

Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Informática

Pós-Graduação em Ciência da Computação

Modelagem de Políticas de Estoques: uma abordagem
baseada em Redes de Petri

Dissertação de Mestrado

por

Mauro José Carlos e Silva

Recife

19 de novembro de 2004

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE INFORMÁTICA

MAURO JOSÉ CARLOS E SILVA

Modelagem de Políticas de Estoques: uma abordagem
baseada em Redes de Petri

Este trabalho foi apresentado à Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Paulo Romero Martins Maciel

Recife, 19 de novembro de 2004

Silva, Mauro José Carlos e

Modelagem de políticas de estoques : uma abordagem baseada em Redes de Petri / Mauro José Carlos e Silva. - Recife : O Autor, 2004.

xi, 121 folhas : il., fig., tab.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco. CIn. Ciência da Computação, 2004.

Inclui bibliografia.

1. Ciência da computação - Engenharia da computação. 2. Sistema de produção - Redes de Petri - Políticas de estoques. 3. Redes de Petri - Modelos e análises. 4. Redes de Petri temporizada - Escalonamento. I. Título.

004.02

CDU (2.ed.)

UFPE

004.2

CDD (22.ed.)

BC2005-271

AGRADECIMENTOS

Gostaria de registrar meus agradecimentos como um reconhecimento sincero da dedicação das muitas pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao Professor Paulo Maciel, Doutor, pela orientação, paciência, conselhos e amizade, pela constante disposição em tirar minhas (muitas) dúvidas, pela experiência compartilhada, dentro e fora do escopo do trabalho, bem como em me guiar para que eu não saísse do caminho e me perdesse em divagações fora do escopo do Projeto. Um verdadeiro ORIENTADOR.

Aos Professores Tomaz Barros, Doutor, e Ricardo Massa, PhD, pela disponibilidade em participarem da banca examinadora, contribuindo com seus comentários para melhorar a qualidade deste trabalho.

À FITec, na pessoa de Ernesto Antunes, pelo apoio, conselhos e disponibilidade para execução deste trabalho.

Aos colegas do “Grupo de Alunos e Amigos do Professor Paulo”, todos companheiros de redes de Petri. Agradeço também, a todos os amigos que, ao longo deste projeto, entenderam minha ausência.

Ao amigo Wellington Silva, pela parceria, apoio e amizade desde o início do mestrado, especialmente pelas discussões sobre sistemas de manufatura onde se encaixa este trabalho.

À Grande família Sampaio, nas pessoas de Estér e Carlos, que não mediram esforços para me apoiar, incentivar e principalmente em me acolher na sua família.

Ao amigo, tio e pai, Kleuber (*in memoriam*), pelo incentivo, apoio, exemplo, amor e dedicação dispensada a mim e a minha família.

Por último, mas não menos importante, expresso minha gratidão, que não conhece limites, à minha família. Agradeço pelo apoio, compreensão, amor e dedicação, principalmente aos meus pais Mauro de Almeida e Fátima Carlos e às minhas irmãs Aninha e Patrícia.

Em especial agradeço aos meus filhos Letícia, Rafael e Kevin, que me deram poder de renovação para concluir este trabalho. Por fim, agradeço a minha companheira desta (e de outra) vida Suzana, pela inspiração e pelo amor.

RESUMO

Devido à globalização dos mercados, diversos esforços têm sido feitos para o desenvolvimento de soluções que aumentem a competitividade no processo de produção do parque industrial estabelecido. Conseqüentemente, diversos estudos e um grande investimento em pesquisa têm sido feito nos sistemas de produção.

Motivado por estes fatos, esta proposta de trabalho sugere o desenvolvimento de uma metodologia de modelagem dos sistemas de manufatura, voltada para análise e estimativa de políticas de estoques adotadas pela organização.

Inicialmente sugere-se o desenvolvimento da metodologia de modelagem da estrutura do produto, assim como das informações relativas ao estoque. Os modelos obtidos poderão ser analisados com relação às suas propriedades qualitativas. Através destas análises, consegue-se determinar propriedades e características que não são interessantes no ambiente de produção. Com isso, consegue-se prevenir falhas, erros de planejamento e comportamentos indesejáveis no âmbito dos sistemas produtivos.

Os modelos propostos neste trabalho possibilitam analisar valores adotados para a política de estoque da organização. Avaliação destes modelos permite identificar situações que provoquem interrupções inesperadas nos sistemas de produção. Aplicando o modelo proposto é possível determinar *quando* e de *quanto* o estoque será repostado. Desta forma, evita-se uma alocação desnecessária de recursos para a produção, reduzindo os custos totais.

Esta metodologia também poderá ser aplicada para o escalonamento dos sistemas produtivos. Fornecendo respostas às principais questões existentes no campo de controle e gerenciamento da produção.

Palavras-chave: Redes de Petri, Sistema de Produção, Metodologia de Modelagem, Política de Estoque e Análises.

ABSTRACT

In response to the markets globalization, diverse efforts have been made for the development of solutions that increase the production process competitiveness of the established industrial park. Consequently, diverse studies and a great research investment have been done in the production systems.

Motivated by these facts, this work proposal suggests a modeling methodology for manufacturing systems, directed toward analysis and estimation inventory policy for the organization.

Initially the modeling methodology development of the product structure is suggested, as well as of the relative information to the inventory. The obtained models could be analyzed with relation to its qualitative properties. Through these analyses, it is capable to determine properties and characteristics that are not interesting in the production's environment. Doing so, it can prevent imperfections, undesirable errors of planning and behaviors in the scope of the systems production.

The models considered in this work make it possible to analyze values adopted for the inventory policy of the organization. Evaluation of these models allows these situations to be identified, provoking unexpected interruptions in the production's systems. Applying the considered model, it is possible to determine *when* and *how much* of the inventory will be restituted. This way, an unnecessary allocation of resources for the production is prevented, reducing the total costs of production.

This methodology could also be applied for the system production scheduling. Supplying answers to the main existing questions about control and management production field.

Keywords: Petri Nets, Production System, Modeling Methodology, Inventory Policy, and Analysis.

SUMÁRIO

Capítulo 1—Introdução	1
1.1 Contexto	1
1.2 Problemas de Escalonamento	2
1.3 Problemas de Estoque	2
1.4 Método Formal	3
1.5 Motivação	4
1.6 Objetivos	5
1.7 Trabalhos Relacionados	6
1.8 Contribuições	7
1.9 Organização	8
Capítulo 2—Sistemas de Produção	9
2.1 Introdução	9
2.2 Evolução Histórica	10
2.3 Papel Estratégico dos Sistemas de Produção	10
2.3.1 Sistemas de Administração da Produção	11
2.3.2 Gerenciamento da Produção	12
2.4 Técnicas de Produção	14
2.4.1 <i>Just In Time</i>	14
2.4.2 <i>MRP e MRP II</i>	15
2.4.3 <i>OPT</i>	16
2.5 Planejamento Mestre da Produção	17
2.6 Estrutura do Produto	18
2.6.1 Estrutura de Produto de Manufatura	20
2.7 Controle de Estoque	21
2.7.1 Sistemas de Controle de Estoques	22
2.7.1.1 Sistema de Reposição Contínua	23
2.7.1.2 Sistema de Reposição Periódica	24
2.8 Considerações Finais	24
Capítulo 3—Redes de Petri	26
3.1 Introdução	26
3.2 Aspectos Históricos	26
3.3 Componentes de uma rede de Petri	27
3.4 Redes Place-Transition	29

3.4.1	Estrutura Definda em <i>Bag</i>	29
3.4.2	Estrutura Definda em Matriz	29
3.4.3	Rede de Petri Marcada	30
3.4.4	Regras de Execução	30
3.4.5	Matriz de Incidência	31
3.4.6	Grafo de Marcações Acessíveis	31
3.5	Redes de Petri e suas Classes	32
3.5.1	<i>Free-Choice Nets</i>	33
3.6	Extensão Temporizada	33
3.6.1	Timed Petri Nets	33
3.7	Propriedades das Redes de Petri	35
3.7.1	Propriedades Comportamentais	35
3.7.1.1	Alcançabilidade	35
3.7.1.2	Limitação	36
3.7.1.3	Segurança	36
3.7.1.4	<i>Liveness</i>	37
3.7.2	Propriedades Estruturais	37
3.7.2.1	Limitação Estrutural	37
3.7.2.2	Conservação	37
3.7.2.3	Consistência	38
3.8	Análise das Redes de Petri	38
3.8.1	Árvore de Cobertura	38
3.8.2	Redução	39
3.8.2.1	Fusão de Lugar Serial	39
3.8.2.2	Fusão de Transição Serial	39
3.9	Síntese em Redes de Petri	39
3.9.1	Método <i>Top-Down</i>	40
3.9.1.1	Refinamento de Lugares	40

Capítulo 4—Metodologia de Modelagem 41

4.1	Introdução	41
4.2	Informações para Metodologia Proposta	42
4.3	Modelando a Estrutura do Produto	46
4.4	Modelo Completo de Sistemas de Produção	48
4.4.1	Modelo Complementar Lugar-Transição	54
4.4.2	Construção do Modelo Completo	55
4.4.3	Metodologia	59
4.4.4	Refinamento do Modelo	60
4.5	Construindo o modelo da Estrutura do Produto	61
4.6	Considerações Finais	64

Capítulo 5—Análise dos Modelos	67
5.1 Introdução	67
5.2 Políticas de Estoque	68
5.3 Considerações Gerais sobre a Análise	71
5.4 Análise do Modelo	73
5.4.1 Gerar Grafo de Alcançabilidade	74
5.4.2 Analisar Interrupções na Produção	74
5.4.3 Geração do Escalonamento global da produção	77
5.4.4 Determinar Quantidades de Estoque Período-a-Período	79
5.4.5 Determinar Caminho Crítico da Produção	81
5.4.6 Calcular Valor Empenhado para Estoque	81
5.5 Aplicando o Método de Análise	82
5.5.1 Analisar interrupção da produção	83
5.5.2 Construindo o Escalonamento	85
5.5.3 Determinando Níveis em Estoque	87
5.5.4 Determinando o Caminho Crítico	87
5.5.5 Determinando o Valor do Estoque	88
5.6 Considerações Finais	88
Capítulo 6—Estudo de Caso	90
6.1 Introdução	90
6.2 Produção LAFEPE	90
6.2.1 Linha de Produção AAS	92
6.3 Produção CPA	92
6.3.1 Linha TRONIX	94
6.4 Escopo do Estudo de Caso	95
6.5 Modelo Redes de Petri para AAS	95
6.5.1 Análise AAS	97
6.5.1.1 Análise de Interrupção	99
6.5.2 Níveis em Estoque	100
6.5.2.1 Escalonamento Glogal da Produção	101
6.5.3 Caminho Crítico	102
6.5.4 Valor do Estoque	102
6.6 Modelo Redes de Petri para Tronix	105
6.6.1 Análise TRONIX	108
6.6.1.1 Análise de Interrupção	109
6.6.1.2 Escalonamento Glogal da Produção	109
6.6.2 Níveis em Estoque	110
6.6.3 Caminho Crítico	111
6.6.4 Valor do Estoque	111
6.7 Considerações Finais	112

LISTA DE FIGURAS

2.1	Relação entre Tecnologia e Administração na Manufatura	11
2.2	PMS - <i>Production Management System</i>	14
2.3	Funcionamento do MRPII	16
2.4	Exemplo de Estrutura de Produto simples	19
2.5	Exemplo de Estrutura de Produto de Manufatura	21
2.6	Redução dos estoques para expor os problemas dos processos.	22
2.7	Gráfico <i>dente-de-serra</i> para reposição contínua.	24
2.8	Gráfico para reposição periódica.	25
3.1	Elementos básicos	28
3.2	Períodos do dia representado com redes de Petri.	29
3.3	Abstração X Interpretação.	32
3.4	Rede de Petri Marcada	36
3.5	Refinamento de Lugar.	40
4.1	Modelo de sistemas e ambientes	41
4.2	Modelos equivalente: Grafo Direcionado e Estrutura do Produto	42
4.3	Atributos na Estrutura do Produto.	44
4.4	Níveis de itens na Estrutura do Produto.	44
4.5	Estrutura de Produto simplificada.	48
4.6	Produto mapeado em uma rede de Petri.	49
4.7	Conexão mapeada na rede de Petri.	50
4.8	Modelo <i>Input-Flow</i>	51
4.9	Modelo <i>Output-Flow</i>	52
4.10	Modelo <i>Closure</i>	52
4.11	Modelo Componente-Simples	53
4.12	Modelo Componente-Estoque	54
4.13	Modelo <i>Conexão</i>	55
4.14	Modelo Lugar-Transição	55
4.15	Fusão entre IFM e MCS	57
4.16	Fusão entre MCS e CNM	58
4.17	Fusão entre MCS e OFM	59
4.18	Estrutura do Produto da fabricação de Mesa.	63
4.19	Modelo completo	65
5.1	Modelo Componente-Estoque	69
5.2	Diagrama de tempo das operações da estrutura do produto.	72

5.3	Estrutura do arquivo de um Grafo de Alcançabilidade Temporizado. . . .	78
5.4	Estados de um Grafo de Alcançabilidade Temporizado.	79
5.5	Diagrama Temporal.	80
5.6	Estrutura do Produto para análise.	82
5.7	Modelo rede de Petri da estrutura do Produto para análise.	83
5.8	Gráfico do Escalonamento das operações de produção	85
5.9	Gráfico de utilização de estoque no tempo	87
6.1	Fluxo de Produção LAFEPE	92
6.2	Fluxograma de Produção AAS	93
6.3	Linha de produção TRONIX.	94
6.4	Estrutura do Produto do AAS	96
6.5	Modelo redes de Petri AAS.	98
6.6	Utilização do estoque para TA.	100
6.7	Utilização do estoque para PL.	101
6.8	Escalonamento das operações de TA para o primeiro intervalo	102
6.9	Escalonamento das operações de TA para o segundo intervalo	102
6.10	Escalonamento das operações de PL para o primeiro intervalo	103
6.11	Escalonamento das operações de PL para o segundo intervalo	103
6.12	Estrutura do produto TRONIX.	105
6.13	Modelo completo da rede TRONIX.	106
6.14	Modelo reduzido da rede TRONIX.	108
6.15	Escalonamento das operações.	110
6.16	Utilização do estoque.	111
6.17	Tabela de estados.	113

LISTA DE TABELAS

3.1	Algumas interpretações típicas para lugares e transações	28
4.1	Lista de Materiais da fabricação de Mesa.	62
4.2	Informações de Estoque da fabricação de Mesa.	63
4.3	Mapeando os itens nos elementos da rede de Petri.	64
4.4	Mapeando os itens às conexões existentes.	66
4.5	Fusão entre elementos da rede.	66
4.6	Valores do estoque mapeados na rede.	66
5.1	Valores utilizados no algoritmo <i>Plotar Diagrama Temporal</i>	80
5.2	Lista de Materiais	82
5.3	Informações de Estoque	83
5.4	Valores de resultado do algoritmo	84
5.5	Valores obtidos do grafo para <i>Plotar Diagrama Temporal</i> do exemplo. . .	86
6.1	Lista de Materiais AAS.	97
6.2	Informações de Estoque AAS.	97
6.3	Informações de Estoque AAS.	99
6.4	Determinando tempo de reposição ótimo.	99
6.5	Lista de Materiais TRONIX.	107
6.6	Informações de Estoque TRONIX.	107
6.7	Informações de Estoque TRONIX.	108
6.8	Determinando tempo de reposição ótimo para linha TRONIX.	109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Segue lista de siglas e acrônimos adotados durante todo o trabalho:

RdP redes de Petri.

ERP *Enterprise Resource Planning*.

WIP *Working In Process*.

MRP *Material Requirements Planning* (Planejamento das Necessidades de Material).

MRPII *Manufacturing Resources Planning* (Planejamento dos Recursos da Manufatura).

JIT *Just In Time*.

OPT *Optimized Production Technology*.

ASAP *As Soon As Possible* (tão logo quanto possível).

ALAP *As Late As Possible* (tão tarde quanto possível).

PPCP Planejamento, Programação e Controle da Produção.

PCP Planejamento e Controle da Produção.

AMS *Automated Manufacturing Systems*.

SAP Sistemas de Administração da Produção.

CPM *Critical Path Method* (Método do Caminho Crítico).

BOM *Bill of Material* (Lista de Material).

FMS *Flexible Manufacturing System* (Sistema Flexível de Manufatura).

CIM *Computer Integrated Manufacturing* (Manufatura Integrada por Computador).

PMS *Production Management System* (Sistema de Gerenciamento da Produção).

PMP Planejamento Mestre da Produção.

APICS *American Production and Inventory Control Society*.

PDM *Product Data Management* (Gerenciamento de Dados de Produtos).

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada uma introdução ao gerenciamento de produção, particularmente à política de estoque nos sistemas produtivos. Em seguida, é abordado de forma sucinta, a origem e objetivo de redes de Petri no contexto de sistema de produção. Finalmente, é feita uma breve apresentação da proposta do trabalho, abordando o escopo e sua contribuição.

1.1 CONTEXTO

Desde o início da década de 50, que se constituiu uma época de grandes mudanças na gestão e organização do sistema produtivo das indústrias em todo o mundo. Um grande número de mudanças marcantes ocorreram particularmente ao desenvolvimento tecnológico das máquinas, sistemas de informações, automação, robótica, entre outros. Estes avanços tornaram possível um planejamento e controle mais eficiente das operações de produção.

Atualmente, empresas de grande porte têm voltado seus interesses à implantação de sistemas caríssimos de gestão integrada (ERP - *Enterprise Resource Planning*). Tais sistemas, apesar de bastante avançados, deixam a desejar no que diz respeito ao gerenciamento de operações do chão de fábrica e na integração com os recursos que realmente produzem e geram riquezas. Em geral, sistemas ERP não atendem às necessidades específicas de cada operação da produção. É comum que após a aquisição e implantação destes sistemas, sejam necessárias instalações e integrações de *software* específicos, como os de planejamento e controle da produção (PCP).

O mercado atual apresenta inúmeras possibilidades de aplicativos (*software*) para apoiar a implantação e as decisões decorrentes destes sistemas. Em geral, estes *software* possuem algumas das funcionalidades abaixo:

- emitir ordens de produção e possuir informações de custos dos produtos;
- controlar os setores por onde o produto está transitando, bem como ter informações de sobrecarga de cada centro produtivo;
- fazer a alocação direta do custo sobre as quantidades produzidas. Fazer o rateio dos custos indiretos aos produtos, para que no final do mês seja possível saber o custo de cada produto individualmente;
- possuir previsões de necessidades de materiais a partir da curva de estoque baseada no lote econômico, estoques mínimos e consumo médio histórico;

- requisitar materiais de forma automática ao almoxarifado para execução de ordens de produção;
- integração com departamento contábil da organização.

É importante compreender que as informações sobre prazos e, mais detalhadamente, sobre custos inerentes ao processo produtivo, são de grande importância para situações de controle e tomada de decisão.

1.2 PROBLEMAS DE ESCALONAMENTO

No atual ambiente competitivo, o escalonamento efetivo tornou-se uma necessidade para sobrevivência no mercado. As organizações devem esforçar-se ao máximo para cumprir as datas firmadas com seus clientes, e o fracasso deste comprometimento pode resultar em perdas significantes da imagem da empresa perante os clientes [PC99].

A função do Escalonamento nas indústrias, no sentido mais amplo, visa estabelecer datas e quantidades específicas, para todos os produtos considerando o tempo das ordens de serviços existentes na produção. Os recursos podem ser compartilhados ao longo do tempo para executar operações a fim de atingir os objetivos da produção, como por exemplo, redução do WIP (*Work In Process*) e minimização de atrasos de ordens de fabricação ou *jobs*, atendimento de prazos (ou datas de entrega), minimização do tempo de fluxo dos estoques intermediários e na maximização da utilização da capacidade disponível, ou mesmo na combinação de todos estes objetivos [WAL99].

1.3 PROBLEMAS DE ESTOQUE

Inúmeros são os fatores que podem vir representar problemas para o gerenciamento do estoque em uma organização. Um deles diz respeito à política de estoques adotada para garantir a produtividade e liquidez da organização.

Um dos dilemas que vivem as organizações tem que considerar o seguinte: *quanto a empresa deverá estocar?* Em posições diferentes, o departamento de vendas deseja que o estoque seja elevado para atender melhor o cliente, a área de produção também prefere trabalhar com uma maior margem de segurança, ao passo que o departamento financeiro almeja os estoques reduzidos para reduzir o investimento de capital, objetivando melhorar seu fluxo de caixa.

Este é um problema típico que pode ser resolvido adotando-se uma política de estoques adequada, para que os interesses da organização sejam atendidos e os clientes satisfeitos. O planejamento é um dos principais instrumentos para o estabelecimento de uma política de estoque eficiente. Para isto, a organização deverá acompanhar sistematicamente os seguintes pontos:

- acompanhar os itens em estoque, verificando lucratividade e posicionamento da empresa no mercado;
- acompanhar o recebimento e a armazenagem correta das mercadorias;

- acompanhar inventários periódicos para avaliação das quantidades e do estado dos materiais estocados;
- acompanhar o tempo de reposição de cada mercadoria.

O acompanhamento destes pontos ajudará dimensionar o estoque de maneira mais eficiente. Este dimensionamento significa definir as quantidades corretas de cada item que devem estar no estoque em um determinado período de tempo para que a organização não sofra nenhum prejuízo.

1.4 MÉTODO FORMAL

A adoção de modelos formais, no contexto de sistemas de produção, pode prover um auxílio matemático importante para o controle da produção. Redes de Petri são uma ferramenta gráfica e matemática de modelagem (descrição/especificação) que podem ser aplicadas em diversos tipos de sistemas apresentando um bom nível de abstração em comparação com outros modelos. As redes de Petri são formadas por dois tipos de componentes: um ativo denominado de *transição* e outro passivo denominado *lugar*. Os lugares correspondem às variáveis de estado e as transições às ações (eventos) realizadas pelo sistema.

As redes de Petri tem sido amplamente utilizadas para modelar, analisar, simular e controlar sistemas de manufatura¹ [Desrochers & Al-Jaar, 1994]. Elas conseguem fornecer modelos úteis, pois:

- abstraem as relações de precedência e interações estruturais de eventos concorrentes e assíncronos;
- a natureza gráfica ajuda na visualização de grandes sistemas;
- conflitos e tamanhos de *buffers* podem ser modelados de maneira fácil e eficiente;
- travamentos do sistema podem ser detectados;
- várias extensões de redes de Petri (temporizada, estocástica, colorida, etc.) permitem análises qualitativas e quantitativas de utilização de recurso, falhas, taxa de processamento, etc;
- os modelos podem ser utilizados para implementar sistemas de controle de tempo real para sistemas flexíveis de manufatura (FMS); etc.

De acordo com [CV97], por ser uma ferramenta gráfica e matemática, as redes de Petri são adaptáveis a várias aplicações em que são importantes os conceitos de eventos e evoluções simultâneas de um sistema.

¹Neste trabalho será utilizado indistintamente os termos sistema de produção e sistema de manufatura.

1.5 MOTIVAÇÃO

No atual ambiente competitivo, as organizações devem esforçar-se ao máximo para cumprir as datas firmadas com seus clientes. O fracasso deste comprometimento, pode resultar em uma perda significativa da imagem da organização, além de ter impactos financeiros negativos.

O não cumprimento destes prazos pode ter inúmeras causas. Dentre elas estão: o escalonamento da produção mal planejado compromete a eficácia e a alocação dos recursos para execução das atividades do sistema; e a falta de uma política bem estabelecida de estoque, pode causar interrupções (paradas) na linha de produção.

O escalonamento é uma das atividades que compõem o planejamento da produção. Nele são levados em consideração uma série de elementos que disputam recursos por um período de tempo. Recursos esses que possuem uma capacidade máxima associada. Os principais objetivos tratados na questão do escalonamento podem ser resumidos em:

- atender devidamente os prazos (ou datas de entrega);
- minimizar tempo de fluxo de estoques intermediários;
- maximizar utilização da capacidade disponível.

Além do escalonamento e outras preocupações no âmbito da produção, existe uma atenção permanente na administração eficiente de estoques. Os estoques afetam as operações diárias, porque precisam ser contados, pagos, empregados em operações, usados para satisfazer os clientes e gerenciados. As organizações geralmente estão envolvidas em um dilema: *quando* e de *quanto* repor.

Uma saída para se determinar de maneira eficiente os tempos e quantidades aceitáveis pela produção, é a adoção de uma política de estoque. O planejamento é um dos principais instrumentos para o estabelecimento de uma política de estoque eficiente. Para isto, a organização deve acompanhar sistematicamente:

- os itens em estoque, verificando lucratividade e posicionamento da empresa no mercado;
- o recebimento e o correto armazenamento das mercadorias²;
- o tempo de reposição de cada mercadoria.

Dimensionar o estoque significa definir as quantidades corretas (ou desejáveis pela organização) de cada mercadoria que deve estar no estoque em um determinado período de tempo, para que a empresa não sofra nenhum tipo de prejuízo.

Dentro deste contexto, torna-se muito importante um modelo de avaliação para estes dois aspectos dos sistemas produtivos: escalonamento e estoque. É importante adotar uma modelagem adequada que permita verificar o comportamento dos sistemas e analisar características desejáveis dos sistemas de produção.

²Entende-se por mercadoria: matéria-prima, materiais em processo e produtos acabados.

Baseado nos aspectos acima citados e, considerando que os sistemas de produção podem ter como característica um comportamento dinâmico definido através das mudanças de estados (em consequência da ocorrência de eventos discretos), que se justifica a utilização de metodologias para auxiliar e direcionar o desenvolvimento dos modelos.

1.6 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal propor uma abordagem formal na aplicação da teoria de redes de Petri (como técnicas de modelagem e análise de sistemas de eventos discretos) para modelar políticas de estoques em sistemas de produção. A utilização de um método formal proporcionará:

- habilidade para descrição comportamental dos sistemas, tanto no sentido de desenvolvimento do modelo, quanto na interpretação deste;
- consideração de características quantitativas e qualitativas, possibilitando a análise destas informações.

Como um dos objetivos específicos do trabalho apresentamos a aplicação de uma metodologia de modelagem ao Planejamento e Controle da Produção (PCP) considerando restrições de itens em estoque. Tal metodologia permitirá responder as seguintes questões:

- Quanto existe em estoque, em cada momento, de cada item sob controle?
- Qual é o investimento em estoque?
- Para cada um dos itens em estoque, quanto deve ser encomendado?
- Quando deve ser feita a encomenda de um dado item?

Também um objetivo específico deste trabalho é propor um modelo em redes de Petri para determinar através de análises:

- o tempo de reposição (ressuprimento);
- a quantidades de ordens fixas para reposição;
- o tamanho do Estoque Mínimo;
- o escalonamento mestre e das operações;
- o caminho crítico de produção.

Este trabalho foca nos aspectos da modelagem dos sistemas de produção, na determinação do escalonamento global da produção e na verificação de parâmetros utilizados para a política de estoque da organização.

1.7 TRABALHOS RELACIONADOS

Segundo [PC96], os sistemas de Planejamento, Programação e Controle da Produção (PPCP) objetivam apoiar as decisões de *o que, quanto, quando e onde produzir* e *o que, quanto e quando comprar*. Estas decisões definem quatro determinantes fundamentais do desempenho destes sistemas:

- os níveis, em volume e diversidade, de estoques de matérias-primas, produtos em processo e produtos acabados;
- os níveis de utilização e de variação da capacidade produtiva (e, conseqüentemente, os custos financeiros e organizacionais decorrentes de ociosidade, hora extra, demissão, contratação, subcontratação e outros);
- o nível de atendimento à demanda dos clientes, considerando a disponibilidade dos produtos em termos de quantidades e prazos de entrega;
- a competência quanto à reprogramação da produção, abordando a forma como a empresa reage às mudanças não previstas nos seus recursos de produção e na demanda dos clientes.

Estes determinantes são desdobrados em objetivos de desempenho específicos para o PPCP. Seu desempenho, por outro lado, impacta diretamente no desempenho da manufatura, caracterizado por objetivos tais quais: custo, qualidade, rapidez, confiabilidade e flexibilidade. O desempenho da manufatura, por sua vez, reflete no desempenho externo da empresa.

Conforme [DTMM95], as atividades relacionadas com o planejamento e controle da produção possuem uma inter-relação muito efetiva com as demais áreas de operações. Todas estas funções trabalham com grande número de dados e a complexidade do processo produtivo limita os procedimentos analíticos para otimização do planejamento. Uma solução para este problema está na informatização, sendo entendida como a aplicação de tecnologia de informação e computadores às atividades de planejamento, engenharia e fabricação, visando maximizar o desempenho dos recursos (tanto pessoas quanto equipamentos).

Tradicionalmente, a literatura tem abordado predominantemente assuntos como MRPII, JIT e OPT, que há anos fazem parte do jargão da área de PPCP. Recentemente, um novo conjunto de termos têm sido crescentemente divulgado na literatura, como *finite capacity scheduling*[KIR94], *advanced planning and scheduling*, simuladores e otimizadores de produção, *manufacturing execution systems* e *manufacturing operation management systems*. Todos são centrados basicamente na utilização de aplicativos informatizados de suporte às decisões em gerenciamento de operações.

O mercado apresenta hoje centenas de alternativas de aplicativos de software para apoiar a implantação e as decisões decorrentes destes sistemas. Entre estes aplicativos, estão aqueles que utilizam a lógica MRP e MRPII, os quais apresentam, em linhas gerais, uma mesma estrutura para solução de problema e variam entre si nas funcionalidades que cada um apresenta. Em [RK04] é apresentado um exemplo prático da utilização

do MRP na fábrica da IBM em Rochester. A utilização do MRP tem como objetivo executar as estratégias de atendimento rápido. A fábrica é responsável pela montagem final dos computadores IBM de porte médio AS/400. O sistema tem permitido à fábrica de Rochester melhorar a precisão de seus estoques em 99 por cento e reduzir o estoque de segurança de 15 a 25 por cento.

O artigo de [PC96] analisou o impacto da adoção de determinado sistema de PPCP na estratégia de manufatura das empresas. Foram considerados os sistemas de programação da produção com capacidade finita, já que o desenvolvimento rápido da área não tem sido acompanhado por discussões da literatura, particularmente, sobre a gestão e a adequação destes sistemas às necessidades estratégicas específicas de cada empresa, um aspecto essencial a ser considerado na decisão de implantá-los.

Tratando especificamente de ambientes de modelagem para sistemas automatizados da manufatura (AMS - *Automated Manufacturing Systems*), em [VN92], abordam-se modelos para simulação e análises destes sistemas. Os modelos apresentados tem como objetivo obter medidas de desempenho dentro do AMS. As abordagens adotadas vão desde Cadeias de Markov, até teoria das filas e redes de Petri.

Por fim, no trabalho de [DHP⁺93], uma abordagem mais ampla, trata de sistemas de manufatura diretamente modelados através de redes de Petri. Neste trabalho, aborda-se o conceito inicial de redes de Petri, princípios de modelagem de sistemas de manufatura, sínteses para integração de sistemas de manufatura e avaliação de desempenho.

1.8 CONTRIBUIÇÕES

A modelagem de sistemas de produção está sendo desenvolvida de acordo com uma metodologia formal. Nesta modelagem, foi proposta uma abordagem baseada em redes de Petri. Tal abordagem leva em consideração os aspectos de tempo, através do escalonamento das operações do sistema, assim como aspectos de estoque.

Além disso, a proposta da abordagem adotada é que políticas de estoque possam ser verificadas através de técnicas de análises baseadas na estrutura e comportamento da rede encontrada. Desta forma, a modelagem irá contemplar o seguinte conjunto de informações de produção:

- estrutura do produto, onde é definida todas as composições dos itens de produção para manufatura do produto final;
- lista de materiais de produção;
- informações referentes à política de estoque adotada pela organização.

Este trabalho tem por objetivo propor uma metodologia de modelagem para sistemas de produção. É intenção da metodologia viabilizar a integração entre métodos consagrados de controle e gerenciamento de produção e de estoque. Na integração, a proposta é obter, em uma única ferramenta matemática e gráfica, a modelagem do planejamento da produção, dos estoques e do escalonamento global do sistema produtivo. O principal objetivo do trabalho é a proposição de um modelo que possibilite a representação e avaliação de políticas de estoque adotadas nas organizações.

1.9 ORGANIZAÇÃO

Este trabalho está organizado como segue: o **Capítulo 2** apresenta conceitos e definições inerentes aos Sistemas de Produção. O **Capítulo 3** introduz os conceitos de Redes de Petri que serão utilizados ao longo do trabalho. Um modelo para a representação de um sistema de produção será apresentado no **Capítulo 4**. No **Capítulo 5** é abordado as técnicas de análise e estimativas aplicadas no modelo proposto. No **Capítulo 6** serão apresentados estudos de caso nos quais foi aplicado a metodologia. Finalmente, o **Capítulo 7** conclui o trabalho e sugere possíveis caminhos a serem abordados para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE PRODUÇÃO

Este capítulo faz uma introdução aos Sistemas de Produção , a sua evolução história e aspectos da administração da produção, bem como apresenta alguns sistemas como JIT, MRPII e OPT. É abordado o processo de Gerência da Produção e do Planejamento da Produção propriamente dito. Finalmente, detalha-se cada elemento de entrada para o planejamento, como Estrutura do Produto, Lista de Materiais e Estoques, para o embasamento de conteúdos futuros que este trabalho irá abordar.

2.1 INTRODUÇÃO

As atividades de produção constituem a base do sistema econômico de uma nação. Elas são responsáveis direta pela transformação dos recursos de capital, materiais e humanos, em bens e serviços de maior valor [MON85]. Isto torna a administração da produção uma tarefa de suma importância para o meio sócio-econômico. A partir de seu sucesso obtém-se bens e serviços que chegarão ao consumidor e conseqüentemente retornarão à empresa como capital.

Poucas áreas dentro da Administração de Empresas mudaram tanto nos últimos anos como a Administração da Produção. Historicamente percebe-se a evolução dos Sistemas de Produção desde a antiguidade até os tempos modernos. Um marco inquestionável e constituinte desta evolução foi o advento da Revolução Industrial. A partir de então, com a descoberta da máquina a vapor, o processo de substituição da força humana pela força da máquina, marca o avanço da tecnologia (em sua fase embrionária).

O avanço tecnológico possibilitou o aperfeiçoamento da mão-de-obra e dos sistemas produtivos. A partir de 1950, segundo [MMS77], na medida em que os computadores tornaram-se economicamente viáveis e as técnicas de pesquisa operacional começaram a surgir, a indústria ingressou numa era de automação sem precedentes. Da segunda metade do século XXI em diante, a perspectiva é de que cerca de 80% da força de trabalho estará empenhada em atividades que não incluem fabricação. Com isso, os sistemas de alta tecnologia desempenharão um importante papel dentro dos Sistemas de Produção , seja em serviços ou na fabricação de bens tangíveis.

Este capítulo apresenta uma visão da evolução histórica no contexto de sistemas de produção. Será abordado também, o papel estratégico dos sistemas de produção evidenciando tanto os SAP, quanto o processo geral de gerenciamento da produção. Algumas técnicas de produção serão definidas e suas principais características serão discutidas,

dentre elas a fase de planejamento mestre da produção, que é comum a qualquer processo produtivo. Tal planejamento utilizará como informações de entrada as estruturas analíticas do produto e as informações inerentes ao estoque.

2.2 EVOLUÇÃO HISTÓRICA

A função *produção*, entendida como o conjunto de atividades que levam à transformação de um bem tangível em um outro com maior utilidade, acompanha o homem desde sua origem. Pode-se evidenciar nas civilizações antigas, aspectos sociais e econômicos precursores do que entende-se hoje como Administração de Produção. Quando o *homem pré-histórico* polia a pedra a fim de transformá-la em utensílio mais eficaz, ele estava executando uma atividade de produção. Nesse primeiro estágio, as ferramentas e os utensílios eram utilizados exclusivamente por quem os produzia, ou seja, inexistia o comércio, mesmo que de troca ou escambo [ML01].

Com o passar dos tempos passou a existir a primeira forma de produção, a *produção organizada*. Esta forma compreendia a produção de certos bens (segundo especificações de terceiros) por pessoas habilitadas, ora chamadas de *artesãos*. Chamava-se *produção organizada* pelo fato dos artesãos estabelecerem prazos de entrega atendendo especificações pré-estabelecidas e fixando preços para suas encomendas.

Com a descoberta da máquina a vapor, em 1764, por James Watt, a produção artesanal começou a entrar em decadência. Esta fase é caracterizada com o advento da *Revolução Industrial*, onde o processo de substituição da força humana pela força das máquinas marcou o século XVIII. Os artesãos, que até então trabalhavam em suas próprias oficinas, começaram a ser agrupados nas primeiras fábricas.

A sistematização do conceito de *produtividade* surgiu nos Estados Unidos no fim do século XIX com os trabalhos de Frederick W. Taylor, considerado o pai da Administração Científica. Procurava-se incessantemente por melhores métodos de trabalho e processos de produção, com o objetivo de se obter melhoria da produtividade com o menor custo possível.

Até meados da década de 60, surgiu uma grande variedade de técnicas de engenharia industrial, sempre com o objetivo de melhorar a produtividade e reduzir os custos. Esta fase foi caracterizada pela *produção em massa*, onde a preocupação dos engenheiros era produzir o máximo possível, sem se preocupar em colocar os produtos no mercado. A esta fase aplica-se muito bem a frase dita por Henry Ford: “*Todo cliente pode ter um automóvel de qualquer cor, desde que seja da cor preta.*” Giorgio Merli [MER94], denomina essa fase do desenvolvimento da empresa de *product-out*, isto é, a preocupação é “colocar” o produto no mercado.

2.3 PAPEL ESTRATÉGICO DOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO

Já no final dos anos 60, vários autores começam a reconhecer e chamar a atenção para o papel estratégico que a função manufatura deve ter na competitividade da organização como um todo [SKI85]. O potencial da manufatura como uma arma competitiva, e o conceito do uso da manufatura como um ativo estratégico, começou a ser percebido pelas

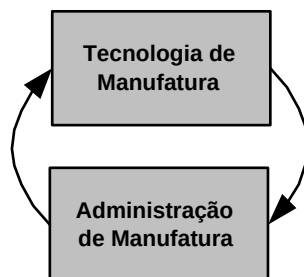


Figura 2.1. Relação entre Tecnologia e Administração na Manufatura

indústrias. Alguns aspectos principais, segundo [COR93], tornaram-se preponderantes para o entendimento da função estratégica da manufatura. São eles:

- a manufatura como arma competitiva poderosa;
- a manufatura deve contribuir com eficácia e não só com eficiência em custos;
- foco: excelência no que realmente importa;
- integração: quebrar barreiras organizacionais;
- manufatura proativa e não apenas reativa;
- estratégia como um padrão de decisões.

Atuar de forma mais eficaz, cumprindo metas e atingindo objetivos, implica em exigir da manufatura um padrão coerente de decisões e organizar melhor seus recursos. Tais recursos devem prover um composto adequado de características de desempenho que possibilitem à organização competir de forma eficaz no mercado. Para tal, o desenvolvimento de novas tecnologias de processo começam a influenciar cada vez mais a gestão de manufatura (ver Figura 2.1), surgindo assim os *Sistemas de Administração da Produção(SAP)*.

2.3.1 Sistemas de Administração da Produção

Os Sistemas de Administração da Produção(SAP) são o coração dos processos produtivos. Eles têm o objetivo básico de planejar e controlar o processo de manufatura em todos os níveis, incluindo materiais, equipamentos, pessoas, fornecedores e distribuidores. É através dos SAP que a organização garante que suas decisões operacionais sobre *o que*, *quando* e *como* produzir e comprar sejam adequadas às suas necessidades estratégicas, que por sua vez são ditadas por seus objetivos e seu mercado.

Os SAP tem a função de suportar os administradores para que eles possam executar suas atividades de forma adequada [VBW92]. Algumas atividades gerenciais típicas que devem ser suportadas pelos SAP são:

Planejar as necessidades futuras de capacidade (qualitativa e quantitativamente) do processo produtivo, de forma que haja disponibilidade para atender o mercado com os níveis de serviço compatíveis com as necessidades competitivas da organização.

