas máquinas gargalo) são utilizadas totalmente (uma condição que sempre pode ser satisfeita).

Este tipo de rede é por natureza fortemente conexa e livre de conflitos, podendo ter sincronizações, e sendo, portanto, o número de lugares maior ou igual ao número de transições.

Num sistema job-shop onde máquinas processam "n" produtos diferentes, podem distinguir-se três tipos de circuitos na rede. a) *Circuitos de comando* (cc) que representam o sequenciamento das tarefas sobre as correspondentes máquinas.

Uma ficha neste tipo de circuito representa a disponibilidade da máquina para processar uma tarefa específica. Além do mais, nestes circuitos, só pode existir uma ficha, já que uma máquina só pode estar habilitada para processar uma tarefa de cada vez. b) *Circuitos de processo* (cp) que representam o fluxo do processamento de cada produto. Fichas circulando neste tipo de circuito representarão, portanto, produtos em processo ou "pallets".

Além destes circuitos básicos, existem outros tipos de circuitos elementares na rede que incluem nós de ambos os circuitos anteriormente citados. Tais circuitos são chamados de circuitos mistos.

## 8.1. Avaliação do Desempenho

Quanto à análise do desempenho (RIGHINI, 1993) mostrou que o número total de fichas em qualquer circuito elementar é invariante, sendo que um circuito elementar é um caminho que vai de um nó (lugar ou transição), e após "n" disparos volta ao mesmo nó, sem que nenhum outro nó seja repetido.

Sendo assim, para qualquer circuito elementar "c", o tempo de ciclo será definido por:

$$TC(c) = u(c)/M(c) \quad (8.1)$$

Onde:

- $u(c)$ , denota a soma dos tempos de disparo das transições do circuito;

- $M(c)$ , é o número de fichas circulando no circuito.

Sendo, portanto o tempo de ciclo máximo igual a:

$$T = \max (TC (c_i)) \quad (8.2)$$

É importante neste ponto observar que  $TC(c)$  pode ser calculado diretamente da distribuição inicial de fichas  $M_o$ , desde que a equação 8.1 implique que  $M(c) = M_o(c)$ .

Aqueles circuitos "c" para os quais o tempo de ciclo é máximo são chamados de circuitos críticos. Tais circuitos são, portanto, aqueles que irão determinar a produtividade do sistema em regime. Mais precisamente para um grafo a eventos temporizado fortemente conectado, onde transições disparam assim que elas sejam habilitadas, o índice de disparo de todas as transições em estado constante (ou regime permanente) é dado por:

$$\lambda = 1 / T = \min. (1 / TC) \quad (8.3)$$

Tal índice (taxa de produtividade) é alcançado após uma quantidade finita de tempo, onde o sistema atinge um comportamento periódico; sendo a mesma imposta pelos circuitos críticos. Portanto, para determinar o índice de produtividade usando a equação 8.3 é necessário determinar todos os circuitos elementares da rede. Neste caso as soluções de  $X^T C = 0$  conduzem a um conjunto de circuitos elementares da

rede. O número destes circuitos é  $n_p - n_t + 1$ . A enumeração de todos os circuitos da rede será também útil para minimizar o número total de fichas na rede.

Caso  $T = TC_{(cc)}$ , sendo "cc" um circuito de comando; então a máquina gargalo estará plenamente utilizada. Assim, o limite superior da produtividade será determinado pelo tempo de ciclo da máquina gargalo.

## 8.2. Funcionamento em Velocidade Máxima

Como visto no parágrafo anterior, o limite superior da produtividade será determinado pelo tempo de ciclo da máquina gargalo ( $T_0$ ), o qual garante a máxima produtividade do sistema.

Seja então  $\lambda_0 = 1 / T_0$  o correspondente índice, se o sistema estiver funcionando neste índice, então a máquina gargalo será totalmente utilizada. Em termos de Redes de Petri, isto significa que o correspondente circuito de comando (isto é, aquele com o máximo TC) é crítico. O problema é agora determinar se este índice é alcançável, e se é, sob que condições.

Este problema foi mostrado em (VALETTE, 1986) que para um sistema flow-shop ali existe sempre uma distribuição finita de recursos (isto é, uma marcação inicial dos lugares recurso-variado), tal que a máquina gargalo seja totalmente utilizada em regime permanente. Permitindo tarefas estarem em processo no estado inicial, pode-se generalizar este resultado para um sistema job-shop (DOS SANTOS, 1993).