Planejar os materiais comprados, de modo que eles cheguem no momento e nas quantidades certas, necessárias a manter o processo produtivo funcionando sem rupturas prejudiciais aos níveis pretendidos de utilização de seus recursos.

Planejar níveis apropriados de estoques de matérias-primas, semi-acabados e produtos finais nos pontos certos, garantindo que as incertezas do processo afetem cada vez menos a produção e o cliente.

Programar as atividades de produção, de forma que as pessoas e os equipamentos envolvidos no processo, estejam em cada momento trabalhando nas coisas certas e prioritárias, evitando a dispersão desnecessária de esforço;

Ser capaz de saber da situação corrente das pessoas, dos equipamentos, dos materiais, das ordens e de outros recursos produtivos da fábrica, de modo a poder informar e, de maneira geral, comunicar-se de forma adequada com clientes e fornecedores.

Ser capaz de reagir eficazmente, reprogramando bem e rápido as atividades quando algo correr mal no processo ou quando situações ambientais inesperadas ocorrerem.

Prover informações a outras funções a respeito das implicações físicas e financeiras das atividades da manufatura, presentes e prospectivas, contribuindo para que os esforços de todas as funções possam ser integradas e coerentes.

Ser capaz de prometer prazos com precisão aos clientes e, depois, cumpri-los, mesmo em situações ambientais dinâmicas e, muitas vezes, difíceis de prover.

A maioria das atividades gerenciais suportadas pelos SAP tem claras implicações estratégicas. Embora sejam consideradas por muito tempo operacionais, elas afetam os níveis de desempenho do sistema de produção, em termos de custos, qualidade, prazos, confiabilidade e flexibilidade. Afetam também a forma com que a própria organização compete e é vista pelo mercado.

2.3.2 Gerenciamento da Produção

O Gerenciamento da Produção ou *Production Management* é uma das maiores atividades dentro de um sistema de produção e, por conseguinte, num SAP. Esta atividade, assim como a de Marketing, Engenharia e a Manufatura, formam juntas o ciclo de desenvolvimento de um produto dentro da produção.

O papel de um Gerenciamento de Produção, segundo [VN92], é planejar e controlar eficientemente os recursos atuais de manufatura de acordo com os requisitos estabelecidos

para a produção. Na lista de recursos incluem-se materiais, ambientes, máquinas, espaço de armazenamento, pessoas, etc. Gerência de Produção é uma área onde técnicas como Método do Caminho Crítico (CPM¹), MRP-II e JIT são todas técnicas de controle bem estabelecidas.

Ainda dentro de um sistema de gerência de produção, identificam-se várias atividades e funções para regular um sistema de manufatura. A Figura 2.2, segundo [VN92], mostra cada uma delas descritas abaixo:

Production Planning concentra-se com a determinação de produção, estoque e níveis de força de trabalho baseado na demanda. Desta forma, a previsão de vendas da organização é usada para diminuir ou aumentar os níveis de produção. É também chamada de planejamento agregado².

Engineering Database contém todas as informações sobre a fabricação e montagem dos produtos que a produção destina-se a manufaturar.

Master Production Scheduling é a desagregação do planejamento da produção. É dentro dele que se especifica quantas unidades de cada produto são distribuídas e quando.

Capacity Planning é interessado na determinação de recursos de trabalho e equipamentos necessários para atender o *schedule* de produção.

Material Requirement Planning (MRP) converte o *Master Production Scheduling* dentro de um detalhado cronograma para linha de materiais e componentes. Mais precisamente, o MRP toma o *schedule* mestre, a lista de materiais³ e os dados de estoque, e determina quando requisitar materiais e componentes para montagem dos produtos.

Inventory Management tem por interesse a manutenção de certos níveis de linhas de materiais, partes semi-acabadas, submontagens e produtos prontos. Desta forma funciona como um *buffer* entre a organização, os clientes e entre diferentes estágios no sistema de manufatura.

Production Activity Control ou *Shop-floor control* transforma as decisões de planejamento em comandos de controle para o processo produtivo.

Cada organização utiliza algumas das atividades anteriores, ou todas elas, para realizar suas atividades de transformação. Tais atividades são comumente encontradas, em parte ou na sua totalidade, nas técnicas de produção atualmente desenvolvidas. Permitem também seguir uma filosofia que auxilie a coordenar as diversas fases do sistema de manufatura. Mundialmente, existem inúmeras técnicas de produção que norteiam, filosoficamente e operacionalmente, a tarefa de produzir. A seguir serão apresentadas algumas das técnicas de produção utilizadas nas indústrias.

¹ *Critical Path Method*

² Consiliação de produtos similares dentro de grupos de produtos, onde o nível de abstração é o maior a que se queira dar.

³ *Bill of Material* (BOM)

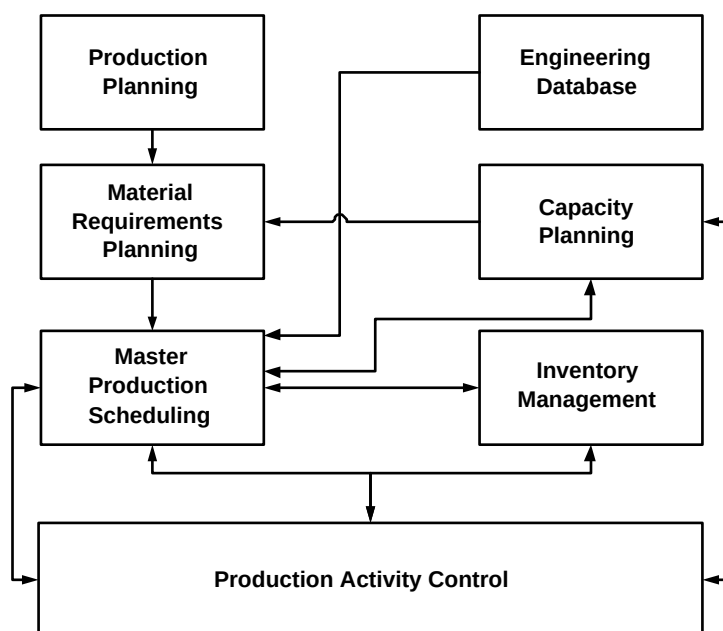


Figura 2.2. PMS - *Production Management System*

2.4 TÉCNICAS DE PRODUÇÃO

O conceito de produção em massa e as técnicas produtivas delas decorrentes predominaram nas fábricas até meados da década de 60. Neste momento, surgiram novas técnicas de produção, que vieram a caracterizar a denominada *produção enxuta*. Os conceitos utilizados na produção enxuta são: *just-in-time*; engenharia simultânea; tecnologia de grupo; células de produção; sistemas flexíveis de manufatura (FMS⁴); manufatura integrada por computador (CIM⁵); etc.

Acompanhando a evolução dos processos produtivos, as técnicas de produção surgiram com o objetivo de atender diferentes tipos de produção e foram comumente observadas nas indústrias sob os seguintes nomes: *Just-In-Time*, MRP-II e OPT.

2.4.1 Just In Time

O *Just In Time* (JIT) surgiu no Japão, nos meados da década de 70, sendo sua idéia básica e seu desenvolvimento creditados à Toyota Motor Company, a qual buscava um sistema de administração que pudesse coordenar a produção com a demanda específica de diferentes modelos e cores de veículos com o mínimo de prazo [COR93].

JIT é caracterizado como um sistema que produz a partir da demanda, fabricando somente os itens necessários, em quantidade e momento exatos, para cada fase de produção.

No ocidente, o JIT ficou conhecido como *Kanban*. *Kanban* é conhecido como um método de autorização da produção e movimentação do material no sistema JIT. Na

⁴Flexible Manufacturing System

⁵Computer Integrated Manufacturing

língua japonesa, a palavra *kanban* significa um marcador (cartão, sinal, placa ou outro dispositivo) usado para controlar a ordem dos trabalhos em um processo seqüencial. O *kanban* é um subsistema do JIT. Os dois termos não são sinônimos. Alguns dos objetivos inerentes ao JIT são:

- produção sem estoques;
- eliminação de desperdícios;
- manufatura de fluxo contínuo;
- esforço contínuo na resolução de problemas;
- melhoria contínua dos processos.

2.4.2 MRP e MRP II

MRP (*Material Requirements Planning* ou planejamento das necessidades de materiais) e MRP II (*Manufacturing Resources Planning* ou planejamento dos recursos de manufatura), são os Sistemas de Administração da Produção (SAP) de grande porte que mais tem sido implantado pelas empresas desde os anos 70.

Segundo [COR93], o principal objetivo do sistema de cálculo de necessidades é permitir o cumprimento dos prazos de entrega dos pedidos dos clientes com mínima formação de estoques, planejando as compras e a produção de itens componentes para que ocorram apenas nos momentos e nas quantidades necessárias, nem mais, nem menos, nem antes, nem depois.

O MRP I, ou simplesmente MRP, surgiu da necessidade de se planejar o atendimento de um plano de produção de um produto final (demanda independente) em um plano de compras ou produção de seus itens componentes (demanda dependente).

Itens de demanda independente são aqueles cuja demanda não depende da demanda de nenhum outro item. Um típico exemplo de um item de demanda independente é o produto final. Um produto final tem sua demanda dependente do mercado consumidor e não da demanda de qualquer outro item.

Itens de demanda dependente, por outro lado, são aqueles cuja demanda depende da demanda de algum outro item. A demanda de um componente de um produto final, por exemplo, é dependente da demanda do produto final. Para a produção de cada unidade do produto final, uma quantidade bem definida e conhecida do componente será sempre necessária.

Com o advento dos computadores, aliado ao aumento de capacidade de processamento, foi possível expandir o conceito do MRP até então utilizado. Assim, além dos materiais que já eram tratados, passou-se a considerar também outros insumos, como mão-de-obra, equipamentos, espaços disponíveis para estocagem, instalações, etc. Os *software* com tais capacidades de processamento passaram a utilizar todos esses insumos em sistemas agora denominados de *manufacturing resources planning*, ou MRP II.

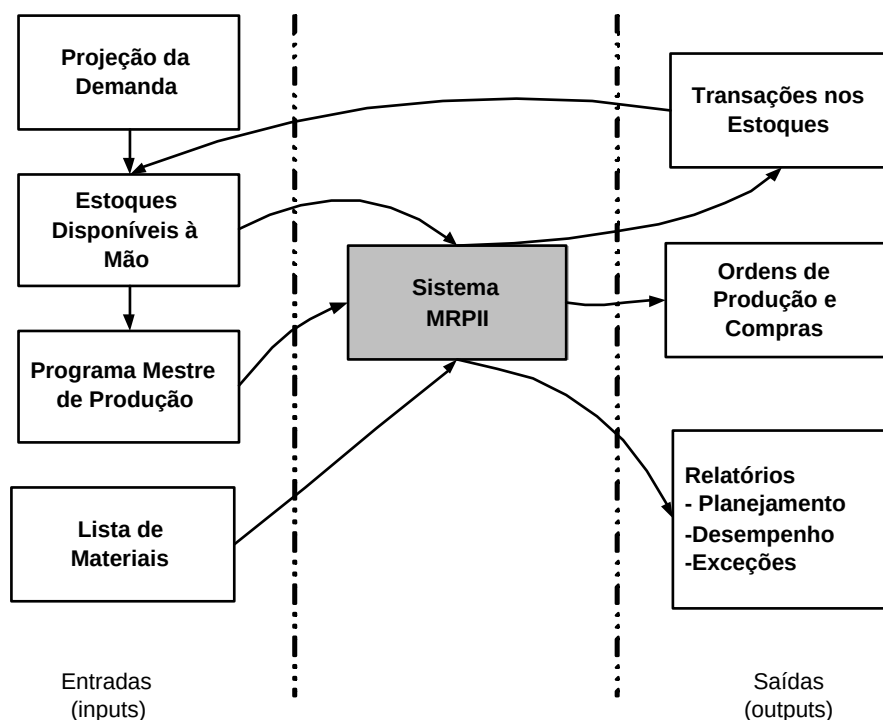


Figura 2.3. Funcionamento do MRPII

O MRP II é um sistema hierárquico, em que os planos de produção de longo prazo ou agregados, são sucessivamente detalhados até se chegar ao nível do planejamento de componentes e máquinas específicas. A Figura 2.3 mostra graficamente como é o funcionamento de um sistema MRP II.

2.4.3 OPT

OPT é a sigla para *Optimized Production Technology*, uma técnica de produção desenvolvida por um grupo de pesquisadores israelenses, do qual fazia parte o físico Eliyahu Goldratt⁶. A abordagem OPT, segundo [COR93], advoga que o objetivo básico das empresas é “*ganhar dinheiro*”. Considera que a manufatura deve contribuir com este objetivo básico através da atuação sobre três elementos:

- fluxo de materiais passando através da fábrica (*Throughput*). O fluxo (de produtos vendidos) é a taxa segundo a qual o sistema gera dinheiro através da venda de seus produtos;
- estoques (*Inventory*). Quantificado pelo dinheiro que a empresa empregou nos bens que pretende vender. Refere-se ao valor apenas das matérias-primas envolvidas;
- despesas operacionais (*operating expenses*). O dinheiro que o sistema gasta para

⁶Escreveu *A Meta*. Referência para assuntos de melhoria contínua e TOC (*Theory Of Constraints*)

transformar estoque em fluxo.

No sentido de maximizar e atingir este objetivo, o sistema OPT questiona e nega alguns pressupostos que a administração de produção tradicional tem considerado como postulados, principalmente em relação ao aspecto da programação de atividades. Seguem abaixo os nove princípios do OPT:

- i) balanceie o fluxo e não a capacidade;
- ii) a utilização de um recurso não-gargalo não é determinada por sua disponibilidade, mas por alguma outra restrição do sistema;
- iii) utilização e ativação de um recurso não são sinônimos;
- iv) uma hora ganha no recurso-gargalo é uma hora ganha para o sistema global;
- v) uma hora ganha num recurso não-gargalo não é nada, é só uma miragem;
- vi) o lote de transferência pode não ser e, freqüentemente, não deveria ser, igual ao lote de processamento;
- vii) o lote de processamento deve ser variável e não fixo;
- viii) os gargalos não só determinam o fluxo do sistema, mas também definem seus estoques;
- ix) a programação de atividades e a capacidade produtiva devem ser consideradas simultaneamente e não seqüencialmente. Os *lead-times* são um resultado da programação e não podem ser assumidos *a priori*.

2.5 PLANEJAMENTO MESTRE DA PRODUÇÃO

A utilização de cada um dos processos para um modelo específico de produção converge, na sua grande maioria, para fases e etapas bem definidas, como a fase de planejamento mestre da produção (PMP). Em todos os processos é bastante evidente a existência desta fase, muito embora, cada uma dê a sua abordagem na resolução dos problemas inerentes ao seu planejamento.

O Planejamento Mestre da Produção ou Programa Mestre da Produção caracteriza uma etapa que pode naturalmente agregar o *Production Planning* e *Master Production Scheduling*, ora mencionados. É nesta fase que se tem uma declaração referente aos produtos finais, período a período, a fim de estabelecer uma sinergia entre os níveis mais agregados de planejamento: o planejamento estratégico da empresa e o plano de produção agregado.

O plano mestre de produção representa uma das contribuições mais importantes da função operacional da manufatura ao processo de planejamento global da organização. Ele representa a desagregação (em termos de produtos individualizados) do plano de produção (ou *Production Planning*) agregado [COR93]. Tais contribuições podem ser observadas através da programação de produção, que são elementos ativos no planejamento.

A programação de produção pode ser definida como a alocação de recursos disponíveis num tempo que melhor satisfaça algum conjunto de critérios [GRA81]. Os principais objetivos da programação da produção são os de organizar o trabalho da unidade de trabalho, de modo que, todas as ordens sejam entregues no prazo e num custo mínimo [HAR81]. A programação da produção, baseada em um plano de produção, é a determinação de *quando* e *quanto* deve-se produzir [LIN78].

Existem outros objetivos a serem alcançados com a elaboração da programação da produção. São eles: garantir que toda a matéria-prima esteja disponível, ou pelo menos programada, quando os setores produtivos as requisitarem; entregar os produtos fabricados nas datas estabelecidas; distribuir a carga de trabalho total para maximizar o resultado econômico de utilização de equipamentos e de pessoal alocados para a produção; prever e evitar gargalos de produção; prever ociosidade e capacidade inaproveitada dos recursos disponíveis; estabelecer um plano de produção e de aquisição de materiais.

Baseada nos objetivos e princípios da programação de produção, através de uma estrutura analítica desagregada do produto a ser manufaturado, consegue-se estabelecer o seqüenciamento e as relações de precedência inerentes ao processo de fabricação. A esta estrutura analítica dá-se o nome de Estrutura do Produto, que representa fundamentalmente a lista de materiais necessária para o processo de produção.

2.6 ESTRUTURA DO PRODUTO

A estrutura do produto (BOM - *Bill Of Material*), segundo definiu a *American Production and Inventory Control Society* (APICS⁷), diz que é uma lista de todas as submontagens, componentes intermediários, matérias-primas e itens comprados que são utilizados na fabricação e/ou montagem de um produto, mostrando as relações de precedência e quantidade de cada item necessário. Pode-se dizer resumidamente que tal estrutura representa toda a estrutura analítica da manufatura de um determinado produto final.

Segundo [CCS92], além desses elementos da lista mencionados, a BOM também pode conter outros objetos, tais como, instruções de trabalho ou ferramentas requeridas para suportar o processo de manufatura. Devido à grande diversidade de objetos que a BOM pode conter, é necessário definir uma nomenclatura padrão para que o uso de cada um deles seja diferenciado e entendido. Segundo a própria APICS [PSA92], os objetos da BOM podem ser classificados em:

- Item (*item*): qualquer matéria-prima, peça, embalagem, submontagem, montagem ou produto único fabricado ou comprado.
- Componente (*component*): matéria-prima, peça ou submontagem que é utilizada numa montagem de nível mais alto, ou em outro item. Esse termo pode incluir também embalagens no caso de itens finais.
- Peça (*part*): geralmente um item isolado comprado ou fabricado que é usado como componente e não é uma montagem ou submontagem, nem matéria-prima.

⁷Atualmente o significado da sigla APICS foi alterado para *Educational Society for Resource Management*

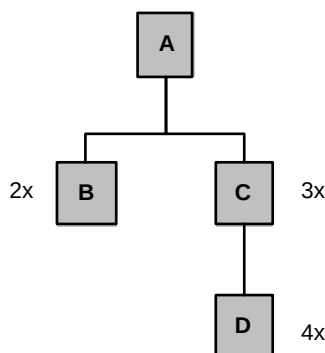


Figura 2.4. Exemplo de Estrutura de Produto simples

Neste trabalho utilizaremos indistintamente o termo *item-componente* ou simplesmente *item* para se referir a qualquer objeto existente na BOM.

Além dos itens tradicionalmente incorporados, destaca [CH97], é preciso entender o conceito de “item-componente” para as informações associadas ao produto, como modelos geométricos, desenhos, planos de processo e outros documentos de suporte elaborados durante os processos de desenvolvimento e alteração do produto. Desta forma, a BOM passa a exercer um papel chave como uma espinha dorsal dos sistemas de gerenciamento de dados de produtos (PDM - *Product Data Management*).

A Figura 2.4 mostra um simples exemplo da estrutura de produto, onde o item-componente A é composto de 2 unidades do item-componente B e 3 unidades do item-componente C, que por sua vez consome 4 unidades do produto D.

A utilização deste tipo de representação para se modelar um determinado sistema de manufatura, unificando os dados do produto em uma mesma fonte, possibilita a navegação nas informações através da BOM, tornando o processo de busca e acesso mais rápido e fácil [Cle95, Kem98].

A BOM é baseada numa estrutura analítica onde naturalmente existe a relação/conceito pai/filho entre os itens-componentes. Desta forma fica estabelecido também o conceito de nível a partir das relações de dependência/precedência. Os níveis de uma BOM são basicamente determinados a partir da forma como os itens intermediários e semi-acabados são tratados no processo de manufatura, desde a matéria-prima e os itens comprados, até o produto final [Sch95, CCS92].

Item Pai é o item-componente que está sendo produzido a partir de outros itens-componentes. Na estrutura, este item-componente dito item pai, estabelece uma relação de precedência com os itens-componentes ligados diretamente a ele.

Item Filho é o item-componente que faz parte da produção do seu item pai. Na estrutura, este item-componente, dito item filho, estabelece uma relação de dependência localizando-se um nível abaixo do item pai.

Nível existe a partir do momento que se estabelece uma relação de precedência/dependência entre itens-componentes na mesma estrutura. O

produto final equivale ao nível mais alto, e seus itens-componentes diretos ficam nos níveis inferiores até o nível 0.

Com tais conceitos básicos de uma BOM, como nível, item pai, item filho, pode-se construir uma BOM para determinadas características de negócio e produto. Sendo assim, a BOM pode assumir vários tipos de arquiteturas de acordo com as classificações utilizadas por [PSA92, CCS92, Gar95, Gue85]. A arquitetura que será utilizada neste trabalho baseia-se na *Estrutura de produto de manufatura*.

2.6.1 Estrutura de Produto de Manufatura

A estrutura de produto e os planos de processo⁸ são dois elementos chaves nas atividades de planejamento e controle da produção, porém a maioria dos sistemas de informação considera-os de forma separada [HY92]. Tal necessidade de separar a estrutura de produto e os planos de processo foi devido às limitações computacionais existentes na época do desenvolvimento dos primeiros sistemas MRP [GOL96].

A integração lógica entre a estrutura de produto e do plano de processo [HY92] será a abordagem adotada de agora em diante. A sequência de operações será especificada, e a cada operação, serão associados os itens-componentes necessários da estrutura do produto. A estrutura de produto de manufatura (ver Figura 2.5), portanto, é usada como um guia para a fabricação e montagem de um produto, sendo que seus níveis refletem o fluxo de produção e pontos de estoque [CF92].

A integração entre BOM e o plano de processo, pode ser considerado durante as atividades de programação não só em relação aos tempos dos itens, mas também os tempos e os itens necessários em cada operação. Uma série de vantagens podem ser observadas segundo [HY92]:

- construção e manutenção fáceis;
- foco no processo de manufatura e encoraja melhorias no fluxo de produção e redução dos pontos de estoque;
- possibilita informações mais detalhadas sobre o custo de produção dos itens, uma vez que o custo *roll-up* pode ser executado para cada operação de cada item.

Neste trabalho, tal unificação reflete em duas informações básicas que são entradas para a modelagem e análise dos sistemas produtivos: a estrutura de produto de manufatura representada graficamente (ver Figura 2.5); a BOM desta estrutura com informações complementares; e informações de estoque (que serão tratadas na próxima seção).

Na Figura 2.5, a estrutura gráfica do produto deve conter as seguintes informações:

Rótulo: nome do item-componente e/ou operação em cada caixa da estrutura do produto.

⁸São as operações propriamente ditas que ocorrem entre itens-comopnentes de uma estrutura de produto.

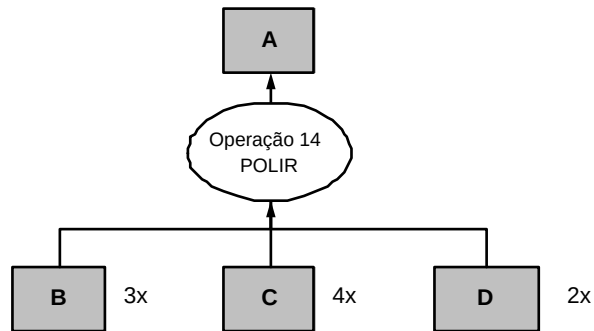


Figura 2.5. Exemplo de Estrutura de Produto de Manufatura

Quantidade Produzida: valor que é produzido a partir de cada item-componente e/ou operação representado pelo valor seguido de x (p.ex. $4x$).

Já as informações complementares que são proximante a BOM (lista de materiais) deverá conter as seguintes informações:

Componente: nome do item-componente e/ou operação da estrutura de produto.

Código: código do componente que serve como identificação única do mesmo.

Nível: nível a que pertence o componente na estrutura.

Unidade: unidade de consumo do componente.

Consumo: consumo propriamente dito do componente.

Tempo: tempo necessário para obter o componente pronto.

Estoque: informação que indica a existência ou não de itens em estoque para aquele componente.

A partir de agora, a referência ao termo *estrutura de produto* e *lista de materiais* serão empregadas para o gráfico da estrutura de produto de manufatura e BOM, respectivamente.

2.7 CONTROLE DE ESTOQUE

Entende-se por estoque quaisquer quantidades de bens físicos que sejam conservados de forma improdutivo, por algum intervalo de tempo; constituem estoques tanto os produtos acabados que aguardam venda ou despacho, como matérias-primas e componentes que aguardam utilização na produção [ML01].

Os principais objetivos dos estoques nas organizações são: cobrir mudanças previstas no suprimento e na demanda; proteger contra incertezas; e permitir produção ou compra econômica. Altos níveis de estoque podem caracterizar problemas sendo incobertos durante o processo produtivo. Reduzir os estoques assemelha-se a baixar o nível da água,

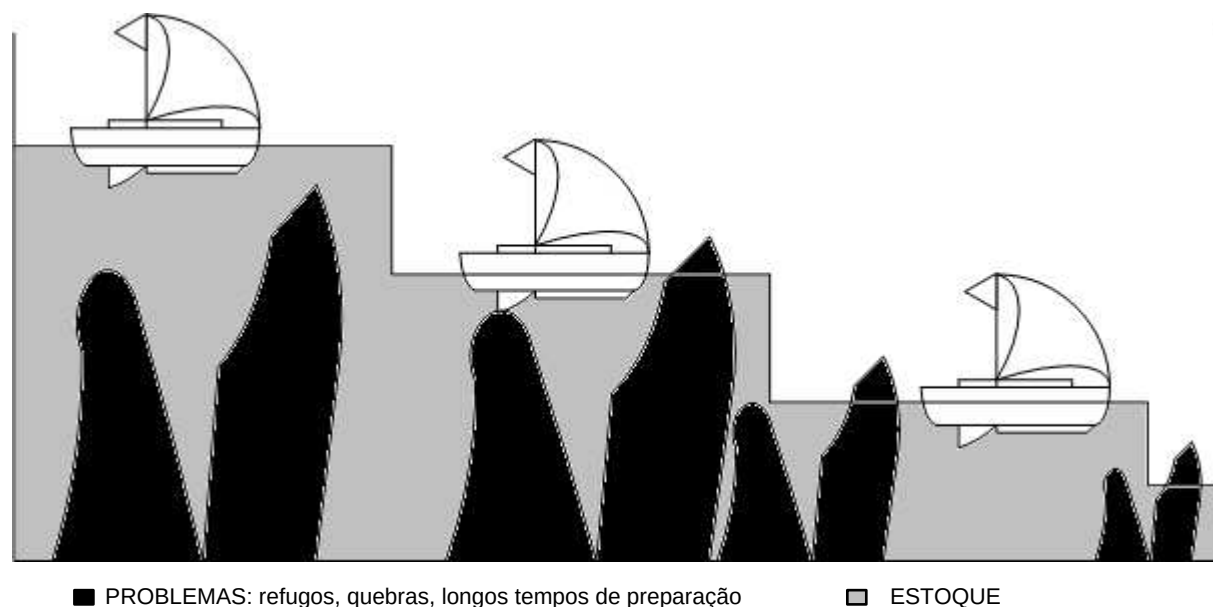


Figura 2.6. Redução dos estoques para expor os problemas dos processos.

tornando visíveis os problemas que, quando eliminados, permitem um fluxo mais suave da produção, mesmo sem estoques [COR93], veja Figura 2.6.

O gerenciamento de estoques requer abordagens diferentes quer se trate de itens pertencentes a um ou outro padrão de consumo: item de demanda dependente e independente. Para itens de demanda independente, a abordagem é a reposição do estoque: à medida em que o item é utilizado, ele é repostado para se ter sempre material à mão para os futuros consumidores. Será necessário conhecer uma estimativa de demanda futura, para que se possa saber o momento da reposição, e quantidades a adquirir ou fabricar para o estoque.

Já para os itens de demanda dependente, ao contrário, a abordagem a seguir é a de requisição, onde a quantidade pedida e o momento em que ela deve estar disponível na produção são em função de previsões de mercado ou encomendas já efetuadas por clientes. Neste trabalho a abordagem seguida será a de itens cujo padrão de consumo é dado por demanda independente.

2.7.1 Sistemas de Controle de Estoques

Um sistema de controle de estoque é fundamentalmente um conjunto de regras e procedimentos que permitem responder algumas perguntas e tomar algumas decisões sobre os estoques. No caso de um sistema montado para controlar itens de demanda independente, lista-se entre as mais importantes perguntas e decisões as seguintes:

- Quanto existe em estoque, a cada momento, de cada item sob controle⁹?

⁹Utiliza-se tal expressão para dizer que o item-componente possui restrição em relação ao seu estoque

- Qual é o investimento em estoque?
- Para cada item, existe alguma quantidade já encomendada para compra ou fabricação? Quanto?
- Para cada um dos itens em estoque, quanto deve ser encomendado?
- Quando deve ser feita a encomenda de um dado item?

Resumindo, os sistemas de controle de estoques deve responder *quando* e *quanto* se deve adquirir de cada mercadoria, por compra ou fabricação. Essas são ditas funções básicas do sistema, embora não sejam as únicas. Três sistemas são muito encontrados e considerados fundamentais para o controle de estoques de itens de demanda independente:

- o Sistema de Lote Econômico de Compra, que se desdobra em Lote Econômico de Fabricação;
- o Sistema de Reposição Contínua ou simplesmente Sistema Q;
- o Sistema de Reposição Periódica ou Sistema P.

2.7.1.1 Sistema de Reposição Contínua No Sistema de Reposição Contínua o estoque do item é monitorado continuamente ou após cada transação; quando o estoque descer a certa quantidade prefixada, chamada Ponto de Ressuprimento, emite-se uma nova ordem de compra ou produção. Este sistema também é conhecido como Sistema do Ponto de Reposição e em linhas gerais funciona da seguinte maneira: calcula-se um nível de estoque, S , e quando o estoque do material alcança esse valor é emitida uma ordem para a reposição do estoque na quantidade Q , fixa ao longo do tempo, recomeçando-se o ciclo. A Figura 2.7 representa o sistema quando o consumo e tempo necessário para a reposição do material, L , são constantes. Este gráfico também pode ser chamado de “*dente de serra*”.

Uma característica para esses tipos de sistemas é que a quantidade a comprar ou fabricar é sempre constante, geralmente assumida como o Lote Econômico. O conjunto principal de informações necessárias para este trabalho, será baseada neste tipo de sistema de reposição, são elas:

Nível de Estoque: este nível de estoque (S) representa o limite que atinge o estoque a fim de que uma ordem de produção ou compra seja emitida para futura reposição;

Tempo de Ressuprimento: tempo decorrido entre emissão de ordem de compra ou fabricação até o recebimento do produto para reposição propriamente dita em estoque;

Ordem Fixas: quantidades (Q) que o estoque será repostos;

Consumo: padrão de consumo do estoque ao longo do tempo.

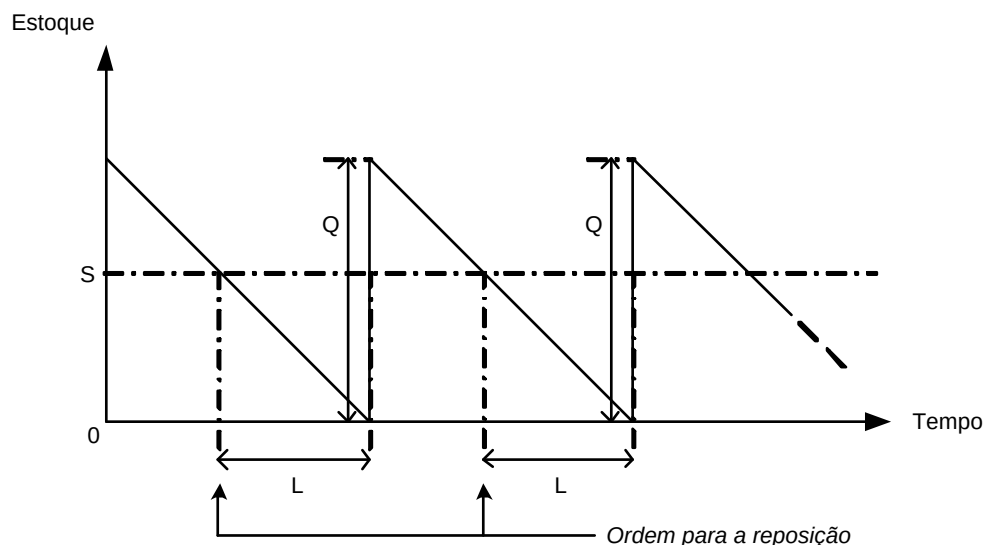


Figura 2.7. Gráfico *dente-de-serra* para reposição contínua.

2.7.1.2 Sistema de Reposição Periódica No Sistema de Reposição Periódica a monitoração da quantidade remanescente em estoque é agora feita em intervalos regulares, exatamente antes de se emitir um pedido de compra ou uma ordem de fabricação. Tal sistema também é conhecido como Sistema de Estoque Máximo, onde revisa-se o sistema (faz-se a verificação do nível de estoque do item) em intervalos fixos e estima-se a quantidade necessária para completar um nível máximo previamente calculado, encomendando-se a reposição desta quantidade. A Figura 2.8 mostra graficamente o comportamento deste tipo de sistema.

A partir do início, após o período I , denominado intervalo de revisão, verifica-se que falta a quantidade Q_1 para completar o estoque máximo M . Pede-se então, a reposição dessa quantidade Q_1 , que é entregue após decorrido o tempo de reposição L_1 , ocasionando o aumento do nível de estoque. Novamente, decorrido o prazo I , verifica-se que é necessária a quantidade Q_2 para completar o estoque máximo M . Essa quantidade encomendada chega após decorrido o tempo L_2 , continuando assim sucessivamente o processo de reposição.

2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, nenhuma técnica de produção (JIT, OPT ou MRPII) será utilizada de forma particular. No entanto, como a estrutura do produto será o objeto principal de estudo, é factível que o modelo aplique-se a qualquer uma destas técnicas.

Sabe-se que em ambientes de produção, vários fatores e variáveis podem ser consideradas. A quantidade de possibilidades a serem contempladas pode tornar os sistemas de produção mais complexos de estudar. Com o enfoque no sistema de reposição contínuo e na estrutura do produto, este trabalho visa estabelecer modelos e análises específicas para tais tópicos.

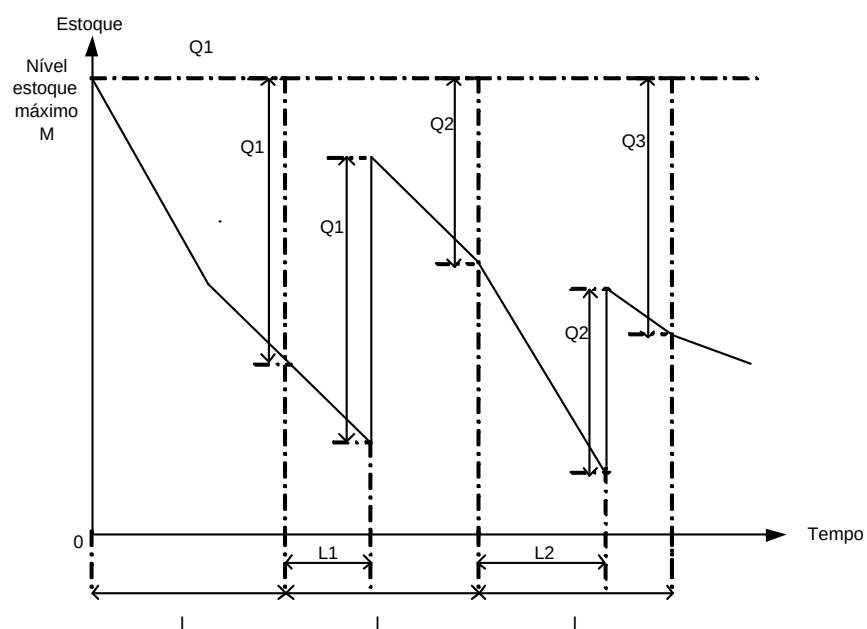


Figura 2.8. Gráfico para reposição periódica.

CAPÍTULO 3

REDES DE PETRI

Este capítulo faz uma revisão bibliográfica sobre Redes de Petri. Define-se formalmente as Redes de Petri assim como apresenta-se a sua aplicabilidade aos problemas reais. Algumas de suas principais características são também discutidas, bem como descreve-se algumas propriedades e técnicas de análise. Por fim, apresenta-se o processo de síntese utilizado neste trabalho.

3.1 INTRODUÇÃO

Redes de Petri (RdP) é uma família de técnicas formais muito bem estabelecida, que consegue modelar concorrência, sistemas assíncronos, sistemas não-determinísticos, etc. Vários autores tem mostrado um grande número de uso para RdP em diferentes áreas tais como, ciência da computação, engenharia eletrônica, química, gerenciamento de negócios, sistemas de produção, etc.

A sua facilidade para modelar situações que dificilmente são representadas por outros modelos fazem das Redes de Petri uma ferramenta de modelagem muito importante. Por exemplo, os modelos de fila são usados com muita frequência para avaliar o desempenho, mas sincronizações são difíceis 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.

Neste capítulo será apresentado alguns aspectos históricos que envolve o surgimento das redes de Petri, tipos de técnicas existentes e componentes básicos de uma rede. Mais formalmente será abordado as redes *Place-Transition*, onde serão definidas as estruturas utilizadas, regras associadas à execução de uma rede e comentar um pouco sobre a matriz de incidência. Algumas classes de redes de Petri serão comentadas, mas apenas a extensão temporizada das redes será abordada com mais detalhes. Algumas propriedades estruturais e comportamentais serão definidas e por fim será apresentado o método de análise e síntese utilizados neste trabalho.

3.2 ASPECTOS HISTÓRICOS

A teoria inicial das Redes de Petri foi apresentada na tese de doutoramento *Kommunikation mit Automaten* do Dr. C. A. Petri em 1962 na faculdade de Matemática e Física da Universidade de Darmstadt na então Alemanha Ocidental. O trabalho de Petri atraiu a atenção de A.W. Holt que, em conjunto com outros pesquisadores, desenvolveu muito da teoria, notação e representação das Redes de Petri.

De 1970 a 1975, o grupo de estrutura da computação do MIT foi o mais ativo na condução da pesquisa sobre Redes de Petri . Em 1975, houve uma Conferência sobre Redes de Petri , no entanto não houve publicação nos anais [MUR89]. Em 1979, pesquisadores de vários países europeus reuniram-se em Hamburgo para um curso avançado sobre a Teoria Geral das Redes de Processos e Sistemas [BRA79]. Seguiram-se diversos outros trabalhos propondo alterações ao modelo original, tais como redes com arco inibidor, e redes temporizadas determinísticas e estocásticas.

Hoje em dia, Redes de Petri é considerada uma técnica para especificação de sistemas concorrentes consolidada. Grupos de pesquisa em todo o mundo têm Redes de Petri como tema, desenvolvendo estudos sobre seus aspectos teóricos e suas aplicações.

Diversas técnicas de modelagem matemática de sistemas em diversas áreas da ciência têm sido propostas. Barroca e McDermid [BM92] apresenta a seguinte classificação:

Técnicas Baseadas em Modelos: Fornece uma descrição abstrata explícita sobre estados e operações que transformam os estados, no entanto não oferece meios explícitos para especificar concorrência. Ex.: Z [SPI89].

Técnicas Baseadas em Álgebra de Processos: Estas técnicas fornecem meios explícitos para especificar concorrência. O comportamento dos processos é representado através de comunicações observáveis. Ex.: CCS [MIL89], CSP [HOA85] e LOTOS [HOA85, LOT87].

Técnicas Baseadas em Lógica: Uma grande variedade de técnicas baseadas em lógica tem sido postas, onde se analisam as relações causais e aspectos relacionados à temporização. Ex.: Lógica Modal de Ações [GOL82].

Técnicas Baseadas em Redes: Estas técnicas modela concorrência, através de mecanismos implícitos de fluxo de *tokens* na rede. Este fluxo é controlado por condições que habilitam a realização de tarefas (eventos). Ex.: Redes de Petri .

3.3 COMPONENTES DE UMA REDE DE PETRI

O grafo de uma rede de Petri direcionado e bipartido, possui pesos e dois tipos de componentes, chamados lugares (*places*) e transições (*transitions*) com arcos que vão de um lugar a uma transição ou de uma transição para um lugar.

Graficamente, representa-se lugares com círculos e transição com barras ou retângulos (ver Figura 3.1). Os arcos são rotulados com seus pesos (exceto se o peso for igual a um¹), e um arco de peso k pode ser interpretado como k arcos paralelos.

Caso o conceito de condição-evento estiver sendo usado na modelagem de um sistema, lugares e transições representam respectivamente condições e eventos. Os lugares portanto são ditos componentes passivos e as transições são componentes ativos. Uma transição possui um certo número de lugares de entrada e saída, o que representa as pré e pós-condições do evento observado. A realização de uma ação, portanto, está associada a algumas pré-condições, ou seja, existe uma relação entre os lugares e as transições, que

¹Dá-se o nome de arco *monovalorado*

**Figura 3.1.** Elementos básicos

possibilita a realização de uma ação. De forma semelhante, após a realização de uma ação, alguns lugares terão suas informações alteradas (pós-condições). Algumas interpretações típicas de transições e seus lugares de entrada e saída são mostradas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Algumas interpretações típicas para lugares e transações

Lugares de entrada	Transição	Lugares de Saída
Pré-condições	Evento	Pós-condições
Dados de entrada	Passo computacional	Dados de saída
Sinais de entrada	Processador de sinais	Sinais de saída
Recursos requeridos	Tarefa	Recursos liberados
Condições	Cláusula lógica	Conclusões
<i>Buffers</i>	Processador	<i>Buffers</i>

Dado os conceitos informalmente apresentados sobre Redes de Petri ilustramos a seguir, segundo [MLC96], um pequeno exemplo para entendimento: o ciclo repetitivo dos turnos (períodos) de um dia. Dividamos o dia em três períodos: *manhã*, *tarde* e *noite*, ou seja, há três condições. A transição de uma dessas condições para uma outra, por exemplo- amanhecer (*noite* $\rightarrow$ *manhã*), são os eventos. O modelo que representa o ciclo operacional desse sistema é formado pelas três condições, representadas por três variáveis de estado (lugares), e por três eventos (transições): *amanhecer*, *entardecer* e *anoitecer*. Para representar a situação atual, ou seja, em que a condição encontra-se o sistema modelado, usa-se uma marca grafada (um ponto) no lugar que corresponde a essa situação, por exemplo: a condição atual é *manhã*. Na Figura 3.2.a tem-se o modelo que representa este sistema e a sua situação atual.

Nesse modelo, temos a condição atual representada pela marca no lugar *manhã*. Estando nesta condição o único evento que poderá ocorrer é *entardecer*, que é representado pela transição de mesmo nome. Na ocorrência desse evento, teremos uma nova situação atual, ou seja, *tarde*, que é representada graficamente na Figura 3.2.b por uma marca no lugar *tarde*.

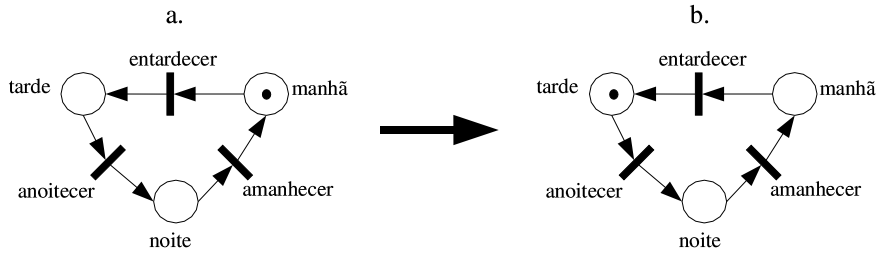


Figura 3.2. Períodos do dia representado com redes de Petri.

3.4 REDES PLACE-TRANSITION

Pode-se definir mais formalmente as Redes de Petri de três maneiras distintas. Uma sobre o ponto de vista da teoria *bag*² [PET81], que apresenta mapeamentos das transições para os *bags* de lugares. Um segundo tipo de definição usa a notação matricial [BRA83]. E a terceira, define as Redes de Petri através de relações e pesos associados a estas relações [REI82]. Neste trabalho será apresentado apenas o segundo tipo de definição, a notação matricial.

3.4.1 Estrutura Definda em Bag

A estrutura das redes de Petri, segundo a teoria *bag* é composta por cinco partes: o conjunto de lugares P , o conjunto de transições T , o *bag* de entrada I , o *bag* de saída O e a capacidade associada a cada lugar. Para denotarmos bags, utilizamos - $[]$. Formalmente apresentamos abaixo:

Definição 3.1 (Estrutura de Redes de Petri em *Bag*) *Define-se a estrutura de uma rede de Petri R , como uma quártupla $R = (P, T, I, O, K)$, onde $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ é um conjunto finito não-vazio de lugares, $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ é um conjunto finito não-vazio de transições. $I : T \rightarrow P^{\infty}$ é um conjunto de bags que representa o mapeamento de transições para lugares de entrada. $O : T \rightarrow P^{\infty}$ é um conjunto de bags que representa o mapeamento de transições para lugares de saída. $(K : P \rightarrow \mathbb{N} \cup \{\infty\})$, é conjunto das capacidades associadas a cada lugar, podendo assumir um valor infinito.*

3.4.2 Estrutura Definda em Matriz

Devido aos resultados existentes nos estudos da álgebra matricial, as Redes de Petri utilizam este ferramental para a formalização de sua teoria, possibilitando a análise de propriedades comportamentais e estruturais, posteriormente apresentadas neste capítulo.

Segundo o ponto de vista matricial, a estrutura das Redes de Petri é apresentada por uma quártupla formada pelo conjunto de lugares, o conjunto de transições, a matriz de entrada das transições, a matriz de saída das transições, a capacidade de cada lugar,

²Um *bag* é uma generalização do conceito de conjunto que admite a repetição de elementos.

formalmente apresentado abaixo:

Definição 3.2 (Estrutura de Redes de Petri em Matrizes) *Seja a estrutura de uma rede definida por uma quintupla $R = (P, T, I, O, K)$, onde P é um conjunto finito de lugares. T é um conjunto finito de transições. $I : (P \times T) \rightarrow IN$ é a matriz de pré-condições. $O : (P \times T) \rightarrow IN$ é a matriz de pós-condições. K é o vetor das capacidades associadas aos lugares ($K : P \rightarrow IN \cup \{\infty\}$).*

Se o conjunto de lugares ou o conjunto de transições é vazio, a rede é dita degenerada.

3.4.3 Rede de Petri Marcada

Uma marca³ é um conceito primitivo em Redes de Petri, tal qual lugar e transição. As marcas são informações atribuídas aos lugares. Uma marcação, ou estado, associa um inteiro k , não-negativo, a cada lugar da rede. Abaixo seguem as seguintes definições: a definição formal de marcação; a definição formal da marcação na forma vetorial; e a definição de rede de Petri marcada.

Definição 3.3 (Marcação) *Seja P o conjunto de lugares de uma rede R . Define-se formalmente marcação como uma função que mapeia o conjunto de lugares P a inteiros não-negativos $M : P \rightarrow IN$.*

Definição 3.4 (Vetor Marcação) *Seja P o conjunto de lugares de uma rede R . A marcação pode ser definida como um vetor $M = (M(p_1), \dots, M(p_n))$, onde $n = \#P$, para todo $p_i \in P$ tal que $M(p_i) \in IN$.*

Definição 3.5 (Rede Marcada) *Define-se uma rede de Petri marcada pela dupla $RM = (R; M_0)$, onde R é a estrutura da rede e M_0 é a marcação inicial.*

O comportamento dos sistemas pode ser descrito em função dos seus estados e suas alterações. Para simular o comportamento dinâmico dos sistemas, a marcação da rede de Petri é modificada a cada ação realizada (transição disparada), segundo regras de execução apresentadas a seguir.

3.4.4 Regras de Execução

O disparo de transições (execução das ações) é controlado pelo número e distribuição de marcas nos lugares. A transição está habilitada se cada um dos seus lugares de entrada possuírem um número de *tokens* pelo menos igual ao peso do arco que os liga. Denota-se a habilitação de uma transição t para uma marcação M_k por $M_k[t >]$.

Definição 3.6 (Regra de Habilitação) *Seja $RM = (R; M_0)$ uma rede de Petri marcada, $t \in T$ ser uma transição e M_k uma marcação. Se $M_k[t >]$, $M_k(p_i) \geq I(p_i, t)$, $\forall p_i \in P$.*

Formalmente, apresentamos as regras de execução das redes de Petri a seguir:

³Pode também ser denominado *ficha* ou *token*.

Definição 3.7 (Regra de Disparo) *Seja $RM = (R; M_0)$ uma rede de Petri marcada, $t \in T$ uma transição e M_k uma marcação. A transição t pode disparar quando ela está habilitada. Disparando uma transição habilitada, a marcação resultante é $M_i = M_k - I(p_j, t) + O(p_j, t), \forall p_j \in P$. Se uma marcação M_i é alcançada por M_k pelo disparo de uma transição t , ela é denotada por $M_k[t > M_i$.*

3.4.5 Matriz de Incidência

Esta seção apresenta a *matriz de incidência*. Esta matriz representa a estrutura da rede em termos do peso de todos os arcos. Tal definição é de suma importância desde que esta estrutura seja a base para uma análise estrutural e para descrição do comportamento da rede em termos da equação de estado.

Uma maneira prática de representar a matriz de uma rede é através de pré e pós-condições de incidência. Estas matrizes representam as interconexões entre lugares e transições e também seus pesos. Quando uma transição t dispara, a diferença entre a nova marcação alcançável e uma anterior é obtida por $O(p_i, t) - I(p_i, t)$, considerando cada lugar p_i .

A matriz $C = O - I$ é chamada matriz de incidência. Esta matriz representa a estrutura da rede do sistema ora modelado. Abaixo, segue uma definição formal de uma matriz de incidência:

Definição 3.8 (Matriz de Incidência) *Seja $R = (P, T, I, O, K)$ ser uma rede de Petri. A matriz de incidência C representa a relação $(P \times T) \rightarrow Z$ definida por $C(p, t) = O(p, t) - I(p, t), \forall p \in P, \forall t \in T$.*

3.4.6 Grafo de Marcação Acessíveis

O grafo das marcações acessíveis é uma representação gráfica do conjunto das marcações que podem ser alcançadas para uma dada rede de Petri. O disparo de uma transição modifica a marcação, conforme a marcação atual e a estrutura da rede. Essas marcações obtidas após os disparos das transições são marcações acessíveis de uma rede para uma determinada marcação inicial.

Definição 3.9 (Conjunto de Marcação Acessíveis) *Seja uma rede marcada $RM = (R; M_0)$; define-se conjunto das marcações acessíveis $A(R; M_0)$ pelo conjunto de marcações obtidas a partir de uma marcação inicial M_0 pelo disparo de todas as possíveis seqüências de transições habilitadas, ou seja, $A(R; M_0) = \{M_i \in IN^m\}$, tal que existe uma seqüência de transições sq , que $M_0[sq > M_i$, onde $m = \#P$ e M_i , só é alcançável se, e somente se, $M_i \in A(R; M_0)$.*

O grafo das marcações acessíveis pode ser definido por uma dupla $GA(R; M_0) = (M_i, a_{(i,j)})$, onde $M_i \in A(R; M_0)$ são os vértices do grafo e $a_{(i,j)}$ os arcos. Os arcos representam a alteração da marcação pelo disparo das transições.

Definição 3.10 (Grafo das Marcação Acessíveis) *Seja uma rede marcada $RM = (R; M_0)$; define-se grafo das marcações acessíveis GA , por um par $GA(R; M_0) =$*

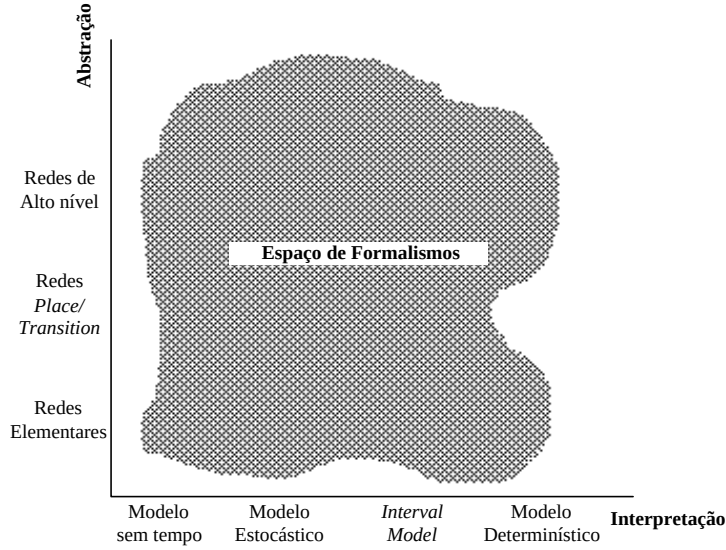


Figura 3.3. Abstração X Interpretação.

$(M_i, a_{(i,j)})$, onde $M_i \in A(R; M_0)$ são os vértices do grafo e $a_{(i,j)}$ os arcos. Os arcos representam $M' \geq M''$ se, e somente se, existe uma transição t tal que $M'[t > M''$ (mudança de marcação).

3.5 REDES DE PETRI E SUAS CLASSES

Duas características de um modelo de redes de Petri que fazem elas úteis são níveis de abstração e as diferentes interpretações [ST96, STVH98]. Estas características especificam um espaço de formalismos apropriados para diferentes propósitos e são apresentados na Figura 3.3.

A primeira classe no eixo do nível de abstração são as *redes elementares*, onde lugares representam condições booleanas. A segunda classe são as *redes place-transition*, onde lugares são contadores. Adicionalmente algumas extensões podem ser consideradas tais como arco inibidores e redes com prioridades. Tais extensões afetam não somente a concisão, mas também o poder de modelagem dos modelos adotados. A interpretação mostrada basicamente no eixo x modela em redes de Petri várias interpretações temporizadas incluindo modelos determinísticos [SSM04b], disparo no tempo representado por intervalos, modelos estocásticos [FSS⁺04], etc, com os quais são aplicados para análises de desempenho [MBC⁺89, MOL81, STA88, ZUB91, BOW96, SSM04a], *scheduling* [ZUB91], controle de tempo real, etc.

As subclasses de redes são definidas pela introdução de restrições para a estrutura de redes *Place-Transition*. Pelo fato de restringir a generalidade de um determinado modelo, torna-se fácil estudar seus comportamentos [DHP⁺93]. Este trabalho realizou a construção de modelos baseado na classe de redes de Petri denominada *Free-Choice Nets* (redes Livre de Escolha).

3.5.1 Free-Choice Nets

O nome desta subclasse implica que este modelo pode modelar conflito, no entanto, o mais importante é ficar claro que nele é permitido um mecanismo para a resolução do conflito. Na verdade, esta subclasse de rede permite modelar concorrência, sincronização e modelos de conflitos, no entanto, de uma maneira mais restrita do que a rede *Place-Transition*.

Definição 3.11 (Free-Choice Nets) *Seja $RM = (R; M_0)$ ser uma rede de Petri marcada classificada como uma free-choice se $p_i \in P$, então $I(t_j) = \{p_i\}$ ou $O(p_i) = \{t_j\}$.*

Esta classe de rede permite ter conflitos controlados [HAC72], pois quando um lugar é entrada de diversas transições, este lugar é a única entrada destas transições. Desta forma, todas as transições estarão habilitadas ou nenhuma estará, possibilitando a escolha da realização do evento livremente.

3.6 EXTENSÃO TEMPORIZADA

Redes de Petri tem sido utilizadas para modelar pontos de vista lógicos dos sistemas. Uma atenção formal tem sido dada para relações temporais e restrições [MF76, STA88]. A primeira abordagem de aspecto temporal foi proposto por Ramchandani [RAM74]. Hoje, existem não menos que três grandes abordagens com as quais o aspecto tempo é associado as redes: estocásticas, disparo de tempo especificado por intervalos e determinístico. Em uma rede estocástica uma distribuição de probabilidade para o disparo no tempo é atribuído ao modelo [MOL81].

Os tempos podem ser associados aos lugares (*Place-Timed Models*) [SIF77], aos *tokens* (*Token-Timed Models*) [GMMP91] e transições (*Transition-Timed Petri Models*) [RAM74]. Ainda existe uma abordagem proposta [MF76] que associa o tempo para as transições pelo uso de intervalos (*Transition-Time Petri Nets*).

Em redes temporizadas (*timed*) determinísticas os disparos das transições podem também estar representado pelas seguintes políticas de disparo: disparo em três fases e a abordagem segundo o disparo ser atômico. Nas redes temporizadas determinísticas com política de três fases de disparo o tempo representa a duração para o disparo da transição [RAM74]. Já nas redes determinísticas temporizadas com disparo atômico a abordagem proposta em [MF76] modela o tempo em intervalo onde os limites são os mesmo (d_i, d_i) (*Transition-Time Petri Nets*). Neste trabalho a extensão adotada para os modelos que serão apresentadas são baseados em *Transition-Timed Petri Net* ou *Timed Petri Net*.

3.6.1 Timed Petri Nets

Esta seção abordará modelos baseados em *Timed Petri Nets*, extensões redes de Petri em que o tempo é expressado pela duração (rede de tempo determinístico com política de três fases para a semântica de disparo) e é associado as transições.

Definição 3.12 (Timed Petri Nets) Seja o par $Nt = (R, D, C)$ ser uma *timed Petri net*, onde $R = (P, T, I, O, M_0)$ representa uma rede de Petri, $D : T \rightarrow \mathbb{R}^+ \cup \{0\}$ é a função na qual se associa cada transição t_i a duração de disparo d_i . $C : T \rightarrow c(0 \leq \mathbb{R} \leq 1)$, $t \in T$ é uma função de escolha na qual atribui-se uma probabilidade free-choice para cada transição da rede, onde $\sum_{t \in T_c} c(t) = 1$. $T_c \subseteq T$ é um conjunto de transições estruturalmente conflitantes.

Um estado em uma *Timed Petri Net* é definido como uma função formada de 3-tuplas: a primeira é a marcação dos lugares; a segunda é a distribuição em disparo de transições; e a terceira e última é a *remaining firing time* [ZUB91]. Por exemplo, se um número de tokens em um disparo de uma transição t_i é $mt(t_i) = k$, então o *remaining firing time* é representado por um vetor $RT(t) = (rt(t_1), \dots, rt(t_k))$. Formalmente tem-se:

Definição 3.13 (Estado de uma Timed Petri Net) Seja o par $Nt = (N, D)$ uma *Timed Petri Net*, um estado S de Nt é definido por uma 3-tupla $S = (M, MT, RT)$, onde $M : P \rightarrow \mathbb{N}$ representa a marcação, $MT : T \rightarrow \mathbb{N}$ é a distribuição de tokens no disparo das transições e $RT : K \rightarrow \mathbb{R}_T^+$ é a função de *remaining firing time* na qual atribui-se o *remaining firing time* a cada disparo independente de uma transição para cada transição que $mt(t) \neq 0$. K é o número de tokens em um disparo da transição t_i ($mt(t_i) = K$). RT não é definido para as transições t_i nas quais $mt(t_i) = 0$.

Definição 3.14 (Regra de Habilitação) Seja $Nt = (R, D)$ ser uma *Timed Petri Net*, e $S = (M, MT, RT)$ o estado de Nt . Diz-se que um bag de transições BT é habilitado no instante x se, e somente se, $M(p) \geq \sum_{t_i \in BT} \#BT(t_i) \times I(p, t_i), \forall p \in P$, onde $BT(t_i) \subseteq BT$ e $\#BT(t_i) \in \mathbb{N}$.

Se um bag de transições BT é habilitado no instante de tempo x , então o instante em que ele é removido corresponde ao número de tokens ($\#BT(t_i) \times I(p, t_i)$) de lugares de entrada de um bag BT , e ao tempo $x + d_i$ (d_i é a duração relacionada a transição t_i no bag BT), somado ao respectivo número de tokens para o lugar de saída. O número de tokens armazenados no lugar de saída é igual ao produto dos pesos dos arcos de entrada ($I(p, t)$) pelo módulo do bag em relação a cada transição t cuja duração é igual a d_i ($\#BT(t), BT(t) \subseteq BT$) mais o número de tokens já "dentro" da transição disparada, tal que sua duração tenha decorrido, durante o presente disparo do bag.

Definição 3.15 (Regra de Disparo) Seja $Nt = (R, D)$ ser uma *Timed Petri Net*, e $S = (M, MT, RT)$ o estado de Nt . Se um bag de transições BT é habilitado no instante x , então no instante x $\sum_{t_i \in BT} \#BT(t_i) \times I(p, t_i), \forall p \in P$ o número de tokens seja removido dos lugares de entrada do bag BT . No tempo $x + d$, a marcação alcançada é $M' = M - \sum_{t_i \in BT} \#BT(t_i) \times I(p, t_i) + \sum_{t_i \in BT | d_i = d} \#BT(t_i) \times O(p, t_i) + \sum_{t_j \in T, MT(t_j) > 0} M(t_j) \times O(p, t_j), \forall p \in P$, se nenhuma outra transição $t \in T$ tenha sido disparada no intervalo $(x, x + d)$.

A rede *Timed Petri Net* é utilizada nos trabalhos que utilizam modelos intermediários. A razão para esta escolha é que ações são representadas pelas transições ao invés de lugares, o delay das ações é melhor representado pela duração do que pela restrição

temporal e, por fim, que os modelos obtidos são menores do que utilizando *Time Petri Nets*. Um outro importante aspecto é que para o ciclo computacional de tempo, este modelo provê uma maior representação natural desde que cada ação tenha uma duração.

A inclusão de tempo nos modelos de redes de Petri permite a análise de desempenho dos sistemas [BOW96]. Quando consideramos modelos de redes de Petri determinísticos, um método bem conhecido para computar ciclo de tempo é baseado em *timed reachability graph* com algoritmo *path-finder* [STA88, MOL81]. Muito embora, para modelos gerais, a computação de uma *timed reachability graph* é muito complexa e, para sistemas não limitados, é infinito. O pragmático ponto de vista sugere a exploração da estrutura das redes (para transformar ou para modelar os sistemas em termos de subclasses de redes de Petri) e aplicar métodos de programação linear [CS, DAJ95]. Métodos estruturais eliminam a derivação do espaço de estados, então evita-se o problema da explosão de estados. No entanto, alguns medidas de desempenho tais como tempo mínimo de uma caminho crítico pode ser obtido pela aplicação de métodos estruturais. Uma terceira classe de métodos é o baseado em transformações. Esta abordagem executa algumas regras de transformação em ordem para reduzir a dimensão dos modelos preservando as propriedades de desempenho [ZH97].

3.7 PROPRIEDADES DAS REDES DE PETRI

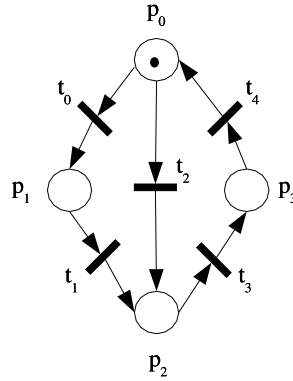
Em paralelo aos modelos apresentados foi desenvolvido uma série de métodos que permitem a análise de um grande número de propriedades em sistemas [PET81, BRA83, MUR89]. Divide-se em dois tipos as propriedades de redes de Petri : as propriedades dependentes da marcação e as não dependentes da marcação, denominadas propriedades comportamentais e estruturais, respectivamente.

3.7.1 Propriedades Comportamentais

3.7.1.1 Alcançabilidade Esta propriedade de Alcançabilidade ou *reachability* é de suma importância para o estudo de propriedades dinâmicas dos sistemas. A alcançabilidade indica a possibilidade de atingirmos uma determinada marcação pelo disparo de um número finito de transições, a partir de uma dada marcação inicial. Será apresentado adiante este conceito no contexto de redes de Petri [PET81, MUR89, CM82].

Dada uma determinada rede de Petri marcada $RM = (R; M_0)$, representada na Figura 3.4, o disparo de uma transição t_i altera a marcação da rede, conforme as regras descritas na Seção 3.4.4. Uma marcação M' é dita acessível de M_0 se existe uma seqüência de transições que, disparadas, levam a marcação M' . Ou seja, se a marcação M_0 habilita a transição t_0 , disparando-se esta transição atinge-se a marcação M_1 . A marcação M_1 habilita t_1 a qual sendo disparada atinge-se a marcação M_2 e assim por diante até a obtenção da marcação M' . Mais formalmente temos:

Definição 3.16 (Alcançabilidade) *Seja $M_i[t_j > M_k$ e $M_k[t_h > M_l$ então $M_i[t_j t_h > M_l$. Por recorrência designamos o disparo de uma seqüência $s \in T$ por $M[s > M']$. O conjunto de todas as possíveis marcações obtidas a partir da marcação M_0 na rede $RM = (R; M_0)$ é denotado por $A(R; M_0) = \{M' \in IN^m | \exists s, M_0[s > M']\}$, onde m é a cardinalidade do*

**Figura 3.4.** Rede de Petri Marcada

conjunto de lugares da rede.

O problema da análise desta propriedade consiste em determinarmos se uma dada marcação $M' \in A(R; M_0)$ da rede marcada RM . Em alguns casos, deseja-se observar apenas alguns lugares específicos da rede em estudo. Este problema é denominado *submarcação alcançável* (*submarking reachability*).

Muitos outros problemas de análise podem ser observados em termos o problema de *alcançabilidade*. Por exemplo, se uma rede fica em *deadlock* em uma determinada marcação, pode-se querer saber se essa marcação é acessível.

3.7.1.2 Limitação Abaixo segue definição formal do conceito de limitação (*boundedness*) nas redes de Petri e sua importância na verificação de uma especificação de sistemas [MUR89].

Definição 3.17 (Limitação) Seja um lugar $p_i \in P$, de uma rede de Petri marcada $RM = (R; M_0)$. Este lugar são ditos k -limitados (k -bounded) ($k \in \mathbb{N}$) ou simplesmente limitados se para toda marcação acessível $M \in A(R; M_0)$, $M(p_i) \leq k$.

Caso esta propriedade não seja identificada, o lugar é dito *não-limitado*. Perceba que o limite k é o número de marcas que um lugar pode acumular. Uma rede de Petri marcada $RM = (R; M_0)$ é dita k -limitada se o número de marcas de cada lugar de RM não excede k em qualquer marcação acessível de RM ($M(p) \leq k, \forall M \in GA(R; M_0), \forall p \in P$).

Definição 3.18 (Rede Limitada) Diz-se que uma rede $RM = (R; M_0)$ é limitada (*bounded*) se $k(p_i) \leq \infty$ para todo $p_i \in P$.

3.7.1.3 Segurança O conceito de segurança (*safeness*) é uma particularização do conceito de limitação. Um lugar p_i é dito k -limitado se o número de marcas que este lugar pode acumular estiver limitado ao número k . Um lugar que é *1-limitado* pode ser simplesmente chamado de seguro (*safe*).

Definição 3.19 (Lugar Seguro) *Seja um lugar $p_i \in P$ de uma rede marcada $RM = (R; M_0)$, onde $R = (P, TI, O, K)$, p_i é seguro se para toda marcação $M' \in A(R; M_0)$ tivermos $M(p_i) \leq 1$.*

Dizemos que a rede $RM = (R; M_0)$ é segura se todos dessa rede são seguros, ou seja, todos os lugares desta rede podem conter uma ou nenhuma marca.

Definição 3.20 (Rede Segura) *Uma rede $RM = (R; M_0)$ é definida como segura se $M(p_i) \leq 1$, para todo $p_i \in P$.*

3.7.1.4 Liveness A ausência de *deadlock* (impasse) em sistemas está fortemente ligada ao conceito de *liveness*. Deadlock em uma rede de Petri é a impossibilidade do disparo de qualquer transição da rede.

Definição 3.21 (Transição Potencialmente Disparável) *Chamamos uma transição t_i potencialmente disparável em uma marcação M_0 se existe uma marcação $M' \in A(R; M_0)$ tal que t_i é habilitada para esta marcação.*

Denominamos uma transição t_i *live* em uma marcação M se t_i é potencialmente disparável para todas as marcações $M \in A(R; M_0)$, ou seja, uma transição é *live* se esta não é passível de *deadlock*.

Definição 3.22 (Rede Live) *Uma rede $RM = (R; M_0)$ é dita live se para toda $M_i \in A(R; M_0)$ é possível disparar-se qualquer transição de RM através do disparo de alguma seqüência de transições de $L(R, M_0)$.*

3.7.2 Propriedades Estruturais

Tais propriedades estão interessadas em observar a estrutura do modelo. As propriedades estruturais são aquelas que refletem características independentes da marcação.

Desde que as redes sejam puras, a estrutura da rede pode ser representada pela matriz de incidência. Será visto os conceitos de limitação estrutural, conservação e consistência.

3.7.2.1 Limitação Estrutural Uma rede de Petri $R = (P, T, I, O, K)$ é classificada como estruturalmente limitada (*structural bounded*) se é limitada para qualquer marcação inicial.

3.7.2.2 Conservação A *conservação* é uma importante propriedade das redes de Petri permitindo, por exemplo, a verificação da não-destruição de recursos através da simples conservação de marcas [BAR85, BAR90]. Uma rede é dita *conservativa* se esta é conservativa para algum vetor de peso de inteiros positivos.

Definição 3.23 (Rede Conservativa) *Uma rede marcada $RM = (R; M_0)$ é dita conservativa com relação a um vetor de pesos $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$, se $\sum w_i \cdot M_k(p_i) = \sum w_i \cdot M_0(p_i)$, onde $n = \#P$ e w_i é um inteiro positivo, $\forall p_i \in P$ e $\forall M_k \in A(R; M_0)$.*

3.7.2.3 Consistência Uma rede de Petri tem a propriedade de consistência se disparando uma seqüência de transições a partir de uma marcação inicial M_0 retorna-se a M_0 , porém todas as transições da rede são disparadas pelo menos uma vez.

Definição 3.24 (Consistência) Seja $RM = (R; M_0)$ uma rede marcada e s uma seqüência de transições. RM é dita consistente se $M_0[s > M_0$ e toda transição t_i , dispara ao menos uma vez em s .

3.8 ANÁLISE DAS REDES DE PETRI

O estudo dos métodos de análise [MUR89, PET81, MUR84] das redes de Petri são fundamentais para verificação das propriedades existentes em cada rede. Os métodos de análise das redes de Petri podem ser classificados em três grupos: análise baseada na árvore de cobertura (análise por enumeração), os métodos baseados na equação fundamental das redes de Petri (técnicas de análise estrutural) e as técnicas de redução (análises por transformação). Neste trabalho, apenas será apresentado o primeiro grupo de análise: análise baseada na árvore de cobertura.

3.8.1 Árvore de Cobertura

O método de análise ora denominado *Árvore de Cobertura* baseia-se na construção de uma árvore que possibilite a representação de todas as possíveis marcações de uma rede.

Para uma dada rede de Petri, com uma marcação inicial, é possível obtermos diversas marcações para um grande número de transições potencialmente habilitadas [DCG91]. Essas marcações podem ser representadas por uma árvore, onde os nós são as marcações e os arcos as transições disparadas. Algumas propriedades, tais como limitação (*bound-ness*), segurança (*safeness*), transição morta (*dead*) e alcançabilidade de marcações [YEN92], podem ser analisadas através da árvore de cobertura.

A árvore de cobertura é um gráfico utilizado para representar finitamente⁴ um número infinito de marcações.

Definição 3.25 (Árvore de Cobertura) Seja $RM = (R; M_0)$ uma rede de Petri marcada. Define-se árvore de cobertura pelo par $AC = (S, A)$, onde S representa as marcações e A os arcos rotulados por $t_j \in T$.

Para uma rede de Petri limitada, a árvore de cobertura é denominada *árvore de alcançabilidade*, dado que esta contém todas as possíveis marcações da rede. Uma outra possível representação finita das marcações acessíveis pode ser obtida do grafo de cobertura [lp-2].

Definição 3.26 (Grafo de Cobertura) Seja $RM = (R; M_0)$ uma rede de Petri marcada. Define-se árvore de cobertura pelo par $GC = (S, A)$, onde S representa o conjunto de todos os nós na árvore de cobertura e A os arcos rotulados por $t_j \in T$ representando todas os possíveis disparos de transição tal que $M_i[t_k > M_j$, onde $M_i, M_j \in S$.

⁴Para possibilitar a representação finita das marcações, é utilizado o símbolo ω .

Se uma rede é limitada o grafo de cobertura é também denominado de *grafo de alcançabilidade*. Embora, através desse método de análise, pode-se analisar as propriedades de limitação (*boundedness*), segurança (*safeness*), conservação e problemas de cobertura de marcações (*coverability*), não possibilita a resolução de *liveness*, alcançabilidade (*reachability*) e reversibilidade em redes não-limitadas. Este problema está relacionado a introdução do símbolo ω que é uma informação da qual não sabemos o seu real valor.

3.8.2 Redução

Outra técnica muito comum e muita utilizada para análises quantitativas é a abordagem baseada na transformação. Realizar análises em redes de Petri, onde as dimensões da rede são realmente grandes, não é nada trivial. No entanto, a alcançabilidade de métodos que seguem os modelos de transformação conseguem preservar as propriedades inerentes a cada tipo de sistema.

Normalmente estas transformações são reduções que são aplicadas com o objetivo de obter modelos menores. Tais reduções conseguem preservar as propriedades qualitativas do modelo original.

As técnicas de redução são baseadas nas transformações de redes originais em um modelo mais abstrato de tal maneira que propriedades como *liveness*, *boudedness* e *safe-ness* são preservadas nos modelos obtidos por estas reduções. A transformação reversa (refinamento) pode ser usada para processos de síntese.

Nesta seção, somente as reduções simples serão apresentadas. Para mais informações em relação a este tópico as referências [BER, MUR89, BRA83] devem ser lidas. As regras de transformação das redes podem ser a partir de aplicação das fusões tanto de lugares quanto de transições.

3.8.2.1 Fusão de Lugar Serial Seja $R = (P, T, I, O, M_0)$ uma rede de Petri e $t_i \in T$ uma transição, onde $(I(t_i) = [p_j]$ e $O(t_i) = [p_k])$. R pode ser transformada em $R' = (P', T', I', O', M'_0)$ pela fusão dos lugares p_j e p_k , e pela eliminação de t_i . O lugar $p_{j/k} \in P'$ representa os lugares fundidos, onde $I(p_{j/k}) = I(p_j)$ e $O(p_{j/k}) = O(p_k)$.

3.8.2.2 Fusão de Transição Serial Seja $R = (P, T, I, O, M_0, D)$ uma rede de Petri e $p_i \in P$ um lugar, onde $(I(p_i) = [t_j]$ e $O(p_i) = [t_k])$. R pode ser transformada em $R' = (P', T', I', O', M'_0, D')$ pela fusão das transições t_j e t_k , e pela eliminação de p_i . A transição $t_{j/k} \in T'$ representa as transições fundidas, onde $I(t_{j/k}) = I(t_j)$ e $O(t_{j/k}) = O(t_k)$. $D = \{d_{t_{j/k}}\}$. $D(t_{j/k}) = D(t_j) + D(t_k) = d_{t_{j/k}}, d_{t_{j/k}} \in \mathbb{R}$.

3.9 SÍNTESE EM REDES DE PETRI

Em redes de Petri vários são os métodos de síntese de modelos para sistemas concorrentes, protocolos de comunicação, sistemas de manufatura, etc. Estes métodos abrangem abordagens *bottom-up* [ACA78, BEC85, KB86], *top-down* [VAL] e técnicas híbridas. Neste trabalho, será abordado apenas os métodos *top-down* e mais especificamente os refinamento de lugares.

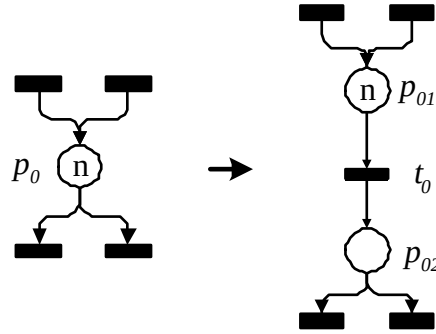


Figura 3.5. Refinamento de Lugar.

3.9.1 Método Top-Down

Atualmente sínteses cuja abordagem é *top-down*, iniciam com um modelo agregado de sistemas e negligenciam detalhes de baixo nível. Então, refinamentos são feitos de maneira prudente para incorporar mais detalhes dentro do modelo. Existem duas formas comuns de realizar os refinamentos: através da expansão dos lugares e através da expansão das transições. Os refinamentos continuam até que o nível de detalhes satisfaça a especificação do sistema. Métodos *Top-down* tem a vantagem da visualização do sistema de forma global do início até o final da síntese. Será apresentado nesta seção apenas o método de refinamento utilizado *a posteriori* neste trabalho: o refinamento de lugares.

3.9.1.1 Refinamento de Lugares Suzuki e Murata [SM] apresentam um método de refinamento para lugares, pelo qual o lugar refinado, p_0 , é primeiro substituído por outros lugares, p_{01} e p_{02} , e por uma transição t_0 tal que as condições abaixo devem ser satisfeitas:

- i) As transições de entrada (saída) de p_{01} (p_{02}) são transições de entrada (saída) de p_0 ;
- ii) p_{01} (p_{02}) é somente lugar de entrada (saída) de t_0 ;
- iii) A marcação inicial de p_{01} é igual a marcação inicial de p_0 ;
- iv) A marcação inicial de p_{02} é zero.

A Figura 3.5 ilustra graficamente as definições citadas acima em relação ao refinamento de lugar em uma rede de Petri. Depois que estas condições são satisfeitas, técnicas de refinamento de transição pode ser aplicada a transição t_0 . Suzuki e Murata demonstraram também que o método de refinamento de lugar, também preserva as propriedades de *boundness*, *safeness* e *liveness* após o refinamento realizado.

METODOLOGIA DE MODELAGEM

Neste capítulo faz-se uma introdução às informações utilizadas em sistemas de produção discreto, bem como apresenta-se um modelo fundamentado em redes de Petri para permitir análises e estimativas. É feita uma descrição detalhada das informações necessárias de sistema de manufatura para sua utilização no modelo. Finalmente, aplica-se em um simples exemplo de sistema de manufatura todos os passos necessários para construção do modelo proposto.

4.1 INTRODUÇÃO

Uma Rede de Petri, segundo [DHP⁺93], pode ser usada para modelar um sistema dinâmico de eventos discretos atribuindo um significado para os elementos associados (lugares, transições e tokens) e relacionando explicitamente o sistema modelado e seu ambiente (ver Figura 4.1). Em geral o comportamento de um sistema é influenciado pelo ambiente (através de eventos) quando as ações geradas pelo sistema influenciam o comportamento de seu ambiente. Sendo então um sistema de manufatura caracterizado como um sistema discreto, consegue-se modelá-lo utilizando Redes de Petri.

Inerente ao processo de manufatura, o aspecto tempo nestes sistemas descreve uma relação causal existente entre os eventos. A introdução de uma especificação temporal é essencial no modelo apresentado, pois deseja-se utilizar uma classe de modelo que considere alguns aspectos dentro do sistema de manufatura, como desempenho, escalonamento e estoque.

Sendo assim, nesta seção será apresentado uma metodologia formal para modelar um sistema de produção discreto através de uma classe temporizada de Redes de Petri denominada *Timed Petri Net*. Os aspectos que serão considerados para este sistema de

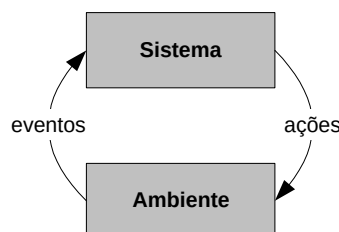


Figura 4.1. Modelo de sistemas e ambientes

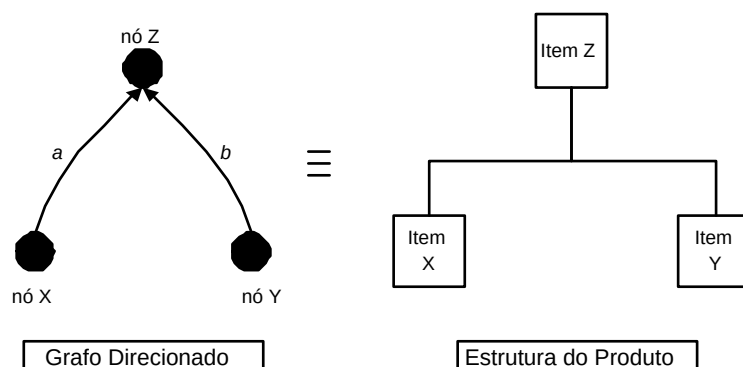


Figura 4.2. Modelos equivalente: Grafo Direcionado e Estrutura do Produto

produção serão informações tanto para o planejamento da produção quanto para dimensionamento de estoque.