Sendo assim, nós podemos escrever a equação 8.4 na forma seguinte:

$$T_0 = \max (\max (C_{(cc)}), \max (C_{(\Psi)})) \quad (8.4)$$

Onde "cc" representa um circuito de comando e  $\Psi \neq cc$  representa qualquer outro tipo de circuito. Por definição temos que:

$$T_0 = \max (C_{(cc)}) \quad (8.5)$$

é o índice no qual a máquina gargalo é utilizada plenamente.

Ora, um circuito  $\gamma$  o qual não é um circuito de comando contém no mínimo um lugar o qual é um Buffer ou um lugar recurso-variado. Se nós colocarmos bastantes fichas neste lugar (numa quantidade finita), nós podemos fazer sempre o tempo de ciclo  $TC(\gamma)$  menor que  $T_0$ , garantindo assim a plena utilização da máquina gargalo.

Já que o número de fichas em qualquer circuito de comando é 1, nós temos que para  $i = 1, 2, \dots, k$ :

$$u(\gamma_i) \leq k \cdot T_0 \quad (8.6)$$

além do mais, supondo que cada Buffer e lugar recurso-fixos contenha exatamente uma ficha,

$$M(\gamma) \geq k \quad (8.7)$$

tendo portanto, a partir das equações 8.6 e 8.7, para qualquer circuito  $\gamma \neq cc$

$$TC(\gamma) = (u(\gamma) / M(\gamma)) \leq T_0 \quad (8.8)$$

Este resultado é importante por duas razões: primeiro, ele provê diretamente o estado inicial que sempre leva à total utilização da máquina gargalo em regime permanente (seja qual for o processo de manufatura, assim como a seqüência de tarefas sobre as máquinas). Segundo, deduz-se deste resultado um limite superior para o número de recursos (pallets) necessários para assegurar a máxima produtividade do sistema.

Considerando  $M_{\min}(\gamma)$  como o número mínimo de fichas no circuito " $\gamma$ " para qualquer circuito elementar, tal que  $TC(\gamma) \leq T_0$ , isto é:

$$M_{\min}(\gamma) - 1 < u(\gamma) / T_0 \leq M_{\min}(\gamma) \quad (8.9)$$

onde  $T_0$  representa o tempo de ciclo da máquina gargalo (equação 8.5), a seguinte condição é necessária e suficiente para assegurar a total utilização da máquina gargalo em regime permanente. Para qualquer circuito elementar " $\gamma$ "

$$M_0(\gamma) \geq M_{\min}(\gamma) \quad (8.10)$$

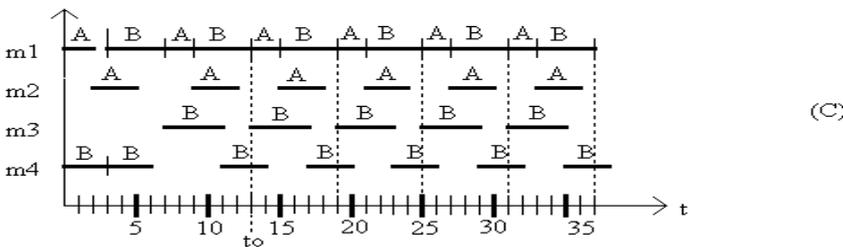
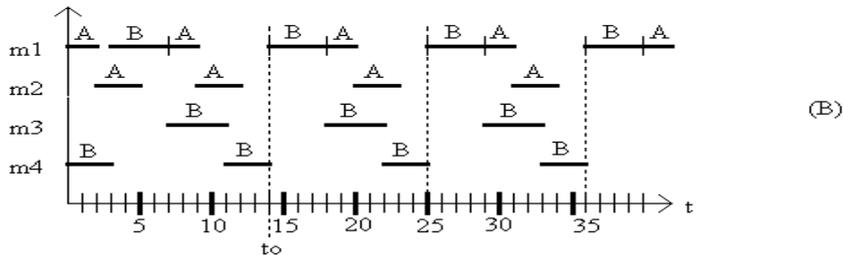
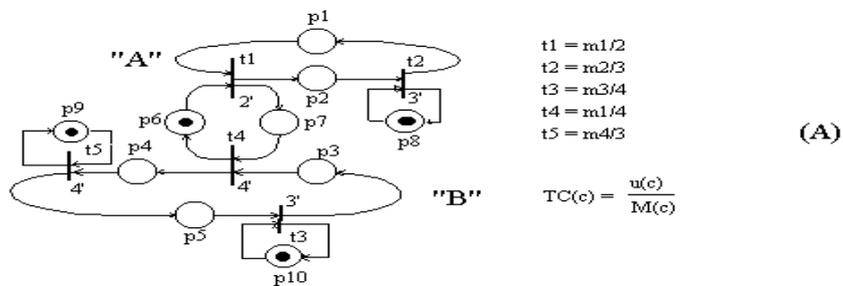
onde  $M_0$  é a marcação inicial, a qual determina unicamente o número total de fichas num circuito em qualquer estado do sistema.