4.2 INFORMAÇÕES PARA METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia proposta para a modelagem do Planejamento da Produção é baseada num Sistema de Produção Discreto representado através de uma extensão de redes de Petri denominada *Timed Petri Net*. Neste tipo de sistema as informações que serão consideradas são as referente ao escalonamento de produção e ao estoque de itens. A estrutura do produto torna-se a base do sistema, na medida em que ela consegue descrever as relações de precedência/dependência entre os itens de produção.

Qualquer nível de agregação de produto pode ser empregada nesta estrutura. O modelo proposto não é dependente da granularidade escolhida para modelar a linha de produção. O nível de agregação não é determinante para a construção do modelo, que é unicamente baseado nos elementos que fazem parte da estrutura do produto.

Antes de apresentar formalmente a estrutura do produto, de maneira simples e informal, será mostrada a equivalência da estrutura com o conceito de grafo direcionado.

Um grafo direcionado é formado por elementos denominados nós (vértices) e arcos (arestas). Diz-se que um grafo é direcionado quando deseja-se que os arcos de um dado grafo comecem em um nó e terminem em outro, possuindo um sentido ou orientação.

Na estrutura do produto os elementos gráficos que a constitui são denominados itens (caixas) e conexões (linhas). O sentido de direção, apesar de não estar explícito, também é representado na estrutura do produto. O sentido é de acordo com o desencadeamento do processo produtivo. A ordem de manufatura ocorre então de baixo para cima, do nível 0 até o nível do produto final (item localizado mais acima no modelo).

Pode-se afirmar então, de maneira informal, que uma estrutura do produto também pode ser representada por um grafo direcionado. Os nós do grafo seriam representados pelos itens da estrutura, enquanto que os arcos seriam as conexões (ver Figura 4.2).

Um conjunto de atributos é mapeado para cada item da estrutura do produto. Tais atributos são informações necessárias para a operação sob o item. Sempre será atribuído

um conjunto mínimo de informações para cada item. Além dos atributos mínimos, caso o item tenha restrições de estoque para sua operação, outro conjunto de atributos deve ser informado. As informações mínimas que devem ser inseridas no item são as seguintes:

- nível do item na estrutura do produto;
- quantidade de ordem de serviço;
- tempo de operação para se obter o item;
- quantidade exigida de ordens de serviço para realizar a operação (consumo de ordem de serviço);
- unidade de medida do item.

Quando um item possui informações relativas ao estoque, o conjunto de atributos que devem ser inseridos para o item são os seguintes:

- nível corrente de estoque;
- nível Mínimo do estoque ou estoque de segurança;
- capacidade Máxima do estoque;
- tempo para o ressuprimento;
- ordens fixas;
- quantidade exigida do estoque para realizar a operação (consumo de estoque).

A Figura 4.3 ilustra como fica a atribuição destas informações nos itens com e sem restrições de estoque. Note que na Figura 4.3 os itens *ItemX* e *ItemY* possuem informações de estoque, mas o item *ItemZ* não.

Após elencar todos os atributos inerentes aos itens da estrutura do produto, convém definir mais formalmente cada um deles. Segue abaixo as definições dos atributos mínimos e de estoque.

O *nível* representa o patamar em que um item encontra-se na estrutura do produto. Convenciona-se que o nível mais baixo da estrutura do produto é o nível 0 (zero). Todo item tem um nível associado a ele (ver Figura 4.4). O último nível da estrutura do produto é formado por apenas um item dito *produto-final*. Segue definição formal abaixo:

Definição 4.1 (Nível) *Seja PR o conjunto de itens de produção. $N_{iv} : PR \rightarrow IN$ define o nível de um item na estrutura do produto. $N_{iv}(pr_i) = 0$ se pr_i for um item que pertence ao conjunto de itens básicos da estrutura do produto. $N_{iv}(pr_j) - N_{iv}(pr_i) = b, b \in IN, pr_i, pr_j \in PR$ define a profundidade do item pr_j em relação ao item pr_i . Se $N_{iv}(pr_i) = 0$ e pr_j representa um item produto final, então $N_{iv}(pr_j) = b$ representa a profundidade da estrutura do produto.*

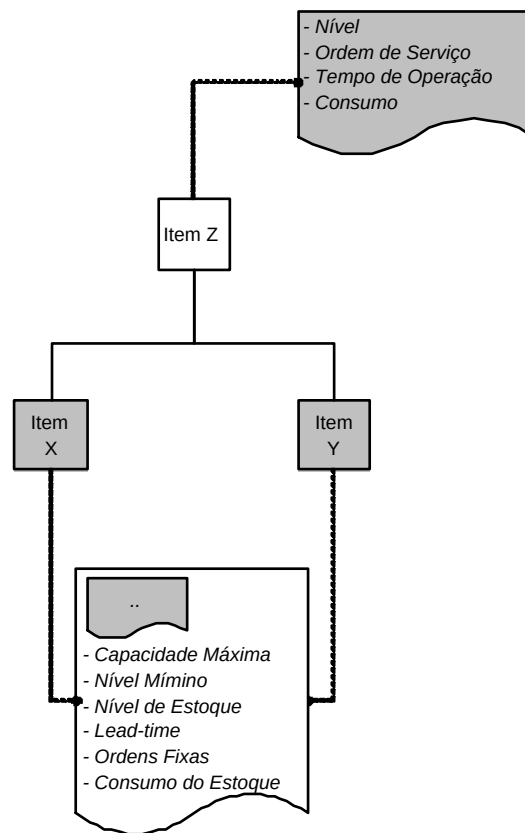


Figura 4.3. Atributos na Estrutura do Produto.

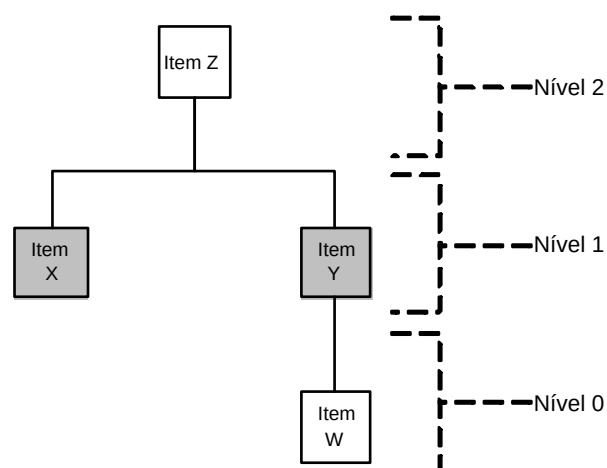


Figura 4.4. Níveis de itens na Estrutura do Produto.

A *ordem de serviço* representa as ordens emitidas para a produção de uma determinada quantidade de itens. Segue definição formal abaixo:

Definição 4.2 (Ordem de Serviço) *Seja PR o conjunto de itens de produção. $O_{srv} : PR \rightarrow IN^*$ define a ordem de serviço de um item na estrutura do produto.*

O *tempo de operação* representa o tempo necessário para se obter um item, seja por fabricação ou compra. Segue definição formal abaixo:

Definição 4.3 (Tempo de Operação) *Seja PR o conjunto de itens de produção. $T_{op} : PR \rightarrow IR^+ \cup \{0\}$ define uma função que associa a cada item $pr_i \in PR$ um tempo. $T_{op}(pr_i) = b$, onde $b \in IR^+ \cup \{0\}$ é o tempo de fabricação/compra do item pr_i .*

O *consumo* ou *consumo de ordens de serviços* representa a quantidade mínima exigida para iniciar a operação no item. Caso o item seja de fabricação, esta quantidade é o número de unidades de insumos. Caso o item seja de compra, esta quantidade é o número de ordens de compra. Segue definição formal abaixo:

Definição 4.4 (Consumo) *Seja PR o conjunto de itens de produção. $C_{ons} : PR \rightarrow IN^*$ define o consumo de um item na estrutura do produto.*

O *nível de estoque* representa o número presente em estoque de cada item. Segue definição formal abaixo:

Definição 4.5 (Nível de Estoque) *Seja PR o conjunto de itens de produção. $N_{est} : PR \rightarrow IN$ define o nível do estoque de um item considerado na estrutura do produto. Se $N_{est}(pr_i) = 0$, então a operação vinculada ao item pr_i não será realizada até que o estoque seja reposto ($N_{est}(pr_i) > 0$).*

O *nível mínimo de estoque* representa o número mínimo permitido de cada item em estoque. Também é conhecido como estoque de segurança. Segue definição formal abaixo:

Definição 4.6 (Nível Mínimo de Estoque) *Seja PR o conjunto de itens de produção. $S_{min} : PR \rightarrow IN$ define o nível mínimo do estoque de um item na estrutura do produto. $S_{min}(pr_i) = b, b \in IN$, onde b representa o valor adotado para o nível mínimo de estoque.*

A *capacidade máxima* é o número máximo de unidades de um determinado item que o estoque suporta. Segue definição formal abaixo:

Definição 4.7 (Capacidade Máxima do Estoque) *Seja PR o conjunto de itens de produção. $C_{max} : PR \rightarrow IN^*$ define a capacidade máxima do estoque de um item considerado na estrutura do produto. $C_{max}(pr_i) > 0$ e $C_{max}(pr_i) >> N_{est}(pr_i), pr_i \in PR$.*

O *Tempo de Ressuprimento* representa o tempo entre a geração de uma ordem de serviço e o recebimento dos itens para estocagem. Segue definição formal abaixo:

Definição 4.8 (Tempo de Ressuprimento) *Seja PR o conjunto de itens de produção. $T_{rp} : PR \rightarrow \mathbb{R}^+ \cup \{0\}$ define uma função que associa a cada item $pr_i \in PR$ um tempo. $T_{rp}(pr_i) = b$, onde b é o tempo de ressuprimento do item pr_i .*

As *ordens fixas* representam as ordens de compra ou serviço de quantidades fixadas para reposição do estoque. Segue definição formal abaixo:

Definição 4.9 (Ordens Fixas) *Seja PR o conjunto de itens de produção. $O_{fix} : PR \rightarrow \mathbb{N}^*$ define as ordens fixas de um item na estrutura do produto.*

O *consumo do estoque* representa a quantidade consumida do estoque para atender a demanda de operação de um determinado item. Segue definição formal abaixo:

Definição 4.10 (Consumo do Estoque) *Seja PR o conjunto de itens de produção. $C_{on} : PR \rightarrow \mathbb{N}^*$ define o consumo do estoque de um item da estrutura do produto.*

A inserção dos atributos no modelo da estrutura do produto, portanto, deve ser criteriosamente informada para que a estrutura represente fielmente o sistema de produção estudado.

Para finalizar o conjunto de informações inerentes à estrutura do produto, deve também ser informado um atributo chamado *Pedido do Sistema*. Este atributo não é específico de cada item, mas sim representa uma informação do sistema de produção como um todo.

Pedido do Sistema: representa a quantidade exigida do produto final para atender as necessidades de um determinado cliente.

4.3 MODELANDO A ESTRUTURA DO PRODUTO

Esta seção apresenta um modelo desenvolvido para representar a estrutura do produto, com finalidade de capturar as informações de dependências/precedências entre seus itens. Será definido mais formalmente a estrutura do produto através da notação de grafos direcionados. Esta notação é adequada, pois possibilita uma representação direta da notação usual que a comunidade de sistemas de produção utiliza para representar estruturas de produto.

A estrutura do produto, no contexto deste trabalho, é formada por dois tipos de elementos: *componente-simples* e *componente-estoque*. O *componente-simples* é caracterizado por não possuir restrição de quantidades disponíveis em estoque. Na medida em que uma ordem de serviço é emitida para um item componente-simples, a operação a ser realizada no item pode ser iniciada e não depende de nenhum outro fator.

Por outro lado, existe também itens do tipo *componente-estoque*. Estes, ao contrário dos itens componente-simples, possuem no seu processo de manufatura uma disponibilidade vinculada. Este nível de disponibilidade reflete no número de itens em estoque. A partir do momento em que o estoque não possua mais itens disponíveis $N_{est}(pr_i) = 0$, existirá o comprometimento da operação para o item correspondente. Até que o estoque seja devidamente repostado, a operação a ser realizada no item não ocorrerá.

Aos itens do tipo componente-simples atribui-se o seguinte conjunto de informações: nível do item na estrutura do produto, ordem de serviço, tempo de operação e consumo. Segue a definição formal abaixo:

Definição 4.11 (Componente-Simples) *Seja $CS = \{pr_i\}$ o conjunto finito de itens do tipo componente-simples pertencentes à estrutura do produto. Para cada item $pr_i \in CS$, definem-se os seus atributos pela avaliação das funções da tupla $(N_{iv}, O_{sr}, T_{op}, C_{on})$.*

Para os itens do tipo componente-estoque, além dos atributos existentes nos itens componente-simples, existirão as seguintes informações: nível de estoque, nível mínimo de estoque, capacidade máxima do estoque, tempo de ressuprimento, ordens fixas e consumo do estoque. Segue definição formal abaixo:

Definição 4.12 (Componente-Estoque) *Seja $CE = \{pr_j\}$ o conjunto finito de itens do tipo componente-estoque pertencentes à estrutura do produto. Para cada item $pr_j \in CE$, definem-se os seus atributos pela avaliação das funções da tupla $(N_{iv}, O_{sr}, T_{op}, C_{on}, N_{est}, C_{max}, S_{min}, T_{rp}, O_{fix}, C_{est})$.*

No conjunto de itens da produção tem-se um subconjunto de itens cujo nível é igual a 0, itens cujo nível é a profundidade da estrutura do produto e itens cujo nível é diferente de zero e da a profundidade.

Os itens da estrutura do produto que estão distribuídos no nível zero, são denominados Itens Básicos. Segue definição formal abaixo:

Definição 4.13 (Itens Básicos) *Seja $PR \supset PR_{ib} = \{pr_i\}$ o conjunto não vazio de itens básicos pertencentes à estrutura do produto. $\forall pr_i \in PR_{ib}, N_{iv}(pr_i) = 0$.*

O item da estrutura do produto que é localizado no nível igual a profundidade da estrutura do produto, é denominado Item Produto-Final. Segue definição formal abaixo:

Definição 4.14 (Item Produto-Final) *Seja $PR \supset PR_{pf} = \{pr_j\}$ o conjunto de itens produto-final pertencentes à estrutura do produto. $\forall pr_{pf} \in PR_{pf}, N_{iv}(pr_{pf}) = b$, onde b é a profundidade da estrutura do produto, $|PR_{pf}| = 1$.*

Os itens da estrutura do produto que estão distribuídos nos níveis intermediários (entre o nível zero e a profundidade) da estrutura do produto, são denominados Itens Intermediários. Segue definição formal abaixo:

Definição 4.15 (Itens Intermediários) *Seja $PR \supset PR_{int} = \{pr_k\}$ o conjunto de itens intermediários pertencentes à estrutura do produto. $\forall pr_{int} \in PR_{int}, N_{iv}(pr_{ib}) < N_{iv}(pr_{int}) < N_{iv}(pr_{pf}), pr_{ib} \in PR_{ib}, pr_{pf} \in PR_{pf}$. Caso um item intermediário não possua itens precedentes a ele, ele é particularizado como sendo um item folha.*

A *Estrutura de Produto* será definida formalmente abaixo segundo os conceitos de grafos direcionados. Algumas restrições serão adotadas nesta definição para que o grafo obedeça a regras inerentes a estrutura do produto, são elas:

- i) um nó inicial possui no máximo um arco ligando-o com o mesmo nó final;

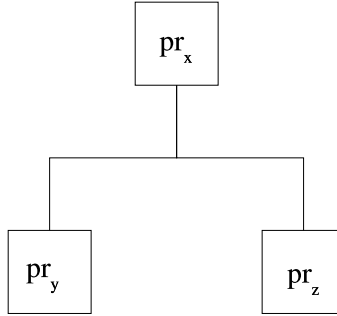


Figura 4.5. Estrutura de Produto simplificada.

- ii) não existe um nó inicial que seja ligado a um nó final de nível igual ou menor ao dele;
- iii) não existe um nó inicial que seu nível seja menor do que 0;
- iv) não existe um nó final cujo o nível seja maior que a profundidade da estrutura do produto.

Definição 4.16 (Estrutura do Produto) *Seja uma estrutura do produto formado pela tupla (PR, CN) , onde PR representa um conjunto não vazio de itens de produção. $PR = PR_{ib} \cup PR_{int} \cup PR_{prf}$. CN representa um conjunto não vazio de arcos. $CN = \{a | a = (x, y), x, y \in PR \text{ e } \nexists a' = a, a \in CN \text{ e } \nexists x, Niv(x) \geq Niv(y), Niv(x) < 0 \text{ e } \nexists y, Niv(y) \geq b\}$, onde b é a profundidade da estrutura do produto.*

Para ilustrar a definição da estrutura do produto, considere uma estrutura formada por três itens (ver Figura 4.5), onde a formação do produto final pr_x será realizada a partir da composição de dois outros itens pr_y e pr_z . Define-se então, o conjunto de itens de produção como sendo PR , onde $PR = \{pr_x, pr_y, pr_z\}$; o conjunto de conexões como sendo $CN = \{a, b\}$, onde $a = (pr_y, pr_x)$ e $b = (pr_z, pr_x)$; a função de nível Niv para os itens definida como $Niv(pr_x) = 1$, $Niv(pr_y) = 0$ e $Niv(pr_z) = 0$.

4.4 MODELO COMPLETO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO

Para modelar um sistema de produção é necessário entender, além de seu conceito, o limite do mesmo. De maneira geral, um sistema pode ser entendido como um conjunto de elementos dinamicamente e estruturalmente relacionados entre si, formando um conjunto de atividades para possibilitar avaliação de políticas de estoque.

Como visto anteriormente, um sistema de produção representado pela estrutura do produto é composto por itens e conexões. Informações inerentes aos itens, independente do tipo (simples ou estoque), podem ser associadas a um conjunto de atributos.

Tendo em vista agora o processo produtivo como um todo, pode-se caracterizá-lo pelo interrelacionamento complexo de suas atividades, condições, ciclos, repetições e conexões.

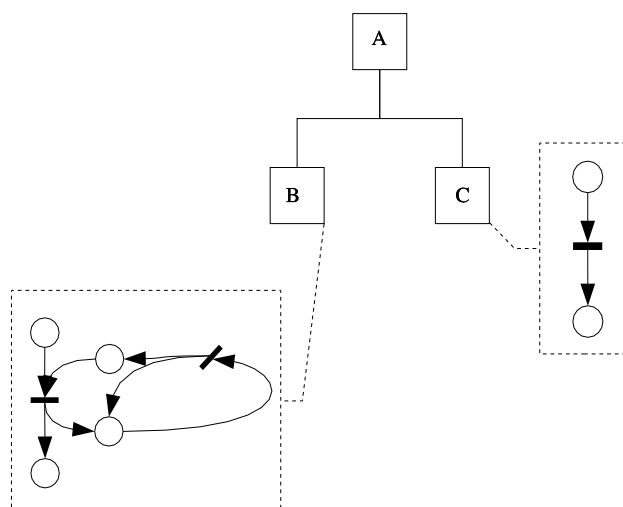


Figura 4.6. Produto mapeado em uma rede de Petri.

Baseado na natureza discreta do interrelacionamento entre atividades e condições, estes sistemas de manufatura podem ser definidos como sistemas de eventos discretos [Ho, 1989] ou sistemas de produção discreto [Silva, 1989].

Esta seção apresenta o método de geração dos modelos redes de Petri a partir do modelo da estrutura do produto. A metodologia de geração do modelo leva em consideração a estrutura de um produto formado por componentes do tipo simples e do tipo estoque. A aplicação do método gera uma *Timed Petri Net*.

Antes de apresentar um modelo redes de Petri dos itens simples e de estoque, convém associar cada conceito definido anteriormente de um sistema de manufatura aos elementos nativos das redes de Petri .

Lugares: um lugar poderá representar tanto níveis e capacidade de estoque, quanto o início e fim de uma operação.

Transições: uma transição poderá representar operações a serem realizadas.

Arcos: pesos nos arcos poderão representar quantidades de itens para reposição ou consumo de estoque.

Tokens: os token poderão representar ordem de serviço e níveis.

A Figura 4.6 ilustra a equivalência entre os modelos da estrutura do produto e os modelos rede de Petri correspondentes. Cada item, representado como uma caixa na estrutura possui uma estrutura em rede de Petri equivalente. De forma análoga, também se monta uma estrutura equivalente para as conexões, representadas através de linhas entre os itens (ver Figura 4.7). Em seguida, serão formalizados os modelos em redes de Petri para um Sistema de Produção Discreto como segue abaixo:

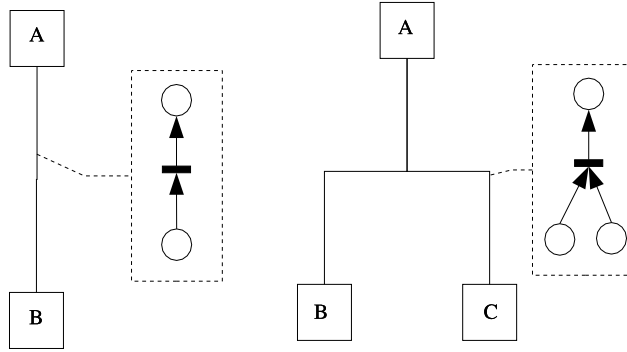


Figura 4.7. Conexão mapeada na rede de Petri.

Definição 4.17 (Sistema de Produção Discreto) Seja SPD um sistema de produção discreto. $SPD = (IFM, OFM, CNM, MCS, MCE, CLM)$ define um modelo para o sistema de produção discreto na fase do planejamento da produção, onde:

- IFM representa o *Modelo Input-Flow*, cuja função é modelar os pedidos emitidos para o sistema;
- OFM representa o *Modelo Output-Flow*, cuja função é modelar os pedidos concluídos pelo sistema;
- CNM representa o *Modelo Conexão*, cuja função é modelar as conexões existentes entre os itens da estrutura do produto do sistema;
- MCS representa o *Modelo Componente-Simples*, cuja função é modelar os itens componente-simples que compõem a estrutura de produtos do sistema;
- MCE representa o *Modelo Componente-Estoque*, cuja função é modelar os itens componente-estoque que compõem a estrutura de produtos do sistema que necessitam de estoque;
- CLM representa o *Modelo Closure*, cuja função é modelar o aspecto cíclico do sistema tornando o modelo fortemente conectado;

O Modelo *Input-Flow* (Figura 4.8) descreve a emissão de um pedido para o sistema de produção. É desta maneira que o sistema modelado entra em funcionamento executando suas operações. O Modelo *Input-Flow* é formalizado abaixo:

Definição 4.18 (Modelo *Input-Flow*) Seja $IFM = (P, T, I, O, M_0, D)$ uma *Timed*

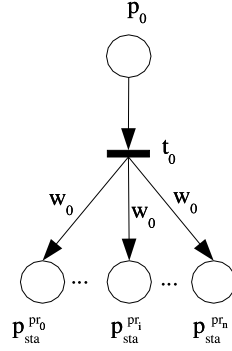


Figura 4.8. Modelo *Input-Flow*

Petri Net definindo o modelo *input-flow* de pedidos emitidos para o sistema.

$$\begin{cases} P = \{p_0, p_{sta}^{pr_i}\} \\ T = \{t_0\} \\ I(p_0, t_0) = 1 \\ O(p_{sta}^{pr_i}, t_0) = 1 \\ D = \{d_0\}, d_0 = 0 \end{cases}$$

Um token no lugar p_0 e $p_{sta}^{pr_i}$ modela a quantidade de produtos finais a serem produzidos (conforme pedido) e a emissão de uma ordem de serviço de um item pr_i .

O Modelo *Output-Flow* (Figura 4.9) descreve a conclusão dos pedidos do sistema. É desta maneira que o sistema de produção finaliza todas as operações e o produto final na quantidade exigida pelo pedido gerado. O Modelo *Output-Flow* é formalizado abaixo:

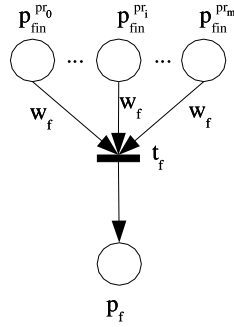
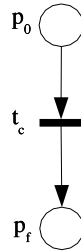
Definição 4.19 (Modelo *Output-Flow*) Seja $OFM = (P, T, I, O, M_0, D)$ uma *Timed Petri Net* definindo o modelo *output-flow* que representa os pedidos concluídos pelo sistema.

$$\begin{cases} P = \{p_{fin}^{pr_i}, p_f\} \\ T = \{t_f\} \\ I(p_{fin}^{pr_i}, t_f) = 1 \\ O(p_f, t_f) = 1 \\ D = \{d_f\}, d_f = 0 \end{cases}$$

Um token no lugar p_f e $p_{fin}^{pr_i}$ modela a quantidade de produtos finais produzidos pelo sistema e a conclusão da ordem de serviço de um item.

O Modelo *Closure* (Figura 4.10) modela a capacidade do sistema de repetir todo o ciclo de produção, tornando a rede (modelo completo) conectada. O Modelo *Closure* é formalizado abaixo:

Definição 4.20 (Modelo *Closure*) Seja $CLM = (P, T, I, O, M_0, D)$ uma *Timed Petri*

**Figura 4.9.** Modelo *Output-Flow***Figura 4.10.** Modelo *Closure*

Net que define um modelo *closure* da linha de produção.

$$\left\{ \begin{array}{l} P = \{p_f, p_0\} \\ T = \{t_c\} \\ I(p_f, t_c) = a \\ O(p_0, t_c) = a, a \in \mathbb{N}^* \\ D = \{d_c\}, d_c = 0 \end{array} \right.$$

a representa a quantidade de produtos finais produzidos pelo sistema. O disparo da transição t_c representa a conclusão do pedido para o sistema modelado.

O *Modelo Componente-Simples* (Figura 4.11) descreve uma operação sob o item componente-simples (pr_i) da estrutura de produto que não possui restrição de estoque. Esta operação depende unicamente de suas ordens de serviço. Segue definição formal abaixo:

Definição 4.21 (Modelo Componente-Simples) Seja $MCS = (P, T, I, O, M_0, D)$

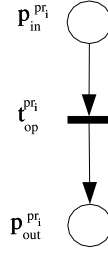


Figura 4.11. Modelo Componente-Simples

uma *Timed Petri Net* que define um modelo componente-simples.

$$\left\{ \begin{array}{l} P = \{p_{in}^{pr_i}, p_{out}^{pr_i}\} \\ T = \{t_{op}^{pr_i}\} \\ I(p_{in}^{pr_i}, t_{op}^{pr_i}) = C_{on}(pr_i) = 1 \\ O(p_{out}^{pr_i}, t_{op}^{pr_i}) = O_{srv}(pr_i) = 1 \\ D = \{d_{op}^{pr_i}\} \\ d_{op}^{pr_i} = T_{op}(pr_i) \end{array} \right.$$

O disparo da transição $t_{op}^{pr_i}$ modela a ordem de serviço em execução. Um token nos lugares $p_{in}^{pr_i}$ e $p_{out}^{pr_i}$ representam a existência de uma ordem de serviço para realização da operação e a finalização da operação, respectivamente.

O *Modelo Componente-Estoque* (Figura 4.12) descreve cada item componente-estoque (pr_i) da estrutura de produto que possui estoque associado ao item. O modelo proposto emprega restrição de disponibilidade de itens, ou seja, a operação de manufatura do item depende das quantidades em estoque para atender uma ordem de serviço. Segue definição formal abaixo:

Definição 4.22 (Modelo Componente-Estoque) Seja $MCE = (P, T, I, O, M_0, D)$ uma *Timed Petri Net* que define um modelo de componente-estoque.

$$\left\{ \begin{array}{l} P = \{p_{in}^{pr_i}, p_e^{pr_i}, p_{e'}^{pr_i}, p_{out}^{pr_i}\} \\ T = \{t_{op}^{pr_i}, t_{rp}^{pr_i}\} \\ I(p_{in}^{pr_i}, t_{op}^{pr_i}) = C_{on}(pr_i) = 1 \\ O(p_{out}^{pr_i}, t_{op}^{pr_i}) = O_{srv}(pr_i) = 1 \\ I(p_e^{pr_i}, t_{op}^{pr_i}) = O(t_{op}^{pr_i}, p_{e'}^{pr_i}) = w_e \\ I(p_{e'}^{pr_i}, t_{rp}^{pr_i}) = w_a \\ O(p_{e'}^{pr_i}, t_{rp}^{pr_i}) = w_b \\ O(p_e^{pr_i}, t_{rp}^{pr_i}) = w_q \\ D = \{d_{op}^{pr_i}, d_{rp}^{pr_i}\} \\ d_{op}^{pr_i} = T_{op}(pr_i), d_{rp}^{pr_i} = T_{rp}(pr_i) \end{array} \right.$$

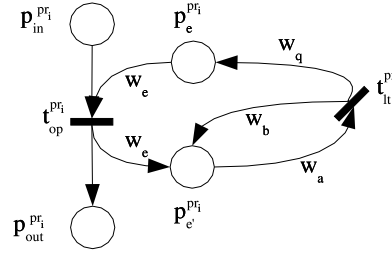


Figura 4.12. Modelo Componente-Estoque

O disparo das transições $t_{op}^{pr_i}$ e $t_{rp}^{pr_i}$ modela a emissão da ordem de serviço e a aquisição de itens para o estoque, respectivamente. Um token nos lugares $p_{in}^{pr_i}, p_e^{pr_i}, p_{e'}^{pr_i}, p_{out}^{pr_i} \in P$ modela a existência de ordem de serviço para realização da operação, nível do estoque, a disponibilidade de espaço de armazenamento em estoque e a finalização da operação, respectivamente. w_e, w_q, w_a, w_b modela a quantidade de itens fornecida do estoque para realização de uma operação, quantidades fixas associadas a uma ordem de reposição, o espaço disponível em estoque para que ocorra uma requisição de uma ordem de reposição ($C_{max} - S_{min}$) e o espaço ocupado em estoque através da reposição ($C_{max} - S_{min} - w_q$), respectivamente. C_{max} é dado pela soma entre $m(p_e^{pr_i})$ e $m(p_{e'}^{pr_i})$, então pode-se afirmar que $p_{e'}^{pr_i}$ é o lugar complementar de $p_e^{pr_i}$.

O Modelo *Conexão* (Figura 4.13) descreve todas as conexões existentes na estrutura do produto. Tais conexões podem caracterizar uma composição de itens para a formação de um próximo ou simplesmente uma ligação sequencial entre dois itens. É desta maneira que se consegue representar as dependências e precedências da estrutura do produto e mapeá-las em redes de Petri. O Modelo *Conexão* é formalizado abaixo:

Definição 4.23 (Modelo *Conexão*) Seja $CNM = (P, T, I, O, M_0, D)$ uma *Timed Petri Net* que define o modelo conexão entre itens da estrutura do produto. $T = \{t_{ct}^k\}$, onde t_{ct}^k é denominado *transição-conexão*. $P = \{p_{cout}^{pr_i}, p_{cin}^{pr_j}\}$, onde $pr_i \neq pr_j$. Um token no lugar $p_{cout}^{pr_i}$ e $p_{cin}^{pr_j}$ modela o fim da operação sob um item pr_i e a próxima ordem de serviço a ser executada, respectivamente. $O(p_{cin}^{pr_j}, t_{ct}^k) = I(p_{cout}^{pr_i}, t_{ct}^k) = 1$. $D = \{d_{ct}^k\}$, onde $d_{ct}^k = 0$.

4.4.1 Modelo Complementar Lugar-Transição

O Modelo Lugar-Transição (Figura 4.14) modela uma estrutura auxiliar/complementar da estrutura do produto. Ela é inserida quando se deseja que a rede se comporte com características ALAP. A maneira como estas estruturas serão inseridas na rede, será abordado no próximo capítulo. O Modelo Lugar-Transição é formalizado abaixo:

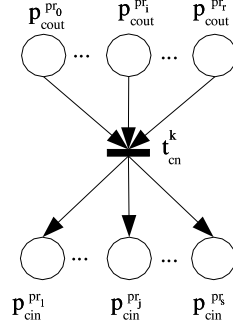
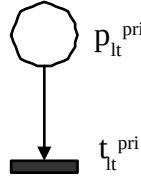
Figura 4.13. Modelo *Conexão*

Figura 4.14. Modelo Lugar-Transição

Definição 4.24 (Modelo Lugar-Transição) Seja $MLT = (P, T, I, O, M_0, D)$ uma *Timed Petri Net* que define um modelo lugar-transição da linha de produção.

$$\begin{cases} P = \{p_{lt}^{pri}\} \\ T = \{t_{lt}^{pri}\} \\ I(p_{lt}^{pri}, t_{lt}^{pri}) = 1 \\ D = \{d_{lt}^{pri}\}, d_{lt}^{pri} \in IR \end{cases}$$

4.4.2 Construção do Modelo Completo

Com base nas definições descritas anteriormente, é necessário ainda fazer ajustes entre os modelos, de tal forma que agregados formem um único modelo do sistema de produção discreto (*SPD*). Esses ajustes realizados são operações de fusões entre pares de elementos do modelo *SPD*.

O processo de fusão, já apresentado no capítulo anterior, é realizado entre lugares de modelos distintos. Por exemplo, lugares específicos do Modelo Componente-Simples são fundidos com lugares do Modelo *Conexão*. A operação que ocorre é a fusão entre lugares sequenciais (*Serial-Place Fusion*), onde dois lugares sequenciais se fundem resultando um outro lugar equivalente.

Para se construir/montar o modelo completo, baseado nas informações do sistema de produção modelado através de *SPD*, é necessário saber em que par de modelos a fusão pode ser aplicada:

- fusão entre Modelo *Input-Flow* com Modelo Componente-Simples e/ou Modelo Componente-Estoque;
- fusão entre Modelo Componente-Simples e/ou Modelo Componente-Estoque com Modelo *Conexão*;
- fusão entre Modelo Componente-Simples e/ou Modelo Componente-Estoque com Modelo *Output-Flow*.

Para se efetuar a fusão entre os modelos *IFM* com *MCS* e/ou *MCE* é necessário identificar itens que não possuam outros de menor nível ligados a ele. Segue abaixo a definição formal da fusão entre o Modelo *Input-Flow* e o Modelo Componente-Simples (ver Figura 4.15). A definição descrita abaixo, de forma análoga, aplica-se a fusão do Modelo *Input-Flow* com o Modelo Componente-Estoque.

Definição 4.25 (Fusão IFM e MCS) Sejam $IFM = (P^x, T^x, I^x, O^x, M_0^x, D^x)$ e $MCS = (P^y, T^y, I^y, O^y, M_0^y, D^y)$ o modelo *input-flow* e o modelo *componente-simples*, respectivamente. Ambos os modelos são uma *Timed Petri Net*, onde

$$\begin{cases} O^x(p_{sta}^{pr_i}, t_0) = 1 \\ I^y(p_{in}^{pr_i}, t_{op}^{pr_i}) = 1 \end{cases}$$

IFM e *MCS* podem se transformar em $N_{mcs}^{ifm} = (P', T', I', O', M_0', D')$ pela fusão dos lugares existentes nos conjuntos

$$\begin{cases} P f^x = \{p_{sta}^{pr_i}\} \\ P f^y = \{p_{in}^{pr_i}\} \\ P f^x \subseteq P^x, P f^y \subseteq P^y \end{cases}$$

P' define o conjunto de lugares resultante após a fusão, onde

$$\begin{cases} P' = P^x \cup P^y - P f^x \\ \forall p_{in}^{pr_i} \in P f^y, \bullet p_{in}^{pr_i} = \{t_0 | t_0^\bullet \in P f^x\} \end{cases}$$

Após a fusão, portanto, aplica-se uma função nomeação $l : P f^y \rightarrow \Sigma$ para o lugar resultante, onde

$$\begin{cases} \Sigma = \{q_{sta}^{pr_i}\} \\ l(p_{in}^{pr_i}) = q_{sta}^{pr_i}, q_{sta}^{pr_i} \in P' \\ I'(q_{sta}^{pr_i}, t_{op}^{pr_i}) = I^x(p_{sta}^{pr_i}, t_{op}^{pr_i}) \\ O'(q_{sta}^{pr_i}, t_0) = O^y(p_{in}^{pr_i}, t_0) \end{cases}$$

Após realizar todas as fusões necessárias entre os itens *folha* com o modelo de entrada (Modelo *Input-Flow*), o próximo passo é realizar a fusão entre os itens e suas conexões na estrutura do produto.

A fusão entre o Modelo *Conexão* e o Modelo Componente-Simples e/ou Modelo Componente-Estoque será realizada nos lugares de entrada ($p_{cout}^{pr_i}$) e também nos lugares de saída ($p_{cin}^{pr_j}$) da transição t_c (ver Figura 4.16). A definição formal da operação de fusão entre MCS e CNM será apresentada abaixo. De maneira análoga, pode-se aplicar esta definição para a fusão entre MCE e CNM.

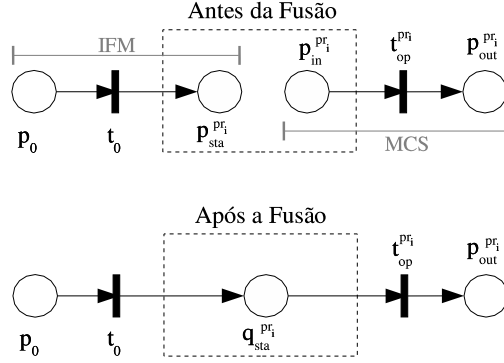


Figura 4.15. Fusão entre IFM e MCS

Definição 4.26 (Fusão MCS e CNM) Sejam $MCS = (P^x, T^x, I^x, O^x, M_0^x, D^x)$ e $CNM = (P^y, T^y, I^y, O^y, M_0^y, D^y)$ o modelo componente-simples e o modelo conexão respectivamente. Ambos os modelos são uma *Timed Petri Net*, onde

$$\begin{cases} O^x(p_{out}^{pr_i}, t_{op}^{pr_i}) = 1 \\ I^y(p_{cout}^{pr_i}, t_{ct}^i) = 1 \\ O^y(p_{cin}^{pr_j}, t_{ct}^i) = 1 \\ I^x(p_{in}^{pr_j}, t_{op}^{pr_j}) = 1 \end{cases}$$

MCS e CNM podem ser combinados em $N_{cnm}^{mcs} = (P', T', I', O', M_0', D')$ pela fusão dos lugares pertencentes a

$$\begin{cases} Pf_1^x, Pf_2^x \subseteq P^x \\ Pf_1^y, Pf_2^y \subseteq P^y \\ Pf_1^x = \{p_{out}^{pr_i}\} \\ Pf_2^x = \{p_{in}^{pr_j}\} \\ Pf_1^y = \{p_{cout}^{pr_i}\} \\ Pf_2^y = \{p_{cin}^{pr_j}\} \end{cases}$$

P' define o conjunto de lugares resultante após a fusão, onde

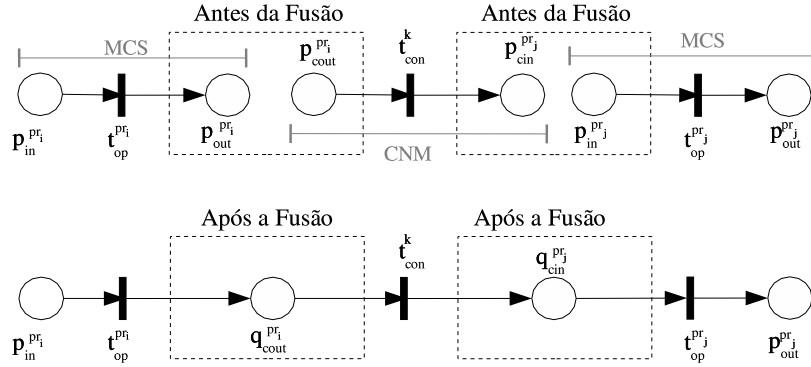
$$\begin{cases} P' = P^x \cup P^y - Pf_1^x - Pf_2^x \\ \forall p_{cout}^{pr_i} \in Pf_1^y, \forall p_{cin}^{pr_j} \in Pf_2^y \\ \bullet p_{cout}^{pr_i} = \{t_{op}^{pr_i} | t_{op}^{pr_i} \bullet \in Pf_1^x\} \\ p_{cin}^{pr_j} \bullet = \{t_{op}^{pr_j} | \bullet t_{op}^{pr_j} \in Pf_2^x\} \end{cases}$$

Após a fusão, portanto, aplica-se uma função nomeação $l : Pf_1^y, Pf_2^y \rightarrow \Sigma$ para o lugar resultante, onde

$$\begin{cases} \Sigma = \{q_{cout}^{pr_i}, q_{cin}^{pr_j}\} \\ l(p_{cout}^{pr_i}) = q_{cout}^{pr_i} \\ l(p_{cin}^{pr_j}) = q_{cin}^{pr_j} \end{cases}$$

O lugar $q_{cout}^{pr_i}, q_{cin}^{pr_j} \in P'$ representa os lugares fundidos, onde

$$\begin{cases} I'(q_{cout}^{pr_i}, t_{ct}^i) = I^x(p_{out}^{pr_i}, t_{ct}^i) \\ O'(q_{cin}^{pr_j}, t_{ct}^i) = O^y(p_{in}^{pr_j}, t_{ct}^i) \end{cases}$$

**Figura 4.16.** Fusão entre MCS e CNM

A última operação de fusão é aplicada entre o item *produto-final* da estrutura do produto (MCS ou MCE) com o Modelo *Output-Flow* (OFM). Esta operação é realizada aplicando a fusão entre os lugares $p_{out}^{pr_i}$ e $p_{fin}^{pr_i}$ dos modelos MCS e OFM, respectivamente (ver Figura 4.17). A definição formal da fusão entre MCS e OFM será apresentada abaixo. De maneira análoga, pode-se aplicar esta definição para a fusão entre MCE e OFM.

Definição 4.27 (Fusão entre MCS e OFM) Sejam $MCS = (P^x, T^x, I^x, O^x, M_0^x, D^x)$ e $OFM = (P^y, T^y, I^y, O^y, M_0^y, D^y)$ o modelo componente-simples e o modelo output-flow, respectivamente. Ambos os modelos são uma *Timed Petri Net*, onde

$$\begin{cases} O^x(p_{out}^{pr_i}, t_{op}^{pr_i}) = 1 \\ I^y(p_{fin}^{pr_i}, t_f) = 1 \end{cases}$$

MCS e OFM podem se transformar em $N_{ofm}^{mcs} = (P', T', I', O', M_0', D')$ pela fusão dos lugares existentes nos conjuntos

$$\begin{cases} P f^x = \{p_{out}^{pr_i}\} \\ P f^y = \{p_{fin}^{pr_i}\} \\ P f^x \subseteq P^x, P f^y \subseteq P^y \end{cases}$$

P' define o conjunto de lugares resultante após a fusão, onde

$$\begin{cases} P' = P^x \cup P^y - P f^x \\ \forall p_{in}^{pr_i} \in P f^y, \\ \bullet p_{fin}^{pr_i} = \{t_{op}^{pr_i} | t_{op}^{pr_i} \bullet \in P f^x\} \end{cases}$$

Após a fusão, portanto, aplica-se uma função nomeação $l : P f^y \rightarrow \Sigma$ para o lugar resultante, onde

$$\begin{cases} \Sigma = \{q_{fin}^{pr_i}\} \\ l(p_{fin}^{pr_i}) = q_{fin}^{pr_i}, q_{fin}^{pr_i} \in P' \\ I'(q_{fin}^{pr_i}, t_f) = I^x(p_{out}^{pr_i}, t_f) \\ O'(q_{fin}^{pr_i}, t_{op}^{pr_i}) = O^y(p_{fin}^{pr_i}, t_{op}^{pr_i}) \end{cases}$$

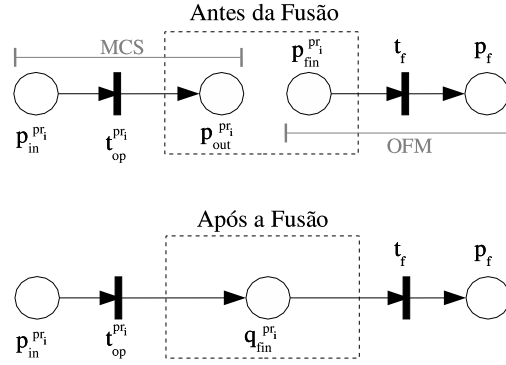


Figura 4.17. Fusão entre MCS e OFM

4.4.3 Metodologia

Uma vez definida todas as operações de fusões possíveis para o modelo proposto, é necessário aplicar todas estas operações com o objetivo de obter o modelo completo. Segue abaixo todos os passos necessários para obter o modelo completo *SPD*:

- i) identificar/inserir cada item do tipo componente-simples e modelar de acordo com a definição *MCS*;
- ii) identificar/inserir cada item do tipo componente-estoque modelar de acordo com a definição *MCE*;
- iii) identificar/inserir cada conexão (identificando os lugares $p_{cout}^{pr_i}$ e $p_{cin}^{pr_j}$ pertencentes a conexão do sistema e modelar de acordo com a definição *CNM*;
- iv) identificar quais são os *MCS* e/ou *MCE* que são itens *folha* da estrutura do produto e em seguida inserir o modelo de entrada do sistema segundo a definição de *IFM*;
- v) identificar qual é o *MCS* ou *MCE* que é item *produto-final* da estrutura do produto e em seguida inserir o modelo de saída do sistema segundo a definição *OFM*;
- vi) fundir os lugares dos modelos *MCS* e/ou *MCE* com *IFM* de acordo com a Definição 4.25;
- vii) fundir os lugares dos modelos *MCS* e/ou *MCE* com *CNM* baseado na Definição 4.26;
- viii) fundir os lugares dos modelos *MCS* e/ou *MCE* com *OFM* baseado na Definição 4.27;
- ix) Para finalizar a construção do modelo completo, inserir o modelo *CM* na rede de Petri.

4.4.4 Refinamento do Modelo

Após obter o modelo final da rede de Petri aplicando todas as fusões necessárias, caso seja necessário ainda inserir o Modelo Lugar-Transição, alguns refinamentos devem ser realizados. A inserção do Modelo Lugar-Transição deve-se ao fato da caracterização ALAP no modelo final. No próximo capítulo, na Seção 5.3 será explicado em detalhes o procedimento para inserir o modelo MLT na rede final. Nesta seção, mostra-se formalmente como será realizado os refinamentos necessários para a transformação de uma rede com característica ASAP em ALAP.

No modelo N_{mcs}^{ifm} , resultante da fusão entre o modelo IFM e MCS , será realizado um processo de refinamento do lugar $q_{sta}^{pr_i}$. Este refinamento será seguido da inserção do modelo MLT. Segue definição formal abaixo:

Definição 4.28 (Refinamento de N_{mcs}^{ifm}) Sejam $N_{mcs}^{ifm} = (P^x, T^x, I^x, O^x, M_0^x, D^x)$ e $MLT = (P^y, T^y, I^y, O^y, M_0^y, D^y)$ os modelos resultado da fusão entre IFM e MCS , e o modelo lugar transição, respectivamente. Ambos os modelos são uma *Timed Petri Net*, onde

$$\left\{ \begin{array}{l} O^x(q_{sta}^{pr_i}, t_0) = 1 \end{array} \right.$$

N_{mcs}^{ifm} pode se transformar em $RIFM_{mcs}^{ifm} = (P', T', I', O', M_0', D')$ pelo refinamento do lugar $q_{sta}^{pr_i}$ na estrutura definida pelo modelo MLT , onde

$$\left\{ \begin{array}{l} P^x = \{q_{sta}^{pr_i}\} \\ T^x = \{t_0, t_{op}^{pr_i}\} \\ P^y = \{p_{lt}^{pr_i}\} \\ T^y = \{t_{lt}^{pr_i}\} \end{array} \right.$$

P' e T' define o conjunto de lugares e transições resultantes após o refinamento, respectivamente, onde

$$\left\{ \begin{array}{l} P' = P^x \cup P^y \\ T' = T^x \cup T^y \\ \forall p_{lt}^{pr_i} \in P^y, \bullet p_{lt}^{pr_i} = \{t_0 | t_0^\bullet \in P^x\} \\ \forall q_{sta}^{pr_i} \in P^x, \bullet q_{sta}^{pr_i} = \{t_{lt}^{pr_i} | t_{lt}^{pr_i} \bullet \in P^y\} \\ O'(q_{sta}^{pr_i}, t_0) = 0 \\ O'(p_{lt}^{pr_i}, t_0) = 1 \\ O'(q_{sta}^{pr_i}, t_{lt}^{pr_i}) = 1 \\ I'(p_{lt}^{pr_i}, t_{lt}^{pr_i}) = 1 \\ I'(q_{sta}^{pr_i}, t_{op}^{pr_i}) = 1 \end{array} \right.$$

No modelo N_{mcs}^{cnm} , resultante da fusão entre o modelo MCS e CNM , será realizado um processo de refinamento de sua matriz de pós-condição. Este refinamento será seguido da inserção do modelo MLT. Segue definição formal abaixo:

Definição 4.29 (Refinamento entre N_{mcs}^{cnm} e MLT) Sejam $N_{mcs}^{cnm} = (P^x, T^x, I^x, O^x, M_0^x, D^x)$ e $MLT = (P^y, T^y, I^y, O^y, M_0^y, D^y)$ os modelos resultado

da fusão entre MCS e CNM, e o modelo lugar transição, respectivamente. Ambos os modelos são uma *Timed Petri Net*, onde

$$\{ O^x(q_{cin}^{pr_j}, t_{ct}^k) = 1$$

N_{mcs}^{cnm} pode se transformar em $RCNM_{cnm}^{mcs} = (P', T', I', O', M'_0, D')$ pelo refinamento do lugar $q_{cin}^{pr_i}$ na estrutura definida pelo modelo *MLT*, onde

$$\begin{cases} P^x = \{q_{cout}^{pr_i}, q_{cin}^{pr_j}\} \\ T^x = \{t_{ct}^k, t_{op}^{pr_j}\} \\ P^y = \{p_{lt}^{pr_j}\} \\ T^y = \{t_{lt}^{pr_j}\} \end{cases}$$

P' e T' define o conjunto de lugares e transições resultantes após o refinamento, respectivamente, onde

$$\begin{cases} P' = P^x \cup P^y \\ T' = T^x \cup T^y \\ \forall p_{lt}^{pr_j} \in P^y, \bullet p_{lt}^{pr_j} = \{t_{ct}^k | t_{ct}^{k\bullet} \in P^x\} \\ \forall q_{cin}^{pr_j} \in P^x, \bullet q_{cin}^{pr_j} = \{t_{lt}^{pr_j} | t_{lt}^{pr_j\bullet} \in P^y\} \\ O'(q_{cin}^{pr_j}, t_{ct}^k) = 0 \\ O'(p_{lt}^{pr_j}, t_{ct}^k) = 1 \\ O'(q_{cin}^{pr_j}, t_{lt}^{pr_j}) = 1 \\ I'(p_{lt}^{pr_j}, t_{lt}^{pr_j}) = 1 \\ I'(q_{cin}^{pr_j}, t_{op}^{pr_j}) = 1 \end{cases}$$

4.5 CONSTRUINDO O MODELO DA ESTRUTURA DO PRODUTO

Nesta seção será apresentado como, a partir de um sistema de produção real, aplicar o processo de modelagem descrito e formalizado nas seções anteriores. Desta forma, um modelo completo em redes de Petri consistente e coerente com as informações reais de produção será obtido.

O exemplo apresentado será o processo de manufatura de uma simples mesa, cuja montagem e fabricação serão descritos segundo as premissas abaixo:

- a mesa é montada a partir de três itens: *tampa* da mesa, *pés* da mesa e *travessa* da mesa.
- as quantidades necessárias para a fabricação de uma (1) mesa são as seguintes: 1 *tampa* de mesa, 4 *pés* de mesa e 4 *travessas* de mesa.
- destes itens, apenas os *pés* e as *travessas* passam por um processo de fabricação. A *tampa* é adquirida através de compra.
- para alguns dos itens, é necessário trabalhar com um estoque mínimo de segurança para que não se comprometa a produção das mesas.
- os tempos associados (hipotéticos), sejam na fabricação quanto na compra, são os seguintes:

- Para fabricar um item *pé* de mesa, são necessárias 3 unidades de tempo (*u.t.*);
- Para fabricar um item *travessa* de mesa, são necessárias 5 *u.t.*;
- Para montar a *base* da mesa, que é o item resultante da operação de montagem do *pé* com a *travessa*, consome-se 2 *u.t.*;
- Para obter, através da compra, um lote de 40 *tampas* de mesa são necessários 23 *u.t.*. Não existe tempo de operação associado a *tampa*;
- Para montar a *tampa* da mesa com a *base* consome-se 4 *u.t.*.

Ainda é necessário descrever como será o processo de fabricação da mesa, isto é, em que ordem ocorrem as manufaturas/operações e a compra para se obter o produto final.

- a operação de fabricação (manufatura) do *pé* da mesa não possui nenhum tipo de dependência em relação a fabricação da *travessa*. Desta forma, pode-se considerar que ambas as operações podem ser executadas em paralelo;
- a obtenção (compra) da *tampa* da mesa não possui nenhum vínculo de precedência em relação aos outros componentes, podendo ocorrer paralelamente;
- a montagem do produto final é realizada em dois momentos: no primeiro, a partir de 4 itens fabricados do tipo *pé* e 4 itens fabricados do tipo *travessa* efetua-se a primeira montagem. Em um segundo momento, com o resultado da montagem dos *pés* com as *travessas*, efetua-se a segunda montagem com a *tampa* da mesa.

A Figura 4.18 mostra a estrutura do produto que representa o exemplo descrito anteriormente. Nela, pode-se coletar algumas informações dos itens envolvidos para produção do produto final, assim como suas dependências. É necessário também obter informações mais detalhadas inerentes ao processo de manufatura, como a lista de materiais descrita na Tabela 4.1 e informações relativas ao estoque na Tabela 4.2.

Tabela 4.1. Lista de Materiais da fabricação de Mesa.

Item	Código	Nível	Consumo	Tempo (<i>u.t.</i>)	Estoque
MESA	MES	2	1	4	Não
TAMPA	TAM	1	1	0	Não
BASE	BAS	1	1	2	Sim
PÉ	PE	0	4	3	Não
TRAVESSA	TRA	0	4	5	Não

Todo este conjunto de informações do sistema de produção fornecido será mapeado diretamente no modelo redes de Petri proposto, seguindo os seguintes passos:

- i) identificar/listar cada item da estrutura do produto de acordo com seu tipo definido na Tabela 4.1. Mais formalmente, temos:

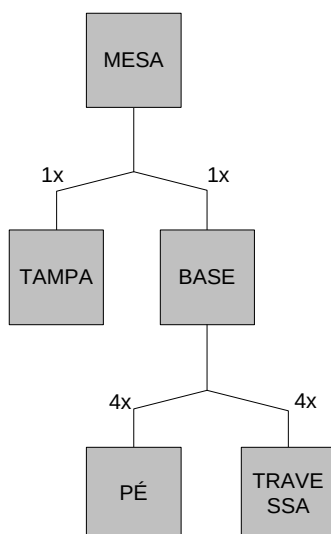


Figura 4.18. Estrutura do Produto da fabricação de Mesa.

Tabela 4.2. Informações de Estoque da fabricação de Mesa.

Item	Código	C_{max}	S_{min}	Nível Est.	Tempo Rep.	Ordens Fixas	Consumo
TAMPA	TAM	70	7	10	23	40	1

- PR é o conjunto de itens do sistema modelado, onde $PR = \{MES, TAM, BAS, PE, TRA\}$;
 - $CS \subseteq PR$ é o subconjunto de itens componente-simples do sistema modelado, onde $CS = \{MES, PE, TRA, BAS\}$;
 - $CE \subseteq PR$ é o subconjunto de itens componente-estoque do sistema modelado, onde $CE = \{TAM\}$.
- ii) para o conjunto CN , que representa a conexão entre os itens, identificar/listar todos os arcos existentes:
- *Tampa* e *base* precedem a *mesa*: $a = (TAM, MES)$ e $b = (BAS, MES)$;
 - *Pé* e a *travessa* precedem a *base*: $c = (PE, BAS)$ e $d = (TRA, BAS)$;
- iii) montar o modelo de entrada (IFM), mapeando em seus lugares de saída os itens a que se destinam. Os itens básicos que os lugares $pr_{sta}^{pr_i}$ do modelo IFM estão associados são os itens *tampa*, *pé* e *travessa*, modelados através dos lugares pr_{sta}^{tam} , pr_{sta}^{pe} e pr_{sta}^{tra} , respectivamente;
- iv) montar o modelo de saída (OFM), mapeando em seu lugar de saída o item a que

- se destina. O item *produto-final* que o lugar pr_{fin}^{pri} do modelo *OFM* está associado é o item *mesa*, modelado através do lugar pr_{fin}^{mes} ;
- v) montar, para cada tipo de item, os modelos de redes de Petri equivalente. A Tabela 4.3 mapeia cada tipo de item (modelo componente-simples ou componente-estoque) nos respectivos elementos da rede;
 - vi) montar os modelos de conexão baseado nas relações de precedência entre os itens. A Tabela 4.4 mapeia cada conexão nos seus respectivos elementos da rede;
 - vii) realizar as operações de fusão entre elementos da rede. A Tabela 4.5 mapeia os lugares (coluna *Lugar 1* e *Lugar 2*) que serão fundidos, assim como os lugares resultantes (coluna *Lugar Resultante*);
 - viii) mapear os valores inerentes ao estoque em relação ao componente *tampa* e *mesa*. Tais valores estão listados na Tabela 4.2. No modelo final obtido, os valores do estoque são mapeados nos pesos dos arcos, como descrito na Tabela 4.6.

Após a realização de todos os passos descritos anteriormente, obtém-se o modelo em redes de Petri a partir da estrutura do produto e das informações complementares fornecidas pelas lista de materiais e de estoque. No modelo exibido pela Figura 4.19 percebe-se a existência de todos os modelos definidos formalmente, como: modelo de entrada (IFM), modelo de saída (OFM), modelo componente-simples (MCS), modelo componente-estoque (MCE), modelo conexão (CNM) e modelo *closure* (CM).

O modelo descrito na Figura 4.19 oferece todas as informações necessárias para se efetuar análises e estimativas comuns ao planejamento da produção. No próximo capítulo, a análise pormenorizada do modelo será capaz de elencar alguns comportamentos e propriedades inerentes a estrutura de produto modelada em redes de Petri.

Tabela 4.3. Mapeando os itens nos elementos da rede de Petri.

Produto	Lugar	Transição
Mesa	$p_{in}^{mes}, p_{out}^{mes}$	t_{op}^{mes}
Tampa	$p_{in}^{tam}, p_{out}^{tam}, p_e^{tam}, p_{e'}^{tam}$	$t_{op}^{tam}, t_{rp}^{tam}$
Base	$p_{in}^{bas}, p_{out}^{bas}$	t_{op}^{bas}
Pés	$p_{in}^{pe}, p_{out}^{pe}$	t_{op}^{pe}
Travessa	$p_{in}^{tra}, p_{out}^{tra}$	t_{op}^{tra}

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerações Finais....

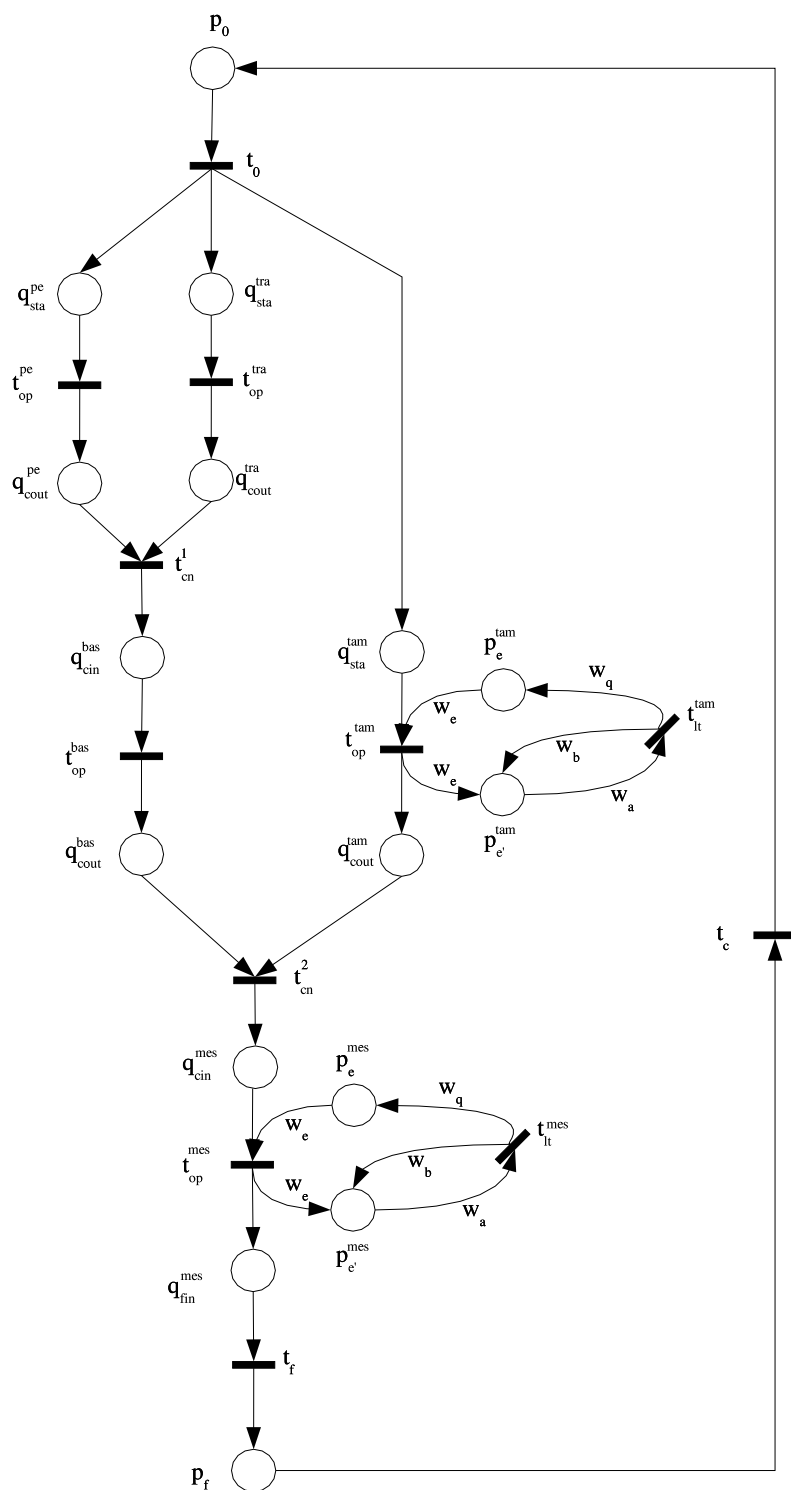


Figura 4.19. Modelo completo

Tabela 4.4. Mapeando os itens às conexões existentes.

Conexão	Produtos	Lugar	Transição
1	base, pé, travessa	$p_{cin}^{bas}, p_{cout}^{pe}, p_{cout}^{tra}$	t_{ct}^1
2	base, tampa, mesa	$p_{cin}^{mes}, p_{cout}^{pe}, p_{cout}^{tam}$	t_{ct}^2

Tabela 4.5. Fusão entre elementos da rede.

Fusão(k)	Lugar 1	Lugar 2	Lugar Resultante
1	p_{sta}^{prpe}	p_{in}^{prpe}	q_{sta}^{prpe}
2	p_{sta}^{prtra}	p_{in}^{prtra}	q_{sta}^{prtra}
3	p_{sta}^{prtam}	p_{in}^{prtam}	q_{sta}^{prtam}
4	p_{cout}^{prpe}	p_{out}^{prpe}	q_{cout}^{prpe}
5	p_{cout}^{prtra}	p_{out}^{prtra}	q_{cout}^{prtra}
6	p_{cin}^{prbas}	p_{in}^{prbas}	q_{cin}^{prbas}
7	p_{cout}^{prbas}	p_{out}^{prbas}	q_{cout}^{prbas}
8	p_{cout}^{prtam}	p_{out}^{prtam}	q_{cout}^{prtam}
9	p_{cin}^{prmes}	p_{in}^{prmes}	q_{cin}^{prmes}
10	p_{fin}^{prmes}	p_{out}^{prmes}	q_{fin}^{prmes}

Tabela 4.6. Valores do estoque mapeados na rede.

	w_e	w_q	w_a	w_b	t_{rp}	$M(p_e)$	$M(p_{e'})$
TAM	1	40	63	23	23	10	60

ANÁLISE DOS MODELOS

Neste capítulo faz-se uma introdução à técnica de análise utilizada para um sistema de produção. Toma-se como base a estrutura do produto para se construir todo o planejamento da produção baseando-se no escalonamento das operações existentes. Neste contexto, também são analisadas as restrições de estoque para um dado planejamento. Por fim, apresenta-se um exemplo simples para ilustrar e fixar as técnicas de análise utilizadas.

5.1 INTRODUÇÃO

Um Sistema de Manufatura, como foi visto no capítulo anterior, pode ser caracterizado como um sistema discreto que pode ser modelado por redes de Petri. Uma preocupação comum nestes sistemas, é em relação a fase de planejamento mestre da produção, onde o principal objetivo é garantir o cumprimento dos prazos de entrega dos pedidos dos clientes com mínimo estoque, planejando as compras e a produção de itens componentes, para que ocorram apenas nos momentos e nas quantidades necessárias, nem mais, nem menos, nem antes, nem depois [Henrique, Irineu, 1993].

O plano (ou programa) mestre de produção é um plano para a produção de itens produtos finais, período-a-período. Como tal, é uma declaração referente à produção de itens finais e não uma declaração referente à previsão de demanda do mercado ou previsão de vendas, sendo estes últimos, sem dúvida, *input* crítico para o processo do plano mestre. Nesta fase, o planejamento de recursos envolve análises do programa-mestre para determinar a existência de setores que possam representar possíveis gargalos dentro do fluxo de produção. Tais análises são norteadas por dois fatores preponderantes em um sistema de manufatura: tempo, previsões e cronogramas que serão denominados como fator de *Scheduling* ou Escalonamento; e restrições e indisponibilidade de materiais, que será particularizado como preocupações de nível de *Estoque*.

Escalonamento é a determinação de uma ordem temporal para execução de um conjunto de operações com objetivos (marcos) concretos, respeitando um conjunto de restrições. Neste caso, as restrições serão de estoque. Baseado neste contexto, é que podemos analisar um sistema de manufatura sob pontos de vista quantitativos e qualitativos. A análise qualitativa observa propriedades como ausência de interrupções (*deadlocks*), ausência de *overflows* ou mesmo a presença de exclusões mútuas no uso de recursos compartilhados (por exemplo, num robô). A análise quantitativa contempla o desempenho (p.ex., taxa de produção) e utilização (p.ex., taxas de utilização de máquinas), etc. Enquanto na análise qualitativa concentra-se na “corretude” funcional nos sistemas modelados, a análise quantitativa concentra-se na avaliação da eficiência dos modelos.

Redes de Petri permitem a construção de modelos para contemplar a avaliação de características qualitativas e quantitativas (corretude e eficiência). Uma rede de Petri, como uma equação diferencial, é um formalismo matemático. Sendo assim, diversos métodos de análises podem ser empregados para diversos tipos de comportamentos e estruturas que um sistema de manufatura pode vir possuir. Um dos métodos utilizados para a técnica de análise será o Método de Análise por Enumeração e o Método de Análise Estrutural, descritos na Seção 3.1.2. Dado que o modelo adotado é um modelo temporal, estas técnicas propiciam tanto análise quantitativa como também a avaliação de métricas de desempenho.

5.2 POLÍTICAS DE ESTOQUE

A gestão do estoques de itens de reposição constitui um capítulo à parte na literatura e prática da gestão de estoques. Isto se deve aos elevados custos de aquisição, aos longos tempos de resposta de fornecimento e aos baixíssimos giros, característicos dos itens de reposição. Estas são armadilhas freqüentemente encontradas na definição de políticas de estoques (quanto pedir, quando pedir, qual o nível de serviço).

Os estoques de itens de reposição podem responder por uma das maiores parcelas dos custos corporativos em empresas de diferentes setores da economia. Em 2001, no setor automobilístico, por exemplo, os custos anuais de armazenagem, depreciação, seguro e movimentação de peças de reposição variam entre 25 e 35% do valor contábil de todos estoques de uma empresa típica [KRI].

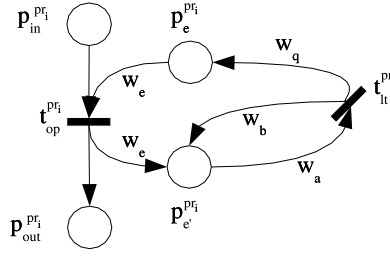
Apesar das armadilhas existentes, os sintomas de problemas existentes na gestão de estoques de itens de reposição são os mesmos encontrados na gestão de produtos acabados ou de matérias-primas:

- excesso de estoques, como resultado de uma política de antecipação ao uso futuro, implica em custos elevados devido a manutenção dos estoques e custos de obsolescência;
- falta de estoques, como resultado de uma política conservadora em relação à taxa real de utilização dos estoques, implica na deterioração dos níveis de disponibilidade de produto.

Em diversos sistemas de produção, como estaleiros, usinas siderúrgicas, concessionárias de serviços públicos (água, luz e telefone), por exemplo, o custo médio de manutenção dos itens de reposição é considerável, já que o custo unitário de aquisição destes itens é alto, sendo normalmente utilizada uma política de ter sempre uma peça em estoque.

Neste trabalho, através do modelo adotado para o item componente-estoque, é possível modelar diferentes políticas de estoque. Para exemplificar, poderia-se fixar o nível de estoque mínimo adotado pela organização e determinar as quantidades de itens para reposição, ou vice-versa. Para mostrar a relação existente entre os elementos da rede w_a , w_q e w_b (ver Definição 4.22), analisemos a definição do Modelo Componente-Estoque.

Para verificar a relação entre os pesos dos arcos do modelo do estoque, fazemos a seguinte análise: seja $R = (P, T, I, O, M_0, D)$ uma rede de Petri marcada tal que

**Figura 5.1.** Modelo Componente-Estoque

$R = MCE$ (ver Figura 5.1). Uma das propriedades estruturais desta rede R é ser estruturalmente conservativa, ou seja, existe solução para o sistema $W \cdot C = 0$, onde C representa a matriz de incidência da rede R e W representa o vetor de ponderação (inteiros positivos).

$$C = \begin{array}{cc|c} & t_{op} & t_{rp} & \\ \hline & -1 & 0 & p_{in} \\ & 1 & 0 & p_{out} \\ & -1 & w_q & p_e \\ & 1 & w_b - w_a & p_{e'} \end{array}$$

$$W = \begin{array}{c|c} i_0 & p_{in} \\ i_1 & p_{out} \\ i_2 & p_e \\ i_3 & p_{e'} \end{array}$$

O produto entre o vetor W e a matriz C ($W \cdot C = 0$) é o sistema a seguir:

$$\begin{cases} -i_0 + i_1 - i_2 + i_3 = 0 \\ i_2 w_q + i_3 (w_b - w_a) = 0 \end{cases}$$

A partir do sistema de equação acima obtemos i_2 em função de i_3 :

$$i_2 = \frac{i_3 (w_a - w_b)}{w_q} \quad (5.1)$$

A capacidade máxima de um determinado item em estoque é dado pela soma entre o número de itens armazenados ($m(p_e)$) e a área disponível ($m(p_{e'})$). Acossiamos os pesos correspondentes do vetor de ponderação i_2 e i_3 aos lugares p_e e $p_{e'}$, respectivamente. Assim, a capacidade máxima pode ser da seguinte forma:

$$C_{max} = i_2 m(p_e) + i_3 m(p_{e'}) \quad (5.2)$$

Fazendo $i_3 = 1$ e substituindo 5.1 em 5.2 teremos,

$$C_{max} = m(p_e) \frac{(w_a - w_b)}{w_q} + m(p_{e'}) \quad (5.3)$$

A partir da expressão 5.3, podemos trabalhar com as seguintes possibilidades descritas abaixo:

- o nível de estoque do item é máximo;
- não existe espaço de armazenamento disponível em estoque;
- o nível de estoque atual corresponde ao limite de armazenamento máximo do estoque.

Estes três pontos acima, listados como cenário de uma organização em um determinado momento, refletem-se nos seguintes valores:

- nível máximo de estoque e capacidade máxima de armazenamento no limite significam que $m(p_e) = C_{max}$;
- não existir espaço (área física) disponível para armazenamento de itens no estoque, significa que $m(p_{e'}) = 0$.

Aplicando os valores acima em 5.3, teremos:

$$\begin{aligned} C_{max} &= m(p_e) \frac{(w_a - w_b)}{w_q} + m(p_{e'}) \\ C_{max} &= C_{max} \frac{(w_a - w_b)}{w_q} \\ w_a - w_b &= w_q \end{aligned} \quad (5.4)$$

Através do modelo, determinamos o peso w_a como sendo a diferença entre a capacidade máxima e o nível de estoque mínimo:

$$S_{min} = C_{max} - w_a \quad (5.5)$$

A partir das equações 5.4 e 5.5 podemos manipular os valores do estoque mínimo e a quantidade de reposição, de forma que a partir de um deles consegue-se determinar o outro. Por exemplo: uma determinada política de estoque de uma organização diz que o espaço de armazenamento disponível deve ser de no máximo 55% da capacidade máxima de armazenamento do estoque:

$$w_b = 55\% \cdot C_{max}$$

Conhecendo a capacidade máxima de um determinado estoque, determina-se w_b . Caso a política de estoque determine o valor do estoque mínimo, dado que se conheça a quantidade de reposição (w_q), então teremos o valor exato de w_a :

$$w_a = w_q + 55\% \cdot C_{max} \quad (5.6)$$

Aplicando a substituição do valor encontrado para w_a em 5.5, consegue-se determinar o nível de estoque mínimo adotado pela política de estoque da organização.

5.3 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A ANÁLISE

No Capítulo 3 foi apresentado um conjunto de propriedades comportamentais relacionadas às redes de Petri. Tais propriedades são desejáveis nos sistemas de manufatura contemplados neste trabalho. Esta seção será dedicada a aplicação de um método de análise no modelo proposto, listando o conjunto de passos necessários para se verificar a consistência do modelo.

A análise empregada é fundamentada na geração do grafo de alcançabilidade, possibilitando a representação de todos os possíveis estados de uma determinada rede. Caso se deseje a emissão de ordens de serviço e compra, segundo uma política ALAP (*As Late As Possible*), o modelo da estrutura do produto deve ser ajustado para possibilitar a geração da escala adequada. Esta alteração consiste na inserção do Modelo Lugar-Transição entre Modelo Componente-Estoque e/ou Modelo Componente-Simples e o Modelo *Input-Flow*.

Após a adaptação do modelo, os seguintes passos serão realizados:

- verificação das propriedades do modelo final;
- geração do grafo de alcançabilidade temporizado;
- determinar o escalonamento das operações, baseando-se no grafo;
- analisar a escala e, baseada nela, calcular o caminho crítico da produção.

Com essas etapas realizadas, consegue-se estabelecer/definir um plano-mestre de produção a ser executado ao longo do tempo. Com o grafo de alcançabilidade temporizado, também é possível analisar critérios da política de reposição.

Associado à estrutura do produto, existe um conjunto de atributos pertencente a cada item. Um destes atributos é o tempo para manufatura ou compra do item. Com os tempos de todas as operações, é possível gerar um diagrama de tempo que represente uma escala ALAP.

Aplicando a metodologia proposta no capítulo anterior à estrutura do produto, um modelo com características ASAP (*As Soon As Possible*) será encontrado. A Figura 5.2.a, apresenta uma estrutura de produto formada por três itens, onde os tempos de operações sobre estes itens são T_a , T_b e T_c , associados respectivamente às operações A , B e C .

Ao contrário, a Figura 5.2.b mostra uma outra característica do sistema. Nela as operações B e C começam o mais tarde possível (ALAP). Esta estrutura de produto possibilita a execução simultânea ASAP das operações B e C , dado que não há dependências entre elas. Contudo, a operação A só será realizada após a finalização das operações B e C . O diagrama tempo real apresentado na Figura 5.2.a desceve esta precedência.

Para efetuar corretamente a análise do sistema de manufatura modelado, a inserção do Modelo Lugar-Transição é necessário para garantir que o funcionamento das operações de produção sejam feitas tão tarde quanto possível (ALAP). A inserção deste modelo na estrutura da rede de Petri é realizada baseada nos métodos de refinamento apresentados na Seção 4.4.4. Estes métodos, de inserção do Modelo Lugar-Transição (MLT), serão empregados em duas situações. São elas:

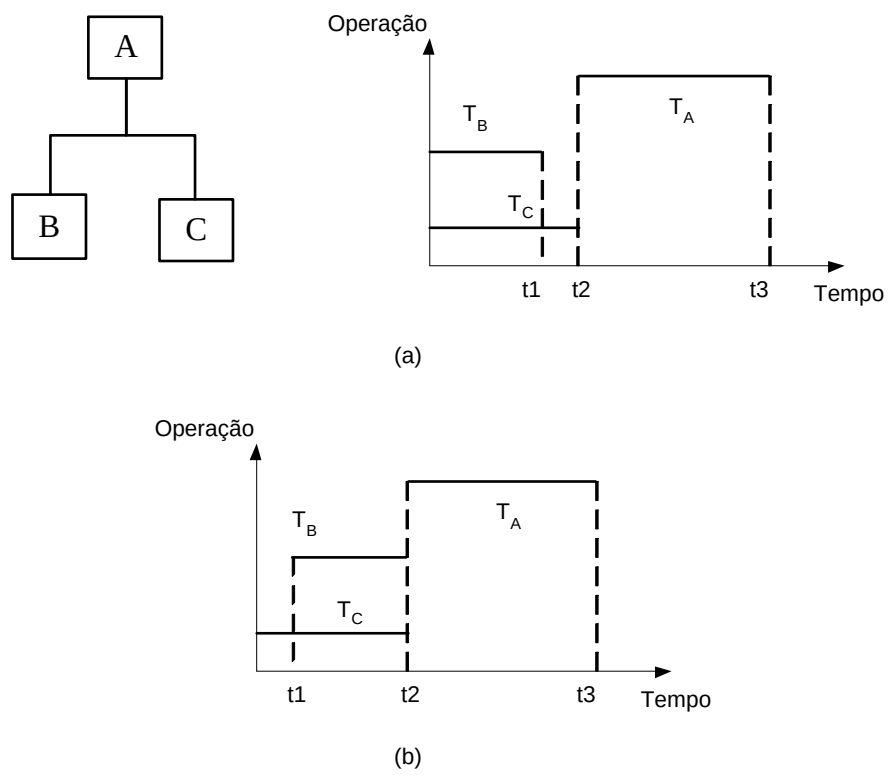


Figura 5.2. Diagrama de tempo das operações da estrutura do produto.

- inserção do Modelo Lugar-Transição em itens que estão no nível zero. Esta inserção, será realizada segundo o procedimento de refinamento descrito na Definição 4.28;
- inserção do Modelo Lugar-Transição em itens que estão no nível diferente de zero. Esta inserção, será realizada segundo o procedimento de refinamento descrito na Definição 4.29.

A partir do momento em que definimos todos os métodos de refinamento (inserção do MLT), definimos *como* é realizada a transformação de uma rede ASAP em ALAP. No entanto, ainda falta definir *quando* estas operações serão realizadas e *de que forma*.