O seguinte exemplo foi tomado de (RILLO, 1988) para ilustrar os conceitos emitidos, sendo que consideraremos também o caso quando o número de peças no buffer para o produto B seja igual a 1.

Ex: Consideremos o grafo a eventos da Figura 15, onde quatro máquinas produzem dois tipos de produtos A e B, definidos pelos seguintes processos.

A: (m1/2, m2/3)

B: (m4/3, m1/4, m3/4)



**Figura 15 - Grafo a eventos do sistema, e a evolução da sua execução a partir do estado inicial (RILLO, 1988)**

Os circuitos elementares obtidos no grafo são três que correspondem às tarefas A e B (circuitos de processo), e o circuito que corresponde ao circuito de comando da máquina  $m_1$ . Sendo os tempos gastos em cada circuito os seguintes:

$$c_1 = 2+3 = 5, \quad c_2 = 3+4+4 = 11, \quad c_3 = 2+4 = 6$$

a) Consideremos primeiro que a marcação inicial seja  $M_0 = (1, 0, 0, 0, 1)^T$ , neste caso o grafo (b) da Figura 15 mostra a evolução do grafo a partir do estado inicial considerado, tendo, portanto que o tempo de ciclo máximo do sistema é igual a:

$$T = \text{máx. TC}(c_i) = \text{máx} (5, 11, 6) = 11 \text{ unidades de tempo}$$

Portanto o circuito " $c_2$ " é um circuito crítico. Assim o sistema atingirá um comportamento periódico em regime permanente com período  $T = 11$ . Sendo sua taxa de produtividade  $\lambda = 1 / 11$ , ou seja, uma peça de cada tipo é completada a cada 11 unidades de tempo.

Note-se que neste caso a máquina gargalo não esta sendo plenamente utilizada.

b) Agora, consideremos uma marcação inicial  $M_0 = (1, 0, 0, 0, 2)$ . O grafo (c) da Figura 15 anterior mostra sua evolução a partir de seu estado inicial. Neste caso observa-se que o sistema atinge um comportamento periódico em regime permanente com  $T = 6$  e máxima taxa de produtividade (pleno uso da máquina  $m_1$ ). Sendo neste caso a taxa de produtividade de  $\lambda = 1 / 6$ , ou seja, uma peça de cada tipo é completada a cada 6 unidades de tempo.

Neste caso  $c_2 = 11 / 2 = 5.5$ , devido a que existem duas fichas no circuito.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-JAAR, R. (1990). Performance Evaluation of Automated Manufacturing Systems Using Generalized Stochastic Petri Net. *IEEE Transaction on Robotic and Automation*, Vol. 6 , 621-639.
- DOS SANTOS, D. (December de 1993). Proposta do Mark Graph Estendido para a Modelagem e Controle de Sistemas de Manufatura. *IEEE Transaction on Robotics and Automation* , pp. 106-118.
- FAVREL, R. (August de 1984). Modelling, Analyzing, Scheduling and Control of Flexible Manufacturing System by Petri Nets. in IFIP Conf. Production System, Copenhagen, Amsterdam: North-Holland, pp. 223- 243, aug. (1984). *IFIP Conf. Production System* , pp. 223-243.
- GRISLAIN, J. (1979). *Graphical Methods for Production Control*. New York: John Willey.
- HACK, P. (1972). Analysis of Production Schemata by Petri Nets. *Master of Science Dissertation Thesis* (pp. 74-82). MIT.
- RAMAMOORTHY, J. (1980). Performance Evaluation of Asynchronous Concurrent System Using Petri Nets. *IEEE Transaction on software Engineering*, vol. SE-6, n. 5 , 440-449.
- RIGHINI, G. (1993). Modular Petri Nets for Simulation of Flexible Production System. *Int. J. Prod. Res.* , pp. 2463-2477.
- RILLO, M. (1988). *Aplicações de Redes de Petri em sistemas de Manufatura*. São Paulo: Adusp.
- VALETTE, R. (July de 1986). Nets in Producyion System. *Lecture Notes in Computer Science 255* , pp. 191-207.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)