Para que seja necessária a inserção do Modelo Lugar-Transição, é necessário que o nível, seja ele qual for, possua no mínimo dois itens pertencentes a ele. A inserção do Modelo Lugar-Transição é realizada da seguinte forma:

- identificar, para o nível corrente, a existência de pelo menos dois itens pertencentes ao nível;
- determinar o maior tempo de operação dentre os itens contidos no nível. Desta maneira, denotaremos por $D(t_{max}^{lv})$ o tempo máximo encontrado para o nível lv ;
- inserir o Modelo Lugar-Transição nos itens existentes no nível, baseando-se nos métodos de fusão descritos da Seção 4.4.4;
- ajustar os tempos das transições ($t_{lt}^{pr_i}$) do Modelo Lugar-Transição da seguinte forma:

$$\begin{cases} D(t_{lt}^{pr_i}) = D(t_{max}^{lv}) - D(t_{op}^{pr_i}) & , \text{ se } lv = 0 \\ D(t_{lt}^{pr_i}) = D(t_{max}^{lv}) - D(t_{op}^{pr_i}) + \sum_{i=0}^{lv-1} D(t_{max}^i) & , \text{ se } lv > 0 \end{cases}$$

5.4 ANÁLISE DO MODELO

O método de análise proposto tem por objetivo avaliar um conjunto de aspectos de desempenho e de políticas de estoque associadas aos sistemas produtivos. Neste trabalho, baseia-se na construção do Grafo de Alcançabilidade Temporizado para obter um conjunto de propriedades existentes no modelo gerado, a fim de responder às seguintes questões:

- determinar o tempo máximo permitido para que haja reposição do estoque sem que ocorra interrupção da produção;
- construir o escalonamento global da produção sem levar (em um primeiro momento) em consideração o estoque;
- determinar os níveis de estoque (ao longo do tempo) de cada item sob controle.
- determinar o caminho crítico da produção;
- determinar o investimento necessário no estoque.

5.4.1 Gerar Grafo de Alcançabilidade

Alcançabilidade ou *Reachability* é fundamental para o estudo de propriedades dinâmicas de qualquer sistema. A alcançabilidade indica a possibilidade de atingir-se uma determinada marcação pelo disparo de um número finito de transições a partir de uma marcação inicial.

Para se gerar o Grafo de Alcançabilidade é necessário que o modelo de redes de Petri encontrado seja **Limitado**. Isto é necessário, pois a rede sendo limitada, o Grafo de Cobertura é o próprio Grafo de Alcançabilidade (definido no Capítulo 3) encontrado para a rede.

Neste trabalho, a geração do Grafo de Alcançabilidade Temporizado tem sido realizada com o auxílio do *software* voltados para redes de Petri, INA¹.

5.4.2 Analisar Interrupções na Produção

Esta seção se destina a análise do impacto de estoque na linha de produção de forma a antecipar as possíveis interrupções no processo produtivo. Desta maneira, consegue-se tomar medidas de realocação de recursos com antecedência. A causa principal para interrupção, pode ser a não reposição de itens em estoque em tempo hábil. Estas reposições podem ser vistas como tempos necessários para que o fornecedor, interno ou externo à organização, leve para abastecer o estoque. Estes tempos podem ser de muita valia quando minimizados, dado que a linha, em um determinado instante, ficará sem itens disponíveis em estoque e a reposição tem que acontecer em tempo hábil para que a linha não pare.

Um algoritmo é proposto nesta seção para que se determine o tempo máximo permitido para que haja reposição de produtos em estoque. Isto significa estabelecer, para a linha de produção analisada, tempos mínimos exigidos dos fornecedores (internos ou externos) a fim de garantir a ausência de interrupções.

Em linhas gerais, o algoritmo proposto calcula o tempo ótimo para a reposição do estoque baseado nos tempos e marcações existentes nos estados do Grafo de Alcançabilidade Temporizado. Segue abaixo os principais passos que o algoritmo executa:

- i) identificar item componente-estoque (modelado a partir de *MCE*). Devem ser analisados os seguintes elementos deste modelo: p_{in}^{pri} , t_{op}^{pri} , p_e^{pri} e t_{rp}^{pri} ;
- ii) fixar, para o item, tempos mínimo (RP_{min}) e máximo (RP_{max}) que serão praticados para a reposição do estoque;
- iii) reduzir transições dispostas serialmente. Desta forma o tempo da transição resultante será igual a soma dos tempos das transições envolvidas na redução;
- iv) para os valores dentro dos limites mínimo (*min*) e máximo (*max*) do tempo de reposição, os seguintes passos são executados:
 - a. Gerar, para o valor corrente do tempo de reposição, o grafo de alcançabilidade temporizado correspondente;

¹ *Integrated Net Analyzer*

- b. Verificar, a partir do estado inicial, a existência de interrupções na produção através das seguintes condições:
 - *Condição Marcação*: verificar se a marcação no lugar $p_e^{pr_i}$ e $p_{in}^{pr_i}$ assume o valor zero e diferente de zero, respectivamente. Desta forma, a regra de habilitação da transição $t_{op}^{pr_i}$ não é satisfeita.
 - *Condição Disparo*: verificar se a transição $t_{op}^{pr_i}$ não foi disparada, ou seja, $mt(t_{op}^{pr_i}) = 0$.
- c. caso as condições *Condição Marcação* e *Condição Disparo* não sejam satisfeitas, então deve-se adotar o valor corrente do tempo de reposição como o ótimo e retornar ao passo *iv*);
- d. caso as condições *Condição Marcação* e *Condição Disparo* sejam satisfeitas, então para o valor corrente do tempo de reposição, constata-se que houve interrupção na produção. Sendo assim, o tempo de reposição procurado (ótimo) é o tempo do passo anterior.

Para formalizar todas as regras e verificações realizadas para determinar o tempo de reposição *ótimo* (de um determinado item), segue o algoritmo abaixo:

ALGORITMO

- Entrada:
 - Modelo *SPD*;
 - Item componente-estoque ($CE = \{pr_i\}$) a ser analisado;
 - Limites adotados para o tempo de reposição do item pr_i : *min* é o limite mínimo e *max* é o máximo.
- Saída:
 - Tempo de reposição ótimo (RP_{opt});
 - Diagrama temporal que representa o tempo de reposição analisado para o item pr_i ;
 - Escalonamento global de produção para todas as operações realizadas nos itens da estrutura do produto;
 - Escalonamento do pedido de produção.

Função Principal

VAR:

flag, ExisteInterrupcao : Bool;*RP_{opt}, RP_i* : real;*RG* : TipoEstados²;*flag* := Falso;*RP_{opt}* := min;FOR *RP_i* = min TO max DO*RG* := GerarGrafoAlcancabilidateTemporizado(*RP_i*);*ExisteInterrupcao* := VerificarInterrupcao(*RG*);IF *ExisteInterrupcao* = Falso THEN*RP_{opt}* := *RP_i*;*flag* := Verdadeiro;

END IF;

END FOR;

IF *flag* = Verdadeiro THEN// ** Tempo de reposição ótimo *RP_{opt}* encontrado.

ELSE

// ** Sistema produtivo não é interrompido pela falta de itens em estoque.

END IF;

EXIT();

FIM Função Principal

O algoritmo apresentado anteriormente consegue verificar, através dos estados gerados pelo grafo de alcançabilidade temporizado, a existência de um tempo de reposição capaz de oferecer condições de operação ao sistema modelado. Este tempo encontrado, o tempo de reposição ótimo (*RP_{opt}*), permitirá que a operação realizada no item verificado (*pr_i*) não seja interrompida por indisponibilidades de estoque. Esta característica é avaliada no algoritmo através das funções:

GerarGrafoAlcancabilidateTemporizado(*RP_i*): esta função é responsável em gerar³ o grafo de alcançabilidade temporizado (*RG*) para a rede modelada, adotando como tempo de reposição para o item analisado ($D(t_{rp}^{pr_i})$) o valor *RP_i*.

VerificarInterrupcao(*RG*): esta função é responsável por verificar as condições *Condição Marcação* e *Condição Disparo* a existência (*Verdadeiro*) ou não (*Falso*)

²Tipo definido com as seguintes informações: estados, lugar, marcação do lugar, transição, tempo da transição, transições habilitadas e tempo de mudança de estado

³Neste trabalho utilizamos a ferramenta INA para realizar esta operação.

de interrupção da operação t_{op}^{pri} . Esta função verifica, a partir do estado inicial até o estado onde o pedido é satisfeito (estado final), se houve interrupção.

5.4.3 Geração do Escalonamento global da produção

Nesta etapa da análise, o objetivo principal é construir, para um determinado pedido, todo o escalonamento das operações da produção. Mapear todos os tempos envolvidos no sistema produtivo tem por finalidade:

- estabelecer padrões para programas de produção;
- fornecer os dados para a determinação dos custos padrões;
- estimar o custo de um novo produto;
- fornecer dados para o estudo da eficiência da estrutura do produto.

A estrutura do arquivo que corresponde ao grafo de alcançabilidade temporizado gerado pela ferramenta INA, possui informações relativas aos estados e às transições entre estados. No entanto, estas informações não estão em um formato adequado para representar (diretamente) o diagrama temporal. Portanto, é necessário propor um procedimento para extração das informações relevantes (do grafo de alcançabilidade temporizado) e geração do respectivo diagrama temporal. Como premissas (entradas), para o procedimento de extração e geração do diagrama temporal, é necessário que o Grafo de Alcançabilidade Temporizado tenha sido gerado com as seguintes informações (ver Figura 5.3):

- estados alcançáveis devidamente enumerados;
- número de tokens de cada lugar para cada estado;
- lista de transições disparadas ou remanescentes (TD);
- tempos das transições remanescentes⁴ (RFT) para cada estado;
- mista de transições habilitadas (TH) para o disparo com o respectivo tempo de mudança de estado (TMD).

Com estas informações existentes no arquivo, o procedimento abaixo pode ser executado:

⁴Remaining Firing Time

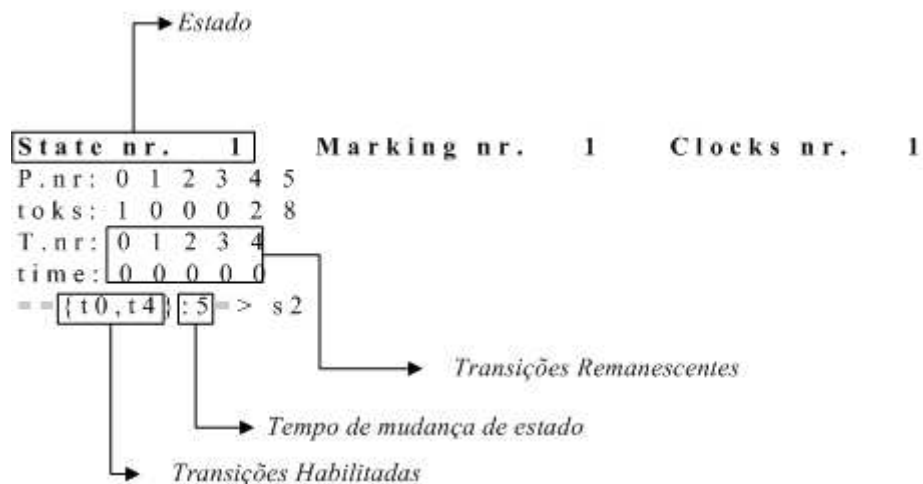


Figura 5.3. Estrutura do arquivo de um Grafo de Alcançabilidade Temporizado.

Função Plotar Diagrama Temporal

VAR:

instanteInicial, instanteFinal : real;
TH : vetor – *TipoTransicoesHabilitadas*;
TD : vetor – *TipoTransicoesDisparadas*;
RFT : vetor – *TipoTemposRemanescentes*;
TMD : vetor – real;

instanteInicial := 0;

instanteFinal := 0;

FOR *i* = *instanteInicial* TO *instanteFinal* DO

instanteInicial := *instanteFinal*;

instanteFinal := *instanteFinal* + *TMD*[*i*];

PlotarTransHabilitadas(*TH*[*i*], *instanteInicial*, *instanteFinal*);

IF *ExisteTransicaoDisparada*() = Verdadeiro THEN

PlotarTransDisparadas(*TD*[*i*], *instanteInicial*, *instanteFinal*, *RFT*[*i*]);

END IF;

END FOR;

EXIT();

FIM Plotar Diagrama Temporal

O algoritmo apresentado anteriormente consegue extrair os valores necessários para plotar um diagrama temporal das operações existentes no sistema de produção modelado. Este diagrama é gerado através das funções descritas abaixo:

State nr. 1 Marking nr. 1 Clocks nr. 1 P.nr: 0 1 2 3 4 5 6 7 8 toks: 10 0 0 0 0 0 5 45 0 T.nr: 0 1 2 3 4 5 6 7 time: 0 0 0 0 0 0 0 0 =={t0,t6}:1=> s2	State nr. 4 Marking nr. 4 Clocks nr. 4 P.nr: 0 1 2 3 4 5 6 7 8 toks: 7 2 1 0 0 0 4 1 0 T.nr: 0 1 2 3 4 5 6 7 time: 0 0 0 0 0 0 7 0 =={t0,t1,t2}:1=> s5
State nr. 2 Marking nr. 2 Clocks nr. 2 P.nr: 0 1 2 3 4 5 6 7 8 toks: 9 1 0 0 0 0 5 0 0 T.nr: 0 1 2 3 4 5 6 7 time: 0 0 0 0 0 0 9 0 =={t0,t1}:1=> s3	State nr. 5 Marking nr. 5 Clocks nr. 5 P.nr: 0 1 2 3 4 5 6 7 8 toks: 6 2 0 1 0 0 3 1 0 T.nr: 0 1 2 3 4 5 6 7 time: 0 1 0 0 0 0 6 0 =={t0,t3}:1=> s6
State nr. 3 Marking nr. 3 Clocks nr. 3 P.nr: 0 1 2 3 4 5 6 7 8 toks: 8 1 0 0 0 0 4 0 0 T.nr: 0 1 2 3 4 5 6 7 time: 0 1 0 0 0 0 8 0 =={t0}:1=> s4	State nr. 6 Marking nr. 6 Clocks nr. 6 P.nr: 0 1 2 3 4 5 6 7 8 toks: 5 3 1 0 0 0 3 2 0 T.nr: 0 1 2 3 4 5 6 7 time: 0 0 0 1 0 0 5 0 =={t0,t1,t2}:1=> s7

Figura 5.4. Estados de um Grafo de Alcançabilidade Temporizado.

PlotarTransHabilitadas(): esta função é responsável por construir um diagrama temporal das operações modeladas pelas transições $t_{op}^{pr_i}$. Estas transições, no estado do grafo, estão habilitadas para o estado i . A inserção do gráfico para cada transição, será a partir do valor definido pelo parâmetro *instanteInicial* até o *instanteFinal*.

PlotarTransDisparadas(): esta função é responsável por construir um diagrama temporal das operações modeladas pelas transições $t_{op}^{pr_i}$. Estas transições, no estado do grafo, continuam sendo disparadas com tempo remanescente $RFT[i]$. A inserção do gráfico para cada transição remanescente, será a partir do valor definido pelo parâmetro *instanteInicial*. O valor limite do gráfico será determinado ou pelo parâmetro *instanteFinal* ou por $RFT[i]$. Se $RFT[i]$ for maior do que *instanteFinal*, então o parâmetro que definirá o valor final será *instanteFinal*. Caso contrário, o parâmetro $RFT[i]$ definirá o valor final.

Para ilustrar o algoritmo acima, a Figura 5.4 mostra parte de um arquivo que contém alguns estados do Grafo de Alcançabilidade Temporizado de uma determinada rede. Através deste arquivo construiremos um diagrama temporal, levando em consideração as transições de operação (t_1 e t_3) e a transição que modela a emissão do pedido (t_0).

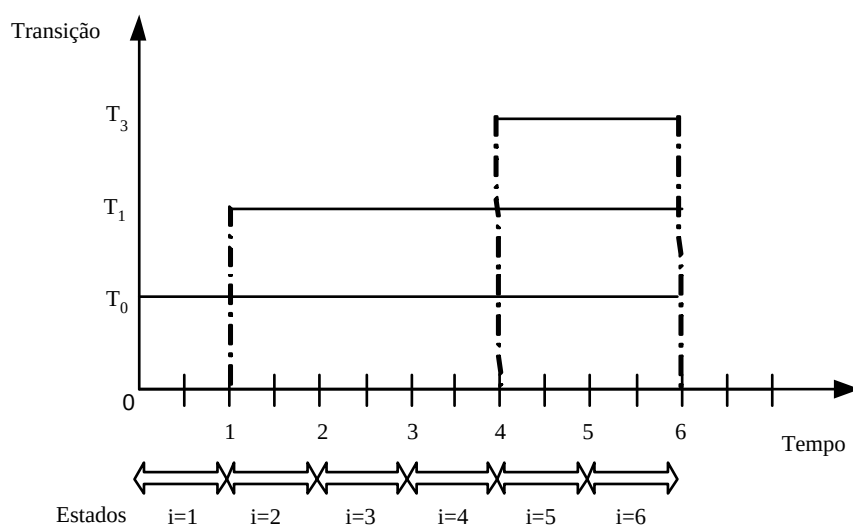
Aplicando o algoritmo *Plotar Diagrama Temporal* mapeamos os valores utilizados e calculados nos estados do grafo (da Figura 5.4) na Tabela 5.1. Desta forma, obtem-se o diagrama temporal para as operações e a transição que representa a emissão do pedido do sistema (ver Figura 5.5).

5.4.4 Determinar Quantidades de Estoque Período-a-Período

É de suma importância para a produção, determinar os momentos e as quantidades em estoque. Estes aspectos afetam diversas áreas dentro da organização, como área de

Tabela 5.1. Valores utilizados no algoritmo *Plotar Diagrama Temporal*.

i	TMD[i]	TH[i]	TD[i]	RFT[i]	instanteInicial	instanteFinal
1	1	t_0, t_6	-	-	0	1 (0 + 1)
2	1	t_0, t_1	t_6	$t_6 : 9$	1	2 (1 + 1)
3	1	t_0	t_1, t_6	$t_1 : 1, t_6 : 8$	2	3 (2 + 1)
4	1	t_0, t_1, t_2	t_6	$t_6 : 7$	3	4 (3 + 1)
5	1	t_0, t_3	t_1, t_6	$t_1 : 1, t_6 : 6$	4	5 (4 + 1)
6	1	t_0, t_1, t_2	t_3, t_6	$t_3 : 1, t_6 : 5$	5	6 (5 + 1)

**Figura 5.5.** Diagrama Temporal.

custos, compras e de planejamento.

Esta informação é obtida a partir do Grafo de Alcançabilidade Temporizado encontrado através do tempo de reposição ótimo calculado. Através dos estados obtidos, consegue-se avaliar o lugar que representa o nível do estoque ($p_e^{pr_i}$) e a transição que representa o tempo de reposição ($t_{rp}^{pr_i}$). Com estes valores identificados e mapeados, faz-se a seguinte análise:

i) Avaliar a utilização:

- identificar com o decorrer do tempo, a periodicidade do consumo do estoque;
- identificar o nível mais baixo que o estoque atingiu;
- avaliar se o limite mínimo identificado atende ao sistema produtivo, não causando interrupção da produção.

ii) Avaliar o número de reposições que houve no estoque. Para cada item, isto é identificado, observando o término do disparo da transição de reposição pelo aumento

do número de tokens no lugar $p_e^{pr_i}$.

5.4.5 Determinar Caminho Crítico da Produção

Determinar o caminho crítico de uma linha de produção tem como objetivo realizar um balanceamento dos recursos. Identifica também as atividades críticas que não podem, de forma alguma, sofrer atrasos; permitindo um controle eficaz das tarefas prioritárias. Estabelecendo o caminho crítico, consegue-se priorizar as atividades de maior impacto ao longo do processo produtivo.

Neste trabalho, o caminho crítico é obtido através do Grafo de Alcançabilidade Temporizado, onde são avaliados os caminhos existentes entre o estado inicial até o estado que caracteriza a finalização de pelo menos um produto final do sistema produtivo. A determinação do caminho crítico é realizada da seguinte forma:

- i) identificar o estado que caracteriza a conclusão do primeiro pedido da produção;
- ii) determinar todos os caminhos (seqüência ordenada de estados) do estado inicial até o estado identificado no passo anterior;
- iii) calcular a duração para cada caminho encontrado;
- iv) o(s) caminho(s) com a maior duração é denominado de caminho crítico.

5.4.6 Calcular Valor Empenhado para Estoque

Informações de cunho monetário são de extrema importância para setores que tratam de custos dentro de uma organização. Em um sistema de manufatura não é diferente. A existência antecipada de dados com valores de custos diretos e indiretos da produção, faz com que um planejamento mais real e detalhado seja possível. Por este motivo, que os resultados obtidos pelas análises anteriores, fornecem informações (de quantidades) relevantes para análise de custo.

Sendo assim, para se calcular o valor empenhado para um determinado estoque é necessário determinar qual o tipo de custo que será utilizado para se determinar o valor do estoque. Segundo [WAL03], existem quatro tipos de custo: o custo unitário (*unit cost*); custo de renovação (*reorder cost*); custo de manutenção (*holding cost*); e custo de carência (*shortage cost*). O valor do estoque será determinado, tomando como base o tipo de custo unitário.

O custo unitário é o preço calculado pelos fornecedores para um item, ou o custo da organização para adquirir uma unidade deste item. Caso o valor não seja por unidade do item e sim para lotes ou granularidades maiores, calcula-se o custo unitário pela divisão entre valor do lote cobrado pelo fornecedor e quantidades recebidas no respectivo lote.

$$UC = VF/QT DREC \quad (5.7)$$

Onde UC representa o custo unitário do item, VF é o valor cobrado pelo fornecedor e $QT DREC$ é a quantidade recebida. Determina-se então o valor do estoque pelo produto



Figura 5.6. Estrutura do Produto para análise.

do custo unitário e a quantidade de itens em estoque:

$$VALEST = UC * QTDEST \quad (5.8)$$

Onde *VALEST* representa o valor monetário do estoque, *UC* o custo unitário e *QTDEST* é a quantidade de itens em estoque.

O cálculo, a partir dos resultados das análises nas seções anteriores, revelará o valor empenhado para o estoque de cada item do sistema de manufatura analisado. Aplicando as equações 5.7 e 5.8 nos resultados da utilização de estoque período-a-período da Seção 5.4.4, determina-se o valor total utilizado para os estoques dos itens.

5.5 APLICANDO O MÉTODO DE ANÁLISE

Nesta seção será apresentada uma aplicação do método de análise, proposto na seção anterior, em um exemplo ilustrativo. O objetivo principal é evidenciar cada um dos aspectos relevantes para um sistema de manufatura, como por exemplo, a determinação do escalonamento de produção, utilização de estoque, entre outras características.

O exemplo apresentado na Figura 5.6 é uma estrutura (simples) do produto, formada por dois itens: um, do tipo componente-estoque, modelado através da definição de *MCE*; e outro, do tipo componente-simples, modelado através da definição de *MCS*.

Através da estrutura do produto exibida na Figura 5.6 e dos atributos de cada item descritos na Tabela 5.2 e 5.3, obtém-se o modelo *SDP*, aplicando toda a metodologia de modelagem apresentada no Capítulo 4.

Tabela 5.2. Lista de Materiais

Item	Código	Nível	Unidade	Consumo	Tempo (<i>u.t.</i>)	Estoque
A	A01	1	<i>unidade</i>	1	2	Não
B	B02	0	<i>unidade</i>	1	2	Sim

Com todas as informações mapeadas no modelo rede de Petri da estrutura do produto, a análise pode ser realizada. O modelo encontrado, por ser sequencial, não requer a

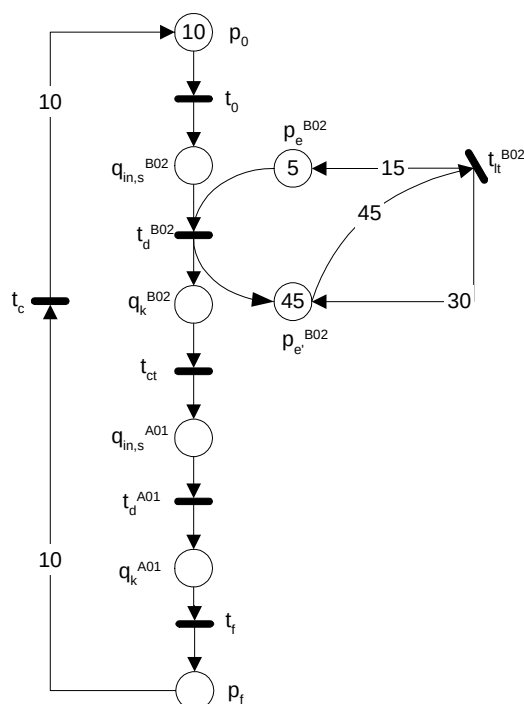


Figura 5.7. Modelo rede de Petri da estrutura do Produto para análise.

Tabela 5.3. Informações de Estoque

Item	Código	C_{max}	S_{min}	Nível	Tempo Repos.	Ordens Fixas	Consumo
B	B02	50	5	5	16	15	1

transformação para uma rede ALAP, pois ele já se comporta como tal. A partir de então, é possível analisar cada uma das questões levantadas na Seção 5.4 (*Análise do Modelo*). São elas:

- determinar tempo para reposição do estoque sem que haja interrupção;
- contruir o escalonamento global de produção;
- determinar níveis de utilização do estoque ao longo do tempo;
- determinar o caminho crítico da produção;
- determinar o investimento necessário para manter o estoque.

5.5.1 Analisar interrupção da produção

Para realizar análise das possíveis interrupções existentes no estoque, deve-se tomar como base as informações listadas nas Tabelas 5.2 e 5.3 para executar o algoritmo pro-

posto.

Entrada Valores de entrada para o algoritmo

- SPD não modificado;
- Item componente-estoque a ser analisado: $CE = \{B01\}$;
- Limites mínimo (min) e máximo (max) adotados para reposição: $min = 1$ e $max = 16$.

Executando os passos do algoritmo proposto pela Seção 5.4.2, temos como objetivo principal encontrar o tempo de reposição ótimo (RP_{opt}). O resultado do algoritmo em relação ao modelo rede de Petri da Figura 5.7 é exibido na Tabela 5.4.

Tabela 5.4. Valores de resultado do algoritmo

RP_i	Existe Interrupção?	RP_{opt}
1	<i>falso</i>	1
2	<i>falso</i>	2
3	<i>falso</i>	3
4	<i>falso</i>	4
5	<i>falso</i>	5
6	<i>falso</i>	6
7	<i>falso</i>	7
8	<i>falso</i>	8
9	<i>falso</i>	9
10	<i>falso</i>	10
11	<i>falso</i>	11
12	<i>verdadeiro</i>	-
13	<i>verdadeiro</i>	-
14	<i>verdadeiro</i>	-
15	<i>verdadeiro</i>	-
16	<i>verdadeiro</i>	-

O resultado apresentado na Tabela 5.4 representa cada passo do algoritmo descrito na Seção 5.4.2. Esta tabela mostra RP_i variando entre $min = 1$ e $max = 16$. O resultado encontrado para o RP_{opt} é igual a 11, portanto significa que este é o valor máximo de reposição que a linha de produção suporta sem haver paradas inesperadas no processo produtivo. Se um maior valor, entre 12 e 16, for praticado para reposição do item $B01$ então interrupção no sistema produtivo será inevitável. Também deve-se observar os valores menores que 11 podem ser adotados pelo sistema. No entanto, os problemas reais de reposição de estoque buscam sempre os valores máximos suportado pela produção.

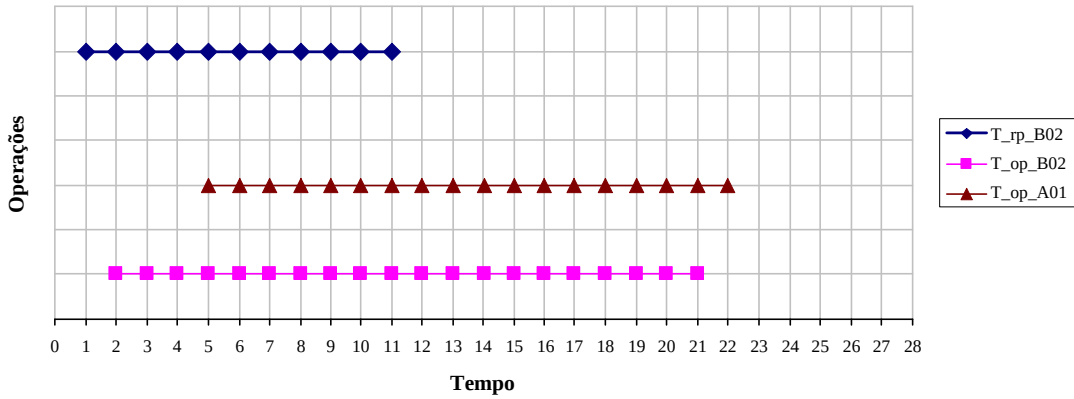


Figura 5.8. Gráfico do Escalonamento das operações de produção

5.5.2 Construindo o Escalonamento

A construção do escalonamento global da produção permitirá entender o que está acontecendo, período-a-período, com as operações de manufatura envolvidas na fabricação do produto final. Obtendo as informações do grafo de alcançabilidade temporizado geradas a partir do valor RP_{opt} encontrado, monta-se um diagrama temporal do sistema de produção.

Através da ferramenta INA, deve-se gerar o arquivo com todos os estados do grafo de alcançabilidade temporizado para o modelo proposto, identifica-se o estado final do sistema produtivo. Este estado representa o estado em que o sistema atingiu o número solicitado para o pedido de produção. Este estado é identificado quando o lugar p_f possui o número de tokens igual ao número do pedido, neste caso 10. O estado final então, para o tempo de reposição RP_{opt} , é o estado de número 25.

Baseado nas informações extraídas do arquivo que representa o grafo de alcançabilidade temporizado, montamos a Tabela 5.5 com as seguintes informações:

- Estado (i) do grafo de alcançabilidade temporizado;
- Tempo de mudança de estado de cada estado ($TMD[i]$);
- Transições habilitadas em cada estado do grafo ($TH[i]$);
- Transições disparadas (remanescentes) em cada estado do grafo ($TD[i]$);

As informações listadas na coluna *instanteInicial* e *instanteFinal* são obtidas a partir da execução do algoritmo proposto na Seção 5.4.3. Desta forma o diagrama temporal para o exemplo dado é plotado na Figura 5.8 para as transições t_{rp}^{B02} , t_{op}^{A01} e t_{op}^{B02} . Interpretando-se este gráfico pode-se identificar três aspectos relevantes do sistema de produção modelado. São eles:

Tabela 5.5. Valores obtidos do grafo para *Plotar Diagrama Temporal* do exemplo.

i	TMD[i]	TH[i]	TD[i]	RFT[i]	instanteInicial	instanteFinal
1	1	t_0, t_{rp}^{B02}	-	-	0	1 (0+1)
2	1	t_0, t_{op}^{B02}	t_{rp}^{B02}	$t_{rp}^{B02} : 10$	1	2 (1+1)
3	1	t_0	$t_{op}^{B02}, t_{rp}^{B02}$	$t_{op}^{B02} : 1, t_{rp}^{B02} : 9$	2	3 (2+1)
4	1	t_0, t_{op}^{B02}	t_{rp}^{B02}	$t_{rp}^{B02} : 8$	3	4 (3+1)
5	1	t_0, t_{op}^{A01}	$t_{op}^{B02}, t_{rp}^{B02}$	$t_{op}^{B02} : 1, t_{rp}^{B02} : 7$	4	5 (4+1)
6	1	t_0, t_{op}^{B02}	$t_{op}^{A01}, t_{rp}^{B02}$	$t_{op}^{A01} : 1, t_{rp}^{B02} : 6$	5	6 (5+1)
7	1	t_0, t_{op}^{A01}	$t_{op}^{B02}, t_{rp}^{B02}$	$t_{op}^{B02} : 1, t_{rp}^{B02} : 5$	6	7 (6+1)
8	1	t_0, t_{op}^{B02}	$t_{op}^{A01}, t_{rp}^{B02}$	$t_{op}^{A01} : 1, t_{rp}^{B02} : 4$	7	8 (7+1)
9	1	t_0, t_{op}^{A01}	$t_{op}^{B02}, t_{rp}^{B02}$	$t_{op}^{B02} : 1, t_{rp}^{B02} : 3$	8	9 (8+1)
10	1	t_0, t_{op}^{B02}	$t_{op}^{A01}, t_{rp}^{B02}$	$t_{op}^{A01} : 1, t_{rp}^{B02} : 2$	9	10 (9+1)
11	1	t_0, t_{op}^{B02}	$t_{op}^{B02}, t_{rp}^{B02}$	$t_{op}^{B02} : 1, t_{rp}^{B02} : 1$	10	11 (10+1)
12	1	t_{op}^{B02}	t_{op}^{A01}	$t_{op}^{A01} : 1$	11	12 (11+1)
13	1	t_{op}^{A01}	t_{op}^{B02}	$t_{op}^{B02} : 1$	12	13 (12+1)
14	1	t_{op}^{B02}	t_{op}^{A01}	$t_{op}^{A01} : 1$	13	14 (13+1)
15	1	t_{op}^{A01}	t_{op}^{B02}	$t_{op}^{B02} : 1$	14	15 (14+1)
16	1	t_{op}^{B02}	t_{op}^{A01}	$t_{op}^{A01} : 1$	15	16 (15+1)
17	1	t_{op}^{A01}	t_{op}^{B02}	$t_{op}^{B02} : 1$	16	17 (16+1)
18	1	t_{op}^{B02}	t_{op}^{A01}	$t_{op}^{A01} : 1$	17	18 (17+1)
19	1	t_{op}^{A01}	t_{op}^{B02}	$t_{op}^{B02} : 1$	18	19 (18+1)
20	1	t_{op}^{B02}	t_{op}^{A01}	$t_{op}^{A01} : 1$	19	20 (19+1)
21	1	t_{op}^{A01}	t_{op}^{B02}	$t_{op}^{B02} : 1$	20	21 (20+1)
22	1	-	t_{op}^{A01}	$t_{op}^{A01} : 1$	21	22 (21+1)
23	2	t_{op}^{A01}	-	-	22	24 (22+2)
24	1	-	-	-	24	25 (24+1)
25	-	-	-	-	-	-

- i) Assim que o pedido é emitido para o sistema, ocorre também a emissão de reposição do estoque através da transição t_{rp}^{B02} . Este comportamento garantiu a realização da reposição em tempo hábil para não interromper a linha de produção.
- ii) Em paralelo ao envio da ordem para repor o estoque, o gráfico apresenta a realização das operações dos itens B02 e A01, através das linhas t_{op}^{B02} e t_{op}^{A01} , respectivamente. A continuidade destas linhas representa a não interrupção do sistema produtivo.
- iii) Observa-se que para finalizar o pedido de produção foram necessários 25 estados e 25 unidades de tempo.

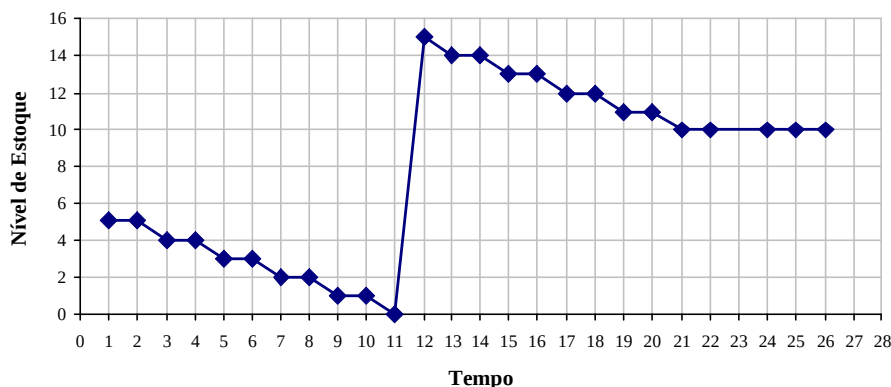


Figura 5.9. Gráfico de utilização de estoque no tempo

5.5.3 Determinando Níveis em Estoque

A determinação dos níveis em estoque período-a-período faz com tenhamos a noção exata do quanto se está utilizando de itens no estoque, e quanto é exigido para reposição do mesmo. A avaliação de tais aspectos é realizada a partir do grafo de alcançabilidade temporizado dado o tempo de reposição ótimo já encontrado.

Os valores avaliados são as marcações existentes no lugar p_e^{B02} do estado inicial ($i = 1$) ao estado final ($i = 25$). Um outro componente a ser plotado no mesmo gráfico, é o que representa a operação de reposição do estoque, t_{rp}^{B02} . Dado as quantidades de *tokens* existentes no lugar p_e^{B02} de cada estado, e o tempo da transição de reposição t_{rp}^{B02} , plota-se o gráfico da Figura 5.9. As seguintes considerações podem ser feitas com relação ao gráfico de utilização do estoque no tempo:

- o consumo do estoque é realizado em paralelo ao pedido de reposição;
- no estado 12, ao terminar o tempo de reposição, o estoque é repostado na quantidade previamente estabelecida de 15 unidades. Neste momento, o estoque vai ao nível zero, mas não compromete o sistema produtivo;
- durante a produção dez unidades do produto final, apenas uma vez o estoque é repostado de 15 unidades;
- o consumo do estoque permanece constante, após a reposição, atingindo o valor de dez itens em estoque no final da produção.

5.5.4 Determinando o Caminho Crítico

A determinação do caminho crítico da produção serve para identificar atividades críticas no sentido de não poder sofrer atrasos para não comprometer a produção. Para o exemplo apresentado, dado que a estrutura de produto não possui composições entre

os itens, a rede encontrada é seqüencial. Desta forma, o caminho crítico da produção é o próprio, e único, caminho que é possível para se obter o produto final.

De qualquer forma, vamos seguir os passos da Seção 5.4.5 para a obtenção formal do caminho crítico. Primeiro, deve-se identificar o estado que caracteriza a conclusão de um pedido. Neste caso, deve-se partir do estado inicial até o estado onde o lugar q_{fin}^{A01} possui marcação igual a um (1). A partir do grafo de alcançabilidade encontrado, identifica-se que o oitavo estado caracteriza o estado final para o caminho crítico, ou seja, o número de *tokens* em q_{fin}^{A01} é igual a 1. O segundo passo é determinar todos os caminhos possíveis para, do estado inicial, se chegar ao estado final (estado igual a 8). Para o exemplo apresentado, não há outros caminhos para se chegar ao estado final. Deve-se então calcular a duração de todos os caminhos encontrados. Neste caso, a duração para o único caminho encontrado é obtido através da soma de todos os tempos associados à mudança de estado até o estado final. O valor calculado é igual a 7 *u.t.*. Como este é o único caminho, este fica sendo o resultado do caminho crítico.

5.5.5 Determinando o Valor do Estoque

Informações de cunho monetário são de suma importância para avaliar o valor agregado da produção (com custos de estoque existentes). Para tanto, com as informações de utilização do estoque durante o ciclo de produção do sistema produtivo, consegue-se determinar os valores monetários (\$) envolvidos.

Admitindo um valor hipotético de \$1.200,00 para a compra de um lote com 16 unidades, calcula-se o custo unitário (segundo a Definição 5.7) para cada item de estoque da seguinte forma:

$$VF = \$1.200,00; QTDREC = 16 \text{ unidades}$$

$$UC = VF/QTDREC = \$1.200,00/16$$

$$UC = \$75,00 \text{ por unidade}$$

Contabiliza-se o valor empenhado para o estoque, observando todos os momentos que precedem a reposição, até o término da produção. Para o exemplo apresentado, o estoque precedente a reposição assumiu o valor de 5 unidades de itens. Após a reposição, com o término da produção, o estoque encontrava-se com 10 unidades de itens. O valor total empenhado é obtido através do produto segundo a Definição 5.8:

$$UC = \$75,00 \text{ por unidade}; QTDEST = 5 + 10 = 15 \text{ unidades};$$

$$VALEST = UC * QTDEST = \$75,00 \text{ por unidade} * 15 \text{ unidades}$$

$$VALEST = \$1.125,00$$

5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo apresentamos o método de análise para o modelo definido no Capítulo 4. Através deste método, consegue-se determinar valores relevantes para o bom funcionamento de um sistema produtivo. Tais valores, são determinados a partir da análise do

grafo de alcançabilidade temporizado. A partir dele, consegue-se obter o escalonamento da produção e analisar valores adotados para a política de estoque da organização.

A análise do modelo, portanto, viabiliza a avaliação do desempenho da linha de produção, através do escalonamento, e dos parâmetros adotados pelo gerenciamento e controle de estoques. É através dos resultados gerados pela análise que torna-se possível planejar e controlar mais eficientemente um sistema de produção.

CAPÍTULO 6

ESTUDO DE CASO

Neste capítulo são apresentados os resultados da aplicação da metodologia proposta sobre um sistema de manufatura real da indústria farmacêutica e de fabricação de celulares. Inicialmente será feita uma descrição breve dos sistemas de produção modelados. A seguir, serão apresentados os modelos em Redes de Petri aplicados aos sistemas estudados. Finalmente os resultados são apresentados e comentados.

6.1 INTRODUÇÃO

Os exemplos utilizados neste estudo de caso foram retirados de sistemas de produção reais e buscam mostrar os princípios das redes de Petri à modelagem do planejamento da produção em conjunto com métodos de análises. Neste sentido, o que se procura demonstrar, de forma simplificada, a efetividade da metodologia desenvolvida para a modelagem de um sistema de produção discreto real.

Dois estudos de casos vão ser mostrados neste capítulo: o primeiro é o sistema de produção real do Laboratório Farmacêutico de Pernambuco (LAFEPE), o segundo maior laboratório público do Brasil, que foi criado em 1966 para produzir medicamentos a baixo custo para as populações de menor poder aquisitivo. Dentre os diversos processos produtivos existentes no LAFEPE, foi selecionado o processo produtivo que contempla a fabricação do analgésico *Ácido Acetilsalicílico 100 mg* (AAS). O segundo estudo de caso trata de um sistema de produção cujo objetivo é a montagem de telefones celulares do modelo Tronix. A empresa na qual foi realizado este estudo é uma grande empresa no seu segmento e, por motivo de confidencialidade, não permitiu a publicação de seu nome neste trabalho. Vamos tratar aqui esta empresa com o seguinte nome: CPA.

Este capítulo irá abordar o fluxo geral de produção adotado pelo LAFEPE e em seguida, para o produto escolhido, descreverá em detalhes a linha de produção, operações e quantitativos inerentes. Após o estudo da linha, o modelo será apresentado e a análise será efetuada. Para a produção da organização CPA, será exibida o modelo real adotado para a linha de montagem, onde aplicaremos a metodologia proposta para obter resultados. Por fim, considerações finais serão tecidas a cada produto modelado.

6.2 PRODUÇÃO LAFEPE

O LAFEPE acompanha a evolução tecnológica ao adotar novos processos produtivos com a construção de unidades fabris de líquidos orais (não-antibióticos, antibióticos e gotas), sólidos orais (comprimidos, comprimidos revestidos, cápsulas e pós) e sólidos

antiretrovirais. Tudo isso aliado a um controle de qualidade. A indústria foi edificada com painéis isotérmicos, o que permite um total controle de umidade e temperatura. Os equipamentos são modernos, automatizados, o que possibilita melhor e maior desempenho produtivo, para atender às normas de BPF (Boas Práticas de Fabricação) e permitem a produção anual de 1 bilhão de unidades. Como forma de acompanhar a demanda por produtos e serviços, o laboratório oficial é capaz de atender às áreas de injetáveis de pequeno e grande volume, pomadas e cremes, antibióticos penicilâmicos e instalar um novo almoxarifado para matérias-primas. Desse modo, o LAFEPE tem condições de elevar a oferta de sua linha de produtos, como analgésicos, antidiabéticos, diuréticos, antiarrítmicos, antiviróticos, dentre outros.

Fazem parte do processo produtivo do LAFEPE cinco grandes áreas para o pleno funcionamento de sua indústria de produtos farmacêuticos. São elas: Planejamento e Controle de Produção (PCP), Custo, Produção (Chão-de-fábrica), Almoxarifado, Controle de Qualidade (CQ) e Expedição.

De maneira geral, pode-se representar o processo produtivo com as áreas envolvidas como ilustrado na Figura 6.1. O que deve ser evidenciado na Figura 6.1, fundamentalmente, é o fluxo (ainda que simplificado) do processo produtivo macro, assim como a comunicação principal entre cada área.

Custo: a partir de demanda de mercado e decisões estratégicas da empresa, a área de custos (representando a alta direção e suas decisões gerenciais) dará início a um planejamento de produção adequado ao produto que será fabricado.

PCP: a área de planejamento e controle da produção é responsável pelo estudo e dimensionamento do que será preciso do ponto de vista de insumos e equipamentos afim de atender a solicitação de tempo, prazo e custo. É também de responsabilidade da área PCP provisionar insumos estocados no almoxarifado para que a linha de produção, quando em funcionamento, não seja comprometida.

Almoxarifado: é responsável pelo armazenamento (estocagem) dos insumos utilizados nas linhas de produção. Tais insumos são cuidadosamente armazenados, verificados e controlados, dado que são produtos da indústria química sensíveis a condições atípicas e armazenamento e manipulação.

Produção: é responsável pela produção propriamente dita do medicamento. Nele que se encontra a linha de produção atendendo a especificações necessárias para o chão-de-fábrica em funcionamento. Ele comunica-se também com o Almoxarifado caso exista necessidades de insumos além das solicitadas inicialmente.

Controle de Qualidade: tem o papel de verificar e validar todo e qualquer elemento dentro do processo produtivo, afim de atender a especificações internas e externas e as boas práticas de fabricação da empresa.

Expedição: é responsável pelo recebimento de todo lote já fabricado e liberado pelo CQ para comercialização e distribuição.

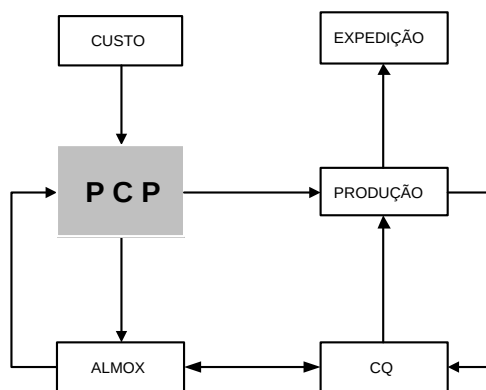


Figura 6.1. Fluxo de Produção LAFEPE

6.2.1 Linha de Produção AAS

A aspirina ou ácido acetilsalicílico, como é conhecida nas farmácias, completou 100 anos em 1997 e é o medicamento mais conhecido e vendido em todo o mundo. Só nos EUA, são consumidos mais de 30 bilhões de comprimidos de aspirina por ano [Ago97]. A aspirina foi patenteada pela Bayer em 1899, e o seu nome deriva de A de acetil e spirina de “spiric acid”, o outro nome em inglês pelo qual era também conhecido o ácido salicílico. “Spiric” por sua vez tem origem em *Spiraea*, gênero ao qual pertence a *Salix alba*, planta de onde foi isolada a salicilina. Desde então, a medicina passou a dispor da aspirina como uma das mais potentes armas de seu arsenal terapêutico [Mar96].

O processo de fabricação do AAS (ver Figura 6.2) está dentro do fluxo do processo produtivo de sólidos do LAFEPE. Neste processo são comuns operações de mistura, preparação de solução, malaxisagem¹, granulação, secagem, calibração, testes, compressão, enchimento de capsula, revestimento, embalagem, etc.

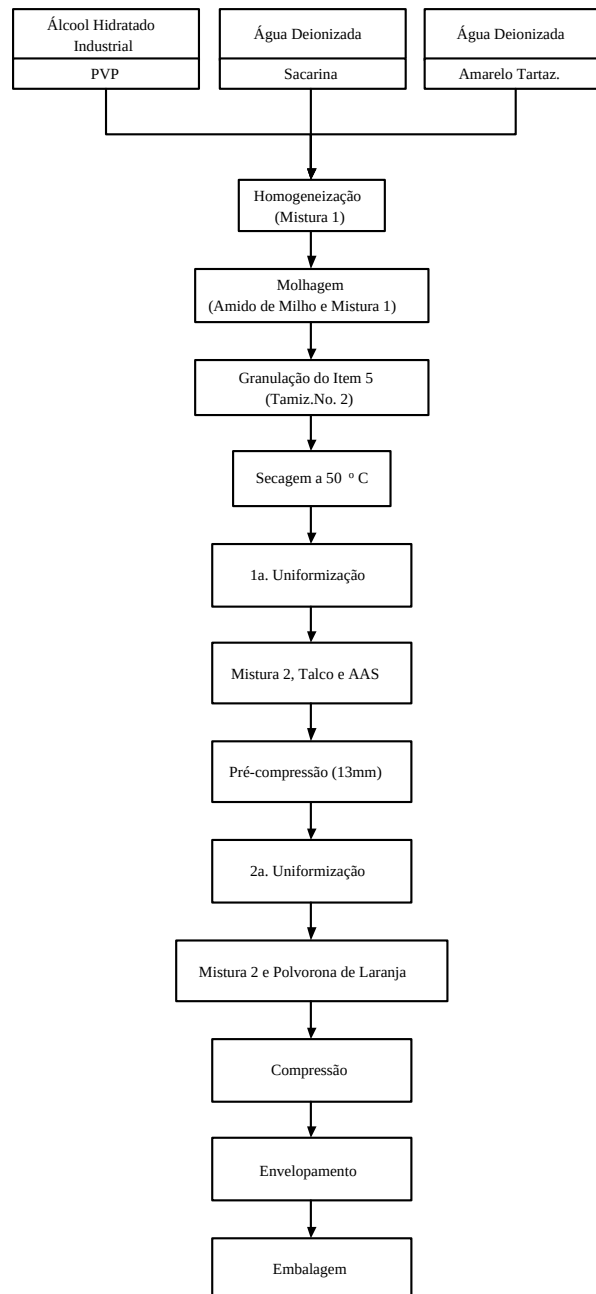
O fluxograma mostrado na Figura 6.2 é mapeado em uma estrutura do produto que possibilita representar o sistema produtivo de forma analítica. Nesta estrutura, serão identificados os itens do tipo componente-simples e do tipo componente-estoque. Para destacar cada tipo de item, para os itens do tipo simples, caixas brancas serão desenhadas com a identificação do item. Os itens do tipo estoque serão representados com caixas cinzas com suas respectivas identificações (ver Figura 6.4).

6.3 PRODUÇÃO CPA

A empresa CPA ocupa a segunda colocação no seu ramo de atividade. No segmento de sistemas produtivos, possui em uma de suas plantas de produção, linhas de montagens de celulares para o mercado mundial. A planta de produção tem capacidade para o pleno funcionamento de pelo menos 10 linhas de montagem de celulares.

De maneira simplificada dizemos que fazem parte do processo produtivo da CPA três grandes áreas para atender especificamente a montagem de celular: planejamento da

¹do Lat. malaxare ; Gr. maláссо, amolecer. v. tr., mexer muito uma substância para a amolecer

**Figura 6.2.** Fluxograma de Produção AAS

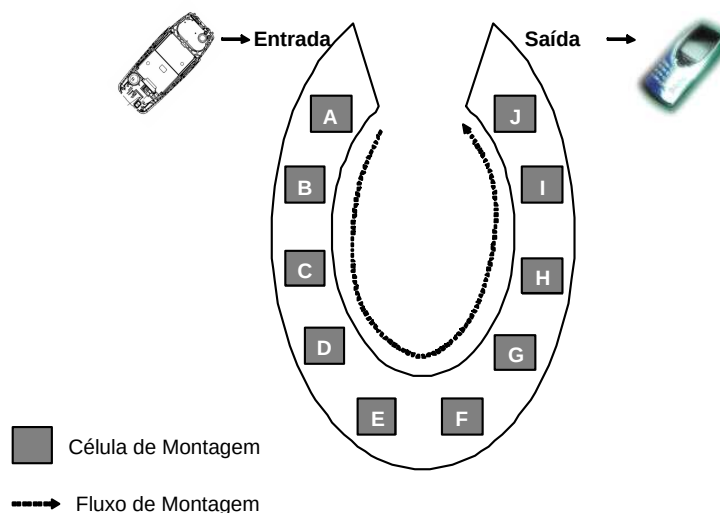


Figura 6.3. Linha de produção TRONIX.

produção, gerencialmente e controle de estoque e chão-de-fábrica.

O processo produtivo da CPA envolve fundamentalmente montagem e exige habilidade e cuidado por parte dos recursos humanos dispostos na linha. O processo, apesar de ser na maioria manual, é rápido e eficiente. Cuidados especiais são tomados com armazenamento destes celulares, assim como seu transporte.

6.3.1 Linha TRONIX

TRONIX é o nome fantasia do modelo de celular que foi objeto de estudo para este trabalho. Normalmente, as grandes indústrias apelidam os modelos fabricados, por motivo de confidencialidade e segurança de marketing dos produtos. Este foi o caso do TRONIX. Apelido dado ao modelo estudado.

A linha de montagem do TRONIX possui um arranjo físico disposto em formato de “U” (ver Figura 6.3). Pela natureza das operações, na grande maioria de encaixes, este arranjo proporciona maior segurança e ganhos na realocação dos recursos da linha. Dois turnos de 8 horas são praticados por duas turmas diferentes de funcionários. Dependendo dos prazos dados aos clientes, aumenta-se ou não o número de turnos para completar a grade horária de um dia. A produção (montagem) é realizada em ritmo acelerado. Em média, cada operação (encaixe) é realizada em 5 segundos. Por existir 10 postos de trabalho na linha TRONIX, em média um celular era montado em aproximadamente 50 segundos.

Uma disposição sequencial das operações é adotada, ou seja, um funcionário realiza a operação de encaixe e encaminha o aparelho para o próximo posto e assim sucessivamente. No final das dez operações, um teste é realizado no aparelho para determinar o sucesso da operação e, só assim, encaminhá-lo para expedição.

Um detalhe importante na linha TRONIX é a manipulação e tratamento de itens em

estoque. Na verdade, todos os itens (peças) que são encaixados na carcaça do celular tem que necessariamente estar disponíveis, ou seja, devem existir em estoque na quantidade mínima exigida. Em uma carcaça de celular, uma peça de cada tipo é inserida. Todos os tipos das peças devem existir na mesma quantidade. Não pode haver casos de se ter quantidades a mais de um determinado tipo. Na política adotada, a compra e o armazenamento é realizado de uma só vez, em lote para todos os itens.

6.4 ESCOPO DO ESTUDO DE CASO

As informações coletadas ao longo do estudo das linhas de produção do AAS e Tronix foram tabuladas, analisadas e representadas pelo modelo proposto. Por questões de confidencialidade do processo produtivo, tempos e quantidades de cada etapa do processo produtivo serão valores médios de um determinado cenário da linha de produção. No entanto, o processo produtivo está sendo modelado e contemplado na íntegra, sem reduções de qualquer natureza e obedecendo às fases reais existentes na linha de produção.

Vale ressaltar que o escopo de modelagem destas linhas de produção é sob a visão do PCP. Fluxos de manutenção de recursos, custos, controle de qualidade e expedição não terão interferência no modelo proposto. Esta restrição do escopo não condiz com a dinâmica da linha de produção, muito embora, seja possível modelar todos esses aspectos. Mas para simplificação e focando o objetivo principal do PCP, o modelo que será construído representará apenas um aspecto do sistema de produção real.

6.5 MODELO REDES DE PETRI PARA AAS

A área de Planejamento e Controle da Produção (PCP) possui uma ordem de produção padrão para produção de AAS. Esta ordem de produção informa as quantidades padrões de cada insumo determinando o tamanho padrão para esta ordem de produção: 4 mil caixas com 500 comprimidos cada. Isto resulta num total de 2 milhões de unidades de comprimidos. No entanto, a fórmula mestra (farmacêutica) padrão para se produzir AAS, leva em consideração a produção de 2 mil unidades de comprimidos para um conjunto fixado de quantidades de insumos. No entanto, paradas no sistema produtivo eram inevitáveis, principalmente em relação a dois insumos (itens de produção): Talco Magnesita (TA) e Polvorona de Laranja (PL). Estes serão os itens que serão analisados após o processo de modelagem.

O cenário real que serviu de exemplo para este estudo de caso, foi a partir de um pedido de um determinado cliente do LAFEPE. Ele desejava ter 4 milhões de unidades de comprimidos AAS. Baseado neste pedido, a linha foi montada e disponibilizada segundo a estrutura do produto para o modelo AAS descrita na Figura 6.4.

Na Tabela 6.1 consta a lista de material, mapeando as operações e seus respectivos dados. As operações dentro na linha de produção podem ser executadas tanto paralelamente quanto sequencialmente. Vamos observar essencialmente as informações inerentes aos itens TA e PL. Uma característica interessante da linha de produção AAS é que o tempo das operações dos itens que possuem restrições de estoque são desprezados. Isto ocorre pois o item está sempre disponível nos depósitos (para armazenamento). O tempo

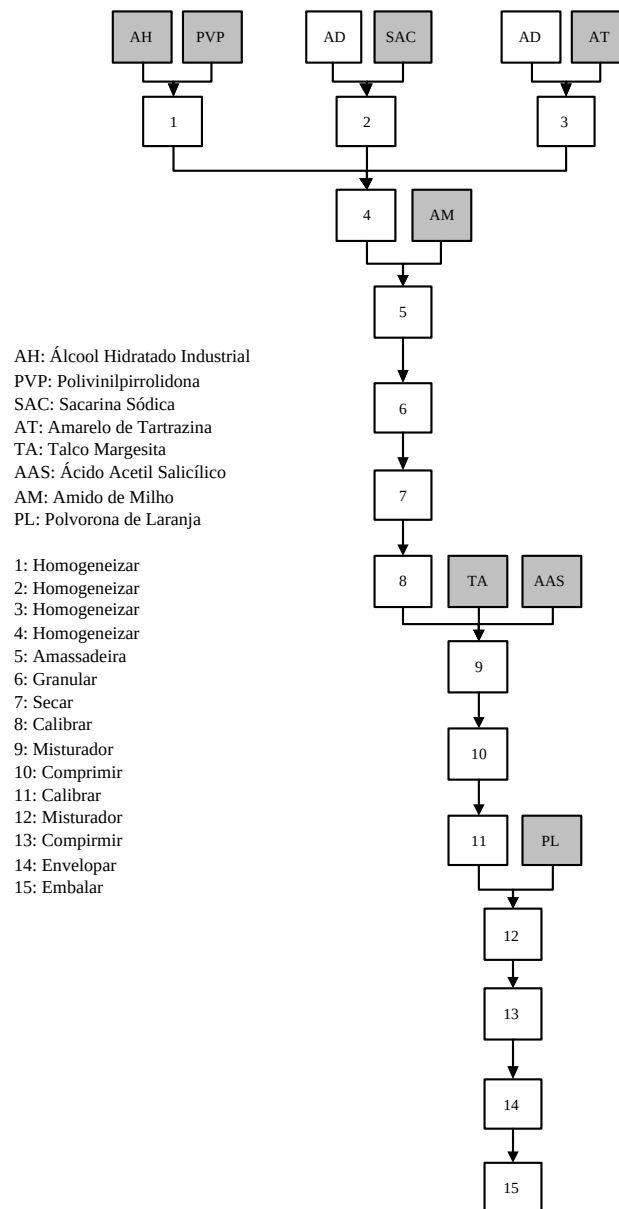


Figura 6.4. Estrutura do Produto do AAS

considerado é em relação ao tempo de reposição dos itens para estes depósitos. A in-

Tabela 6.1. Lista de Materiais AAS.

Item	Código	Nível	Consumo	Tempo (<i>min</i>)	Estoque
Talco Magnesita	TA	6	1	0	Sim
Polvorona de Laranja	PL	9	1	0	Sim

dicação da existência de estoque de *TA* e *PL* refletirá em um detalhamento em relação às quantidades e tempos inerentes à aquisição destes insumos para compor o comprimido. As informações relativas ao estoque estão descritas na Tabela 6.2. Baseado nas informações contidas nestas duas tabelas e na estrutura do produto, aplicamos a metodologia de modelagem do Capítulo 4 e obtemos o modelo redes de Petri como mostra a Figura 6.5.

Tabela 6.2. Informações de Estoque AAS.

Código	C_{max}	S_{min}	Nível	Tempo Rep.(dia)	OF	Cons.
TA	3,3559 <i>T</i>	335,59 <i>Kg</i>	1,118 <i>T</i>	1	1,118 <i>T</i>	50 <i>Kg</i>
PL	310,32 <i>Kg</i>	31,02 <i>kg</i>	103,44 <i>Kg</i>	5	103,44 <i>Kg</i>	4,5 <i>Kg</i>

No entanto, trabalhando com a rede tal qual é mostrada na Figura 6.5 e com os valores de estoque descritos na Tabela 6.2, será gerado uma quantidade muito grande de estados através do Grafo de Alcaçabilidade Temporizado. Para diminuir significativamente o número de estados, a fim de efetuar as análises descritas no Capítulo 5, reduzimos a rede de duas maneiras: aplicando reduções a partir das transições e elevamos a granularidade pelo estudo da proporcionalidade em relação aos tokens.

No sistema de produção modelado, considera-se que um pedido é representado por 1 token no lugar inicial, e este único token equivale a 20 mil unidades de comprimidos. Dado que o pedido do cliente seja de 4 milhões de comprimidos, teremos estes 200 tokens alocados ao lugar inicial da rede. Desta forma, toda operação que utiliza itens disponíveis em estoque, estão operando para disponibilizar lotes de 20 mil comprimidos. Em relação aos valores existentes em estoque, cada 50 *Kg* de Talco Magnesita e 4,5 *Kg* de Polvorona de Laranja, trabalharemos com 1 token.

Após adequação dos tempos das operações e quantidades envolvidas, a Tabela 6.3 mostra valores inerentes à reposição do estoque. Com todos esses valores em mãos, pode-se então efetuar os passos para análise do modelo.

6.5.1 Análise AAS

Com todas as informações mapeadas no modelo rede de Petri da estrutura do produto, a análise pode ser então realizada. Como o modelo analisado não é sequencial, para aplicar a análise é necessário a transformação para uma rede ALAP, pois ele se comporta como

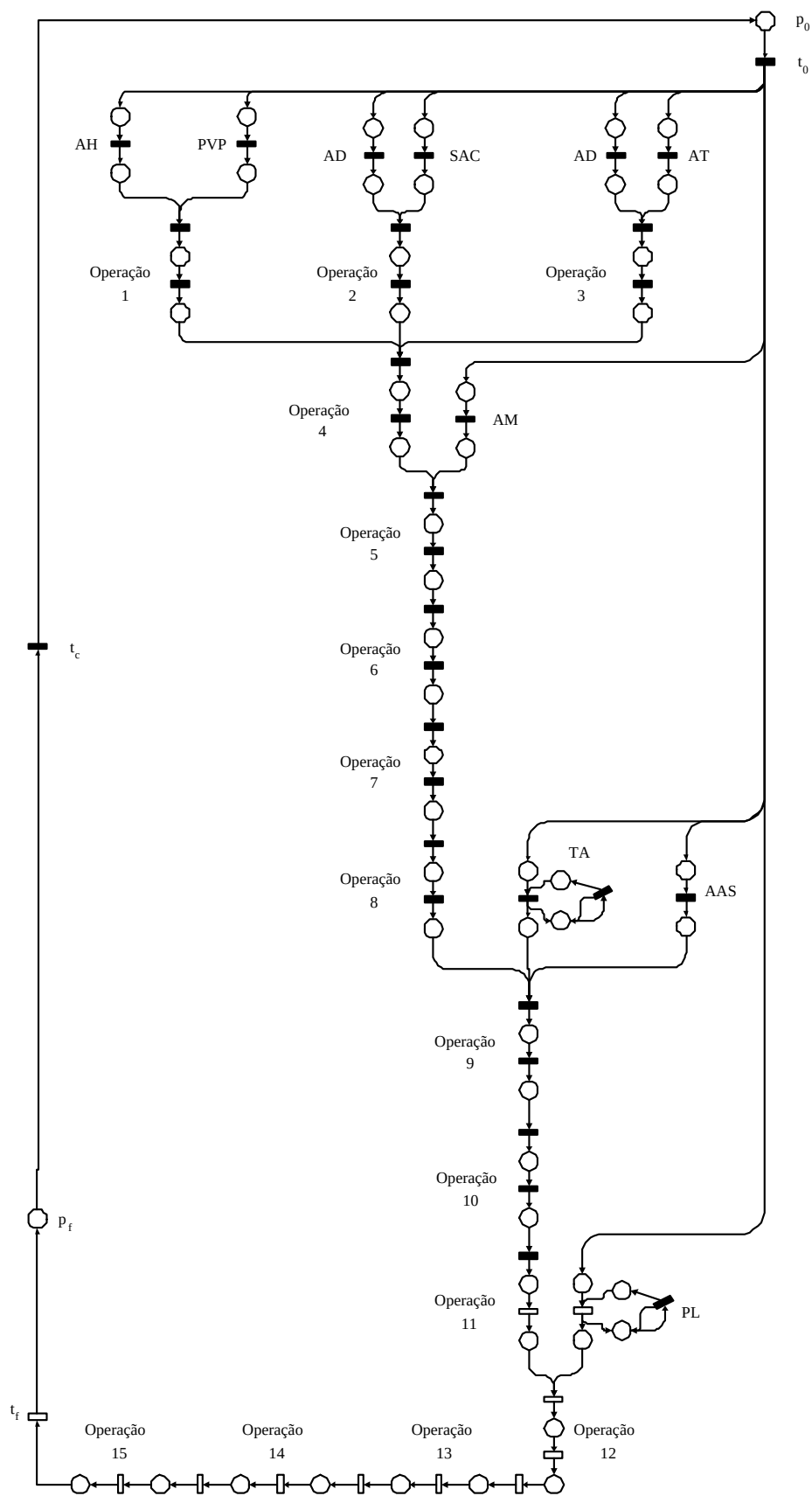


Figura 6.5. Modelo redes de Petri AAS.

Tabela 6.3. Informações de Estoque AAS.

Código	C_{max}	S_{min}	Nível	Tempo Rep. (min)	OF	Consumo
TA	66	7	22	1.440	22	1
PL	69	7	23	7.200	23	1

ASAP. A partir de então é possível analisar cada uma das questões levantadas na Seção 5.4 (*Análise do Modelo*). São elas:

- determinar tempo para reposição do estoque sem que haja interrupção;
- construir o escalonamento global de produção;
- determinar níveis de utilização do estoque ao longo do tempo;
- determinar o caminho crítico da produção;
- determinar o investimento necessário para manter o estoque.

6.5.1.1 Análise de Interrupção Executando os passos do algoritmo proposto pela Seção 5.4.2, temos como objetivo principal encontrar o tempo de reposição ótimo (RP_{opt}) para a linha AAS.

Tabela 6.4. Determinando tempo de reposição ótimo.

RP_i	Existe Interrupção?	RP_{opt}
7.200	<i>falso</i>	7.200
...	<i>falso</i>	...
10.000	<i>falso</i>	10.000
...	<i>falso</i>	...
20.000	<i>falso</i>	20.000
...	<i>falso</i>	...
31.400	<i>falso</i>	31.400
...	<i>falso</i>	...
31.439	<i>falso</i>	31.439
31.440	<i>verdadeiro</i>	-

O resultado apresentado na Tabela 6.4 representa cada passo do algoritmo descrito na Seção 5.4.2 analisado para os itens TA e PL. Esta tabela mostra RP_i variando entre $min = 7.200$ e $max = 31.440$ minutos. O resultado encontrado para o RP_{opt} igual a 31.439 minutos, portanto, significa que este é o tempo máximo de reposição que a linha de produção suporta sem haver paradas no processo produtivo. Se um valor maior que

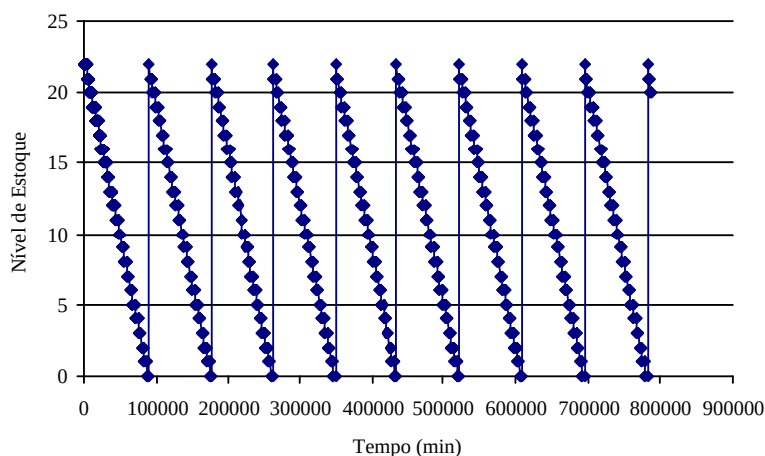


Figura 6.6. Utilização do estoque para TA.

31.439 minutos for praticado para reposição dos itens *TA* e *PL*, então a interrupção no sistema produtivo será inevitável. Também, deve-se observar que os valores menores que 31.439 minutos podem ser adotados pelo sistema. No entanto, os problemas reais de reposição de estoque buscam sempre os valores máximos suportado pela produção.

6.5.2 Níveis em Estoque

A determinação dos níveis em estoque período-a-período faz com que tenhamos a noção exata do quanto se está utilizando de itens no estoque, e quanto é exigido para reposição do mesmo. A avaliação de tais aspectos é realizada a partir do grafo de alcançabilidade temporizado, dado o tempo de reposição ótimo já encontrado.

Os valores avaliados são as marcações existentes no lugar que representa os estoques nos itens *TA* e *PL*, p_e^{ta} e p_e^{pl} , respectivamente. A verificação destes níveis é realizada a partir do estado inicial ($i = 1$) até o estado final ($i = 1795$). Desta maneira, pode-se avaliar, a partir da Figura 6.6 e 6.7, a utilização do estoque (para *TA* e *PL*) durante a produção do pedido.

As seguintes considerações podem ser feitas em relação gráfico de utilização do estoque no tempo para *TA* e *PL*:

- os itens são consumidos em paralelo aos pedidos de reposição;
- para o item *TA*, no estado 908 (90.392 minutos de funcionamento da produção), ocorre a primeira reposição do estoque de 22 tokens (ou 1,118 *T*). Neste momento, o estoque atinge o nível zero de itens comprometendo o sistema produtivo;
- para o item *PL*, no estado 913 (94.322 minutos de funcionamento da produção), ocorre a primeira reposição do estoque de 23 tokens (ou 103,44 *Kg*). Neste momento, o estoque atinge o nível zero de itens comprometendo o sistema produtivo;

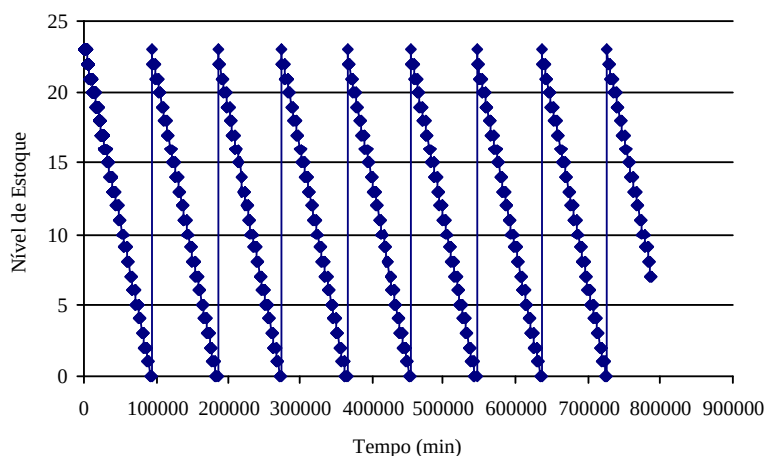


Figura 6.7. Utilização do estoque para PL.

- durante a produção dos itens do pedido, o estoque é reposto 9 vezes para *TA* e 8 vezes para *PL*, sempre com a mesma quantidade.

6.5.2.1 Escalonamento Global da Produção A construção do escalonamento global da produção permitirá entender o que ocorrerá período-a-período com as operações de manufatura envolvidas na fabricação do produto final. Obtendo as informações do grafo de alcançabilidade temporizado geradas a partir do valor RP_{opt} encontrado, monta-se um diagrama temporal do sistema de produção.

No diagrama temporal que representa o escalonamento da produção, são consideradas as seguintes operações: operação A, resultado da fusão entre operação 1 e uma transição de conexão; operação B, resultado da fusão entre as operações 5 à 8 e a transição de conexão; operação F, resultado da fusão entre as operações 9 à 11 e a transição de conexão; e operação G, resultado entre a fusão das operações 12 à 15 e transição de conexão. Baseado nas informações extraídas do arquivo que representa o grafo de alcançabilidade temporizado, montamos o diagrama temporal para TA e PL em dois intervalos durante a produção. O primeiro intervalo, para os dois itens, é desde o instante inicial do sistema produtivo (minuto zero) até o instante de 200 minutos (ver Figuras 6.8 e 6.10). O segundo gráfico representa um segundo instante de produção, desde o minuto 211 até o instante de 1052 minutos (ver Figuras 6.9 e 6.11). Pode-se perceber no primeiro intervalo a execução das operações A, B, C ocorrendo paralelamente, devido a natureza de sua estrutura e, a partir de um determinado instante, a operação D também é executada paralelamente as outras. No segundo intervalo, com o avanço do tempo, as operações subsequentes são disparadas nos seus respectivos instantes. Pertence agora ao diagrama temporal a operação E e outros instantes de execução da operação D.

Os diagramas temporais encontrados, servem de subsídios para o planejamento da produção em função dos tempos das operações. Uma análise pormenorizada pode ser

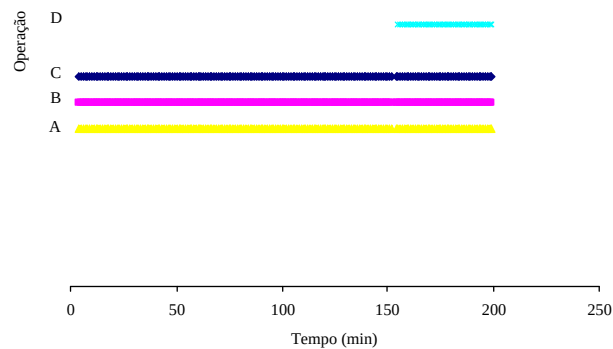


Figura 6.8. Escalonamento das operações de TA para o primeiro intervalo

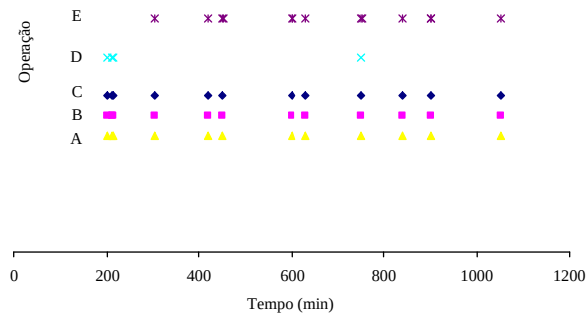


Figura 6.9. Escalonamento das operações de TA para o segundo intervalo

realizada, por exemplo, em algumas precedências/dependências não desejáveis no sistema produtivo.

6.5.3 Caminho Crítico

A determinação do caminho crítico da produção ajuda identificar atividades críticas que não podem sofrer atrasos para não comprometer a produção. Para o exemplo apresentado, o caminho crítico sempre passará pelas operações D, E, F e G. Pertencerá a este caminho ou a operação A, B ou C, dado que elas possuem o mesmo tempo. Para o caminho crítico encontrado, calculamos o menor tempo para a conclusão de um pedido (lote com 20 mil comprimidos) e o resultado foi de 5.251 minutos.

6.5.4 Valor do Estoque

Informações de custo monetário são de suma importância para avaliar o valor agregado da produção (custos de estoque existentes). Para tanto, com as informações de

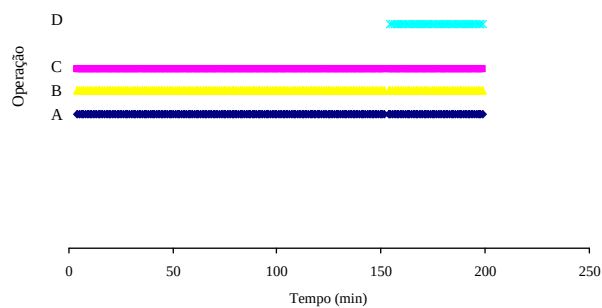


Figura 6.10. Escalonamento das operações de PL para o primeiro intervalo

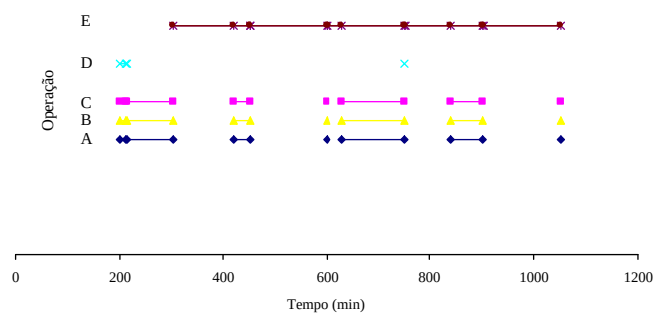


Figura 6.11. Escalonamento das operações de PL para o segundo intervalo

utilização do estoque durante o ciclo de produção da linha de produção, consegue-se determinar os valores monetários (\$) envolvidos.

Apesar de não termos informações financeiras e de custos inerentes ao processo produtivo, será atribuído um conjunto de valores para que o valor do estoque seja calculado, ainda que não seja real.

Admitindo um valor hipotético de \$10.000,00 e \$5.000,00 para a compra de um lote com 1.118,00 Kg de TA e 103,44 Kg de PL, respectivamente. Calcula-se o custo unitário (segundo a Definição 5.7) para TA da seguinte forma:

$$VF = \$10.000,00; QTDREC = 1.118,00Kg$$

$$UC = VF/QTDREC = \$10.000,00/1.118,00$$

$$UC = \$8,94 \text{ por Kg}$$

Calcula-se o custo unitário para PL da seguinte forma:

$$VF = \$5.000,00; QTDREC = 103,44 Kg$$

$$UC = VF/QTDREC = \$5.000,00/103,44$$

$$UC = \$48,33 \text{ por Kg}$$

Contabiliza-se o valor empenhado para o estoque (TA e PL), observando todos os momentos que precedem a reposição, até o término da produção. Para o estudo de caso apresentado, o estoque precedente a reposição assumiu o valor de 1.118,00 Kg de TA e 103,44 Kg de PL. Nove reposições foram necessárias até o término da produção para TA, ou seja, 10.062,00 Kg. O valor total empenhado, é obtido através da Definição 5.8:

$$UC = \$8,94 \text{ por Kg}; QTDEST = 10.062,00 Kg;$$

$$VALEST = UC * QTDEST = \$8,94 \text{ por Kg} * 10.062,00 Kg$$

$$VALEST = \$89.954,28$$

Para PL, oito reposições foram necessárias até o término da produção, ou seja, 827,52 Kg. O valor total empenhado, é obtido através da Definição 5.8:

$$UC = \$48,33 \text{ por Kg}; QTDEST = 827,52 Kg;$$

$$VALEST = UC * QTDEST = \$48,33 \text{ por Kg} * 827,52 Kg$$

$$VALEST = \$39.994,04$$



Figura 6.12. Estrutura do produto TRONIX.

6.6 MODELO REDES DE PETRI PARA TRONIX

A linha de produção TRONIX à princípio, possui uma capacidade produtiva para montagem, em média 1,5 mil unidades de celular por dia, dado que são utilizados os três turnos diários. No entanto, paradas no sistema produtivo eram inevitáveis. Quando não programadas, acarretavam perdas financeiras consideráveis.

O cenário real que serviu de exemplo para este estudo de caso, foi um pedido de um determinado cliente da CPA. Ele desejava ter 45 mil unidades de celulares do modelo TRONIX. Baseado neste pedido, a linha foi montada, disponibilizada, segundo a estrutura do produto para o modelo TRONIX, e mostrada na Figura 6.12.

Cada caixa da estrutura do produto (de A a J) indica a operação (encaixar) que será realizado no celular com o tipo da peça definido para operação. Por exemplo, a operação A encaixa a peça do tipo *ConnectorWZ*, a operação G encaixa a peça do tipo *BatteryConnector*, etc. A caixa A está grifada propositalmente, indicando que naquele ponto haverá a concentração de todos os tipos de peças em estoque. A operação A em conjunto com a disponibilidade de todas as peças definirá se a produção entrará em funcionamento ou não.

Na Tabela 6.5 consta a lista de material, as operações e informações respectivas. Como dito anteriormente, as operações de montagem realizadas no celular duram em média 5 segundos. Cada operação ocupa um nível na estrutura do produto, refletindo sua característica serial de montagem.

A indicação da existência de estoque na *Operação-A* refletirá nas quantidades e tempos inerentes à aquisição de todos os tipos de peças para compor o celular. As informações relativas ao estoque estão descritas na Tabela 6.6. Baseado nas informações contidas nestas duas tabelas e na estrutura do produto, aplicamos a metodologia de modelagem do Capítulo 4 e obtemos o modelo redes de Petri (ver Figura 6.13).

No entanto, trabalhando com a rede tal qual é mostrada na Figura 6.13 e com os

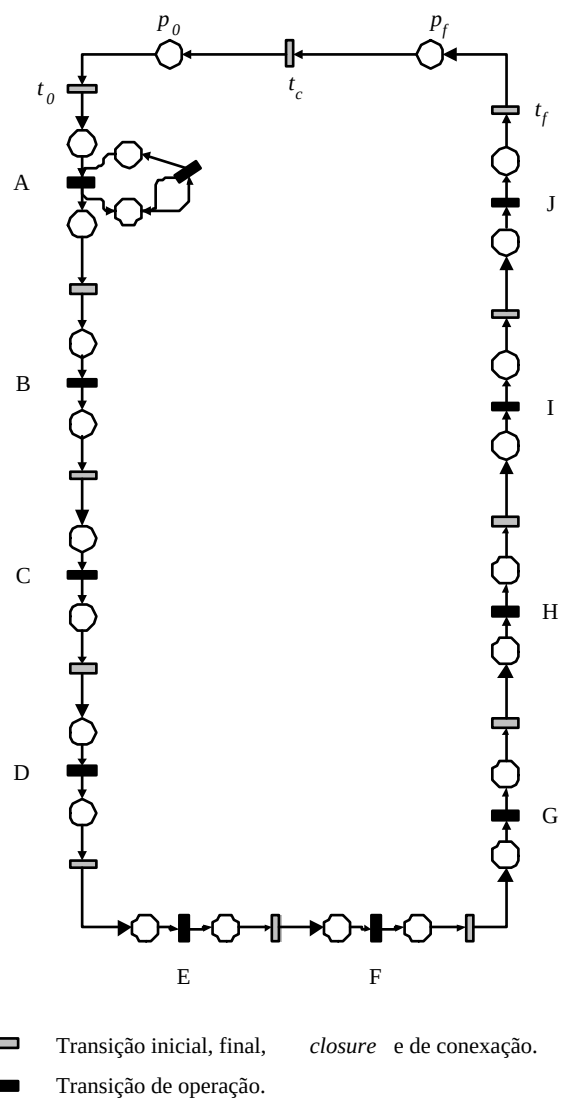


Figura 6.13. Modelo completo da rede TRONIX.

Tabela 6.5. Lista de Materiais TRONIX.

Item	Código	Nível	Consumo	Tempo (<i>seg.</i>)	Estoque
Operação-A	OpA	0	1	5	Sim
Operação-B	OpB	1	1	5	Não
Operação-C	OpC	2	1	5	Não
Operação-D	OpD	3	1	5	Não
Operação-E	OpE	4	1	5	Não
Operação-F	OpF	5	1	5	Não
Operação-G	OpG	6	1	5	Não
Operação-H	OpH	7	1	5	Não
Operação-I	OpI	8	1	5	Não
Operação-J	OpJ	9	1	5	Não

Tabela 6.6. Informações de Estoque TRONIX.

Item	Código	C_{max}	S_{min}	Nível	Tempo Rep. (dia)	Ordens Fixas	Consumo
Operação-A	OpA	15.000	4.500	7.500	2,5	7.500	1

valores de estoque descritos na Tabela 6.6, será gerado uma quantidade muito grande de estados no Grafo de Alcaçabilidade Temporizado. Para diminuir significativamente o número de estados, a fim de efetuar as análises descritas no Capítulo 5, reduzimos a rede de duas maneiras:

- Redução estrutural: aplica-se uma redução serial de transições (descrita na Seção 3.8.2.2) para as operações de B a J . Desta forma, o tempo da transição resultante será o resultado do somatório dos tempos das operações envolvidas na redução.
- Redução das Marcaçãoes: uma proporção é identificada entre as marcações existentes na estrutura da rede. Um token na rede estará representando 1,5 mil unidades.

A aplicação da redução serial das transições da rede será efetuada para as operações de B a J . A operação A não é considerada na fusão. De acordo com a Figura 6.14, a transição resultante da fusão entre as operações B e J será a transição t_{op}^{b-j} , cujo tempo será dado pelo somatório dos tempos das operações de B a J .

Para reduzir o número tokens em relação a marcação inicial do modelo, deve-se ter cuidado em respeitar a proporcionalidade entre os valores e as unidades trabalhadas no estudo de caso. Será considerado, neste estudo de caso, que 1 token representará um lote de 1,5 mil peças do sistema produtivo. Desta forma, teremos uma redefinição de todos os valores praticados para o estoque mostrados na Tabela 6.7. Deve-se observar que a proporcionalidade em relação ao tempo (em segundos) de reposição deve ser obedecida.

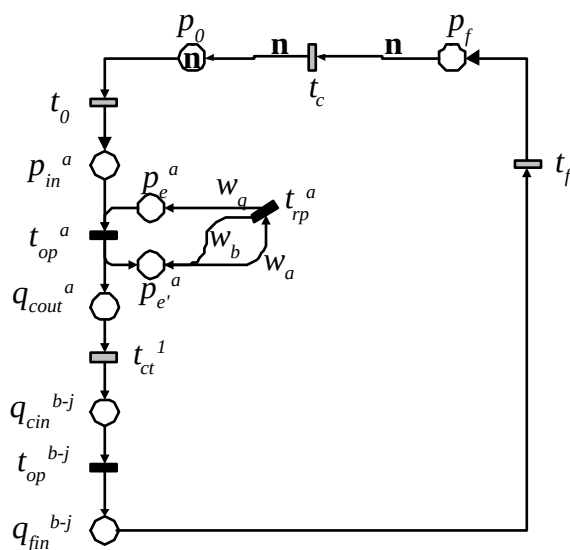


Figura 6.14. Modelo reduzido da rede TRONIX.

Para os tempos das operações do modelo, após a redução, os tempos das operações têm que também obedecer a proporcionalidade de 1,5 mil unidades consumidas através de 1 token. Desta forma, quando se despende 5 segundos para retirar 1 token do estoque ou realizar uma ordem de serviço, este valor deve ser multiplicado por 1,5 mil, transformando-se em 7,5 mil segundos para realização da operação do item A e 67,5 mil segundos para o tempo operação B a J.

Além da adequação dos tempos das operações, a Tabela 6.7 mostra o tempo que é determinado para reposição do estoque. Com todos esses valores em mãos, pode-se então efetuar a análise do modelo.

Tabela 6.7. Informações de Estoque TRONIX.

Item	Código	C_{max}	S_{min}	Nível	Tempo Rep. (seg)	Ordens Fixas	Consumo
Operação-A	OpA	10	3	5	302.400	5	1

6.6.1 Análise TRONIX

Com todas as informações mapeadas no modelo rede de Petri da estrutura do produto, a análise pode ser realizada. Como o modelo analisado é seqüencial, não se requer a transformação para uma rede ALAP, pois ele já se comporta como tal. A partir de então, é possível analisar cada uma das questões levantadas na Seção 5.4 (*Análise do Modelo*). São elas:

- Determinar tempo para reposição do estoque sem que haja interrupção.
- Construir o escalonamento global de produção.
- Determinar níveis de utilização do estoque ao longo do tempo.
- Determinar o caminho crítico da produção.
- Determinar o investimento necessário para manter o estoque.

6.6.1.1 Análise de Interrupção Executando os passos do algoritmo proposto pela Seção 5.4.2, temos como objetivo principal encontrar o tempo de reposição ótimo (RP_{opt}) para a linha TRONIX. O resultado do algoritmo, em relação ao modelo rede de Petri da Figura 6.14, é exibido na Tabela 6.8.

Tabela 6.8. Determinando tempo de reposição ótimo para linha TRONIX.

RP_i	Existe Interrupção?	RP_{opt}
0	<i>falso</i>	0
...	<i>falso</i>	...
15480	<i>falso</i>	15480
...	<i>falso</i>	...
22480	<i>falso</i>	22480
...	<i>falso</i>	...
22498	<i>falso</i>	22498
22499	<i>falso</i>	22499
22500	<i>falso</i>	22500
22501	<i>verdadeiro</i>	-
...	<i>verdadeiro</i>	...
120960	<i>verdadeiro</i>	-

O resultado apresentado na Tabela 6.8 representa cada passo do algoritmo descrito na Seção 5.4.2. Esta tabela mostra RP_i variando entre $min = 0$ e $max = 120960$ segundos. O resultado encontrado para o RP_{opt} igual a 22500 segundos, portanto, significa que este é o valor máximo do tempo de reposição que a linha de produção suporta sem haver paradas no processo produtivo. Se um valor maior que 22500 segundos for praticado para reposição do item A , a interrupção no sistema produtivo será inevitável. Também deve-se observar que valores menores que 22500 segundos podem ser *sim* adotados pelo sistema. No entanto, os problemas reais de reposição de estoque buscam sempre os valores máximos suportado pela produção.

6.6.1.2 Escalonamento Glogal da Produção A construção do escalonamento global da produção permitirá entender o que ocorrerá período-a-período com as operações de manufatura envolvidas na fabricação do produto final. Obtendo as informações do

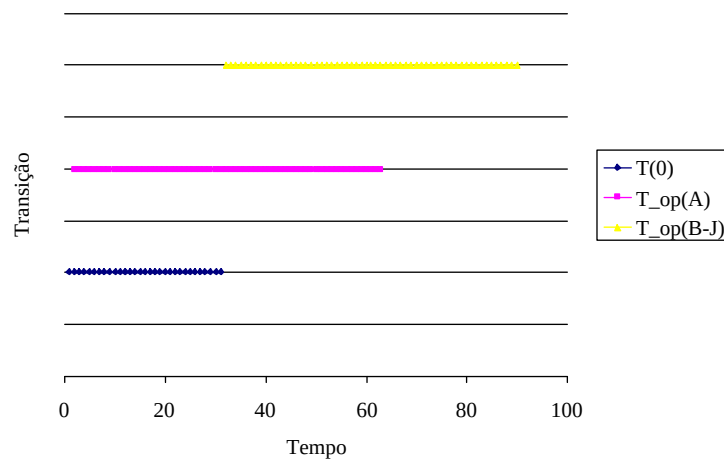


Figura 6.15. Escalonamento das operações.

grafo de alcançabilidade temporizado geradas a partir do valor RP_{opt} encontrado, monta-se um diagrama temporal do sistema de produção.

No diagrama temporal que representa o escalonamento da produção, também foi inserida a linha de tempo da transição que dispara os pedidos para o sistema produtivo, modelado pela transição t_0 . Baseado nas informações extraídas do arquivo que representa o grafo de alcançabilidade temporizado, montamos o diagrama temporal da Figura 6.15. Nesta figura, consta a linha de tempo da transição de operação do item A ($T_{op}(A)$), operação B-J ($T_{op}B-J$) e a transição que modela a emissão do pedido para o sistema produtivo ($T(0)$).

Pode-se perceber a continuidade da linha da transição $T_{op}(A)$ e $T_{op}B-J$ que caracteriza a continuidade das operações do sistema, sem ocorrência de interrupções inesperadas durante o processo produtivo.

6.6.2 Níveis em Estoque

A determinação dos níveis em estoque período-a-período faz com que tenhamos a noção exata do quanto se está utilizando de itens do estoque, e quanto é exigido para reposição do mesmo. A avaliação de tais aspectos é realizada a partir do grafo de alcançabilidade temporizado dado o tempo de reposição ótimo já encontrado.

Os valores avaliados são todas as marcações do lugar p_e^a desde o estado inicial ($i = 1$) até o estado final ($i = 92$) (ver Figura 6.17). No entanto, na Figura 6.16 foi plotado até o estado de número 64, pois a partir dele o nível do estoque permanece sempre igual a 5 (7.500 peças).

As seguintes considerações podem ser feitas sobre o gráfico de utilização do estoque:

- O consumo de itens do estoque é realizado em paralelo ao pedido de reposição;
- No estado 36, ocorre a primeira reposição do estoque (5 tokens ou 7500 peças). Neste

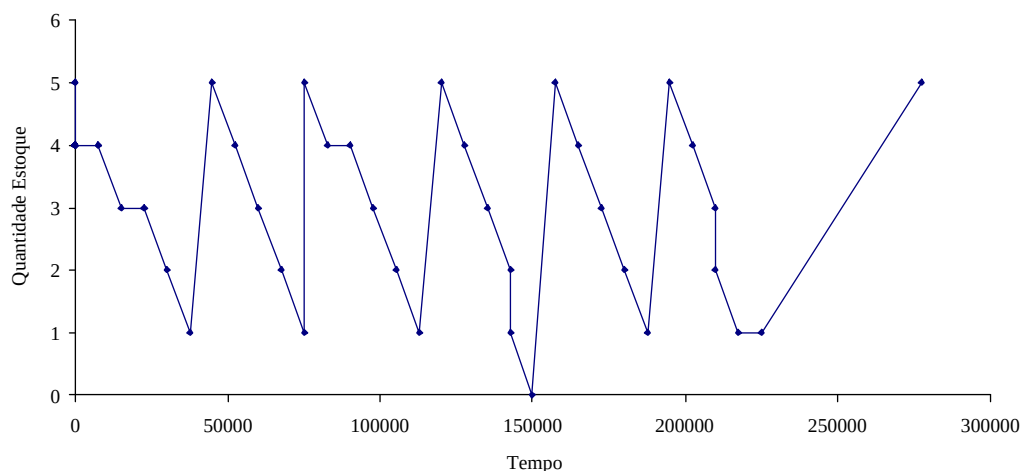


Figura 6.16. Utilização do estoque.

momento, o estoque está com apenas um token (ou 1500 peças), não comprometendo o sistema produtivo.

- Durante a manufatura, até atingir o estado 92, o estoque é repostado seis vezes. Sempre com a mesma quantidade.
- O consumo do estoque permanece constante a partir do estado 64, atingindo o valor de 7500 peças em estoque no final da produção.

6.6.3 Caminho Crítico

A determinação do caminho crítico da produção ajuda identificar atividades críticas que não podem sofrer atrasos para não comprometer a produção. Para o exemplo apresentado, dado que a estrutura de produto não possui composições entre os itens, a rede encontrada é seqüencial. Desta forma, o caminho crítico da produção é o próprio, e único caminho possível para se obter o produto final.

Deve-se identificar o estado que caracteriza a execução completa da linha para um único produto final. Este estado é o de número 43. Para se atingir este estado foram necessários 90.001 segundos para montar uma lote com 1,5 mil unidades de celular.

6.6.4 Valor do Estoque

Informações de cunho monetário são de suma importância para avaliar o valor agregado da produção (custos de estoque existentes). Para tanto, com as informações de utilização do estoque durante o ciclo de produção da linha de produção, consegue-se determinar os valores monetários (\$) envolvidos.

Apesar de não termos informações financeiras e de custos inerentes ao processo produtivo, será atribuído um conjunto de valores para que o valor do estoque seja calculado,

ainda que não seja real.

Admitindo um valor hipotético de \$1.000,00 para a compra de um lote com 1500 unidades (peças), cacula-se o custo unitário (segundo a Definição 5.7) para cada item de estoque da seguinte forma:

$$VF = \$1.000,00; QTDREC = 1.500 \text{ unidades}$$

$$UC = VF/QTDREC = \$1.000,00/1.500$$

$$UC = \$0,66 \text{ por unidade}$$

Contabiliza-se o valor empenhado para o estoque, observando todos os momentos que precedem a reposição, até o término da produção. Para o estudo de caso apresentado, o estoque precedente a reposição assumiu o valor de 7.500 unidades de itens e ocorreram 6 reposições até o término da produção, ou seja, 45.000 unidades. O valor total empenhado, é obtido através da Definição 5.8:

$$UC = \$0,66 \text{ por unidade}; QTDEST = 45.000 \text{ unidades};$$

$$VALEST = UC * QTDEST = \$0,66 \text{ por unidade} * 45.000 \text{ unidades}$$

$$VALEST = \$29.700,00$$

6.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conseguiu-se obter resultados relevantes pela aplicação da metodologia de modelagem e as técnicas de análise nos estudos de caso apresentados neste capítulo. Apesar dos sistemas produtivos apresentados possuírem apenas restrições do ponto de vista do estoque, os resultados gerados a partir do modelo, são relevantes para o sistema produtivo.

Analisando a produção do AAS, na linha de produção do LAFEPE, os valores iniciais adotados para o sistema (ver Tabela 6.2) não afetariam o sistema produtivo no aspecto do tempo de reposição do estoque. Adotou-se o valor de 7.200 minutos para a reposição dos itens TA e PL, onde verificou-se que este tempo (ver Tabela 6.4) não afetaria o sistema produtivo.

Por outro lado, analisando a produção do TRONIX, na linha de produção CPA, os valores iniciais adotados para o sistema (ver Tabela 6.6) afetariam significativamente o sistema produtivo no aspecto do tempo de reposição do estoque. Adotou-se o valor de 302.400 segundos para a reposição das peças da operação A, onde verificou-se que este tempo (ver Tabela 6.8) afetaria o sistema produtivo, pois era muito maior que o tempo de reposição ótimo encontrado (22.500 segundos).

Os valores reais coletados para a linha de produção TRONIX merecem uma melhor avaliação por parte do planejamento. Reposições constantes, duas por lote, caracterizam a necessidade de reavaliar os parâmetros adotados para o sistema. Uma política de estoques eficiente, portanto, deve ser definida para o pleno funcionamento da linha sem perdas de qualquer natureza.

Estado	Tempo	P_in	P_e	P_f
1	1	0	5	0
2	2	1	5	0
3	3	1	4	0
4	4	2	4	0
5	5	3	4	0
6	6	4	4	0
7	7	5	4	0
8	8	6	4	0
9	9	7	4	0
10	10	8	4	0
11	11	9	4	0
12	12	10	4	0
13	13	11	4	0
14	14	12	4	0
15	15	13	4	0
16	16	14	4	0
17	17	15	4	0
18	18	16	4	0
19	19	17	4	0
20	20	18	4	0
21	21	19	4	0
22	22	20	4	0
23	23	21	4	0
24	24	22	4	0
25	25	23	4	0
26	26	24	4	0
27	27	25	4	0
28	28	26	4	0
29	29	27	4	0
30	7501	28	4	0
31	7502	29	4	0
32	15001	28	3	0
33	22501	28	3	0
34	30001	27	2	0
35	37501	26	1	0
36	45001	25	5	0
37	52501	24	4	0
38	60001	23	3	0
39	67501	22	2	0
40	75001	21	1	0
41	75002	20	5	0
42	82501	19	4	0
43	90001	19	4	1
44	97501	18	3	1
45	105001	17	2	1
46	112501	16	1	1
47	120001	15	5	1
48	127501	14	4	1
49	135001	13	3	1
50	142501	12	2	1
51	142502	11	1	1
52	150001	10	0	1

Estado	Tempo	P_in	P_e	P_f
53	157501	10	5	2
54	165001	9	4	2
55	172501	8	3	2
56	180001	7	2	2
57	187501	6	1	2
58	195001	5	5	2
59	202501	4	4	2
60	210001	3	3	2
61	210002	2	2	2
62	217501	1	1	2
63	225001	1	1	3
64	277502	0	5	3
65	345002	0	5	3
66	412502	0	5	4
67	480002	0	5	5
68	547502	0	5	6
69	615002	0	5	7
70	682502	0	5	8
71	750002	0	5	9
72	817502	0	5	10
73	885002	0	5	11
74	952502	0	5	12
75	1.02e+06	0	5	13
76	1.09E+06	0	5	14
77	1.16E+06	0	5	15
78	1.22E+06	0	5	16
79	1.29E+06	0	5	17
80	1.36E+06	0	5	18
81	1.43E+06	0	5	19
82	1.49E+06	0	5	20
83	1.56E+06	0	5	21
84	1.63E+06	0	5	22
85	1.70E+06	0	5	23
86	1.76E+06	0	5	24
87	1.83E+06	0	5	25
88	1.90E+06	0	5	26
89	1.97E+06	0	5	27
90	2.03E+06	0	5	28
91	2.03E+06	0	5	29
92	2.03E+06	0	5	30

Figura 6.17. Tabela de estados.

CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo traz um resumo do trabalho apresentado, mostrando como os objetivos propostos foram atingidos, exibindo também quais os problemas encontrados durante o desenvolvimento do mesmo. Em seguida, são apontadas as contribuições desta pesquisa para a área de conhecimento de redes de Petri e sistemas de produção. Finalmente, são apontadas possibilidades de melhorias no trabalho e novas linhas de investigação para trabalhos futuros dentro do mesmo tema.

Este trabalho teve como objetivo principal propor uma metodologia de modelagem de sistemas de produção que viabilizasse a integração entre métodos consagrados de controle e gerenciamento de produção e de estoque através das redes de Petri. Na integração, a proposta foi obter, em uma única ferramenta matemática e gráfica, a modelagem do planejamento da produção, de aspectos de estoque e de escalonamento global do sistema produtivo.

O foco principal no PCP (Planejamento e Controle da Produção) e mais especificamente nas políticas de estoques, permitiu aplicar o modelo de forma consistente com problemas reais dos sistemas de produção. Como um dos objetivos relacionados ao trabalho, apresentamos métodos de análise para o modelo proposto a fim de verificar e validar o sistema de produção ora modelado em redes de Petri.

Assim, pode-se implementar uma forma de utilização de redes de Petri em sistemas de produção, fazendo com que questões comuns na comunidade de produção fossem modeladas e respondidas com a utilização de métodos formais. Durante o desenvolvimento deste trabalho, foram encontradas diversas dificuldades, principalmente em relação às ferramentas de análise. Uma das dificuldades foi a dependência da utilização de uma ferramenta externa de análise de redes de Petri. Apesar de contar com recursos diversos e uma implementação eficiente, a ferramenta INA limita bastante a capacidade de automatização do processo de análise das propriedades do sistema. Idealmente, deve-se considerar a utilização de uma biblioteca de redes de Petri integrável diretamente à implementação ou da utilização de uma ferramenta com uma interface padronizada e com comportamento desejado. Desta forma, teriam sido evitados problemas como a impossibilidade de controlar a ferramenta externamente (ex.: através do redirecionamento das entradas/saídas padrão do ambiente).

Um outro ponto importante foi a abordagem relativa a utilização de Grafo de Alcançabilidade Temporizado. A sua utilização foi realizada com muito critério. Adotou-se uma estratégia para redução do número de estados que consistia em:

- definir adequadamente a granularidade;

- definir proporcionalidade adequada;
- aplicar reduções.

As redes modeladas foram reduzidas ao máximo, tanto do ponto de vista estrutural, quanto de marcações. Quando as reduções não são aplicadas, o número de estados gerados pelos modelos podem tornar computacionalmente inviável a avaliação. As análises realizadas com sucesso, permitiam antecipar o comportamento do sistema produtivo.

Este trabalho apresentou uma abordagem para a fase de planejamento e controle da produção analisando as políticas de controle de estoques. Anteriormente, os modelos existentes não contemplavam diretamente a análise da política, limitando-se apenas em modelar a estrutura do sistema produtivo [DHP⁺93, DAJ95].

Neste trabalho, foi desenvolvido um processo de análise - também apoiados em redes de Petri - para obter resultados e responder questões comuns em sistemas de produção (**Capítulo 6**). Sobre esta análise, foi desenvolvido um algoritmo para sistematizar todas as fases de avaliação do modelo completo de um sistema de produção. Tal análise se baseia na obtenção do grafo de alcançabilidade temporizado e na verificação de propriedades estruturais bem estabelecidas em redes de Petri, como: limitação, conservação, alcançabilidade, etc.

Além disto, a fase de modelagem de um sistema de produção (**Capítulo 5**) é baseada fundamentalmente em uma notação (método) formal, redes de Petri. Como esta abordagem, pode-se considerar aspectos (escalonamento, caminho crítico, dimensionamento de recursos, níveis de estoque, etc) dentro do planejamento da produção que podem ser verificadas matematicamente através de propriedades das redes. Em relação ao modelo que representa as restrições e características de estoque, uma extensão natural deste trabalho é a elaboração de um modelo que trabalhe com tempos não-determinísticos. A utilização de redes de Petri Estocásticas seria muito enriquecedor para o trabalho, pois abriria um leque de opções para efetuar outros tipos de análises e capturar outros aspectos dos estoques, como: previsão de demanda de utilização, falhas de máquinas, taxas de produção, etc.

Outros enfoques para trabalhos futuros é considerar mais variáveis (como, movimentação, demanda de utilização, não recebimento, etc) para a determinação da política de estoque, modelos que garantam o compartilhamento de estoques entre os itens, alocação de recursos para a realização das operações, definição de roteiros de produção associados a diferentes plantas produtivas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [ACA78] T. AGERWALA and Y. CHOED-AMPHAI. A synthesis rule for concurrent systems. In *Proceedings of the 15th Design Automation Conference*, pages 85–94, Las Vegas, 1978.
- [Ago97] William C. Agosta. *Medicines and Drugs from Plants*, volume 74. J. Chem. Educ., July 1997.
- [BAR85] D.S. BARBALHO. *Conception et Mise en Oeuvre de la Fonction Coordination pour une Commande Distribuée d'Atelier*. PhD thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, March 1985.
- [BAR90] T.C. BARROS. Uma técnica de modelagem por redes de petri voltada a automação da manufatura. Master's thesis, UFPE, Recife, 1990.
- [BEC85] C. L. BECK. Modelling and simulation of flexible control structures for automated manufacturing systems. Master's thesis, Robotics Institute Technical Report, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, 1985.
- [BER] G. BERTHELOT. *Checking Properties of Nets Using Transformations*, volume 222. Springer-Verlag, Edited by G. Rozenberg.
- [BM92] L.M. BARROCA and J.A. MCDEMID. Formal methods: Use and relevance for the development of safety-critical systems. *The Computer Journal*, 1992.
- [BOW96] F. BOWDEN. Modelling time in petri nets. *2nd Australia-Japan Workshop on Stochastic Models*, July 1996.
- [BRA79] W. BRAUER. *Net Theory and Applications*. Springer-Verlag, Hanburg, 1979. Lecture Notes in Computer Science.
- [BRA83] G.W. BRAMS. *Réseaux de Petri: Théorie et Pratique, tome 1*. Masson Editions, 1983.
- [CCS92] J. CLEMMENT, A. COLDRICK, and J. SARI. Manufacturing data structures: building foundations for excellence with bills os mateial and process information. *Journal*, 2(1):123, 125, 127, June 1992. Note.
- [CF92] J.F. COX and B.J. FINCH. Strategic use of wip inventory: the impact of bill of material shape and plant type. *Production and Inventory Management Journal*, 30(1):63–67, June 1992. Note.

- [CH97] Y. CHEN and Y. HSIAO. A collaborative data management framework for concurrent product and process development. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 10(6):446–469, June 1997. Note.
- [Cle95] K. J. Cleetus. Modeling evolving product data for concurrent engineering. In *Engineering with Computers*, volume 11, pages 167–172, March 1995.
- [CM82] P.R.F. CUNHA and T.S.E. MAINBAUM. A synchronization calculus for message oriented programming. *2nd. International Conference on Distributed Computing Systems*, 1982.
- [COR93] Irineu G. N. CORRÊA, H.L. e Giancesi. *Just in time, MRP II e OPT: um enfoque estratégico*, volume 2. Atlas, São Paulo, 2 edition, June 1993. ISBN: 85-224-1058-5.
- [CS] J.M. COLOM and M. SILVA. Improving the linearly based characterization of p/t nets. *Lecture Notes in Computer Science*, 483:113–145.
- [CV97] J. CARDOSO and R. VALLETE. *Redes de Petri*. Editora UFSC, Florianópolis, 1997. 212p.
- [DAJ95] A.A. DESROCHERS and R.Y. AL-JAAR. *Applications of Petri Nets in Manufacturing Systems*. IEEE Press, 1995.
- [DCG91] F. DICESARE, S.J. CHANG, and G. GOLDBOGEN. Failure propagation trees for diagnosis in manufacturing systems. *IEEE Trans. on Systems, Manuf. and Cybernetics*, 1991.
- [DHP⁺93] F. DICESARE, G. HARHALAKIS, J.M. PROTH, M. SILVA, and F.B. VERNADAT. *Practice of Petri Nets in Manufacturing*. Chapman & Hall, London, 1993.
- [DTMM95] J.C. DALMAS, D.F. TUBINO, J.G. MOLINA, and J.M. MASCHERONI. Automação e sistemas de produção: O kanban eletrônico. *Akrópolis*, 11:3–9, 1995.
- [FSS⁺04] S.F.L. FERNANDES, W.J. SILVA, M. SILVA, N.S. ROSA, P.R.M. MACIEL, and D.F.H. SADOK. On the generalised stochastic petri net modeling of message-oriented middleware systems. In: *23rd IEEE International Performance Computing and Communications Conference - International Workshop on Middleware Performance (IWMP 2004)*, 1:783–788, 2004.
- [Gar95] D. Garwood. *Bill of material: structured for excellence*, volume 2. Marieta, Dogwood, 5 edition, June 1995.
- [GMMP91] C. GHEZZI, D. MANDRILOI, S. MORASCA, and M. PEZZ. An unified high-level petri net formalism for time-critical systems. *IEEE Transaction on Software Engineering*, February 1991.

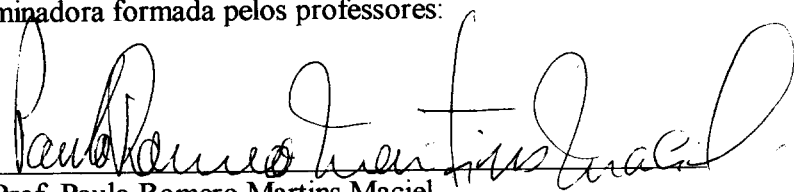
- [GOL82] R. GOLDBLATT. *Axiomatizing the Logic of Computer Programming*. LNCS. Springer-Verlag, 1982.
- [GOL96] E.M. GOLDRATT. *A síndrome do palheiro: garimpando informações num oceano de dados*, volume 2. São Paulo Educadora, June 1996.
- [GRA81] S.C. GRAVES. *A Review of Production Scheduling*, volume 2. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 3 edition, March 1981.
- [Gue85] V. C. Guess. *APICS training aid: bills of material*, volume 2. Falls Church, revised edition edition, June 1985. American Production and Inventory Control Society.
- [HAC72] M.H.T. HACK. Analysis of production schemata by petri nets. Master's thesis, MIT, 1972.
- [HAR81] H.A. HARDING. *Administração da Produção*, volume 2. Atlas, 1 edition, March 1981.
- [HOA85] C.A.R. HOARE. *Communicating Sequential Processes*. Prentice Hall International, 1985.
- [HY92] N.A.J. HASNTINGS and C. YEH. Bill of manufacture. *Production and Inventory Management Journal*, 33(3):27–31, June 1992. Note.
- [KB86] B.H. KROGH and C.L. BECK. Synthesis of place/transition nets for simulation and control manufacturing systems. In *Proceedings IFIP Symposium Large Scale Systems*, pages 85–94, Zurich, August 1986.
- [Kem98] L. Kempfer. Pdm takes to the web. <http://www.penton.com/cae/res/archives/9711pdmweb.html>, 1998.
- [KIR94] W. KIRCHMIER. Finite capacity scheduling. In *Proceedings of the 37th International Conference APICS*, Falls Road, VA, 1994.
- [KRI] K. KRIZNER. Solution takes control of parts inventory levels. *Frontline Solutions*, pages 16–17.
- [LIN78] H. LINK. *Programação e controle da produção*, volume 2. Edgard Blücher: Instituto de Pesquisa Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 1 edition, March 1978.
- [LOT87] A formal description technique based on the temporal ordering of observational behaviour. Technical report, Information Processing System - Open Systems Interconnection, 1987.
- [Mar96] C. Martin. *Chemistry in Britain*, volume 132. June 1996.

- [MBC⁺89] A. MARSAN, G. BALBO, G. CONTE, A. BOBBIO, G. CHIOLA, and A. CUMANI. The effect of execution policies on the semantic and analysis of stochastic petri nets. *IEEE TSE*, 15:832–846, 1989.
- [MER94] G. MERLI. *Comakership: A Nova Estratégia para os Suprimentos*, volume 2. Qualitymark, Rio de Janeiro, 2 edition, June 1994.
- [MF76] P.M. MERLIN and D.J. FARBER. Recoverability of communication protocols: Implications of a theoretical study. *IEEE Transaction Communication*, COM-24, September 1976.
- [MIL89] R. MILNER. *Communication and Concurrency*. Prentice Hall, 1989.
- [ML01] P.G. MARTINS and F.P. LAUGENI. *Administração da produção*, volume 2. Saraiva, São Paulo, 5 edition, June 2001.
- [MLC96] P.R.M. MACIEL, R.D. LINS, and P.R.F. CUNHA. *Introdução às Redes de Petri e Aplicações*. Sociedade Brasileira de Computação, Campinas, SP, 1996.
- [MMS77] C. MACHLINE, I.S. MOTTA, and W. SCHOEPS. *Manual de Administração da Produção vol. 2*, volume 2. Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, 4 edition, June 1977.
- [MOL81] M. K. MOLLOY. *On the Integration of Delay and Throughput MEasures in Distributed Processing Models*. PhD thesis, Los Angeles, CA, 1981.
- [MON85] J.G. MONKS. *Administração da Produção*, volume 2. McGraw-Hill, São Paulo, 2 edition, June 1985.
- [MUR84] T. MURATA. *Modelling and Analysis of Concurrent Systems*. Handbook of Software Engineering. Van Norstrand Reinhold Company Inc, 1984.
- [MUR89] T. MURATA. Petri nets: Properties, analysis and applications. In *Proceedings of the IEEE*, pages 541–580, April 1989. NewsletterInfo: 33Published as Proceedings of the IEEE, volume 77, number 4.
- [PC96] M.C. PEDROSO and H.L. CORRÊA. Sistemas de programação da produção com capacidade finita: uma decisão estratégica? *RAE-Revista de Administração de Empresas/EAESP/FGV*, 36:60–73, 1996.
- [PC99] M. PINEDO and X. CHAO. *Operations Scheduling With Applications in Manufacturing and Services*, volume 2. Irwin McGraw-Hill, June 1999.
- [PET81] J.L. PETERSON. *Petri Nets an Introduction*. Prentice-Hall Inc, 1981.
- [PSA92] AMERICAN PRODUCTION and INVENTORY CONTROL SOCIETY-APICS. *APICS Dictionary*, volume 2. Falls Church, 7 edition, June 1992.

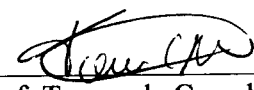
- [RAM74] RAMCHANDANI. Analysis of asynchronuous concurrent systems by timed petri nets. *Technical Report n120, laboratory for Computer Science, MIT*, 1974.
- [REI82] W. REISIG. *Petri Nets: An Introduction*. Springer-Verlag, 1982.
- [RK04] L.P. RITZMAN and L.J. KRAJEWSKI. *Administração da Produção e Operações*. Prentice Hall, São Paulo, 2004.
- [Sch95] B. Schlusel. Principles of product structuring: how to get the most of your bill of material. In *APICS Annual International Conference*, volume 11, pages 101–103, Orlando, March 1995. APICS, Falls Church.
- [SIF77] J. SIFAKIS. Use of petri nets for performance evaluation. *Measuring, Modelling and Evaluating Computer Systems*, 1977.
- [SKI85] W. SKINNER. *Manufacturing: the formidable competitive weapon*, volume 2. John Wiley and Sons, New York, 4 edition, June 1985.
- [SM] I. SUZUKI and T. MURATA. A method for stepwise refinement and abstraction of petri nets. *Journal of Computer Systems Science*, 27:51–76.
- [SPI89] J.M. SPIVEY. *Z Notation - A Reference Manual*. Prentice Hall International, 1989.
- [SSM04a] M.J.C. SILVA, W.J. SILVA, and P.R.M. MACIEL. Modeling of manufacturing system for performance analysis: An approach based on gspn. *European Simulation and Modelling Conference (ESMC'2003)*, 2004.
- [SSM04b] M.J.C. SILVA, W.J. SILVA, and P.R.M. MACIEL. Modelling and analysis in production systems: an approach based on petri nets. In: *IEEE System, Man, and Cybernetics Conference*, 2004.
- [ST96] M. SILVA and E. TERUEL. Petri nets for the design and operation of manufacturing systems. *CIMAT'96*, 1996.
- [STA88] P. H. STARKE. Remarks on timed petri nets. *Proc. 9th European Workshop on Application and Theory of Petri Nets*, 1988.
- [STVH98] M. SILVA, E. TERUEL, R. VALLET, and PINGAUD H. Petri nets and production systems. *Lecture Notes in Computer Science - Advances in Petri Nets*, 2:85–124, 1998. Edited by W. Riesig and G. Rozenberg.
- [VAL] R. VALETTE. Analysis of petri nets by stepwise refinement. *Journal of Computer Systems Science*, 18:35–46.
- [VBW92] T. E. VOLLMANN, W. BERRY, and D. C. WHYBARK. *Manufacturing planning and control systems*, volume 2. Irwin, Illinois, 3 edition, June 1992.

- [VN92] N. VISWANADHAM and Y. NARAHARI. *Performance Modeling of Automated Manufacturing Systems*, volume 2. Prentice-Hall Inc, Illinois, 3 edition, June 1992.
- [WAL99] C. WALTER. *Planejamento e Controle da Produção - PCP*. [S.l.:s.n.], Apostila de aula.- Mestrado em Engenharia de Produção - UFRGS, 1999.
- [WAL03] C.D.J. WALTERS. *Inventory control and management*. Wiley, 2003.
- [YEN92] H.C. YEN. Unified approach for deciding the existence of certain petri net path. *Information and Computation*, 1992.
- [ZH97] L.P. ZEUGMANN and M. HEINER. Worst-case analysis of concurrent system with duration interval petri nets. *Humboldt University, Technical Report*, May 1997.
- [ZUB91] W.M. ZUBEREK. Timed petri nets definitins, properties and applications. *Microeletronic and Reliability*, 31:627–644, 1991.

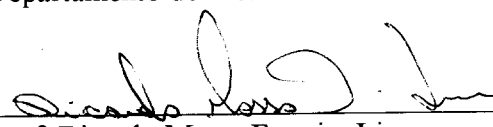
Dissertação de Mestrado apresentada por **Mauro José Carlos e Silva** à Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco, sob o título “**Modelagem de Políticas de Estoques: Uma Abordagem Baseada em Redes de Petri**”, orientada pelo **Prof. Paulo Romero Martins Maciel** e aprovada pela Banca Examinadora formada pelos professores:



Prof. Paulo Romero Martins Maciel
Centro de Informática / UFPE

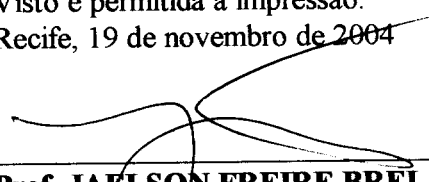


Prof. Tomaz de Carvalho Barros
Departamento de Eletrônica e Sistemas / UFPE



Prof. Ricardo Massa Ferreira Lima
Escola Politécnica / UPE

Visto e permitida a impressão.
Recife, 19 de novembro de 2004



Prof. JAELSON FREIRE BRÉLAZ DE CASTRO
Coordenador da Pós-Graduação em Ciência da Computação do
Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco.