



Universidade Federal de Pernambuco  
Centro de Informática

Mestrado em Ciência da Computação

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE  
SISTEMAS DE MANUFATURA UTILIZANDO  
GSPN COM ANOTAÇÕES DE CONSUMO  
DE ENERGIA E ALOCAÇÃO DE RECURSOS  
HUMANOS**

Adilson de Oliveira Arcoverde Junior

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Recife

Março de 2007



Universidade Federal de Pernambuco  
Centro de Informática

Adilson de Oliveira Arcoverde Junior

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS DE  
MANUFATURA UTILIZANDO GSPN COM ANOTAÇÕES DE  
CONSUMO DE ENERGIA E ALOCAÇÃO DE RECURSOS  
HUMANOS**

*Trabalho apresentado ao Programa de Mestrado em  
Ciência da Computação do Centro de Informática da Uni-  
versidade Federal de Pernambuco como requisito parcial  
para obtenção do grau de Mestre em Ciência da com-  
putação.*

Orientador: *Prof. Dr. Paulo Romero Martins Maciel*

Co-orientador: *Prof. Dr. Ricardo Massa Ferreira Lima*

Recife

Março de 2007



# SUMÁRIO

<b>Capítulo 1—Introdução</b>	13
1.1 Contexto . . . . .	13
1.2 Motivação . . . . .	14
1.3 Objetivos . . . . .	15
1.4 Trabalhos Relacionados . . . . .	16
1.5 Organização . . . . .	18
<b>Capítulo 2—Sistemas de manufatura</b>	19
2.1 Evolução Histórica . . . . .	19
2.2 Tipos de Sistemas de Produção . . . . .	20
2.2.1 Processos de Projeto . . . . .	21
2.2.2 Processos de <i>Jobbing</i> . . . . .	21
2.2.3 Processos em Lote . . . . .	21
2.2.4 Processos de Produção em Massa . . . . .	22
2.2.5 Processos Contínuos . . . . .	22
2.3 Sistemas de Manufatura Flexíveis . . . . .	22
2.4 Papel Estratégico dos Sistemas de Produção . . . . .	23
2.4.1 Sistemas de Administração da Produção . . . . .	24
2.4.2 Gerenciamento da Produção . . . . .	26
2.5 Arranjo Físico . . . . .	27
2.5.1 Tipos de Arranjo Físico . . . . .	28
2.5.1.1 Arranjo físico posicional . . . . .	29
2.5.1.2 Arranjo físico por processo . . . . .	29
2.5.1.3 Arranjo físico celular . . . . .	29
2.5.1.4 Arranjo físico por produto . . . . .	29
2.5.1.5 Arranjo físico misto . . . . .	30

<b>Capítulo 3—Avaliação de Desempenho</b>	31
<b>Capítulo 4—Redes de Petri</b>	33
4.1 Introdução . . . . .	33
4.2 Aspectos históricos . . . . .	34
4.3 Componentes das redes de Petri . . . . .	35
4.4 Estrutura das Redes de Petri . . . . .	36
4.4.1 Estrutura definida em <i>Bag</i> . . . . .	37
4.4.2 Estrutura definida em matriz . . . . .	37
4.4.3 Estrutura definida por relações . . . . .	38
4.4.4 Rede de Petri marcada . . . . .	38
4.4.5 Regras de execução . . . . .	39
4.4.6 Matriz de incidência . . . . .	39
4.4.7 Grafo de Marcações Acessíveis . . . . .	40
4.5 Propriedades das redes de Petri . . . . .	40
4.5.1 Propriedades comportamentais . . . . .	41
4.5.1.1 Alcançabilidade . . . . .	41
4.5.1.2 Limitação . . . . .	42
4.5.1.3 Segurança . . . . .	42
4.5.1.4 <i>Liveness</i> . . . . .	43
4.5.2 Propriedades estruturais . . . . .	43
4.5.2.1 Limitação estrutural . . . . .	43
4.5.2.2 Conservação . . . . .	43
4.5.2.3 Consistência . . . . .	44
4.6 <i>Generalized Stochastic Petri nets</i> (GSPN) . . . . .	44
4.6.1 Aspectos históricos . . . . .	44
4.6.2 Definição formal . . . . .	45
4.7 Resumo . . . . .	46
<b>Capítulo 5—Modelagem</b>	49
5.1 GSPN com anotações de consumo de energia e alocação de recursos humanos	49
5.1.1 Introdução . . . . .	49
5.1.2 Definição formal . . . . .	51

SUMÁRIO	7
5.1.3 Métricas de desempenho . . . . .	52
5.1.4 Exemplificando a EHSPN . . . . .	57
5.2 Modelos básicos . . . . .	60
5.2.1 Modelo máquina . . . . .	60
5.2.2 Modelo decisão . . . . .	62
5.2.3 Modelo falha . . . . .	63
5.2.4 Modelo buffer . . . . .	66
5.2.5 Modelo recurso compartilhado . . . . .	68
5.2.6 Modelo controle de qualidade . . . . .	71
5.3 Resumo . . . . .	73
<b>Capítulo 6—Metodologia de avaliação de desempenho</b>	<b>77</b>
6.1 Introdução . . . . .	77
6.2 Entrevista de reconhecimento . . . . .	79
6.3 Seleção das linhas de produção . . . . .	81
6.4 Seleção das métricas de desempenho . . . . .	84
6.5 Modelagem do workflow das linhas de produção . . . . .	84
6.6 Modelo de rede de Petri abstrato . . . . .	88
6.7 Obtenção de dados históricos . . . . .	91
6.8 Tratamento estatístico . . . . .	93
6.9 Refinamento e análise do modelo de redes de Petri . . . . .	95
6.10 Experimentação com simulação/análise estacionária . . . . .	100
6.11 Interpretação dos dados e apresentação dos resultados . . . . .	101
6.12 Resumo . . . . .	104
<b>Capítulo 7—Estudo de caso</b>	<b>107</b>
7.1 Introdução . . . . .	107
7.2 Aplicando a metodologia . . . . .	108
7.2.1 Entrevista de reconhecimento . . . . .	108
7.2.2 Seleção das linhas de produção . . . . .	108
7.2.3 Seleção das métricas . . . . .	109
7.2.4 Modelagem do workflow das linhas de produção . . . . .	109
7.2.5 Modelo de rede de Petri abstrato . . . . .	109

7.2.6	Obtenção de dados históricos . . . . .	111
7.2.7	Tratamento Estatístico . . . . .	113
7.2.8	Refinamento e análise do modelo de redes de Petri . . . . .	113
7.2.9	Experimentação com simulação/análise estacionária . . . . .	116
7.2.10	Interpretação dos dados e apresentação dos resultados . . . . .	117
7.3	Resultados . . . . .	119
7.4	Resumo . . . . .	120
<b>Capítulo 8—Conclusão e trabalhos futuros</b>		<b>123</b>



## LISTA DE FIGURAS

2.1	Relação entre o binômio volume-variedade e tipos de processos em operação de manufatura . . . . .	20
2.2	Escolha do arranjo físico . . . . .	27
2.3	Relação entre tipos de processo e tipos básicos de arranjo físico . . . . .	28
4.1	Elementos das redes de Petri . . . . .	35
4.2	Exemplo de uma rede de Petri . . . . .	36
4.3	Modelo de redes de Petri das transições dos períodos do dia . . . . .	36
4.4	Modelo de redes de Petri das transições dos períodos do dia após um disparo	36
4.5	Rede de Petri marcada . . . . .	41
5.1	Representação de um equipamento produtivo utilizando uma GSPN . . . . .	51
5.2	Exemplo de um sistema produtivo modelado utilizando uma EHSPN . . . . .	57
5.3	Modelo básico de uma máquina . . . . .	61
5.4	Modelo básico de decisão . . . . .	63
5.5	Modelo básico de falha . . . . .	64
5.6	Modelo de um buffer . . . . .	66
5.7	Modelo de um recurso compartilhado . . . . .	69
5.8	Modelo de controle de qualidade . . . . .	71
6.1	Fluxograma da metodologia de avaliação de desempenho . . . . .	79
6.2	Componentes básicos do <i>workflow</i> . . . . .	85
6.3	Exemplo de um workflow . . . . .	87
6.4	Regras de construção do modelo de rede de Petri abstrato. . . . .	89
6.5	Modelo de rede de Petri abstrato . . . . .	90
6.6	Boletim anual de produção para a <i>Empresa A</i> . . . . .	92
6.7	Boletim anual de produção para a <i>Empresa B</i> . . . . .	92
6.8	Gráfico de caixa para os dados do modelo abstrato. . . . .	95

6.9	Sumário estatístico do boletim diário de produção do componente Lin1.001 antes de tratamento estatístico. . . . .	95
6.10	Sumário estatístico do boletim diário de produção do componente Lin1.001 depois de tratamento estatístico. . . . .	95
6.11	Fluxograma para refinamento do modelo abstrato . . . . .	96
6.12	Refinamento do modelo abstrato . . . . .	97
6.13	Um modelo refinado para o componente <i>Lin1.001</i> . . . . .	98
6.14	Experiments results chart for a single component . . . . .	102
6.15	Resultados da função peso . . . . .	103
6.16	Um guia hierárquico para organização e detalhamento do relatório final .	104
7.1	Workflow da linha de produção . . . . .	110
7.2	Modelo de redes de Petri abstrato da linha de produção . . . . .	110
7.3	Análise de Pareto do histórico de produção da São Mateus . . . . .	112
7.4	Gráfico de caixa para o boletim diário da linha de produção de Salsicha .	113
7.5	Modelo refinado da linha de produção sem falhas e sem controle de qualidade	114
7.6	Modelo refinado da linha de produção com falhas e sem controle de qualidade	115
7.7	Modelo refinado da linha de produção com falhas e com controle de qualidade	115
7.8	Resultados dos experimentos para o componente Fase 1 . . . . .	118
7.9	Resultados dos experimentos para o componente Fase 2 . . . . .	118
7.10	Resultados dos experimentos para o componente Fase 3 . . . . .	119
7.11	Gráfico da função peso da São Mateus aplicada aos experimentos . . . .	119

## LISTA DE TABELAS

5.1	Atributos dos componentes ilustrados no exemplo . . . . .	57
5.2	Resultado das métricas de performance para o exemplo . . . . .	60
5.3	Sumário de métricas para o modelo máquina . . . . .	63
5.4	Sumário de métricas para o modelo de falha . . . . .	66
5.5	Sumário de métricas para o modelo buffer . . . . .	69
5.6	Sumário de métricas para o modelo de recurso compartilhado . . . . .	71
5.7	Sumário de métricas para o modelo de controle de qualidade . . . . .	73
6.1	Entrevista de reconhecimento: Participação dos produtos . . . . .	80
6.2	Entrevista de reconhecimento: Distribuição das linhas de produção . . . . .	81
6.3	Detalhamento das linhas de produção . . . . .	83
6.4	Detalhamento das linhas de produção selecionadas com métricas de desempenho . . . . .	85
6.5	Resumo de métricas para o modelo abstrato . . . . .	91
6.6	Amostra de dados históricos para a linha de produção <i>Lin1</i> . . . . .	94
6.7	Estatísticas para do componente <i>Lin1.001</i> . . . . .	96
6.8	Resumo de métricas para o modelo refinado . . . . .	99
6.9	Resultados da análise do modelo refinado . . . . .	99
6.10	Um exemplo de resultado da execução de um experimento . . . . .	101
7.1	Participação das famílias de produto da São Mateus . . . . .	108
7.2	Resumo de métricas para o modelo abstrato da linha de produção . . . . .	111
7.3	Amostra do boletim diário de produção da linha de produção . . . . .	112
7.4	Resumo das distribuições de probabilidade do modelo refinado da São Mateus	114
7.5	Resumo de métricas para os modelos refinados da linha de produção de Salsicha . . . . .	116
7.6	Comparação dos resultados do sistema com os resultados das simulações dos modelos refinados . . . . .	116

## 7.7 Resultados dos experimentos com simulação estacionária do modelo refinado117

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

*Este capítulo apresenta uma contextualização acerca dos sistemas de manufatura e das necessidades atuais das indústrias, particularmente no que diz respeito a consumo de energia e alocação de recursos humanos. Em seguida são apresentados a motivação e a proposta do trabalho, bem como o seu escopo.*

---

### 1.1 CONTEXTO

As indústrias globalizadas e altamente competitivas, independentemente do ramo de atuação, vêm exigindo que seus sistemas produtivos sejam cada vez mais eficientes, onde se busca o máximo de produtividade com o menor custo possível. Conseqüentemente, o alinhamento da produtividade com baixos custos de produção tem sido um grande desafio da área de Engenharia de Produção.

Sabe-se, portanto, que as métricas de avaliação de desempenho de tais sistemas devem ser não somente refinadas e melhoradas com o passar dos tempos, mas como devem abordar aspectos que outrora não foram abordados a fim de que se possa estabelecer uma relação entre produtividade e custo. Como tais aspectos pode-se citar:

- Produtividade;
- Manutenibilidade;
- Perdas de produção;
- Custos de formulação;
- Consumo de energia;
- Alocação de recursos humanos.

Em contrapartida, a modelagem, análise e avaliação dos sistemas de manufatura também têm sido um tópico relevante e desafiador na área de Engenharia de Produção. Diversos

formalismos foram propostos a fim de solucionar diversos tipos de problemas acerca destes sistemas. Como exemplo destes formalismos pode-se citar as Redes de Fila (QN's), as Cadeias de Markov[4] e as Redes de Petri[43, 47].

As Redes de Petri, enquanto formalismo, é um modelo expressivo e poderoso para a descrição de sistemas de manufatura. Em particular, as Redes de Petri podem facilmente modelar concorrência e paralelismo, eventos assíncronos, compartilhamento de recursos entre outros.

No aspecto de avaliação de desempenho de sistemas, o formalismo das Redes de Petri, mais especificamente do tipo *Generalized Stochastic Petri Nets* ou simplesmente *GSPN*, vêm sendo amplamente utilizada por pelo menos duas décadas. As GSPN's permitem uma avaliação estocástica de sistemas utilizando como fundamento teórico a teoria inicial das Redes de Petri.

## 1.2 MOTIVAÇÃO

A crescente demanda por metodologias de avaliação de desempenho de sistemas de manufatura mais complexas e que considerem mais aspectos relacionados ao desempenho vem impulsionando as áreas de pesquisa correlatas. O equilíbrio entre produtividade e custos vem sendo um tópico desafiador tanto para a Indústria quanto para a Comunidade Acadêmica.

Dentre aspectos relevantes para a sociedade como um todo, podem ser destacados consumo de energia e alocação de recursos humanos. Para das indústrias de base, como as indústrias siderúrgicas, a efficientização do consumo de energia é de alta relevância, pois se apresenta como uma variável monetária importante. Ainda mais, o consumo de recursos energéticos está diretamente relacionado com o aquecimento global[40], assunto este que será o mais importante relacionado ao meio-ambiente durante anos ou décadas.

Por outro lado pode ser notado que diversas economias e indústrias emergentes concentram seu diferencial competitivo no fornecimento de mão-de-obra abundante e a baixos custos. Portanto, não só a alocação de recursos humanos como métrica de desempenho é importante, como é um fator crítico de sucesso para tais economias e indústrias.

A utilização de um mecanismo formal como, por exemplo, as Redes de Petri permite que o comportamento e a dinâmica dos sistemas sejam compreendidos e avaliados. Conseqüentemente, o desenvolvimento de um modelo formal, seja ele baseado em Redes de Petri ou em outros formalismos, capaz de capturar métricas mais complexas relacionadas

aos sistemas de manufatura pode possibilitar uma avaliação mais completa de tais sistemas, inclusive em cenários variados, os quais seriam inviáveis de reproduzir nos sistemas reais.

A ausência de uma metodologia formal de avaliação de desempenho que considere outros aspectos além de produtividade provoca um hiato entre a necessidade das indústrias atuais e a comunidade acadêmica.

### 1.3 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal propor um modelo formal baseado nas *Generalized Stochastic Petri Nets (GSPN)* com anotações de consumo de energia e alocação de recursos humanos. A utilização de um mecanismo formal baseado nas redes de Petri traz os seguintes benefícios:

- Habilidade para a descrição comportamental dos sistemas de manufatura;
- Consideração de características quantitativas e qualitativas, possibilitando a análise destas informações;
- Criação e avaliação de cenários para o sistema de manufatura sem que o sistema real sofra alterações.

Como objetivo específico, este trabalho apresenta a definição de um modelo formal baseado nas Redes de Petri, bem como a definição de métricas de desempenho que considerem aspectos como consumo de energia e alocação de recursos humanos. Isto dar-se-á, em termos práticos, através da definição formal de componentes básicos necessários para a modelagem de sistemas de manufatura e aplicação das métricas relacionadas a consumo de energia e alocação de recursos humanos a estes modelos básicos. Tal modelo permitirá responder as seguintes questões:

- Qual a potência dissipada por cada componente e pelo sistema como um todo?
- Qual o esforço humano necessário para realizar as atividades representadas por cada componente e pelo o sistema como um todo?
- Qual a potência dissipada por cada componente e pelo sistema como um todo durante um intervalo de tempo?
- Qual o esforço humano necessário para realizar as atividades representadas por cada

componente e pelo o sistema como um todo durante um intervalo de tempo?

Também é objetivo específico deste trabalho apresentar uma metodologia formal de avaliação de desempenho capaz de produzir resultados que considerem consumo de energia e alocação de recursos humanos como métricas. Ao final da execução da metodologia em um determinado sistema de manufatura será possível responder as seguintes questões:

- Quais são os gargalos do sistema?
- Como o sistema reage às mudanças de parâmetros e qual o seu impacto na produtividade, na potência dissipada e no esforço humano requerido?
- Qual conjunto de parâmetros apresenta a melhor relação custo-benefício?

Este trabalho contém no seu escopo a definição de um modelo formal no contexto de sistemas de manufatura capaz de capturar métricas relacionadas a consumo de energia e alocação de recursos humanos e a utilização dos mesmos, através de modelos básicos, em uma metodologia de avaliação de desempenho que considere tais aspectos.

#### 1.4 TRABALHOS RELACIONADOS

Esta seção apresenta a aplicação das *Generalized Stochastic Petri nets* nas áreas de avaliação de desempenho e de sistemas de manufatura.

Desde a introdução das redes de Petri em 1962 até os dias atuais, muito foi produzido acerca de avaliação de desempenho utilizando redes de Petri, bem como para a modelagem de sistemas de manufatura, que são objetos de particular interesse deste trabalho.

Na área de avaliação de desempenho pode-se citar o trabalho realizado por Moley[33], que através da demonstração do isomorfismo entre as *Stochastic Petri Nets* e as cadeias de Markov, propõe um método para avaliação de desempenho de sistemas. Da mesma forma pode ser citado o trabalho de Pagnoni[41] o qual também propõe a utilização das *SPN* para a avaliação de desempenho de sistemas.

A aplicação das redes de Petri na modelagem e avaliação de sistemas de manufatura diversos trabalhos também têm sido propostos. Os trabalhos realizados por Al-Jaar *et al.*[49] e por Desrochers *et al.*[16] apresentam uma proposta de modelagem de sistemas automatizados de manufatura através das *Generalized Stochastic Petri Nets* (GSPN).

Os autores apresentam neste artigo uma abordagem de modelagem de sistemas de



manufatura através de blocos básicos de redes de Petri. Os autores afirmam que uma abordagem modular simplifica a atividade de construção do modelo e ajuda a gerenciar a complexidade da tarefa de modelar grandes sistemas.

Estes trabalhos são apresentados através de dois estudos de caso. O primeiro estudo de caso aborda um controlador de estação de máquina. Os autores apresentam a arquitetura de um controlador baseado em redes de Petri (PNC) para esta estação. A partir daí é proposto um modelo GSPN equivalente à arquitetura apresentada. A idéia é que, através de uma abordagem estocástica, o controlador PNC seja avaliado em termos de desempenho. Para tanto, os autores apresentam um conjunto de fórmulas para o cálculo de desempenho e também apresentam os resultados da avaliação.

O segundo estudo de caso aborda linhas de transferências e redes de produção. Os dois blocos básicos apresentados neste estudo de caso - o bloco que representa uma máquina e o bloco que representa um buffer - serão utilizados como blocos básicos deste trabalho. A estratégia para modelagem de uma máquina aborda três ações para uma máquina: a produção de um item em si, a quebra e o reparo. A estratégia para modelagem de um buffer considera apenas o seu tamanho e o seu fator limitante no sistema. Algumas métricas de desempenho são propostas, entretanto apenas a métrica que calcula a produção de itens média é de interesse.

Além de apresentar a aplicação das GSPNs, é também apresentada uma técnica de aproximação por fases para modelagem de distribuição de probabilidades não-exponenciais. Mais especificamente, estes trabalhos apresentam uma técnica para aproximação de uma distribuição Erlang, uma hiperexponencial e uma hipoexponencial.

O trabalho de Zurawski *et. al.*[58] apresenta um tutorial sobre as redes de Petri e suas aplicações no contexto das indústrias.

Diversos outros trabalhos foram apresentados para contextos mais específicos dos sistemas de manufatura. Dentre eles pode-se citar o trabalho de Bruno *et. al.*[7] que trata os FMS (*flexible manufacturing systems* ou *sistemas de manufatura flexíveis*) através da utilização de redes de Petri. Kuo *et. al.*[26] apresenta uma abordagem na modelagem de falhas e monitoramento de processos de FMS's utilizando redes de Petri coloridas[25] temporizadas.

O trabalho de Fanti e Zhou [17] apresenta uma atualização de técnicas de prevenção de *deadlocks* em sistemas de manufatura automatizados. Dentre as técnicas pode-se citar os autômatos e as Redes de Petri.

Carvalho [8], propõe uma abordagem de avaliação de consumo de energia em sistemas

embarcados. Esta abordagem utiliza as Generalized Stochastic Petri Nets (GSPN) como ferramenta formal para estimativa de potência.

Para tanto, foi definida uma extensão à GSPN, chamada de Power-GSPN, onde são definidas duas funções de mapeamento de energia. Carvalho apresenta também em seu trabalho modelos relacionados a sistemas embarcados. Além da proposta desses modelos, são apresentadas métricas relacionadas a consumo de energia.

## 1.5 ORGANIZAÇÃO

Este trabalho está organizado como se segue: o **Capítulo 2** apresenta conceitos inerentes aos sistemas de manufatura. O **Capítulo 3** apresenta conceitos relacionados à avaliação de desempenho. O **Capítulo 4** apresenta noções gerais acerca das Redes de Petri. O **Capítulo 5** é apresentado o modelo formal de redes de Petri que considera consumo de energia e alocação de recursos humanos, bem como alguns componentes básicos para a modelagem de sistemas de manufatura. O **Capítulo 6** apresenta uma metodologia de avaliação de desempenho capaz de avaliar os sistemas de manufatura sobre o aspecto de consumo de energia e alocação de recursos humanos. O **Capítulo 7** apresenta um estudo de caso no qual foi aplicada a metodologia. Finalmente, o **Capítulo 8** conclui o trabalho e sugere caminhos a serem abordados em trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

# SISTEMAS DE MANUFATURA

*Este capítulo apresenta uma introdução sobre sistemas de manufatura através de uma revisão bibliográfica. Diversos aspectos acerca dos sistemas de manufatura*

---

### 2.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA

A função produção, entendida como conjunto de atividades que levam à transformação de um bem tangível em um outro com maior utilidade, acompanha o homem desde a sua origem. Pode-se evidenciar nas civilizações antigas aspectos sociais e econômicos precursores do que entende-se hoje por 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. Neste primeiro estágio, as ferramentas e os utensílios era utilizados exclusivamente por quem os produzia, ou seja, inexistia o comércio, mesmo que de troca ou escambo[30].

Com o passar dos tempos passou a existir a primeira forma de produção, a produção organizada. Esta forma compreendia a produção de certos bens por pessoas habilidosas, chamadas de artesãos. Chamava-se produção organizada pelo fato dos artesãos estabelecerem prazos de entrega atendendo às especificações pré-estabelecidas e fixando o preço de suas encomendas.

Posteriormente, com o advento da *Revolução Industrial* dos séculos XVIII e XIX, que, sem dúvida, mudou a face do mundo. A *Revolução Industrial* marca o início da produção industrial moderna, a utilização intensiva de máquinas, a criação de fábricas, os movimentos de trabalhadores contra as condições desumanas de trabalho, as transformações urbanas e rurais[36].

A chamada produção em massa, que foi e continua sendo a marca registrada dos Estados Unidos, o símbolo do seu poderio industrial, pode ser encontrada já em 1913, quando começou a linha de montagem dos automóveis Ford. Já em fins do XIX e início

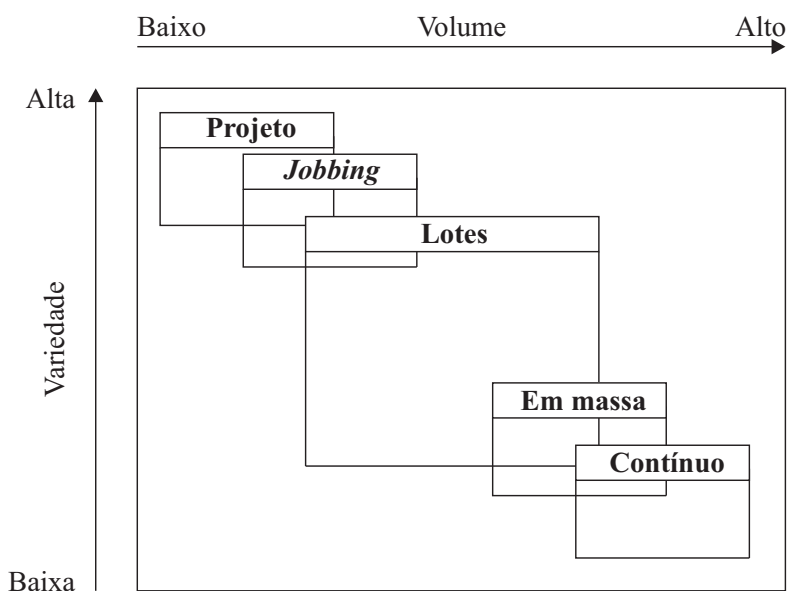
do século XX havia sido introduzida a noção de *administração científica* da produção, quando Frederick Taylor advogava a aplicação de racionalidade e métodos científicos à administração do trabalho nas fábricas.

## 2.2 TIPOS DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO

A classificação dos sistemas de produção, principalmente em função do fluxo do produto, reveste-se de grande utilidade na classificação de uma grande variedade de técnicas de planejamento e gestão da produção[51]. É assim possível discriminar grupos de técnicas e outras ferramentas gerenciais em função do particular tipo de sistema. Tradicionalmente, os sistemas de produção são agrupados em cinco grandes categorias de operação:

1. Processos de projeto;
2. Processos de *jobbing*;
3. Processos em lotes;
4. Processos de produção em massa;
5. Processos contínuos.

A Figura 2.1 ilustra a relação entre o binômio volume-variedade e os tipos de processos em operações de manufatura.



**Figura 2.1** Relação entre o binômio volume-variedade e tipos de processos em operação de manufatura

### 2.2.1 Processos de Projeto

Processos do tipo projeto são os que lidam com produtos discretos, usualmente bastante customizados. Com muita freqüência, o período de tempo para fazer o produto é relativamente longo, como é o intervalo entre a conclusão de cada produto. Logo, baixo volume e alta variedade são características do processo de projeto. As atividades envolvidas na execução do produto podem ser mal definidas e incertas, às vezes modificando-se durante o próprio processo de produção. Exemplos de processos de projeto incluem construção de navios, grandes operações de fabricação como as de turbo-geradores, etc. A essência de processos de projeto é que cada trabalho tem início e fim bem definidos, o intervalo de tempo entre o início de diferentes trabalhos é relativamente longo e os recursos transformadores que fazem o produto provavelmente serão organizados de forma especial para cada um deles.

### 2.2.2 Processos de Jobbing

Processos de *jobbing* também lidam com variedade muito alta e baixos volumes. Enquanto em processos de projeto cada produto tem recursos dedicados mais ou menos exclusivamente a ele, em processos de *jobbing* cada produto deve compartilhar os recursos de operação com diversos outros. Os recursos de produção processam uma série de produtos, mas, embora todos os produtos exijam mesmo tipo de atenção, diferirão entre si pelas necessidades exatas. Os processos de *jobbing* produzem mais itens e usualmente menores do que os processos de projeto, mas, como para processos de projeto, o grau de repetição é baixo. A maior parte dos trabalhos provavelmente será única.

### 2.2.3 Processos em Lote

Processos em lotes freqüentemente podem parecer-se com os de *jobbing*, mas os processos em lotes não têm o mesmo grau de variedade dos de *jobbing*. Como o nome indica, cada vez que um processo em lotes produz um produto, é produzido mais do que um produto. Dessa forma, cada parte da operação tem períodos em que se está repetindo, pelo menos enquanto o lote está sendo processado. O tamanho do lote poderia ser apenas de dois ou três produtos; nesse caso, o processo em lotes diferiria pouco do *jobbing*, especialmente se cada lote for um produto totalmente novo. Inversamente, se os lotes forem muito grandes, e especialmente se os produtos forem familiares à operação, os processos em

lotes podem ser relativamente repetitivos. Por esse motivo, o processo em lotes pode ser baseado em uma gama mais ampla de níveis de volume e variedade do que os outros tipos de processos.

#### **2.2.4 Processos de Produção em Massa**

Processos de produção em massa são os que produzem bens em alto volume e variedade relativamente estreita, isto é, em termos dos aspectos fundamentais do projeto do produto. Por exemplo, uma fábrica de automóveis poderia produzir diversos milhares de variantes de carros se todas as opções de tamanho, cor, etc. forem levadas em consideração. É, entretanto, essencialmente uma operação em massa porque as diferentes variantes de seu próprio produto não afetam o processo básico de produção. Todas as operações de produção em massa são, essencialmente, repetitivas e amplamente previsíveis.

#### **2.2.5 Processos Contínuos**

Processos contínuos situam-se um passo além dos processos de produção em massa, pelo fato de operarem volumes ainda maiores e em geral terem variedade ainda mais baixa. Normalmente, operam por períodos de tempo muito mais longos. Às vezes, são literalmente contínuos no sentido de que os produtos são inseparáveis, e produzidos em um fluxo ininterrupto. Também podem ser contínuos pelo fato de a operação ter que suprir os produtos sem uma parada. Processos contínuos muitas vezes estão associados a tecnologias relativamente inflexíveis, de capital intensivo com fluxo altamente previsível.

### **2.3 SISTEMAS DE MANUFATURA FLEXÍVEIS**

Um Sistema de Manufatura Flexível, ou simplesmente *FMS*, é um sistema de produção composto por um conjunto de máquinas numericamente controladas idênticas e/ou complementares conectadas através sistemas de transporte automatizados. Cada processo em um *FMS* é controlado por um computador dedicado (célula computacional do *FMS*). Esta célula geralmente faz parte de uma grande rede hierárquica de computadores. Uma *FMS* é capaz de processar partes pertencentes a um espectro pré-definido de partes em uma seqüência arbitrária com um tempo mínimo de *setup* entre as operações. Isto é possível, pois em uma *FMS* um conjunto de ferramentas pré-ajustadas são dispostas em um compartimento centralizado, onde as máquinas acessam com um tempo reduzido.

Numa *FMS*, enquanto uma determinada parte está sendo processada, o próximo conjunto de ferramentas a ser utilizado já está sendo preparado.

É bastante comum em uma *FMS* processar partes de diversos tipos de produtos e ordens de produção simultaneamente. Usualmente as partes são montadas sobre pallets com a ajuda de equipamentos elétricos. Cada parte é caracterizada através do seu andamento específico do processo, que deve ser atualizado continuamente e armazenado individualmente pelo sistema de controle da *FMS*. O armazenamento das partes não-acabadas entre as operações podem ser realizadas em uma área central de armazenamento, ou se possível, em uma área local pertencentes às máquinas.

Devido à complexidade das *FMS*'s, decisões de escalonamento são distribuídas, e a coordenação global do sistema é alcançada através da comunicação das decisões locais montadas em cima de níveis hierárquicos de controle.

## 2.4 PAPEL ESTRATÉGICO DOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO

Ainda 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[50]. Dentro da proposta de Richardson *et. al.*[48], as organizações podem ser classificadas em seis tipos:

- **Abridores de fronteiras tecnológicas:** são organizações orientadas para a pesquisa e desenvolvimento de produtos de ponta em suas áreas de atuação. São importantes fatores de sucesso para essas organizações o projeto, a qualidade do produto, aliadas à habilidade para introduzir novos produtos continuamente no mercado. Sem dúvida alguma, ter preços competitivos não costuma ser um fator de grande importância, dado que os produtos dessas empresas são diferenciados;
- **Exploradores de tecnologia:** são organizações que introduzem novos produtos e continuam com eles durante o seu ciclo de vida, ou seja, até que se esgotem tecnológica e/ou mercadologicamente e não sejam mais procurados. Para essas empresas, ter preços competitivos é um fator de sucesso dos mais importantes. Elas devem ter habilidade para reduzir o preço para altos volumes de produção, habilidade para introduzir novos produtos e uma forte orientação para a minimização de custos de produção;
- **Empresas voltadas para o cliente:** são organizações que inovam pouco e aceitam projetos para produtos fabricados em baixo volume, sob especificações do cliente.

Como fatores determinantes de sucesso contam-se a habilidade e a flexibilidade de adaptação a diferentes projetos e volumes de produção;

- **Empresas de alta tecnologia voltadas para o cliente:** sua característica principal é a que desenvolvem tecnologia sob encomenda para poucos clientes e mercados. Para o sucesso, contam-se a excelência em projeto do produto, alta qualidade e flexibilidade de adaptação às necessidades do cliente;
- **Empresas voltadas para o cliente a custo mínimo:** trabalham com produtos maduros, com preços competitivos. Entre os fatores de sucesso contam-se a habilidade em reduzir custos, mesmo com baixos volumes de produção, prazos de entrega atrativos e alguma flexibilidade para mudanças de projeto e volumes de produção;
- **Empresas minimizadoras de custos:** são organizações que trabalham com altos volumes de produção a baixo custo. A habilidade de reduzir custos e prazos de entrega são os principais fatores de sucesso.

O potencial da manufatura como uma arma competitiva, e o conceito do uso da manufatura como um ativo estratégico, começou a ser percebido pelas indústrias. Alguns aspectos principais, segundo [12], 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 começaram a influenciar cada vez mais a gestão de manufatura, surgindo assim os *Sistemas de Administração da Produção (SAP)*.

#### **2.4.1 Sistemas de Administração da Produção**

Os Sistemas de Administração da Produção ou simplesmente SAP são parte essencial dos processos produtivos. Estes sistemas têm como objetivo primordial planejar e controlar o



processo de manufatura, incluindo materiais, equipamentos, pessoas, fornecedores e distribuidores. É através dos SAPs que a organização garante que suas decisões operacionais sobre o que, quando e como produzir sejam adequadas às suas necessidades estratégicas, que por sua vez são ditadas por seus objetivos e seu mercado.

Os SAP tem como função prover suporte aos administradores para que eles possam executar suas atividades de forma adequada[55]. Algumas atividades gerenciais típicas que devem ser suportadas pelos SAP são:

- Planejar as necessidades futuras de capacidade 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 a compra de materiais de modo que eles cheguem no momento e nas quantidades necessárias para 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, garantindo que incertezas do processo afetem a produção e, conseqüentemente, o cliente;
- Programar as atividades de produção de forma que as pessoas e os equipamentos envolvidos no processo estejam em sintonia, evitando assim a dispersão desnecessária de esforço;
- Ser capaz de diagnosticar situação atual 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 de forma rápida as atividades quando houver uma falha no processo ou quando situações ambientais inesperadas ocorrerem;
- Ser capaz de garantir prazos aos clientes com precisão e cumpri-los, mesmo em situações ambientais dinâmicas e, muitas vezes, difíceis de prever.

A maioria das atividades gerenciais suportadas pelos SAP's tem claras implicações estratégicas. 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.

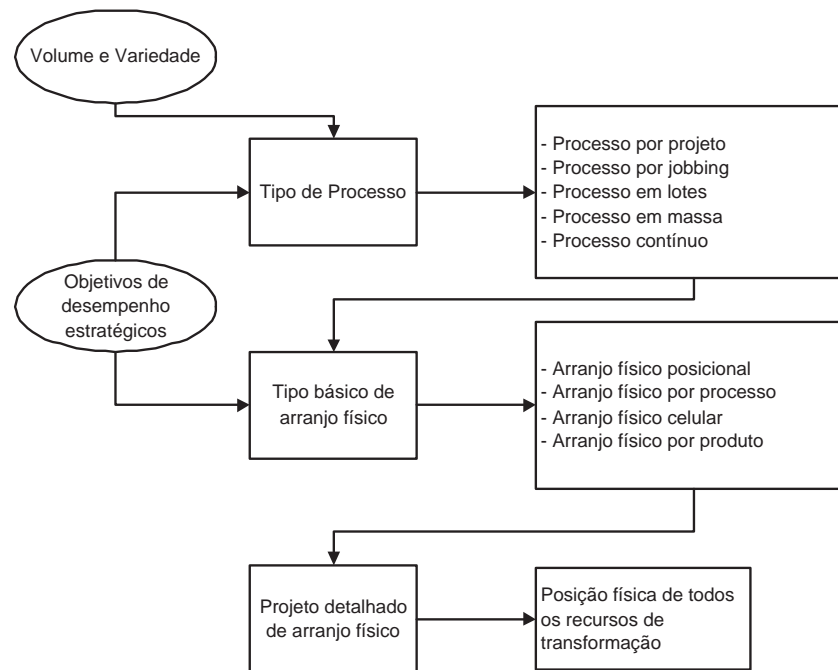
### 2.4.2 Gerenciamento da Produção

O Gerenciamento da Produção é uma das mais importantes atividades dentro de um sistema de produção e, conseqüentemente, em um SAP. Esta atividade, assim como a de Marketing, Engenharia e Manufatura, forma juntas o ciclo de desenvolvimento de um produto dentro da produção.

O papel do gerenciamento de produção 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[54]. A Gerência de Produção é uma área onde técnicas como Método do Caminho Crítico (CPM), MRP-II e JIT são técnicas de controle bem estabelecidas.

Dentro de um sistema de gerência de produção, identificam-se várias atividades e funções para regular um sistema de produção. Cada uma destas atividades são descritas como:

- Planejamento da Produção: concentra-se na determinação da produção, estoque e níveis de força de trabalho baseado na demanda. Desta forma, a previsão de vendas da organização é utilizada para diminuir ou aumentar os níveis de produção. É também chamado de planejamento agregado;
- Banco de dados da Engenharia: contém todas as informações sobre a fabricação e montagem dos produtos que a produção destina-se a manufaturar;
- Escalonamento Mestre da Produção: é a atividade onde o planejamento da produção é decomposta. É nesta atividade que se especifica o número de unidades de cada produto a serem distribuídos e quando esta distribuição deve ocorrer;
- Planejamento de Capacidade: é a atividade onde os recursos de trabalho e equipamentos necessários para atender o escalonamento da produção são determinados;
- *Material Requirement Planning*(MRP): converte o Escalonamento Mestre da Produção dentro de um cronograma detalhado para linha de materiais e componentes. Mais precisamente, o MRP considera o escalonamento mestre, a lista de materiais e os dados de estoque, e determina quando requisitar materiais e componentes para montagem dos produtos;
- Gerenciamento de Estoque: esta atividade é responsável por manter os níveis de estoque de materiais, produtos semi-acabados e produtos finalizados em um nível adequado para a demanda. Desta forma funciona como um *buffer* entre a organização, os clientes entre diferentes estágios no sistema de produção;



**Figura 2.2** Escolha do arranjo físico

- Controle das Atividades da Produção transforma as decisões de planejamento em comandos de controle para o processo produtivo.

## 2.5 ARRANJO FÍSICO

Como definido por Slack *et. al*[51], o arranjo físico de uma operação produtiva preocupa-se com o posicionamento físico dos recursos de transformação. De maneira mais simples, definir o arranjo físico é decidir onde colocar todas as instalações, máquinas, equipamentos e pessoal da produção. O arranjo físico é uma das características mais evidentes de uma operação produtiva porque determina sua "forma" e aparência. Mudanças relativamente pequenas na localização de uma máquina numa fábrica podem afetar o fluxo de materiais e pessoas por meio da operação. Isso, por sua vez, pode afetar os custos e a eficácia geral da produção.

Projetar o arranjo físico de uma operação produtiva, assim como qualquer atividade de projeto, deve iniciar-se com os objetivos estratégicos da produção. Entretanto, isso é apenas o ponto de partida do que é um processo de múltiplos estágios, os quais são ilustrados na Figura 2.2, que leva ao arranjo físico final de uma operação.

O conceito do tipo de processo é muitas vezes confundido com o conceito de arranjo

físico. Os tipos de processo ilustrados na Figura 2.2 são abordagens gerais para a organização das atividades e processos da produção. O arranjo físico reflete fisicamente no sistema de manufatura o tipo de processo utilizado. Há, entretanto, freqüentemente, alguma superposição entre os tipos de processo que podem ser utilizados para determinada posição do binômio volume-variedade. Em casos em que mais do que um tipo de processo é possível, a importância relativa aos objetivos de desempenho da operação pode influenciar na decisão. Em geral, quanto mais importante for o objetivo de baixo custo da operação, mais provável será que se adote um tipo de processo menos flexível, porém com um volume maior.

### 2.5.1 Tipos de Arranjo Físico

Os tipos de arranjo físico podem ser categorizados em quatro tipos:

- Arranjo físico posicional;
- Arranjo físico por processo;
- Arranjo físico celular;
- Arranjo físico por produto.

A relação entre tipos de processo e tipos básicos de arranjo físico não é totalmente determinística. Um tipo de processo não necessariamente implica tipo básico de arranjo físico em particular. Como ilustrado na Figura 2.3, cada tipo de processo pode adotar diferentes tipos básicos de arranjo físico.

Tipos de processo em manufatura	Tipo básicos de arranjo físico
Processo por projeto	Arranjo físico posicional
Processo tipo <i>jobbing</i>	Arranjo físico por processo
Processo por lote	Arranjo físico celular
Processo em massa	Arranjo físico por produto
Processo contínuo	

**Figura 2.3** Relação entre tipos de processo e tipos básicos de arranjo físico

**2.5.1.1 Arranjo físico posicional** Arranjo físico posicional é, de certa forma, uma contradição em termos, já que os recursos transformados não se movem entre os recursos transformadores. Em vez de materiais fluírem pelo sistema produtivo, os equipamentos, maquinários, instalações e pessoas movem-se na medida do necessário. A razão para isso acontecer pode ser a inviabilidade de mover o produto dentro do sistema, seja pelo tamanho do produto ou seja pela risco na locomoção do mesmo.

**2.5.1.2 Arranjo físico por processo** O arranjo físico por processo é assim chamado porque as necessidades e conveniências dos recursos transformadores que constituem o processo na operação dominam a decisão sobre o arranjo físico. No arranjo por processo, processos similares (ou processos com necessidades similares) são localizados juntos um do outro. A razão pode ser que seja conveniente para a operação mantê-los juntos, ou que dessa forma a utilização dos recursos transformadores seja beneficiada. Isso significa que, quando os produtos fluírem pela operação, eles percorrerão um roteiro de processo a processo, de acordo com suas necessidades. Diferentes produtos terão diferentes necessidades e, portanto, percorrerão diferentes roteiros na operação. Por esta razão, o padrão de fluxo na operação poderá ser bastante complexo.

**2.5.1.3 Arranjo físico celular** O arranjo físico celular é aquele em que os recursos transformados, entrando na operação, são pré-selecionados para se movimentar para uma parte específica da operação (ou célula) na qual todos os recursos transformadores necessários a atender a suas necessidades imediatas de processamento se encontram. A célula em si pode ser arranjada segundo um arranjo físico por processo ou por produto.

**2.5.1.4 Arranjo físico por produto** O arranjo físico por produto envolve localizar os recursos produtivos transformadores inteiramente segundo a melhor conveniência do recurso que está sendo transformado. Cada produto segue um roteiro predefinido no qual a seqüência de atividades requerida coincide com a seqüência na qual os processos foram arranjados fisicamente. Esse é o motivo pelo qual, às vezes, esse tipo de arranjo é chamado de arranjo físico em fluxo ou linha. O fluxo de produtos é muito claro e previsível no arranjo físico por produto, o que faz dele um arranjo relativamente fácil de controlar.

**2.5.1.5 Arranjo físico misto** Muitas operações ou projetam arranjos físicos mistos, que combinam elementos de alguns ou todos os tipos básicos de arranjo físico, ou usam tipos básicos de arranjo físico de forma pura em diferentes partes da operação.

## CAPÍTULO 3

# AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO





## CAPÍTULO 4

# REDES DE PETRI

*Este capítulo faz uma revisão bibliográfica acerca da teoria das redes de Petri. Os elementos básicos das redes de Petri são apresentados, bem como os aspectos formais desta teoria. Adicionalmente, são apresentadas as propriedades e técnicas de análise das redes de Petri. Finalmente são apresentadas as GSPN's, que são uma extensão à teoria inicial das redes de Petri, e suas aplicações na área de Engenharia de Produção e avaliação de desempenho.*

---

### 4.1 INTRODUÇÃO

As Redes de Petri são uma família de formalismos matemáticos, bem definidas, capaz de modelar concorrência, paralelismo, assincronismo e não-determinismo[13]. A bibliografia sobre as redes de Petri é bastante extensa, onde diversos tipos de redes de Petri foram propostas, a fim de solucionar diversos tipos de problemas em diversas áreas de conhecimento, como: ciência da computação, engenharia eletrônica, biologia, sistemas de manufatura, etc.

Além de um conjunto de formalismos matemáticos bem definidos, as redes de Petri apresentam uma vantagem, que é o seu apelo visual. As redes de Petri são, na verdade, um modelo visual com determinados componentes que modelam os estados e as ações do sistema.

As redes de Petri possibilitam a modelagem, de maneira relativamente simples em relação a outros formalismos, de situações complexas. Por exemplo, compartilhamento de recursos, sincronizações, dependências, etc.

Este capítulo apresentará os aspectos históricos relacionados às Redes de Petri, bem como os seus componentes básicos e tipos de técnicas existentes. Posteriormente, as redes de de Petri serão formalmente definidas, incluindo todas as suas propriedades. Mais

profundamente será discutida uma extensão das redes de Petri, chamada de *Generalized Stochastic Petri nets* (GSPN), a qual considera transições imediatas e transições temporizadas com distribuição de probabilidade exponencial. Por fim, será discutida a utilização das GSPN's como formalismo na área de Engenharia de Produção e avaliação de desempenho.

## 4.2 ASPECTOS HISTÓRICOS

A teoria inicial das redes de Petri foi introduzida por C. A. Petri, no ano de 1962, com a apresentação da sua tese de doutorado "*Kommunikation mit Automaten*"[43] na faculdade de Matemática e Física da Universidade Darmstadt na Alemanha<sup>1</sup>. O trabalho de Petri logo veio a atrair a atenção de pesquisadores como A.W. Holt, que em conjunto com outros pesquisadores, desenvolveu diversos aspectos da teoria introduzida por Petri.

Entre os anos de 1970 e 1975, o grupo de estrutura da computação do Massachusetts Institute of Technology (MIT), no Estados Unidos, foi o grupo de pesquisa mais ativo no desenvolvimento da teoria de Redes de Petri. No ano de 1975, houve uma conferência sobre Redes de Petri e métodos relacionados, entretanto não houve publicação nos *proceedings*[38]. Em 1979, um grupo de aproximadamente cento e trinta e cinco pesquisadores, participaram de um curso avançado em *General Net Theory of Process and Systems*, na então Alemanha Ocidental. As dezessete palestras ministradas foram publicadas nos *proceedings*[6]. Posteriormente, diversos outros trabalhos surgiram, os quais propunham alterações à teoria inicial de Redes de Petri, tais como redes com arco inibidor, redes temporizadas determinísticas e estocásticas.

Atualmente as Redes de Petri são consideradas uma técnica de especificação de sistemas concorrentes, paralelos, assíncronos e não-determinísticos consolidada.

Diversas técnicas de modelagem matemática de sistemas em diversas áreas da ciência têm sido propostas. Barroca *et. al.*[2] apresentam a seguinte classificação:

- **Técnicas Baseadas em Modelos de Estado:** Fornece uma descrição abstrata explícita sobre estados e operações que transformam os estados, no entanto não oferece meios explícitos para especificar concorrência. Ex: Z [52];
- **Técnicas Baseadas em Álgebra de Processos:** Esta técnicas fornecem meios explícitos para especificar concorrência. O comportamento dos processos é representado através de comunicações observáveis. Ex: CCS[32], CSP[22] e LOTOS[24];


---


<sup>1</sup>Alemanha Ocidental, naquela época

- **Técnicas baseadas em lógica:** Uma grande variedade de técnicas baseadas em lógica tem sido propostas, onde são analisadas as relações causais e aspectos relacionados à temporização. Ex: Lógica Modal de Ações [20];
- **Técnicas Baseadas em Redes:** Estas técnicas modelam concorrência através mecanismos explícitos de fluxo de marcas na rede, onde este conjunto de marcas na rede representam o estado do sistema. O fluxo é controlado por pré-condições que habilitam uma determinada ação, que em sendo executada leva à uma pós-condição. Ex: Redes de Petri.

### 4.3 COMPONENTES DAS REDES DE PETRI

A representação gráfica das redes de Petri tem se mostrado muito útil, pois permite a visualização dos processos e a comunicação entre eles. As redes de Petri são formadas por dois tipos de componentes: um ativo denominado de *transição*, e um passivo denominado de *lugar*. Os lugares correspondem às variáveis de estado e as transições às ações ou eventos realizados pelo sistema. A realização de uma ação está associada a algumas pré-condições, ou seja, existe uma relação entre os lugares e as transições que possibilita ou não a realização de uma determinada ação. Após a realização de uma determinada ação, alguns lugares terão suas informações alteradas, ou seja, a ação criará uma pós-condição. Graficamente os lugares são representados através de elipses ou círculos e as transições através de retângulos, como ilustrado na Figura 4.1.

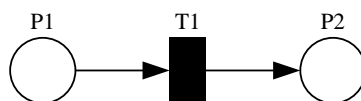
Lugar: 

Transicao: 

**Figura 4.1** Elementos das redes de Petri

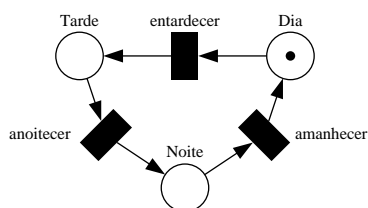
Os dois elementos, lugar e transição, são os vértices do grafo associado às redes de Petri. Os vértices são interligados por meio de arcos dirigidos. Os arcos que interligam lugares às transições correspondem à relação entre as condições verdadeiras (pré-condição), que em um dado momento, possibilitam a execução das ações, enquanto os arcos que interligam as transições aos lugares representam a relação entre as ações e as condições que se tornam verdadeiras com a execução das ações (pós-condição). A Figura 4.2 ilustra

um exemplo de uma rede de Petri.

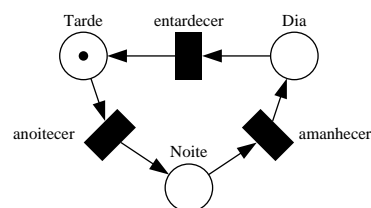


**Figura 4.2** Exemplo de uma rede de Petri

Sendo as redes de Petri informalmente introduzidas, será apresentado um pequeno modelo didático apresentado por Maciel *et. al.*[27]: o ciclo repetitivo dos períodos de um dia. Um dia pode ser dividido em três períodos distintos: manhã, tarde e noite. A transição entre os períodos do dia deve respeitar algumas condições. Por exemplo, o período anterior à tarde é a manhã, o anterior à noite é a tarde, e assim por diante. Desta forma, pode ser estabelecida as pré-condições e as pós-condições. Para modelar esse sistema através de uma rede de Petri são necessários três lugares, os quais representam os três períodos do dia, e três transições, as quais representam as três mudanças de período do dia. Para representar o estado em que o sistema se encontra utiliza-se uma marca que é visualmente representada por um ponto dentro de um lugar. A Figura 4.3 ilustra o modelo de redes de Petri das transições dos períodos do dia.



**Figura 4.3** Modelo de redes de Petri das transições dos períodos do dia



**Figura 4.4** Modelo de redes de Petri das transições dos períodos do dia após um disparo

Este modelo tem o seu estado inicial com uma marca no lugar *Dia*. Com esta marcação, a único evento possível de ocorrer é o evento entardecer, que é representado pela transição *entardecer*. Após a execução deste evento, é depositada uma marca no lugar *Tarde*. Esta segunda situação é apresentada no modelo ilustrado na Figura 4.4.

#### 4.4 ESTRUTURA DAS REDES DE PETRI

As Redes de Petri podem ser formalmente de três maneiras distintas. Uma primeira sobre o ponto de vista da teoria *bag*[42], a qual apresenta mapeamentos das transições

para os *bags* de lugares. Uma segunda abordagem utiliza a notação matricial[5]. E a terceira notação define as Redes de Petri através de relações e pesos associados a estas relações[46].

#### 4.4.1 Estrutura definida 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 cada transição existe uma função de entrada, que é um mapeamento de uma transição  $t_j \in T$  em um *bag* de lugares  $It_j$ . De forma semelhante, as funções de saída mapeiam uma transição  $t_j \in T$  em um *bag* de lugares  $Ot_j$ . Para a denotação de conjuntos será utilizado  $\{-\}$  e para os *bags*  $-[\ ]$ .

**Definição 4.1.** Define-se a estrutura de uma rede de Petri  $R$  como uma quintupla  $R = (P, T, I, O, K)$ , onde  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  é um conjunto finito não-vazio de lugares,  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$  é um conjunto finito não-vazio de transições,  $I : T \rightarrow P^\infty$  é um mapeamento que representa o conjunto de bags de transições para lugares de entrada,  $O : T \rightarrow P^\infty$  é um mapeamento que representa o conjunto de bags de transições para lugares de saída,  $K : P \rightarrow \mathbb{N} \cup \{\infty\}$  é um mapeamento que associa capacidades a cada lugar, podendo inclusive assumir um valor infinito.

#### 4.4.2 Estrutura definida em matriz

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

Segundo o ponto de vista matricial, a estrutura das redes de Petri é representada por uma quintupla formada pelo conjunto de lugares, pelo conjunto de transições, pela matriz de entradas das transições, pela matriz de saídas das transições, e pelo vetor de capacidades associadas aos lugares.

**Definição 4.2.** A estrutura de uma rede de Petri é uma quintupla  $R = (P, T, I, O, K)$ , onde  $P$  é o conjunto de lugares,  $T$  é o conjunto de transições,  $I : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$  é a matriz de pré-condições,  $O : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$  é a matriz de pós-condições, e  $K : P \rightarrow \mathbb{N} \cup \{\infty\}$  é o vetor de capacidades associadas aos lugares.

Caso o conjunto de lugares  $P$  ou o conjunto de transições  $T$  sejam vazios, a rede é dita degenerada.

#### 4.4.3 Estrutura definida por relações

É possível definir a estrutura das redes de Petri utilizando relações. A estrutura é definida por uma quintupla  $(P, T, A, V, K)$ , composta pelo conjunto de lugares  $P$ , pelo conjunto de transições  $T$ , pelo conjunto de arcos  $A$  que interligam lugares às transições ou transições aos lugares, pelo conjunto  $V$  que representa a valoração ou peso dos arcos, e o conjunto  $K$  das capacidades associadas aos lugares.

**Definição 4.3.** A estrutura de uma rede de Petri é uma quintupla  $R = (P, T, A, V, K)$ , onde  $P$  é o conjunto de lugares,  $T$  é o conjunto finito de transições,  $A$  é o conjunto de arcos,  $V$  é o conjunto de valoração dos arcos, e  $K$  é o conjunto das capacidades associadas aos lugares. Os elementos de  $A$  são arcos que conectam transições a lugares ou lugares a transições ( $A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ ).

Como apresentado na definição, o conjunto  $A$  pode ser dividido em dois sub-conjuntos - o conjunto das entradas às transições e das saídas às transições,  $I = \{(p_i, t_j)\}$  e  $O = \{(t_j, p_i)\}$ , respectivamente.

#### 4.4.4 Rede de Petri marcada

Uma marca (também denominada de *token*) é um conceito primitivo em redes de Petri, tal qual lugar e transição. As marcas são informações atribuídas aos lugares. O número e distribuição de marcas nos lugares correspondem à marcação ou estado da rede em um determinado momento. Abaixo serão apresentadas as definições formais de marcação, vetor marcação, e finalmente a rede de Petri marcada.

**Definição 4.4.** 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 naturais  $M : P \rightarrow \mathbb{N}^+$ .

**Definição 4.5.** Seja  $P$  o conjunto de lugares de uma rede  $R$ . A marcação de uma rede  $R$  pode ser formalmente definida como um vetor  $M = (M(p_1), M(p_2), \dots, M(p_n))$ , onde  $n = \#P, \forall p_i \in P$ , tal que  $M(p_i) \in \mathbb{N}$ .

**Definição 4.6.** 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 alterações. Para simular o comportamento dos sistemas, a marcação da rede de Petri é modificada, a cada ação realizada ou transição disparada, segundo algumas regras de execução. Estas regras são apresentadas na próxima seção.

#### 4.4.5 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 ( $p \in P$ ) possuírem um número de *tokens* pelo menos igual ao peso do arco que os liga. Denota-se a habilitação de uma transição  $t \in T$  para uma marcação  $M$  por  $M[t >$ .

**Definição 4.7.** Seja  $RM = (R; M_0)$  uma rede de Petri marcada, uma transição  $t \in T$  é disparável para uma marcação  $M$  ( $M[t >$ ) se, e somente se,  $M(p_i) \geq I(p_i, t), \forall p_i \in P$ . Se  $t$  é disparável para uma marcação  $M_0$ , então com o disparo de  $t$  obtém-se uma nova marcação  $M'$  ( $M[t > M'$ ), tal que:  $M'(p_i) = M(p_i) - I(p_i, t) + O(p_i, t), \forall p_i \in P$ .

#### 4.4.6 Matriz de incidência

Utilizando-se a representação matricial, a estrutura das redes de Petri é representada pelo conjunto de lugares, pelo conjunto de transições, pela matriz de entrada, pela matriz de saída, e pelo conjunto de capacidades associadas aos lugares. Essas matrizes expressam a interconexão entre lugares e transições do modelo, dado que a matriz de entrada apresenta os lugares de entrada (pré-condições), e a matriz de saída apresenta os lugares de saída (pós-condições) das transições, assim como a valoração destas interconexões (arcos). Quando uma transição  $t$  dispara, a diferença entre as duas marcações sucessivas  $M_1$  e  $M_0$  é igual a diferença obtida por  $O(p_i, t) - I(p_i, t), \forall p_i \in P$ . Denomina-se  $C = O - I$  matriz de incidência, dado que esta fornece a incidência de arcos de entrada e saída em cada transição dos modelos. Esta matriz representa a estrutura dos sistemas modelados.

**Definição 4.8.** Seja  $R = (P, T, I, O, K)$  uma rede de Petri,  $P$  o conjunto de lugares,  $T$  o conjunto de transições,  $I$  a matriz de entrada,  $O$  a matriz de saída,  $K$  o conjunto de capacidades associadas aos lugares. A matriz de incidência  $C$  das redes de Petri representa a relação  $P \times T \rightarrow Z$  definida por:  $C(p, t) = O(p, t) - I(p, t), \forall p \in P, \forall t \in T$ .

Embora a estrutura da rede seja representada pelas matrizes de entrada e saída e,

conseqüentemente, pela matriz de incidência, em alguns casos a matriz de incidência não possibilita a representação desta estrutura completamente.

#### 4.4.7 Grafo de Marcações Acessíveis

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

**Definição 4.9.** Seja  $RM = (R; M_0)$  uma rede de Petri marcada, define-se o 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,  $A(R; M_0) = \{M_i \in \mathbb{N}^m \mid \exists s \in T^* \cdot M_0[s > M_i]\}$ , onde  $m = \#P$  só é alcançável se, e somente se,  $M_i \in A(R; M_0)$ .

O grafo de 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 vértices do grafo e  $a_{(i,j)}$  os arcos. Os arcos representam a alteração da marcação pelo disparo das transições.

**Definição 4.10.** Seja  $RM = (R; M_0)$  uma rede de Petri marcada, define-se o grafo das marcações acessíveis  $GA$ , por um par  $GA = (R; M_0) = (M_i, a_{(i,j)})$ , onde  $M_i \in A(R; M_0)$  são os vértices do grafo e  $a_{(i,j)}$  os arcos. Os arcos representam  $M'[t > M''$  se, e somente se, existe uma transição  $t$  tal que  $M'[t > M''$ .

## 4.5 PROPRIEDADES DAS REDES DE PETRI

Desde a proposta inicial das redes de Petri, foram desenvolvidos diversos métodos que permitem a análise de uma grande número de propriedades em sistemas. Os tipos de propriedades podem ser divididos em duas categorias: as propriedades dependentes da marcação inicial, ditas comportamentais, e as propriedades que não dependem das marcação, ditas estruturais.



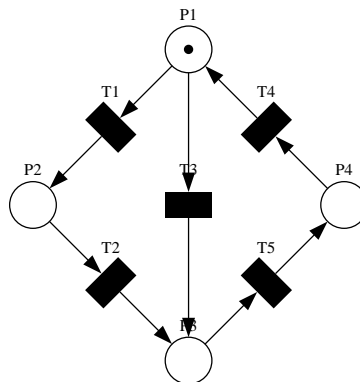
### 4.5.1 Propriedades comportamentais

As propriedades comportamentais são aquelas que dependem apenas da marcação inicial da rede. Em função de as propriedades comportamentais serem dependentes da marcação, a complexidade de sua avaliação está diretamente relacionada ao tamanho do grafo de marcações. Nesta seção serão abordadas algumas propriedades básicas como alcançabilidades, limitação, segurança e *liveness*.

**4.5.1.1 Alcançabilidade** A alcançabilidade é fundamental para o estudo de propriedades dinâmicas de qualquer sistema. A alcançabilidade indica a possibilidade de se atingir determinada marcação pelo disparo de um número finito de transições, a partir de uma marcação inicial. Nesta seção será apresentado o conceito de alcançabilidade no contexto de redes de Petri [42, 37, 14].

Para a rede de Petri marcada  $RM = (R; M_0)$ , representada na Figura 4.5, o disparo da transição  $t_i$  altera a marcação da rede, conforme as regras anteriormente apresentadas. Uma marcação  $M'$  é dita acessível de  $M_0$  se existe uma seqüência de transições que, disparadas, levam à marcação  $M'$ . Ou seja, se a marcação  $M_0$  habilita a transição  $T1$ , disparando-se esta transição se chega à marcação  $M_1$ . A marcação  $M_1$  habilita  $T2$ , a qual disparada chega-se à marcação  $M_2$  e assim por diante até a obtenção da marcação  $M'$ .

**Definição 4.11.** Seja  $M_i[t_i > M_k$  e  $M_k[t_h > M_l$ , então  $M_i[t_i t_h > M_l$ . Por recorrência designa-se o disparo de uma seqüência  $s \in T^*$  por  $M[s > M$ . O conjunto de todas as possíveis marcações obtidas a partir da marcação inicial  $M_0$  na rede  $RM = (R; M_0)$  é denotado por  $A = (R; M_0) = \{M' \in IN^m \mid \exists s \in T^* \therefore M_0[s > M'\}$ .



**Figura 4.5** Rede de Petri marcada

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

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

**4.5.1.2 Limitação** Nesta seção será apresentado o conceito de limitação (*boundedness*) nas redes de Petri e sua importância na verificação de uma especificação de um sistema[38].

**Definição 4.12.** Seja  $p_i \in P$  um lugar de uma rede de Petri marcada  $RM = (R; M_0)$ . Este lugar é dito  $k$ -limitado ( $k \in \mathbb{N}$ ) ou simplesmente limitado se para toda marcação acessível  $M \in A(R; M_0)$ ,  $M(p_i) \leq k$ .

Caso esta propriedade não seja verificada, o lugar é dito não-limitado. Deve ser percebido que o limite  $k$  é o número máximo 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  $RM$  ( $\max(M(p)) = k, \forall M \in GA(R; M_0), \forall p \in P$ ).

**Definição 4.13.** Diz-se que uma rede  $RM = (R; M_0)$  é limitada (*boundedness*) se  $k(p_i) \leq \infty, \forall p_i \in P$ .

**4.5.1.3 Segurança** O conceito de segurança (*safeness*) é uma particularização do conceito de limitação. O lugar  $p_i \in P$  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 4.14.** Seja  $p_i \in P$  um lugar de uma rede de Petri marcada  $RM = (R; M_0)$ ,  $p_i$  é seguro se para toda marcação  $M' \in A(R; M_0)$ ,  $M(p_i) \leq 1$ .

Pode-se dizer que uma rede é segura se todos os lugares pertencentes a esta rede são seguros, ou seja, todos os lugares desta rede podem conter no máximo uma única marca.

**Definição 4.15.** Uma rede  $RM = (R; M_0)$  é definida como segura se  $M(p_i) \leq 1, \forall p_i \in P, \forall M_i \in A(R; M_0)$ .

**4.5.1.4 Liveness** A ausência de *deadlock* em sistemas está fortemente ligado ao conceito de *liveness*. *Deadlock* em uma rede de Petri é a impossibilidade do disparo de qualquer transição da rede.

**Definição 4.16.** Chama-se uma transição  $t_i \in T$  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 ( $M'[t_i >$ ).

Denomina-se uma transição  $t_i \in T$  *live* em uma rede marcada  $(R, M_0)$  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 4.17.** Uma rede de Petri marcada  $RM = (R; M_0)$  é dita *live* se para toda  $M_i \in A(R; M_0)$  é possível disparar qualquer transição de  $RM$  através do disparo de alguma seqüência de transições.

## 4.5.2 Propriedades estruturais

Em diversas ocasiões se está interessado apenas em observar propriedades que estão apenas relacionadas à estrutura dos modelos. As propriedades estruturais são aquelas que refletem características independentes da marcação.

É importante ressaltar que, desde que as redes sejam puras, a estrutura da rede pode ser representada pela matriz de incidência.

**4.5.2.1 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.

**4.5.2.2 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[1, 3].

**Definição 4.18.** Seja  $RM = (R; M_0)$  uma rede de Petri marcada,  $RM$  é dita estritamente conservativa se tem-se  $\sum_{\forall p_k \in P} M_i(p_k) = \sum M_0(p_k), \forall M_i \in A(R; M_0)$ .

**4.5.2.3 Consistência** Uma rede de Petri tem a propriedade de consistência se disparando uma seqüência de transições, a partir de uma marcação inicial específica  $M_0$ , retorna-se a  $M_0$ , disparando-se todas as transições da rede ao menos uma vez.

**Definição 4.19.** Seja  $RM = (R; M_0)$  uma rede de Petri marcada e  $s$  uma seqüência de transições,  $RM$  é dita consistente se  $M_0[s > M_0$  e toda transição  $t_i \in T$  dispara ao menos uma vez em  $s$ .

## 4.6 GENERALIZED STOCHASTIC PETRI NETS (GSPN)

Antes de introduzir os conceitos envolvidos nas *Generalized Stochastic Petri nets* ou GSPN, faz-se necessário uma revisão dos aspectos históricos relacionados aos estudos na área de redes de Petri.

### 4.6.1 Aspectos históricos

Como abordado por Marsan *et. al.*[29], o conceito de tempo associado às redes de Petri foi inicialmente proposto por Merlin *et. al.*[31] e por Noe *et. al.*[39]. No primeiro trabalho, os autores utilizaram redes de Petri com argumentos temporais para a modelagem de protocolos de comunicação. No segundo trabalho citado, um novo tipo de redes temporizadas foram utilizadas para a modelagem de arquiteturas de computadores. Em ambos os casos, as redes de Petri não foram vistas como formalismo para modelagem estática das relações lógicas entre as diversas entidades que formam o sistema real, mas como uma ferramenta para descrever o comportamento global.

Diversas formas de incorporar informações temporais aos sistemas e modelos de redes de Petri foram propostos nas últimas três décadas, propostas estas fortemente influenciadas pelas suas áreas específicas de aplicação. Uma vasta literatura foi produzida em decorrência destas propostas [45, 57, 23, 44].

Posteriormente, as *Stochastic Petri nets* ou simplesmente *SPN* foram propostas. Suas propostas iniciais foram apresentadas de forma independente por Florin *et. al.*[18] e por Molloy [33]. Algumas idéias similares foram apresentadas também por Symons[53]. Em sua definição, uma *SPN* é um modelo de redes de Petri aumentado com um conjunto de taxas (cada uma para cada transição do modelo). Estas taxas são suficientes para caracterizar a função de distribuição de probabilidade exponencial dos retardos associados às transições.

As *Generalized Stochastic Petri nets* ou simplesmente *GSPN*[28, 21] são uma extensão das *SPN* e, conseqüentemente, das redes de Petri, a qual apresenta dois tipos de transições: transições temporizadas e transições imediatas. As transições temporizadas possuem *delays* exponencialmente distribuídos associados elas, enquanto que as transições imediatas não têm um *delay* associado. Estas transições imediatas possuem uma prioridade de disparo maior que as transições temporizadas. Cada transição imediata possui o seu próprio nível de prioridade. Para resolver situações de conflito, ou seja, para resolver situações onde mais de uma transição está habilitada para uma mesma pré-condição, são utilizados pesos associados a estas transições imediatas.

#### 4.6.2 Definição formal

Uma *Generalized Stochastic Petri net* ou simplesmente *GSPN* é definida por uma óctupla  $GSPN = (P, T, \pi, I, O, H, M_0, W)$ , e sua definição formal segue abaixo:

**Definição 4.20.** Seja  $GSPN = (P, T, \pi, I, O, H, M_0, W)$  uma *Generalized Stochastic Petri net*,  $P$  o conjunto de lugares da *GSPN*,  $T$  o conjunto de transições da *GSPN*,  $\pi : T \rightarrow IN$  a função que associa prioridades às transições,  $I$  a função de entradas,  $O$  a função de saídas,  $H$  é função inibidora,  $M_0$  a marcação inicial, e  $W : T \rightarrow IR^+ \cup \{0\}$  uma função que associa peso às transições.

A função  $\pi$  das *GSPNs* associa um natural diferente de zero se, e somente se, a transição de entrada da função for imediata. A seguir será dada a definição formal da função  $\pi$ .

**Definição 4.21.** Seja  $GSPN = (P, T, \pi, I, O, H, M_0, W)$  uma *Generalized Stochastic Petri net*. A função  $\pi : T \rightarrow IN$  associa uma prioridade às transições da *GSPN* e é definida como se segue:

$$\pi(t) = \begin{cases} \geq 1, & \text{se } t \text{ é uma transição imediata;} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

A função  $W$  das *GSPN's* associa um peso para cada transição do modelo. Caso a transição de entrada da função seja imediata, então o valor do peso da transição é retornado, caso contrário o resultado representa a taxa associada às transições temporizadas. A seguir será dada a definição formal da função  $W$ .

**Definição 4.22.** Seja  $GSPN = (P, T, \pi, I, O, H, M_0, W)$  uma *Generalized Stochastic Petri net*. A função  $W : T \rightarrow \mathbb{R}^+ \cup \{0\}$  que associa um peso às transições da GSPN é definida como se segue:

$$W(t) = \begin{cases} w_t, & \text{se } t \text{ é uma transição imediata;} \\ \lambda_t, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

, onde  $w_t$  é um peso e  $\lambda_t$  é a taxa associada a uma variável aleatória exponencialmente distribuída.

Nos modelos GSPN há dois tipos de estado, chamados de estados tangíveis (*tangible*) e os estados voláteis (*vanish*). Os estados voláteis são denominados desta forma, pois o tempo de vida destes é igual a zero. Isto acontece em decorrência da marcação de lugares que são pré-condições de disparo de transições imediatas. Desta forma, quando as marcas chegam a estes lugares, estas são instantaneamente consumidas.

O modelo GSPN faz uso da semântica *interleaving* de ações. Assume-se que as transições são disparadas uma a uma, mesmo se o estado compreenda transições imediatas não conflitantes. A análise de um modelo GSPN requer a solução de um sistema de equações igual ao número de marcações tangíveis. O gerador infinitesimal  $Q$  da CTMC (*Continuous Time Markov Chain*) associado ao modelo GSPN, é derivado de uma redução de um grafo de alcançabilidade, rotulado com as taxas ou pesos das transições imediatas.

Em [46] e [10] é apresentado o isomorfismo entre as GSPNs e as cadeias de Markov a partir do grafo de alcançabilidade reduzido. Este grafo é obtido através da eliminação dos estados voláteis (não-tangíveis) e com as taxas das transições entre os estados rotulando os arcos, possibilitando que as GSPNs possam ser avaliadas em estado estacionário, transiente ou através de simulação.

Adicionalmente é possível avaliar as GSPNs através de simulação estocástica.

## 4.7 RESUMO

Este capítulo apresentou uma introdução sobre as redes de Petri, formalismo que foi inicialmente por C.A. Petri, no ano de 1962, em sua tese de doutorado.

Além das definições e conceitos básicos, apresentou-se também algumas propriedades das redes de Petri, as quais podem ser divididas em duas categorias: propriedades comportamentais e propriedades estruturais. As propriedades comportamentais são aquelas que dependem da marcação do modelo.

Finalmente foram apresentadas as *Generalized Stochastic Petri nets* ou simplesmente *GSPN*, que são de particular interesse deste trabalho. As GSPNs possuem transições com *delays* exponencialmente distribuídos e transições imediatas.





## CAPÍTULO 5

# MODELAGEM

*Este capítulo apresenta em sua primeira parte modelos básicos de redes de Petri para a modelagem de sistemas de manufatura, onde são abordados sete modelos. Para estes modelos são apresentadas métricas de desempenho que podem ser extraídas destes. Apresenta-se também neste capítulo uma abordagem para avaliação de desempenho de sistemas produtivos considerando consumo de energia e alocação de recursos humanos. Desta forma, é definida a rede EHSPN que é uma GSPN rotulada com consumo de energia e alocação de recursos associados ao disparo das transições. Adicionalmente, são definidas todas as métricas de desempenho relacionadas à consumo de energia e alocação de recursos humanos.*

---

## 5.1 GSPN COM ANOTAÇÕES DE CONSUMO DE ENERGIA E ALOCAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS

### 5.1.1 Introdução

As indústrias de manufatura globalizadas e altamente competitivas vêm necessitando cada vez mais sistemas produtivos mais eficientes. Em contrapartida, estas mesmas indústrias necessitam que estes sistemas produzam mais com o menor custo possível. Para acompanhar estas necessidades, os sistemas de avaliação de desempenho devem ser aperfeiçoados. As métricas tradicionais, como a produtividade do sistema (*throughput*), não são suficientes para que estas necessidades sejam supridas. Para tanto, é necessário que métricas de desempenho mais sofisticadas sejam consideradas. Dentre estas, pode-se citar:

- Produtividade;
- Manutenibilidade;

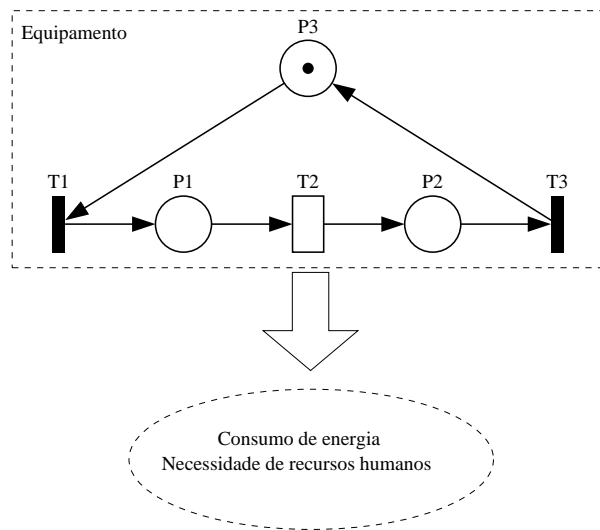
- Perdas;
- Custos do produto;
- Consumo de energia;
- Alocação de recursos humanos;
- etc.

As métricas de produtividade, calculadas através do *throughput* do sistema já eram anteriormente consideradas. Entretanto duas destas métricas são de particular interesse: o consumo de energia elétrica do sistema; e a alocação de recursos humanos. Esta primeira métrica, o consumo de energia elétrica, vêm se tornando um importante fator de custo para as indústrias em geral. Particularmente, as indústrias de base, como as siderúrgicas, possuem um alto consumo de energia elétrica na produção de seus itens. Desta forma, qualquer redução, através de uma melhoria de desempenho, deste consumo pode significar um alto valor monetário. Ao mesmo tempo, a otimização na utilização de recursos humanos também vêm se tornando um importante diferencial competitivo. Observando-se, por exemplo, diversas indústrias emergentes, que são altamente dependentes de recursos humanos, a otimização de recursos humanos pode ser a diferença entre o sucesso e o fracasso.

Conforme pode ser observado, a teoria inicial das GSPN's permite apenas que métricas como produtividade sejam capturadas. Conseqüentemente, métricas relevantes como consumo de energia e alocação de recursos humanos não são possíveis de serem medidas. A fim de solucionar este problema, é necessária a definição de uma rede de Petri que possibilite a captura dessas métricas. Entretanto, é importante, antes de mais nada, entender como o consumo de energia e alocação de recursos humanos podem ser associados à uma rede de Petri.

Conceitualmente, as transições das redes de Petri representam ações que são responsáveis pela mudança do estado no sistema. Isto é, as transições são os elementos ativos do sistema. Nos sistemas produtivos, é bem verdade que um equipamento pode ser definido através de uma rede de Petri com um determinado conjunto de lugares, transições e arcos. E para representar a ação de produzir, pode-se utilizar uma transição temporizada.

Bem, como a maioria dos equipamentos depende de uma fonte de energia para funcionar, e que o consumo de energia pode variar de acordo com a produtividade deste equipamento, pode-se associar o consumo de energia ao disparo da transição que representa a produção. Da mesma forma, pode-se associar a necessidade de alocação de



**Figura 5.1** Representação de um equipamento produtivo utilizando uma GSPN

recursos humanos ao disparo da transição que representa a produção. Na verdade, o que se deseja medir não é o quantitativo total de recursos humanos envolvidos no processo produtivo, mas sim o quanto de recursos humanos são necessários para se atingir determinada produtividade. Sendo assim, deve-se associar a necessidade de alocação de recursos humanos, apenas àquelas transições que recursos humanos afetam a produtividade de tal. Desta forma, ficam excluídas as ações que, ou não envolvem recursos humanos, ou que sua produtividade não depende dos mesmos.

A Figura 5.1 apresenta a modelagem de um equipamento produtivo utilizando uma GSPN. O lugar  $P3$  representa a disponibilidade do equipamento. Caso o número de marcas seja maior do que zero, então o equipamento está disponível, caso contrário o equipamento está alocado. A transição  $T2$ , a qual tem sido o foco da discussão, representa a ação de produzir deste equipamento. Associando-se consumo de energia e necessidade de alocação de recursos humanos ao disparo desta transição, é possível calcular as métricas de consumo de energia e o quantitativo de recursos humanos, dado em homem-hora, necessários para efetuar a produção.

### 5.1.2 Definição formal

Como já discutido, é possível associar consumo de energia e necessidade de alocação de recursos humanos ao disparo de uma transição temporizada, através de anotações na rede. Entretanto, é necessário que esta GSPN anotada com informações de consumo de energia

e necessidade de recursos humanos, chamada de *EHSPN* seja formalmente definida.

Inicialmente é necessário definir funções que realizem essa associação. A função  $E$  associa um consumo de energia ao disparo de uma transição. Esta função recebe uma transição como entrada e retorna um valor real maior ou igual a zero. A função  $\tau$  que digamos, associa um esforço humano, ao disparo de uma transição recebe uma transição como entrada e retorna um valor real maior ou igual a zero. Sendo assim, pode-se definir formalmente a *EHSPN*, que inclui as funções  $E$  e  $\tau$  às GSPN's.

**Definição 5.1 (EHSPN).** Seja  $N = (P, T, \pi, I, O, H, M_0, W)$  uma GSPN.  $EHSPN = (N, E, \tau)$  é uma GSPN com funções que associam consumo de energia e alocação de recursos humanos aos elementos da rede.

- i.  $T = T_i \cup T_t$  é o conjunto de transições da GSPN, onde  $T_i$  é o conjunto de transições imediatas e  $T_t$  é o conjunto de transições temporizadas;
- ii.  $E : T \rightarrow \mathbb{R}^+ \cup \{0\}$  associa um consumo de energia a uma transição;
- iii.  $\tau : T \rightarrow \mathbb{R}^+ \cup \{0\}$  associa uma alocação de recursos humanos a uma transição.

Como se sabe, as GSPN's utilizam a distribuição de probabilidade exponencial associadas às transições temporizadas. Entretanto, caso seja necessário a utilização de outra distribuição de probabilidade, através de aproximação por fases, a definição da *EHSPN* permanece ainda válida. Isso é fato, pois a aproximação por fases não modifica a estrutura da GSPN, mas apenas utiliza de um artifício na modelagem, permitindo que outras distribuições de probabilidade sejam utilizadas. É bem verdade que o cálculo das métricas se diferenciam nas suas aplicações, quando se utiliza aproximação por fases, entretanto os detalhes das métricas serão discutidos posteriormente.

### 5.1.3 Métricas de desempenho

Sendo a *EHSPN* introduzida, é necessário, agora, que as métricas de desempenho associadas a ela sejam também formalmente definidas. Entretanto, antes das métricas de desempenho serem introduzidas, é necessário realizar uma breve introdução sobre os símbolos e funções utilizados na definição das métricas.

A função  $P\{M[t_i >]\}$  calcula a probabilidade da transição  $t_i \in T$  está habilitada para uma determinada marcação  $M \in RS$  em um instante qualquer, onde  $T$  é o conjunto de transições e  $RS$  é o conjunto de alcançabilidade. A função  $\lambda(t_i)$  retorna a taxa de disparo

de uma transição  $t_i$ . Para se calcular o atraso associado a uma transição basta apenas calcular o inverso da taxa de disparo ( $\frac{1}{\lambda(t_i)}$ ).

Dada a definição dos símbolos e funções básicos no cálculo das métricas de desempenho, pode-se definir formalmente as métricas de desempenho.

A produtividade ou *throughput* de uma transição, que representa o número de execuções desta transição em uma unidade de tempo, é resultado do produto da probabilidade da transição  $t_i$  estar habilitada ( $P\{M[t_i >]\}$ ) com a taxa de disparo da transição  $t_i$  ( $\lambda(t_i)$ ).

**Definição 5.2 (Throughput de uma transição).** Seja  $t_i \in T$  uma transição pertencente ao conjunto de transições da rede  $T$ ,  $P\{M[t_i >]\}$  a probabilidade de  $t_i$  estar habilitada, e  $\lambda(t_i)$  a taxa de disparo da transição  $t_i$ , pode-se definir a função  $TP : T \rightarrow \mathbb{R}^+ \cup \{0\}$  que calcula o *throughput* da transição  $t_i$  como se segue:

$$TP(t_i) = P\{M[t_i >]\} \times \lambda(t_i) \quad (5.1)$$

A partir da associação de um consumo de energia a uma transição, pode-se calcular a potência dissipada por uma transição em uma unidade de tempo ( $Pw(t_i)$ ). O *throughput* de uma transição representa quantas vezes uma transição disparou em uma unidade de tempo. Como a função  $E$  associa consumo de energia ao disparo de uma transição, a potência dissipada por uma transição  $t_i$  pode ser calculada através do produto do *throughput* da transição  $t_i$  ( $TP(t_i)$ ) com o consumo de energia da mesma ( $E(t_i)$ ).

**Definição 5.3 (Potência dissipada).** Seja  $t_i \in T_t$  uma transição pertencente ao conjunto de transições da rede  $T_t$ ,  $TP(t_i)$  o *throughput* da transição  $t_i$ , e  $E(t_i)$  o consumo de energia associado à transição  $t_i$ , pode-se definir a função  $Pw(t_i) : T_t \rightarrow \mathbb{R}^+ \cup \{0\}$  que calcula a potência dissipada pelos disparos da transição  $t_i$  em uma unidade de tempo como se segue:

$$Pw(t_i) = \underbrace{P\{M[t_i]\} \times \lambda(t_i)}_{\text{throughput}} \times E(t_i) = TP(t_i) \times E(t_i) \quad (5.2)$$

De maneira semelhante ao cálculo da potência dissipada, o esforço humano utilizado por uma transição em uma unidade de tempo ( $Mh(t_i)$ ) pode ser calculado. Como a função  $\tau(t_i)$  associa o esforço humano utilizado no disparo da transição  $t_i$  e o *throughput*

da transição  $t_i$  representa quantas vezes a transição  $t_i$  disparou em uma unidade de tempo, o esforço humano  $Mh(t_i)$  pode ser calculado como o produto do *throughput* da transição  $t_i$  ( $TP(t_i)$ ) com o esforço humano utilizado no disparo da transição  $t_i$  ( $\tau(t_i)$ ).

**Definição 5.4 (Esforço humano).** Seja  $t_i \in T_t$  uma transição pertencente ao conjunto de transições da rede  $T_t$ ,  $TP(t_i)$  o *throughput* da transição  $t_i$ , e  $\tau(t_i)$  a necessidade de recursos humanos associada à transição  $t_i$ , pode-se definir a função  $Mh(t_i) : T_t \rightarrow IR^+ \cup \{0\}$  que calcula o esforço humano gerado pelos disparos da transição  $t_i$  em uma unidade de tempo como se segue:

$$Mh(t_i) = \underbrace{P\{M[t_i >]\} \times \lambda(t_i)}_{\text{throughput of } t_i} \times \tau(t_i) = TP(t_i) \times \tau(t_i) \quad (5.3)$$

A potência total dissipada pelo sistema ( $SPw$ ) é a potência dissipada pelo disparo de todas as transições habilitadas em uma unidade de tempo. Isso pode ser calculado através do somatório da potência dissipada ( $Pw$ ) aplicada para todas as transições habilitadas em uma unidade de tempo.

**Definição 5.5 (Potência total do sistema).** Seja  $t_i \in T_t$  uma transição pertencente ao conjunto de transições da rede  $T_t$ ,  $TP(t_i)$  o *throughput* da transição  $t_i$ , e  $E(t_i)$  o consumo de energia associado à transição  $t_i$ , pode-se definir a função  $SPw : T_t^n \rightarrow IR^+ \cup \{0\}$  que calcula a potência total dissipada pelo sistema como se segue:

$$SPw(t_0, \dots, t_i) = \sum_{t_i \in T_t} \underbrace{P\{M[t_i >]\} \times \lambda(t_i) \times E(t_i)}_{Pw(t_i)} = \sum_{t_i \in T_t} Pw(t_i), \quad (5.4)$$

onde  $n = \max(\lg(s_k))$ ,  $\forall s_k \in L_N$ ,  $s_k$  é a seqüência de disparo das transições,  $L_N = \{s_k | s_k = s_{k-1}t, s_{k-1} \in L_N, t \in T_t\}$  é a linguagem formal do modelo  $N$  e  $\lg : s_k \rightarrow IN$  calcula o tamanho da seqüência de disparos  $s_k$ .

O esforço humano total dissipada pelo sistema ( $SMh$ ) é o esforço humano gerado pelo disparo de todas as transições habilitadas em uma unidade de tempo. Isso pode ser calculado através do somatório do esforço humano ( $Mh$ ) aplicada para todas as transições habilitadas em uma unidade de tempo.

**Definição 5.6 (Esforço humano total do sistema).** Seja  $t_i \in T_t$  uma transição pertencente ao conjunto de transições da rede  $T_t$ ,  $TP(t_i)$  o *throughput* da transição  $t_i$ , e  $\tau(t_i)$  necessidade de recursos humanos associada à transição  $t_i$ , pode-se definir a função

$SMh : T_t^n \rightarrow IR^+ \cup \{0\}$  que calcula o esforço humano total gerado pelo sistema como se segue:

$$SMh(t_0, \dots, t_i) = \sum_{t_i \in T_t} \underbrace{P\{M[t_i >]\} \times \lambda(t_i) \times \tau(t_i)}_{Mh(t_i)} = \sum_{t_i \in T_t} Mh(t_i), \quad (5.5)$$

onde  $n = \max(\lg(s_k))$ ,  $\forall s_k \in L_N$ ,  $s_k$  é a seqüência de disparo das transições,  $L_N = \{s_k | s_k = s_{k-1}t, s_{k-1} \in L_N, t \in T_t\}$  é a linguagem formal do modelo  $N$  e  $\lg : s_k \rightarrow IN$  calcula o tamanho da seqüência de disparos  $s_k$ .

Todas as cinco métricas introduzidas anteriormente não consideram o tempo como variável. Isto é, as cinco métricas são calculadas apenas para uma unidade de tempo, ou, de maneira estacionária. Entretanto, todas essas métricas precisam ser definidas de maneira a possibilitar o cálculo para um  $\Delta t$ .

A potência dissipada em um intervalo de tempo  $\Delta t$  ( $PwT_{t^0}^{t^1}(t_i)$ ) pelo disparo da transição  $t_i$ , pode ser calculado como resultado da integração, de um  $t^0$  inicial até um  $t^1$  final, da potência dissipada pelo disparo da transição  $t_i$ .

**Definição 5.7 (Potência dissipada em um intervalo de tempo).** Seja  $t_i \in T$  uma transição pertencente ao conjunto de transições da rede  $T$ ,  $TP(t_i)$  o *throughput* da transição  $t_i$ , e  $E(t_i)$  o consumo de energia associado ao disparo da transição  $t_i$ , pode-se definir a função  $PwT_{t^0}^{t^1}(t_i) : T \rightarrow IR^+ \cup \{0\}$  que calcula a potência dissipada pelo disparo da transição  $t_i$  durante um intervalo de tempo  $\Delta t = t^1 - t^0$  como se segue:

$$PwT_{t^0}^{t^1}(t_i) = \int_{t^0}^{t^1} \underbrace{TP(t_i) \times E(t_i)}_{Pw(t_i)} \times dt = \int_{t^0}^{t^1} Pw(t_i) \times dt \quad (5.6)$$

O esforço humano gerado em um intervalo de tempo  $\Delta t$  ( $MhT_{t^0}^{t^1}(t_i)$ ) pelo disparo da transição  $t_i$ , pode ser calculado como resultado da integração, de um  $t^0$  inicial até um  $t^1$  final, do esforço humano gerado pelo disparo da transição  $t_i$ .

**Definição 5.8 (Esforço humano em um intervalo de tempo).** Seja  $t_i \in T$  uma transição pertencente ao conjunto de transições da rede  $T$ ,  $TP(t_i)$  o *throughput* da transição  $t_i$ , e  $\tau(t_i)$  a necessidade de recursos humanos associada ao disparo da transição  $t_i$ , pode-se definir a função  $MhT_{t^0}^{t^1}(t_i) : T \rightarrow IR^+ \cup \{0\}$  que calcula o esforço humano gerado pelo disparo da transição  $t_i$  durante um intervalo de tempo  $\Delta t = t^1 - t^0$  como se segue:

$$MhT_{t^0}^{t^1}(t_i) = \int_{t^0}^{t^1} \underbrace{TP(t_i) \times \tau(t_i)}_{Mh(t_i)} \times dt = \int_{t^0}^{t^1} Mh(t_i) \times dt \quad (5.7)$$

A potência dissipada total em um intervalo  $\Delta t$  de tempo pelo sistema, é, na verdade, a potência dissipada através do disparo de todas as transições do sistema em um intervalo de tempo ( $SPwT$ ). Isso pode ser calculado através do somatório de todas as integrações, de um  $t^0$  inicial até um  $t^1$  final, da energia dissipada gerada pelo disparo de todas as transições habilitadas do sistema.

**Definição 5.9 (Potência total em um intervalo de tempo).** Seja  $t_i \in T_t$  uma transição pertencente ao conjunto de transições da rede  $T_t$ ,  $Pw(t_i)$  a função que calcula a potência dissipada gerada pelo disparo da transição  $t_i$ , pode-se definir a função  $SPwT_{t^0}^{t^1} : T_t^n \rightarrow IR^+ \cup \{0\}$  que calcula a potência dissipada total pelo sistema durante um intervalo de tempo  $\Delta t = t^1 - t^0$  como se segue:

$$SPwT_{t^0}^{t^1}(t_0, \dots, t_i) = \sum_{t_i \in T_t} \left[ \int_{t^0}^{t^1} Pw(t_i) \times dt \right] = \sum_{t_i \in T_t} PwT_{t^0}^{t^1}(t_i), \quad (5.8)$$

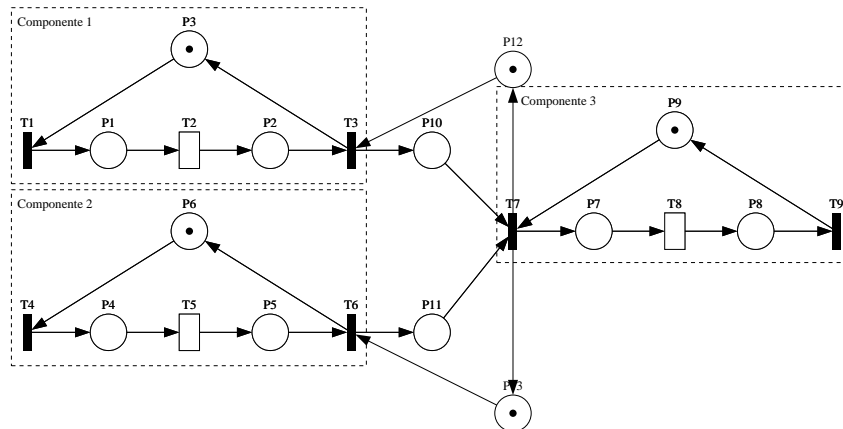
onde  $n = \max(\lg(s_k)), \forall s_k \in L_N$ ,  $s_k$  é a seqüência de disparo das transições,  $L_N = \{s_k | s_k = s_{k-1}t, s_{k-1} \in L_N, t \in T_t\}$  é a linguagem formal do modelo  $N$  e  $\lg : s_k \rightarrow IN$  calcula o tamanho da seqüência de disparos  $s_k$ .

O esforço humano total em um intervalo  $\Delta t$  de tempo gerado pelo sistema, é, na verdade, o esforço humano gerado através do disparo de todas as transições do sistema em um intervalo de tempo ( $SPwT$ ). Isso pode ser calculado através do somatório de todas as integrações, de um  $t^0$  inicial até um  $t^1$  final, do esforço humano gerado pelo disparo de todas as transições habilitadas do sistema.

**Definição 5.10 (Esforço humano total em um intervalo de tempo).** Seja  $t_i \in T_t$  uma transição pertencente ao conjunto de transições da rede  $T_t$ ,  $Mh(t_i)$  a função que calcula o esforço humano gerado pelo disparo da transição  $t_i$ , pode-se definir a função  $SMhT_{t^0}^{t^1} : T_t^n \rightarrow IR^+ \cup \{0\}$  que calcula o esforço humano total gerado pelo sistema durante um intervalo de tempo  $\Delta t = t^1 - t^0$  como se segue:

$$SMhT_{t^0}^{t^1}(t_0, \dots, t_i) = \sum_{t_i \in T_t} \left[ \int_{t^0}^{t^1} Mh(t_i) \times dt \right] = \sum_{t_i \in T_t} MhT_{t^0}^{t^1}(t_i), \quad (5.9)$$





**Figura 5.2** Exemplo de um sistema produtivo modelado utilizando uma EHSPN

onde  $n = \max(\lg(s_k))$ ,  $\forall s_k \in L_N$ ,  $s_k$  é a seqüência de disparo das transições,  $L_N = \{s_k | s_k = s_{k-1}t, s_{k-1} \in L_N, t \in T_t\}$  é a linguagem formal do modelo  $N$  e  $\lg : s_k \rightarrow IN$  calcula o tamanho da seqüência de disparos  $s_k$ .

#### 5.1.4 Exemplificando a EHSPN

A fim de facilitar o entendimento da *EHSPN* e das métricas definidas anteriormente, um exemplo fictício será ilustrado. Suponha o sistema ilustrado na Figura 5.2. Este sistema é composto por dois equipamentos, *Componente 1* e *Componente 2*, que produzem paralelamente, e posteriormente a produção é sincronizada através do equipamento sincronizados através de um terceiro equipamento, o *Componente 3*. O *Componente 1* e o *Componente 2* só podem produzir um novo item, depois que o *Componente 3* consumir os produtos (representados pelas marcas nos lugares  $P_{10}$  e  $P_{11}$ ) gerados por estes dois equipamentos.

Cada um destes equipamentos possui uma taxa ( $\lambda$ ) de disparo diferente associada, um consumo de energia ( $E$ ) associado e uma necessidade de recursos humanos ( $\tau$ ) associada. A Tabela 5.1 detalha esses atributos para os componentes utilizados na EHSPN.

**Tabela 5.1** Atributos dos componentes ilustrados no exemplo

Componente	Transição	$\lambda$	$E$	$\tau$
M1	T2	0,3333	124,00	0
M2	T5	0,2500	322,00	0
M3	T8	1,0000	58,00	10

Sendo definidos os atributos da EHSPN utilizada no exemplo, é possível realizar o cálculo das métricas de desempenho através das funções discutidas anteriormente. Primeiramente será calculado o *throughput* da transição  $T8$  como mostrado na Equação 5.10. Além desta métrica ser o *throughput* da transição  $T8$ , esta também representa o *throughput* do sistema produtivo, já que este componente é o responsável pela finalização da produção.

$$TP(T8) = P\{M[T8 >]\} \times \lambda(T8) = 0,2224 \times 1 = 0,2224 \quad (5.10)$$

Em seqüência a potência dissipada ( $Pw$ ) e esforço humano ( $Mh$ ) podem ser calculados. Como já discutido, a potência dissipada é calculada através do produto do *throughput* de uma transição  $t_i$  com o resultado retornado por  $E(t_i)$ . A Equação 5.11 mostra o cálculo da potência dissipada no disparo da transição  $T8$ . O esforço humano é calculado através do produto do *throughput* de uma transição  $t_i$  com resultado retornado por  $\tau(t_i)$ . A Equação 5.12 mostra o cálculo do esforço humano gerado pelo disparo da transição  $T8$ .

$$Pw(T8) = TP(T8) \times E(T8) = 0,2224 \times 58,00 = 12,90 \quad (5.11)$$

$$Mh(T8) = TP(T8) \times \tau(T8) = 0,2224 \times 10 = 2 \quad (5.12)$$

A potência total dissipada pelo sistema ( $SPw$ ), pode ser obtida através da soma da potência dissipada por todos os componentes do sistema produtivo, ou seja, a soma da potência dissipada no disparo das transições  $T2$ ,  $T5$  e  $T8$ . A Equação 5.13 mostra o cálculo da potência dissipada total. O esforço humano total ( $SMh$ ) gerado pelo sistema pode ser calculado através da soma do esforço gerado por todos os componentes do sistema produtivo. A Equação 5.14 mostra o cálculo do esforço humano total gerado pelo sistema.

$$SPw = Pw(T2) + Pw(T5) + Pw(T6) = 27,58 + 71,63 + 12,90 = 112,11 \quad (5.13)$$

$$SMh = Mh(T2) + Mh(T5) + Mh(T6) = 0 + 0 + 2 = 2 \quad (5.14)$$

Como já discutido anteriormente, todas as métricas já calculadas não possuem dependência com o tempo, entretanto, em determinadas situações, é necessário entender o comportamento transiente do sistema em questão, ou seja, entender como o sistema se comporta com o passar do tempo. Para tanto, foram introduzidas algumas métricas que possibilitam a avaliação de desempenho do sistema com o passar do tempo. O cálculo da potência dissipada em determinado  $\Delta t$  de tempo pode ser calculado através da integração da potência dissipada por um determinado equipamento. A Equação 5.15 mostra o cálculo da potência dissipada num período de tempo para a transição  $T8$ . Para este exemplo utilizou-se  $\Delta t = 10$ . Como também já discutido anteriormente, o esforço humano gerado durante um intervalo de tempo pode ser calculado como resultado da integração do esforço humano gerado pelo disparo de uma determinada transição. A Equação 5.16 mostra o cálculo do esforço humano gerado pelo disparo da transição  $T8$  num intervalo de tempo  $\Delta t = 10$ .

$$PwT_0^{10}(T8) = \int_0^{10} Pw(T8)dt = (Pw(T8) \times t) \Big|_0^{10} = 129,00 \quad (5.15)$$

$$MhT_0^{10}(T8) = \int_0^{10} Mh(T8)dt = (Mh(T8) \times t) \Big|_0^{10} = 20 \quad (5.16)$$

As últimas métricas a serem calculadas são a potência dissipada pelo sistema durante um intervalo de tempo ( $SPwT$ ) e o esforço humano gerado pelo sistema durante um intervalo de tempo ( $SMhT$ ). A primeira delas pode ser obtida através da soma das integrações das potências dissipadas por cada componente do sistema produtivo em um intervalo de tempo  $\Delta t$ . A Equação 5.17 mostra o cálculo da potência dissipada pelo sistema durante um intervalo de tempo  $\Delta t = 10$ . A última métrica a ser calculada é o esforço humano gerado pelo sistema durante um intervalo de tempo. Isso pode ser obtido através da soma das integrações do esforço humano gerado por cada componente do sistema produtivo em um intervalo de tempo  $\Delta t$ . A Equação 5.18 mostra o cálculo do esforço humano gerado pelo sistema em um intervalo de tempo  $\Delta t = 10$ .

$$SPwT_0^{10} = \left( \int_0^{10} Pw(T2)dt \right) + \left( \int_0^{10} Pw(T5)dt \right) + \left( \int_0^{10} Pw(T8)dt \right) = 275,83 + 716,26 + 129,01 = 1121,11 \quad (5.17)$$

$$SMhT_0^{10} = \left(\int_0^{10} Mh(T2)dt\right) + \left(\int_0^{10} Mh(T5)dt\right) + \left(\int_0^{10} Mh(T8)dt\right) = 0 + 0 + 20 = 20 \quad (5.18)$$

A Tabela 5.2 resume o resultado de todas as métricas obtidas na *EHSPN* de exemplo. Como pode ser observado o componente *M2* é aquele que dissipa mais potência no sistema, enquanto o componente *M3* é aquele que dissipa menos energia no sistema. Em contrapartida, o componente *M3* é o único que gera esforço humano. Isso não quer dizer que os demais componentes não necessitam de recursos humanos, mas que a produtividade destes componentes não está relacionada com o fator humano.

**Tabela 5.2** Resultado das métricas de performance para o exemplo

Componente	Transição	$PM[t_i >$	TP	Pw	Mh	PwT	MhT
M1	T2	0,6673	0,222444	27,58	0	275,83	0
M2	T5	0,8898	0,222444	71,63	0	716,27	0
M3	T8	0,2224	0,222444	12,90	2	129,02	22
				SPw	SMh	SPwT	SMhT
				112,11	2,22	1121,12	22,24

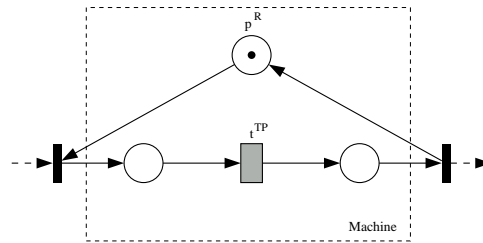
## 5.2 MODELOS BÁSICOS

A modelagem de sistemas de manufatura através das *Generalized Stochastic Petri nets* já vem sendo discutida por um bom tempo. Diversos trabalhos apresentam propostas para este tipo de modelagem.

Um sistema de manufatura, seja este simples ou complexo, pode ser representado através da utilização de diversos modelos básicos. Neste trabalho serão utilizados sete modelos básicos, que através de sua composição, permitirá que diversos tipos de sistema de manufatura sejam representados.

### 5.2.1 Modelo máquina

O modelo básico de uma máquina pode ser representado por um pequena rede de Petri. Essencialmente, esta deve apresentar pelo menos um lugar representando o próprio recursos, que neste caso é uma máquina, e pelo menos uma transição não-imediata representando a ação da produção. Esta transição não-imediata, na verdade, é modelada como



**Figura 5.3** Modelo básico de uma máquina

uma transição genérica. Isto acontece porque a transição em questão pode não modelar distribuições de probabilidade exponenciais, através de transições exponenciais, mas pode modelar distribuições de probabilidade específicas, como uma hiper-exponencial, Erlang, etc. Nesta situação, por exemplo, poderia-se substituir a transição genérica por uma subrede.

A Figura 5.3 ilustra uma rede de Petri que representa uma máquina. Como já discutido é necessário um lugar representando o recurso, que neste caso é o lugar  $p^R$ , e uma transição genérica<sup>12</sup> representando a produção, que neste case é a transição  $t^{TP}$ . A presença de uma marca ou *token* no lugar  $P3$  indica que a máquina está disponível para realizar a produção. Esta produção leva um tempo, digamos,  $t$  para efetuar a produção de um item, e este tempo  $t$  está atribuído à transição  $t^{TP}$ .

A produtividade ou *throughput* desta máquina pode ser calculada simplesmente como o *throughput* da transição que representa a produção  $t^{TP}$ . O *throughput* representa a frequência de disparos da transição  $t^{TP}$ . O *throughput* é resultado do produto da probabilidade da transição  $t^{TP}$  estar habilitada com a sua taxa de disparo.

**Definição 5.11** ( $TP(t^{TP})$ ). Seja  $t^{TP} \in T$  uma transição pertencente ao conjunto de transições  $T$  da rede,  $P\{M[t^{TP} >]\}$  a probabilidade de  $t^{TP}$  estar habilitada, e  $\lambda(t^{TP})$  a taxa de disparo da transição  $t^{TP}$ , pode-se definir a função  $TP : T \rightarrow \mathbb{R}^+ \cup \{0\}$  que calcula o *throughput* da transição  $t^{TP}$  como se segue:

<sup>1</sup>Uma transição genérica não possui uma distribuição de probabilidade associada a seu disparo. A transição genérica, no momento de refinamento do modelo, deve ser substituída por uma única transição exponencial ou por uma subrede (composta de transições imediatas e exponenciais), a qual aproxima uma distribuição de probabilidade.

<sup>2</sup>Desrochers et. al.[16] apresentam como aproximar distribuições de probabilidade específicas utilizando aproximação por fases. [16] apresenta modelo de redes de Petri para uma distribuição Erlang, hipoexponencial e hiperexponencial.

$$TP(t^{TP}) = P\{M[t^{TP} >] \times \lambda(t^{TP}) \quad (5.19)$$

Como já definido, uma *EHSPN* é uma GSPN com anotações consumo de energia e alocação de recursos humanos, e é definida por uma tripla  $EHSPN = (N, E, \tau)$ . Ambas as funções  $E$  e  $\tau$  associam consumo de energia e alocação de recursos humanos ao disparo de transições do modelo, respectivamente. Como este modelo apresenta uma única transição não-imediata, o mapeamento do consumo de energia e alocação de recursos humanos do modelo consiste em mapear consumo de energia e alocação de recursos humanos à transição  $t^{TP}$ .

**Definição 5.12.** Seja  $N = (P, T, \pi, I, O, H, M_0, W)$  uma GSPN,  $t^{TP} \in T$  uma transição que representa a ação de produção pertencente ao conjunto de transições  $T$  da GSPN,  $E$  a função que mapeia consumo de energia ao disparo das transições,  $\tau$  a função que mapeia a alocação de recursos humanos ao disparo das transições, o modelo máquina pode ser formalmente definido como:

$$EHSPN = (N, E, \tau),$$

$$E(t) = \begin{cases} x_E^{TP} & , \quad t = t^{TP}; \\ 0 & , \quad \text{caso contrário.} \end{cases} \quad \tau(t) = \begin{cases} x_\tau^{TP} & , \quad t = t^{TP}; \\ 0 & , \quad \text{caso contrário.} \end{cases}$$

onde  $x_E^{TP}$  é o consumo de energia associado à transição  $t^{TP}$  e  $x_\tau^{TP}$  é o esforço humano necessário para realizar a atividade representada pelo disparo da transição  $t^{TP}$ .

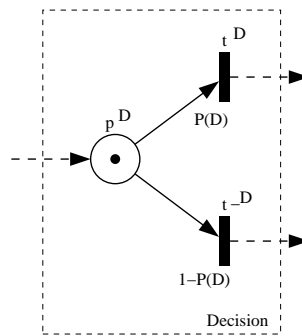
Sendo definido formalmente o modelo máquina, as métricas relacionadas a consumo de energia e alocação de recursos humanos precisam ser redefinidas. A Tabela 5.3 apresenta um sumário destas métricas.

### 5.2.2 Modelo decisão

É muito comum, em sistemas de manufatura, se encontrar situações de decisão, isto é, existe mais de uma opção disponível para determinada situação. Uma decisão pode ser representada por uma rede de Petri que possui duas ou mais transições imediatas em conflito, isto é, duas ou mais transições habilitadas ao mesmo tempo e que neste caso apenas uma pode ser disparada.

**Tabela 5.3** Sumário de métricas para o modelo máquina

$$\begin{aligned}
Pw(t^{TP}) &= TP(t^{TP}) \times x_E^{TP} \\
Mh(t^{TP}) &= TP(t^{TP}) \times x_\tau^{TP} \\
SPw(t^{TP}) &= Pw(t^{TP}) \\
SMh(t^{TP}) &= Mh(t^{TP}) \\
PwT(t^{TP}) &= \int_{t_0}^{t_1} TP(t^{TP}) \times x_E^{TP} \\
MhT(t^{TP}) &= \int_{t_0}^{t_1} TP(t^{TP}) \times x_\tau^{TP} \\
SPwT(t^{TP}) &= PwT(t^{TP}) \\
SMhT(t^{TP}) &= MhT(t^{TP})
\end{aligned}$$

**Figura 5.4** Modelo básico de decisão

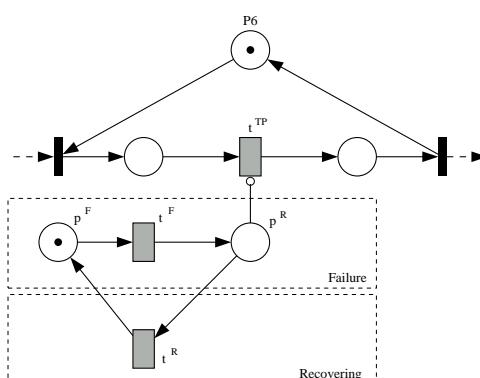
A decisão de qual delas será disparada pode ser representada através da atribuição de pesos diferentes para estas transições imediatas. Sendo assim, o peso destas transições pode ser interpretado como a probabilidade de cada uma destas ser disparada.

A Figura 5.4 ilustra um modelo de decisão onde existem duas opções de decisão. Estas opções são representadas pelas transições  $t^D$  e  $t^{-D}$ . Obviamente, como se trata de probabilidades, a soma de todas as probabilidades deve ser igual a um. Isto leva à definição da Equação 5.20.

$$W(t^D) + W(t^{-D}) = 1 \quad \therefore \quad W(t^{-D}) = 1 - W(t^D) \quad (5.20)$$

### 5.2.3 Modelo falha

Uma falha pode ser interpretada como um evento que acontece em um determinado intervalo de tempo, e que este evento impede que a ação de produção por um certo intervalo de tempo. Isto é, existe um tempo entre falhas desta determinada máquina,



**Figura 5.5** Modelo básico de falha

e um tempo de recuperação da mesma. Para representar uma falha através de uma rede de Petri, além do modelo básico de uma máquina, são necessárias uma transição genérica representando o tempo entre falhas da máquina, e uma outra transição genérica representando o tempo de recuperação da máquina.

A Figura 5.5 ilustra um modelo de falha. Como já discutido anteriormente, é necessário um lugar que represente o tempo entre falhas da máquina, neste caso representado pela transição genérica  $t^F$ , e uma transição que represente o tempo de recuperação da máquina, neste caso representado pela transição  $t^R$ . O lugar  $p^R$  representa o estado de falha. Um *token* neste lugar indica que a máquina falhou e que a produção está suspensa. O arco inibidor que conecta o lugar  $p^R$  à transição  $t^{TP}$  indica que caso o lugar  $p^R$  possua um ou mais *tokens*, a transição  $t^{TP}$  não estará habilitada.

Algumas medidas podem ser calculadas com base nesse modelo. Uma primeira medida é a probabilidade da máquina estar quebrada ( $PF$ ). A probabilidade da máquina estar quebrada é resultado da probabilidade da marcação do lugar  $p^R$  ser maior ou igual a um.

**Definição 5.13** ( $PF(p^R)$ ). Seja  $p^R \in P$  um lugar pertencente ao conjunto de lugares da rede  $P$  e que representa o estado de falha de um determinado equipamento, pode-se definir a função  $PF : P \rightarrow IR[0, 1]$  que calcula a probabilidade de falha de um equipamento como se segue:

$$PF(p^R) = P\{M(p^R) \geq 1\} \quad (5.21)$$

Uma outra medida que pode ser calculada é o tempo médio de permanência no estado de falha ( $TMF$ ). O tempo médio de permanência no estado de falha pode ser resultado do inverso do *throughput* da transição  $t^R$ .



**Definição 5.14** ( $TMF(t^R)$ ). Seja  $t^R \in T$  uma transição pertencente ao conjunto de transições da rede  $T$  e que representa a ação de recuperação da falha de um determinado equipamento,  $P\{M[t^R >]\}$  a probabilidade da transição  $t^R$  estar habilitada, e  $\lambda(t^R)$  a taxa de disparo da transição  $t^R$ , pode-se definir a função  $TMF : T \rightarrow \mathbb{R}^+$  que calcula o tempo médio no estado de falha como se segue:

$$TMF(t^R) = \frac{1}{TP(t^R)} = \frac{1}{P\{M[t^R >]\} \times \lambda(t^R)} \quad (5.22)$$

A definição formal do modelo falha como uma  $EHSPN$  consiste em definir o mapeamento do consumo de energia e alocação de recursos humanos às transições do modelo através das funções  $E$  e  $\tau$ , respectivamente. O modelo falha apresenta três transições não-imediatas:  $t^{TP}$  que representa a ação de produção,  $t^F$  que representa a ação de falha, e  $t^R$  que representa a ação de recuperação da falha. A definição formal do modelo através de uma  $EHSPN$  deve definir as funções  $E$  e  $\tau$  para as transições  $t^{TP}$ ,  $t^F$  e  $t^R$ .

**Definição 5.15.** Seja  $N = (P, T, \pi, I, O, H, M_0, W)$  uma GSPN,  $t^{TP} \in T$  uma transição que representa a ação de produção pertencente ao conjunto de transições  $T$  da GSPN,  $t^F \in T$  uma transição que representa a ação de falha pertencente ao conjunto de transições  $T$  da GSPN,  $t^R$  uma transição que representa a ação de recuperação de falha pertencente ao conjunto de transições  $T$  da GSPN,  $E$  a função que mapeia consumo de energia ao disparo das transições da GSPN,  $\tau$  a função que mapeia alocação de recursos humanos ao disparo das transições da GSPN, o modelo de falha pode ser formalmente definido como:

$$EHSPN = (N, E, \tau),$$

$$E(t) = \begin{cases} x_E^{TP} & , t = t^{TP}; \\ x_E^F & , t = t^F; \\ x_E^R & , t = t^R; \\ 0 & , \text{ caso contrário.} \end{cases} \quad \tau(t) = \begin{cases} x_\tau^{TP} & , t = t^{TP}; \\ x_\tau^F & , t = t^F; \\ x_\tau^R & , t = t^R; \\ 0 & , \text{ caso contrário.} \end{cases}$$

onde  $x_E^{TP}$ ,  $x_E^F$ ,  $x_E^R$  são os consumos de energia relacionados às transições  $t^{TP}$ ,  $t^F$  e  $t^R$ , respectivamente, e  $x_\tau^{TP}$ ,  $x_\tau^F$ ,  $x_\tau^R$  são os esforços humanos necessários para realizar as atividades representadas pelo disparo das transições  $t^{TP}$ ,  $t^F$  e  $t^R$ , respectivamente.

Sendo definido formalmente o modelo de falha, as métricas relacionadas a consumo de energia e alocação de recursos humanos precisam ser redefinidas. A Tabela 5.4 apresenta o sumário destas métricas.

**Tabela 5.4** Sumário de métricas para o modelo de falha

---


$$Pw(t^{TP}) = TP(t^{TP}) \times E(t^{TP}) = TP(t^{TP}) \times x_E^{TP}$$

$$Pw(t^F) = TP(t^F) \times E(t^F) = TP(t^F) \times x_E^F$$

$$Pw(t^R) = TP(t^R) \times E(t^R) = TP(t^R) \times x_E^R$$

$$Mh(t^{TP}) = TP(t^{TP}) \times \tau(t^{TP}) = TP(t^{TP}) \times x_\tau^{TP}$$

$$Mh(t^F) = TP(t^F) \times \tau(t^F) = TP(t^F) \times x_\tau^F$$

$$Mh(t^R) = TP(t^R) \times \tau(t^R) = TP(t^R) \times x_\tau^R$$

$$SPw(t^{TP}, t^F, t^R) = Pw(t^{TP}) + Pw(t^F) + Pw(t^R)$$

$$SMh(t^{TP}, t^F, t^R) = Mh(t^{TP}) + Mh(t^F) + Mh(t^R)$$

$$PwT(t^{TP})_{t_0}^{t_1} = \int_{t_0}^{t_1} (TP(t^{TP}) \times x_E^{TP}) \times dt$$

$$PwT(t^F)_{t_0}^{t_1} = \int_{t_0}^{t_1} (TP(t^F) \times x_E^F) \times dt$$

$$PwT(t^R)_{t_0}^{t_1} = \int_{t_0}^{t_1} (TP(t^R) \times x_E^R) \times dt$$

$$MhT(t^{TP})_{t_0}^{t_1} = \int_{t_0}^{t_1} (TP(t^{TP}) \times x_\tau^{TP}) \times dt$$

$$MhT(t^F)_{t_0}^{t_1} = \int_{t_0}^{t_1} (TP(t^F) \times x_\tau^F) \times dt$$

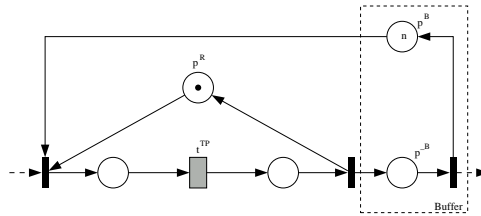
$$MhT(t^R)_{t_0}^{t_1} = \int_{t_0}^{t_1} (TP(t^R) \times x_\tau^R) \times dt$$

$$SPwT(t^{TP}, t^F, t^R)_{t_0}^{t_1} = PwT(t^{TP})_{t_0}^{t_1} + PwT(t^F)_{t_0}^{t_1} + PwT(t^R)_{t_0}^{t_1}$$

$$SMhT(t^{TP}, t^F, t^R)_{t_0}^{t_1} = MhT(t^{TP})_{t_0}^{t_1} + MhT(t^F)_{t_0}^{t_1} + MhT(t^R)_{t_0}^{t_1}$$


---

### 5.2.4 Modelo buffer

**Figura 5.6** Modelo de um buffer

Um buffer, em um sistema de manufatura, pode ser interpretado como uma limitação física de armazenamento da produção, ou seja, um buffer é uma restrição de produção. Os buffers podem ser encontrados em qualquer parte da produção e podem ter os seus tamanhos variados. Como o buffer é uma limitação física de armazenamento, uma determinada máquina, que armazena sua produção em um buffer, só pode produzir se ainda houver espaço para armazenamento neste buffer. Caso não haja espaço no buffer para armazenamento, a máquina só produzirá se pelo menos um item for retirado ou consumido do buffer.

Para modelar um buffer de tamanho, digamos,  $n$  através de uma rede de Petri são

necessários dois lugares onde a soma de *tokens* destes dois lugares deve ser igual a  $n$ , e que para cada *token* introduzido em um destes lugares, obrigatoriamente um *token* deve ser retirado do outro lugar.

A Figura 5.6 ilustra um modelo de um buffer de tamanho  $n$ . Os lugares  $p^B$  e  $p^{-B}$  são lugares complementares e a soma dos *tokens* destes dois deve ser igual a  $n$ . A marcação inicial do buffer, naturalmente, dar-se-á quando o buffer está vazio. Conseqüentemente, obtém-se a marcação  $M(p^B) = n$ ,  $M(p^{-B}) = 0$ . A marcação do lugar  $p^B$  representa quanto do buffer está disponível para armazenamento, e a marcação do lugar  $p^{-B}$  representa quanto do buffer está sendo utilizado. Sendo assim, a marcação  $M(p^B) = 0$ ,  $M(p^{-B}) = n$  representa o buffer sem espaço para armazenamento, ou seja, cheio. Neste modelo, o buffer é pré-alocado antes da produção. Isto garante que a máquina só irá produzir caso o buffer tenha capacidade de armazenamento.

O disparo da transição  $t^{TP}$  indica que um item foi finalizado, e que este item será armazenado no buffer. O disparo da transição  $t^{RB}$  indica que um item foi retirado ou consumido do buffer. O consumo de um item retira um *token* do lugar  $p^{-B}$  e introduz um *token* no lugar  $p^B$ .

Algumas medidas podem ser obtidas através do modelo de um buffer. Por exemplo, em algumas ocasiões é importante se calcular qual a probabilidade do buffer estar cheio ( $BC$ ). A probabilidade do buffer estar cheio é resultado da probabilidade do lugar  $p^B$  estar com marcação igual a zero.

**Definição 5.16** ( $BC(p^B)$ ). Seja  $p^B \in P$  um lugar pertencente ao conjunto de lugares da rede  $P$  e que representa o espaço disponível no buffer de um determinado equipamento, pode-se definir a função  $BC : P \rightarrow IR[0, 1]$  que calcula a probabilidade do buffer de um determinado equipamento estar cheio como se segue:

$$BC(p^B) = P\{M(p^B) = 0\} \quad (5.23)$$

Através do modelo do buffer é possível, também, ser calculado o percentual de ocupação médio do buffer. O percentual de ocupação médio pode ser calculado como uma relação entre a esperança da marcação do lugar  $p^B$  e o tamanho do buffer  $n$ .

**Definição 5.17** ( $POB(p^B)$ ). Seja  $p^B \in P$  um lugar pertencente ao conjunto de lugares da rede  $P$  e que representa o espaço disponível no buffer de um determinado equipamento, pode-se definir a função  $POB : P \rightarrow IR[0, 1]$  que calcula o percentual de ocupação média do buffer de um determinado equipamento como se segue:

$$POB(p^B) = \frac{n - E\{M(p^B)\}}{n} = 1 - \frac{E\{M(p^B)\}}{n} \quad (5.24)$$

A definição formal do modelo buffer como uma *EHSPN* consiste em definir o mapeamento do consumo de energia e alocação de recursos humanos às transições do modelo através das funções  $E$  e  $\tau$ , respectivamente. O modelo buffer apresenta a transição não-imediata  $t^{TP}$  que representa a ação de produção. A definição formal do modelo através de uma *EHSPN* deve definir as funções  $E$  e  $\tau$  para a transição  $t^{TP}$ .

**Definição 5.18.** Seja  $N = (P, T, \pi, I, O, H, M_0, W)$  uma GSPN,  $t^{TP} \in T$  uma transição que representa a ação de produção pertencente ao conjunto de transições  $T$  da GSPN,  $E$  a função que mapeia consumo de energia ao disparo das transições,  $\tau$  a função que mapeia a alocação de recursos humanos ao disparo das transições, o modelo buffer pode ser formalmente definido como:

$$EHSPN = (N, E, \tau),$$

$$E(t) = \begin{cases} x_E^{TP} & , \quad t = t^{TP}; \\ 0 & , \quad \text{caso contrário.} \end{cases} \quad \tau(t) = \begin{cases} x_\tau^{TP} & , \quad t = t^{TP}; \\ 0 & , \quad \text{caso contrário.} \end{cases}$$

onde  $x_E^{TP}$  é o consumo de energia associado à transição  $t^{TP}$  e  $x_\tau^{TP}$  é o esforço humano necessário para realizar a atividade representada pelo disparo da transição  $t^{TP}$ .

Sendo definido formalmente o modelo buffer, as métricas relacionadas a consumo de energia e alocação de recursos humanos precisam ser redefinidas. A Tabela 5.5 apresenta um sumário destas métricas.

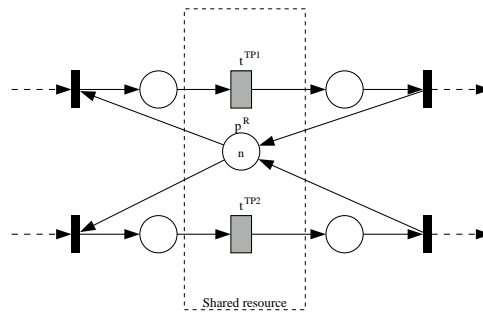
### 5.2.5 Modelo recurso compartilhado

Usualmente, em diversos sistemas de manufatura, um recurso ou máquina é compartilhado por mais de uma linha de produção. Este recurso compartilhado pode produzir para estas linhas ao mesmo tempo ou pode produzir apenas para uma linha a cada vez. Como a primeira situação é mais rara de ser encontrada em sistemas de manufatura, apenas a segunda situação será abordada neste trabalho.

No modelo de uma máquina utilizando redes de Petri, abordado anteriormente, fora representado a disponibilidade de uma máquina através de um lugar. Caso este lugar

**Tabela 5.5** Sumário de métricas para o modelo buffer

$$\begin{aligned}
Pw(t^{TP}) &= TP(t^{TP}) \times x_E^{TP} \\
Mh(t^{TP}) &= TP(t^{TP}) \times x_\tau^{TP} \\
SPw(t^{TP}) &= Pw(t^{TP}) \\
SMh(t^{TP}) &= Mh(t^{TP}) \\
PwT(t^{TP}) &= \int_{t_0}^{t_1} TP(t^{TP}) \times x_E^{TP} \\
MhT(t^{TP}) &= \int_{t_0}^{t_1} TP(t^{TP}) \times x_\tau^{TP} \\
SPwT(t^{TP}) &= PwT(t^{TP}) \\
SMhT(t^{TP}) &= MhT(t^{TP})
\end{aligned}$$

**Figura 5.7** Modelo de um recurso compartilhado

possua um *token*, a máquina está disponível e esperando para produzir, caso este lugar não possua nenhum *token*, a máquina está indisponível. Este mesmo conceito pode ser utilizado para a modelagem de um recurso compartilhado, entretanto o mesmo recurso será necessário para mais de uma linha de produção. Isto implica que, quando uma linha estiver produzindo, a outra não estará.

A Figura 5.7 ilustra o modelo de um recurso compartilhado. O lugar  $p^R$  representa o recurso compartilhado, que neste caso é compartilhado por duas linhas de produção. Quando o lugar  $p^R$  possui um *token* ambas as transições imediatas  $t^{TP1}$  e  $t^{TP2}$  estão habilitadas, entretanto estão em conflito. Caso a transição  $t^{TP1}$  seja disparada, a transição  $t^{TP2}$  não estará mais habilitada, e vice-versa. Após a produção desta linha, representada pelo disparo da transição genérica  $t^{TP1}$ , um *token* será inserido no lugar  $p^R$ , e novamente ambas as transições estarão habilitadas novamente.

O modelo de recurso compartilhado permite que novas métricas sejam medidas. Pode-se, através deste modelo, calcular qual a probabilidade do recurso compartilhado estar disponível para as linhas de produção. A probabilidade do recurso compartilhado estar disponível pode ser calculado através da probabilidade do lugar  $p^R$  ter marcação igual a

um.

**Definição 5.19** ( $PRC(p^R)$ ). Seja  $p^R \in P$  um lugar pertencente ao conjunto de lugares da rede  $P$  e que representa o recurso compartilhado, pode-se definir a função  $PRC : P \rightarrow \mathbb{R}[0, 1]$  que calcula a probabilidade do recurso compartilhado estar disponível como se segue:

$$PRC(p^R) = P\{M(p^R) = 1\} \quad (5.25)$$

A definição formal do modelo de recurso compartilhado como uma  $EHSPN$  consiste em definir o mapeamento do consumo de energia e alocação de recursos humanos às transições do modelo através das funções  $E$  e  $\tau$ , respectivamente. O modelo de recurso compartilhado apresenta duas transições não-imediatas:  $t^{TP1}$  que representa a ação de produção de uma linha de produção, e  $t^{TP2}$  que representa a ação de produção de uma segunda linha de produção. A definição formal do modelo através de uma  $EHSPN$  deve definir as funções  $E$  e  $\tau$  para as transições  $t^{TP1}$ ,  $t^{TP2}$ .

**Definição 5.20.** Seja  $N = (P, T, \pi, I, O, H, M_0, W)$  uma GSPN,  $t^{TP1} \in T$  uma transição que representa a ação de produção de uma linha de produção pertencente ao conjunto de transições  $T$  da GSPN,  $t^{TP2} \in T$  uma transição que representa a ação de produção de uma segunda linha de produção pertencente ao conjunto de transições  $T$  da GSPN,  $E$  a função que mapeia consumo de energia ao disparo das transições da GSPN,  $\tau$  a função que mapeia alocação de recursos humanos ao disparo das transições da GSPN, o modelo de recurso compartilhado pode ser formalmente definido como:

$$EHSPN = (N, E, \tau),$$

$$E(t) = \begin{cases} x_E^{TP1} & , \quad t = t^{TP1}; \\ x_E^{TP2} & , \quad t = t^{TP2}; \\ 0 & , \quad \text{caso contrário.} \end{cases} \quad \tau(t) = \begin{cases} x_\tau^{TP1} & , \quad t = t^{TP1}; \\ x_\tau^{TP2} & , \quad t = t^{TP2}; \\ 0 & , \quad \text{caso contrário.} \end{cases}$$

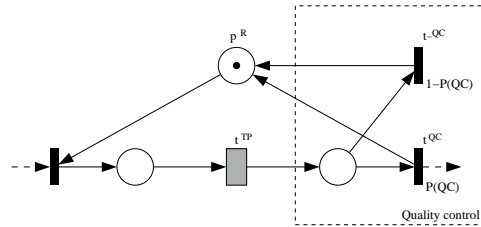
onde  $x_E^{TP1}$ ,  $x_E^{TP2}$  são os consumos de energia relacionados às transições  $t^{TP1}$  e  $t^{TP2}$ , respectivamente, e  $x_\tau^{TP1}$  e  $x_\tau^{TP2}$  são os esforços humanos necessários para realizar as atividades representadas pelo disparo das transições  $t^{TP1}$  e  $t^{TP2}$ , respectivamente.

Sendo definido formalmente o modelo de recurso compartilhado, as métricas relacionadas a consumo de energia e alocação de recursos humanos precisam ser redefinidas. A Tabela 5.6 apresenta o sumário destas métricas.

**Tabela 5.6** Sumário de métricas para o modelo de recurso compartilhado

$$\begin{aligned}
 Pw(t^{TP1}) &= TP(t^{TP1}) \times E(t^{TP1}) = TP(t^{TP1}) \times x_E^{TP1} \\
 Pw(t^{TP2}) &= TP(t^{TP2}) \times E(t^{TP2}) = TP(t^{TP2}) \times x_E^{TP2} \\
 Mh(t^{TP1}) &= TP(t^{TP1}) \times \tau(t^{TP1}) = TP(t^{TP1}) \times x_\tau^{TP1} \\
 Mh(t^{TP2}) &= TP(t^{TP2}) \times \tau(t^{TP2}) = TP(t^{TP2}) \times x_\tau^{TP2} \\
 SPw(t^{TP1}, t^{TP2}) &= Pw(t^{TP1}) + Pw(t^{TP2}) \\
 SMh(t^{TP1}, t^{TP2}, t^R) &= Mh(t^{TP1}) + Mh(t^{TP2}) \\
 PwT(t^{TP1})_{t_0}^{t_1} &= \int_{t_0}^{t_1} (TP(t^{TP1}) \times x_E^{TP1}) \times dt \\
 PwT(t^{TP2})_{t_0}^{t_1} &= \int_{t_0}^{t_1} (TP(t^{TP2}) \times x_E^{TP2}) \times dt \\
 MhT(t^{TP1})_{t_0}^{t_1} &= \int_{t_0}^{t_1} (TP(t^{TP1}) \times x_\tau^{TP1}) \times dt \\
 MhT(t^{TP2})_{t_0}^{t_1} &= \int_{t_0}^{t_1} (TP(t^{TP2}) \times x_\tau^{TP2}) \times dt \\
 SPwT(t^{TP1}, t^{TP2})_{t_0}^{t_1} &= PwT(t^{TP1})_{t_0}^{t_1} + PwT(t^{TP2})_{t_0}^{t_1} \\
 SMhT(t^{TP1}, t^{TP2})_{t_0}^{t_1} &= MhT(t^{TP1})_{t_0}^{t_1} + MhT(t^{TP2})_{t_0}^{t_1}
 \end{aligned}$$

### 5.2.6 Modelo controle de qualidade



**Figura 5.8** Modelo de controle de qualidade

O controle de qualidade é uma característica quase que obrigatória nos sistemas de manufatura atual. Este controle consiste em selecionar os produtos produzidos por uma determinada máquina que estão de acordo com as especificações do produto. O controle de qualidade pode estar presente em cada etapa da produção ou estar presente apenas na fase de acabamento do produto.

Uma das formas de se entender o controle de qualidade enquanto modelo, é através de probabilidades. Existe uma certa probabilidade do produto estar de acordo com as especificações, e existe uma probabilidade do produto não estar de acordo com as

especificações. Sendo assim, o controle de qualidade pode ser interpretado como um processo decisório com duas opções.

O processo decisório através de uma rede de Petri já fora discutido anteriormente. A decisão pode ser modelada através de duas transições imediatas, onde cada uma delas possui peso iguais às probabilidades do produto estar de acordo com as especificações e a probabilidade do produto não estar de acordo com as especificações.

A Figura 5.8 ilustra o modelo de controle de qualidade. O modelo apresenta, além do componente máquina, duas transições imediatas que representam o processo de controle de qualidade. A transição  $t^{QC}$ , quando disparada, indica que o controle de qualidade aprovou o item produzido de acordo com as especificações. Esta transição tem uma probabilidade de disparo igual a  $W(t^{QC})$ . A transição  $t^{-QC}$ , quando disparada, indica que o controle de qualidade não aprovou o item produzido de acordo com as especificações. Esta transição tem uma probabilidade de disparo igual a  $1 - W(t^{QC})$ .

A definição formal do modelo de controle de qualidade como uma *EHSPN* consiste em definir o mapeamento do consumo de energia e alocação de recursos humanos às transições do modelo através das funções  $E$  e  $\tau$ , respectivamente. O modelo de controle de qualidade apresenta a transição não-imediata  $t^{TP}$  que representa a ação de produção. A definição formal do modelo através de uma *EHSPN* deve definir as funções  $E$  e  $\tau$  para a transição  $t^{TP}$ .

**Definição 5.21.** Seja  $N = (P, T, \pi, I, O, H, M_0, W)$  uma GSPN,  $t^{TP} \in T$  uma transição que representa a ação de produção pertencente ao conjunto de transições  $T$  da GSPN,  $E$  a função que mapeia consumo de energia ao disparo das transições,  $\tau$  a função que mapeia a alocação de recursos humanos ao disparo das transições, o modelo de controle de qualidade pode ser formalmente definido como:

$$EHSPN = (N, E, \tau),$$

$$E(t) = \begin{cases} x_E^{TP} & , \quad t = t^{TP}; \\ 0 & , \quad \text{caso contrário.} \end{cases} \quad \tau(t) = \begin{cases} x_\tau^{TP} & , \quad t = t^{TP}; \\ 0 & , \quad \text{caso contrário.} \end{cases}$$

onde  $x_E^{TP}$  é o consumo de energia associado à transição  $t^{TP}$  e  $x_\tau^{TP}$  é o esforço humano necessário para realizar a atividade representada pelo disparo da transição  $t^{TP}$ .



Sendo definido formalmente o modelo de controle de qualidade, as métricas relacionadas a consumo de energia e alocação de recursos humanos precisam ser redefinidas. A Tabela 5.7 apresenta um sumário destas métricas.

**Tabela 5.7** Sumário de métricas para o modelo de controle de qualidade

$$\begin{array}{l}
 \hline
 Pw(t^{TP}) = TP(t^{TP}) \times x_E^{TP} \\
 Mh(t^{TP}) = TP(t^{TP}) \times x_\tau^{TP} \\
 SPw(t^{TP}) = Pw(t^{TP}) \\
 SMh(t^{TP}) = Mh(t^{TP}) \\
 PwT(t^{TP}) = \int_{t_0}^{t_1} TP(t^{TP}) \times x_E^{TP} \\
 MhT(t^{TP}) = \int_{t_0}^{t_1} TP(t^{TP}) \times x_\tau^{TP} \\
 SPwT(t^{TP}) = PwT(t^{TP}) \\
 SMhT(t^{TP}) = MhT(t^{TP}) \\
 \hline
 \end{array}$$

### 5.3 RESUMO

Este capítulo apresentou modelos básicos para modelagem de sistemas de manufatura através de redes de Petri. Para tanto foi utilizada uma abordagem estocástica, através das GSPN's. Através dos sete modelos apresentados e discutidos, foi possível a definição de diversas métricas. Dentre elas pode-se citar: *throughput*, probabilidade de falha de uma máquina, tempo médio no estado de falha, probabilidade de buffer cheio, percentual de ocupação média do buffer, probabilidade da quantidade mínima ser produzida para um buffer de setup, probabilidade de um recurso compartilhado estar disponível e o *throughput* após controle de qualidade. Estas métricas são genéricas, e portanto outras métricas mais específicas podem também ser definidas.

Além da discussão de modelos básicos, este capítulo também apresentou a formalização e as métricas de performance da *EHSPN*, que é, antes de mais nada, uma GSPN com anotações de energia e alocação de recursos humanos.

A partir da necessidade das empresas globalizadas e altamente competitivas de possuir sistemas produtivos mais eficiente no que diz respeito à produção, entretanto que geram o menor custo possível, as métricas tradicionais de desempenho, como *throughput*, já não são mais suficientes. Se torna necessário que outras métricas de desempenho sejam definidas e posteriormente medidas. Dentre algumas métricas importantes, pode-se citar: produtividade, confiabilidade, perdas no processo produtivo, custos de produto, consumo de energia, alocação de recursos humanos, dentre outras. Entretanto, duas

métricas vêm se tornando de fundamental importância para estas empresas. O consumo de energia elétrica vem se apresentando como um fator relevante no custo das empresas, principalmente quando se trata de indústrias de base, como por exemplo as siderúrgicas. Outro assunto de relevância para diversas indústrias é a alocação de recursos humanos. A China, país que mais cresce nos últimos anos, depende quase que totalmente da alocação de recursos humanos. Por tanto, a otimização desta alocação pode ser a diferença entre o sucesso e o fracasso para estas empresas.

A fim de contribuir no sentido de possibilitar a avaliação dessas métricas de desempenho anteriormente discutidas, foi definida a *EHSPN*, que é uma *GSPN* anotada com informações sobre consumo de energia e alocação de recursos humanos. Para tanto foram definidas duas funções adicionais  $E : T \rightarrow \mathbb{R}^+ \cup \{0\}$  e  $\tau : T \rightarrow \mathbb{R}^+ \cup \{0\}$ , que atribuem consumo de energia ao disparo das transições e necessidade de alocação de recursos humanos ao disparo das transições, respectivamente. A partir da definição destas duas funções, foi possível definir novas métricas de desempenho que levassem em conta o consumo de energia e a alocação de recursos humanos.

Foram definidas e discutidas diversas métricas de desempenho acerca consumo de energia e alocação de recursos humanos. Foi definida a métrica  $Pw(t_i)$  que calcula a potência dissipada pelo disparo da transição  $t_i$ . A métrica  $Mh(t_i)$  calcula o esforço humano gerado pelo disparo da transição  $t_i$ . A métrica  $SPw$  calcula a potência total dissipada pelo disparo de todas as transições do sistema. A métrica  $SMh$  calcula o esforço humano total gerado pelo disparo de todas as transições do sistema. A métrica  $PwT_{t_0}^{t_1}(t_i)$  calcula a potência dissipada pela transição  $t_i$  em um intervalo de tempo  $\Delta t = t^1 - t^0$ . A métrica  $MhT_{t_0}^{t_1}(t_i)$  calcula o esforço humano gerado pelo disparo da transição  $t_i$  em um intervalo de tempo  $\Delta t = t^1 - t^0$ . A métrica  $SPwT_{t_0}^{t_1}$  calcula a potência total dissipada pelo disparo de todas as transições do sistema em um intervalo de tempo  $\Delta t = t^1 - t^0$ , e a métrica  $SMhT_{t_0}^{t_1}$  calcula o esforço humano gerado pelo disparo de todas as transições do sistema em um intervalo de tempo  $\Delta t = t^1 - t^0$ .

Finalmente foi apresentado um exemplo fictício mostrando a utilização de uma *EHSPN*. O sistema produtivo apresentado neste exemplo é composto por três equipamentos. Para cada um destes equipamentos foram definidos atributos como  $\lambda(t_i)$ ,  $E(t_i)$  e  $\tau(t_i)$ , que são a taxa de disparo da transição  $t_i$ , o consumo de energia associado ao disparo da transição  $t_i$  e a necessidade de alocação de recursos humanos associada ao disparo da transição  $t_i$ , respectivamente. A partir daí foram calculadas todas as métricas de desempenho definidas de forma bastante detalhada. O resultado destas métricas foi resumido

e apresentado em uma tabela.



## CAPÍTULO 6

# METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

*Este capítulo apresenta uma metodologia de avaliação de desempenho para sistemas de manufatura considerando métricas relacionadas a consumo de energia e alocação de recursos humanos. A metodologia proposta apresenta diversas etapas, onde tem seu início em uma entrevista de reconhecimento e termina na interpretação dos dados gerados e apresentação dos resultados. Dentre estas etapas, é mostrada uma etapa onde é construído um modelo abstrato do sistema avaliado, e é mostrada uma etapa onde é construído um modelo refinado do sistema avaliado. Em ambas as etapas, os modelos são definidos formalmente através de uma EHSPN e são definidas todas as métricas relacionadas a consumo de energia e alocação de recursos humanos.*

---

### 6.1 INTRODUÇÃO

A partir da necessidade das indústrias globalizadas e altamente competitivas de ajuste da relação entre produtividade e custos, a avaliação de desempenho tradicional, onde se considera, por exemplo, a produtividade do sistema, não fornece meios suficientes para este ajuste. Como já apresentado, é de particular interesse deste trabalho métricas relacionadas a consumo de energia e alocação de recursos humanos. Para tanto é proposto um modelo, baseado nas GSPN's, com anotações de consumo de energia e alocação de recursos humanos, chamado de *EHSPN*.

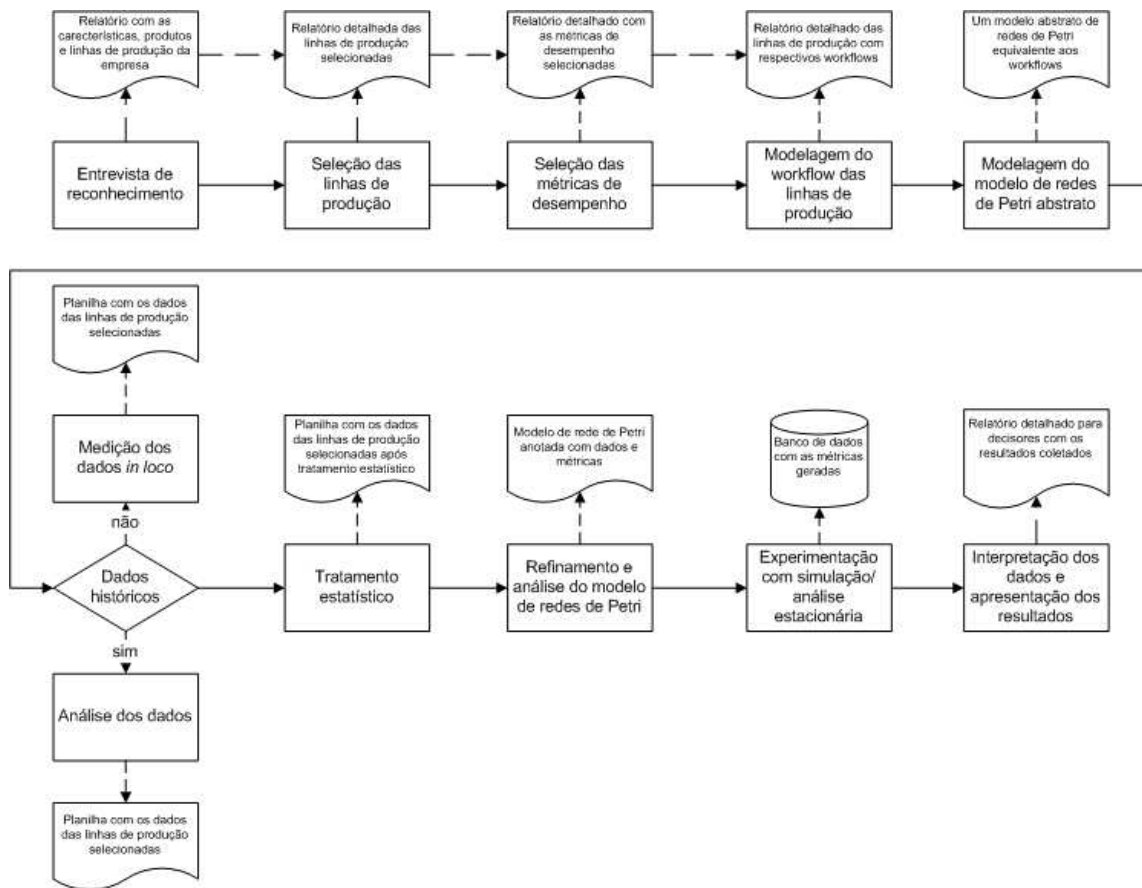
Para que os sistemas de manufatura possam ser avaliados em termos de desempenho, onde são consideradas as métricas relacionadas a consumo de energia e alocação de recursos humanos, se faz necessária a definição de uma metodologia de avaliação de desempenho que suporte estas métricas. Esta metodologia deve conter não somente a modelagem e medição destas métricas, mas deve conter todos as etapas necessárias para

o entendimento do sistema avaliado e captação dos dados para a construção e avaliação dos modelos.

A Figura 6.1 ilustra o fluxograma da metodologia de avaliação de desempenho considerando métricas relacionadas a consumo de energia e alocação de recursos humanos. A metodologia apresenta dez etapas, as quais são divididas como se segue:

- *Entrevista de reconhecimento*: é criada uma visão geral do sistema de manufatura avaliado;
- *Seleção das linhas de produção*: as linhas de produção a serem avaliadas são selecionadas e detalhadas a partir de uma visão geral do sistema de manufatura avaliado;  
a partir de uma visão geral do sistema, pode-se selecionar linhas de produção para uma avaliação mais específica. A partir desta seleção, é realizado um detalhamento das linhas de produção selecionadas;
- *Seleção das métricas*: As métricas relevantes às linhas de produção são selecionadas;
- *Modelagem do workflow das linhas de produção*: É construído um fluxograma ou *workflow* das linhas de produção selecionadas;
- *Modelagem do modelo de redes de Petri abstrato*: O *workflow* das linhas de produção são transformados em modelos de redes de Petri abstratos, permitindo que este *workflow* seja validado. É definida a *EHSPN* do modelo abstrato, bem como são modeladas as métricas selecionadas;
- *Obtenção dos dados históricos*: a partir da validação das linhas de produção através do modelo abstrato, os dados históricos relacionados a estas linhas de produção são obtidos;
- *Tratamento estatístico*: os dados históricos passam por um tratamento estatístico para que as observações anormais sejam retiradas, garantindo assim que os dados históricos são confiáveis;
- *Refinamento e análise do modelo de redes de Petri*: o modelo de redes de Petri abstrato é refinado baseado nos dados históricos após tratamento estatístico. O modelo é definido como uma *EHSPN* e as métricas são refinadas de acordo com o modelo.
- *Experimentação com simulação/análise estacionária*: a partir de um modelo refinado, são executados experimentos que permitem a criação de cenários hipotéticos para as linhas de produção, a fim de verificar o comportamento destas linhas de produção quando determinados parâmetros do sistema sofrem variação;

- *Interpretação dos dados e apresentação dos resultados*: os dados produzidos pelos experimentos são interpretados e os resultados são apresentados;



**Figura 6.1** Fluxograma da metodologia de avaliação de desempenho

## 6.2 ENTREVISTA DE RECONHECIMENTO

A primeira etapa da metodologia é a entrevista de reconhecimento. Como qualquer entrevista de reconhecimento, esta entrevista proverá uma base de conhecimento inicial, sobre o sistema a ser modelado, para que as demais etapas da metodologia possam ser executadas. É bem verdade que a metodologia poderá ser aplicada em uma empresa real e competitiva. Sendo assim, quando se fala em sistema a ser modelado, não se está restringindo à apenas o próprio sistema de manufatura, mas à empresa como um todo.

É fundamental que determinadas informações sejam produzidas nesta etapa da metodologia. O conhecimento acerca da visão da empresa para o futuro, seja ele breve ou distante, proverá que tipo de foco a execução da metodologia seguirá. Por exemplo, em algumas

situações pode ser desejável reduzir custos em detrimento da produtividade. Em outros casos, se deseja o aumento de produtividade. Portanto, a estratégia da empresa, seja ela de curto ou longo prazo causa um forte impacto na execução da metodologia. Obviamente, o nível de detalhe que será obtido para a visão dependerá de caso para caso.

Sendo definida a visão, independentemente do seu nível de detalhe, é importante entender quais são os produtos produzidos por este sistema. Tão importante quanto entender quais os produtos produzidos pelo sistema, é entender como esses produtos participam da produção no sistema. Isto é, é importante entender como os produtos produzidos participam, seja na quantidade produzida, em faturamento, em margem de contribuição, etc.

A Tabela 6.1 exemplifica a tabulação da participação dos produtos dentro de um mix de produtos. São utilizadas três abordagens diferentes nesta tabela: quantidade, faturamento e margem de contribuição. Na primeira abordagem, onde se considera a quantidade como elemento fundamental da participação do produto, os produtos *Produto C* e *Produto B*, com 43,99% e 17,60%, respectivamente, seriam, digamos, os produtos prioritários para um trabalho mais focado. Já na segunda abordagem, onde se considera o faturamento como elemento fundamental da participação, os produtos prioritários seriam o *Produto F* e o *Produto C*, com 35,84% e 23,30% de participação, respectivamente. Na última abordagem, onde se considera a margem de contribuição dos produtos, os produtos prioritários seriam o *Produto A* e o *Produto C*, com 37,93% e 22,99% de participação, respectivamente.

**Tabela 6.1** Entrevista de reconhecimento: Participação dos produtos

Descrição	Qtd	Qtd(%)	Faturamento	Faturamento (%)	Marg. de contrib.	Marg. de contrib. (%)
Produto A	1.050,00	9,24%	R\$ 5.400,00	19,35%	R\$ 3.300,00	37,93%
Produto B	2.000,00	17,60%	R\$ 1.500,00	5,38%	R\$ 300,00	3,45%
Produto C	5.000,00	43,99%	R\$ 6.500,00	23,30%	R\$ 2.000,00	22,99%
Produto D	855,00	7,52%	R\$ 3.000,00	10,75%	R\$ 700,00	8,05%
Produto E	960,00	8,45%	R\$ 1.500,00	5,38%	R\$ 500,00	5,75%
Produto F	1.500,00	13,20%	R\$ 10.000,00	35,84%	R\$ 1.900,00	21,84%
	11.365,00	100,00%	R\$ 27.900,00	100,00%	R\$ 8.700,00	100,00%

Como pode ser observado, o tipo de interpretação utilizada na participação dos produtos, pode influenciar de maneira relevante como a metodologia será executada.

Após a definição dos produtos produzidos, e como estes participam dentro deste conjunto de produtos, é importante entender como estes produtos estão distribuídos nas linhas de produção do sistema, e como estas linhas de produção estão relacionadas entre



si. É comum e esperado que uma mesma linha de produção seja capaz de produzir mais de um produto. O mapeamento dos produtos em suas respectivas linhas de produção, assim como a participação dos produtos, pode influenciar a execução da metodologia.

A Tabela 6.2 exemplifica a distribuição dos produtos apresentados na Tabela 6.1 nas linhas de produção. Para este sistema são descritas três linhas de produção, e cada uma delas é responsável por um determinado quantitativo de produtos. Realizando uma análise utilizando as três abordagens utilizadas anteriormente, pode-se constatar que a linha de produção *Linha 3* em relação à quantidade seria a mais relevante das linhas, com participação de 43,99% da quantidade produzida. Já em relação ao faturamento e à margem de contribuição, a linha de produção *Linha 1* seria a mais relevante delas.

**Tabela 6.2** Entrevista de reconhecimento: Distribuição das linhas de produção

Linha	Produtos	Qtd	Qtd(%)	Faturamento	Faturamento (%)	Marg. Contrib.	Marg. Contrib. (%)
Linha 1	Produto A	1.050,00	9,24%	R\$ 5.400,00	19,35%	R\$ 3.300,00	37,93%
	Produto E	960,00	8,45%	R\$ 1.500,00	5,38%	R\$ 500,00	5,75%
	Produto F	1.500,00	13,20%	R\$ 10.000,00	35,84%	R\$ 1.900,00	21,84%
		3.510,00	30,88%	R\$ 16.900,00	60,57%	R\$ 5.700,00	65,52%
Linha 2	Produto B	2.000,00	17,60%	R\$ 1.500,00	5,38%	R\$ 300,00	3,45%
	Produto D	855,00	7,52%	R\$ 3.000,00	10,75%	R\$ 700,00	8,05%
		2.855,00	25,12%	R\$ 4.500,00	16,13%	R\$ 1.000,00	11,49%
Linha 3	Produto C	5.000,00	43,99%	R\$ 6.500,00	23,30%	R\$ 2.000,00	22,99%
		5.000,00	43,99%	R\$ 6.500,00	23,30%	R\$ 2.000,00	22,99%

As informações produzidas nesta etapa da metodologia servirão de suporte para as próximas etapas da metodologia, mais especificamente na decisão de quais linhas de produção serão abordadas durante a execução da metodologia.

### 6.3 SELEÇÃO DAS LINHAS DE PRODUÇÃO

A etapa seguinte da metodologia envolve a seleção e o detalhamento das linhas de produção que serão abordadas durante os próximos passos da metodologia.

As informações produzidas pela etapa passada possibilita que as linhas de produção, que se deseja abordar, sejam selecionadas. Uma abordagem para esta seleção poderia ser através da análise da participação dos produtos. Como já apresentado, podem existir várias interpretações para a participação dos produtos, dentre elas participação pela

quantidade produzida, faturamento ou margem de contribuição. Utilizando a mesma Tabela 6.2 para realizar uma análise da participação de cada linha de produção, pode-se chegar à conclusão que a linha de produção *Linha 3* é a mais relevante das linhas ao se considerar a quantidade produzida como indicador. Ao se considerar o faturamento e margem de contribuição que a linha proporciona, a seleção natural seria a *Linha 1*.

Obviamente, a análise de qual linha de produção deve ser objeto de estudo da metodologia pode seguir outros critérios de avaliação. A própria estratégia da empresa pode ser utilizada como ferramenta de avaliação. Entretanto, independentemente das linhas selecionadas, o detalhamento destas linhas de produção é fundamental e deve ser realizado com maior profundidade possível. Naturalmente todo o processo de produção das linhas selecionadas deve ser entendido e mapeado. É importante que a análise do processo produtivo seja realizado da forma mais detalhada possível, chegando-se ao nível de cada equipamento da linha de produção. O mapeamento do processo produtivo pode ser desdobrado em alguns itens, como sugere a lista abaixo:

- *Concorrência e sincronização das linhas de produção*: deve ser realizada uma investigação das linhas de produção no sentido de se estabelecer quais momentos da produção essas linhas produzem concorrentemente, e quais os pontos de sincronização, se existirem, entre elas;
- *Confiabilidade*: deve ser determinado se as linhas de produção são suscetíveis a falhas, e se há um plano de contingência (redundância) para estas falhas;
- *Controle de qualidade*: devem ser determinados os pontos de controle de qualidade das linhas de produção. Este controle pode ocorrer apenas no finalização do produto, ou pode existir este controle para os produtos semi-acabados;
- *Custos*: devem ser investigados, ao menos de maneira superficial, os custos envolvidos nas linhas de produção. Os custos podem ser os mais variados possíveis, como matéria-prima, energia elétrica, recursos humanos, perdas, depreciação, entre outros.
- *Identificação*: cada linha de produção e equipamento destas linhas devem ser unicamente identificados. Isto é importante, pois tanto as linhas de produção e os equipamentos podem ser facilmente referenciados e localizados. Uma sugestão de identificação seria  $\langle id\_da\_linha \rangle . \langle id\_do\_equipamento \rangle$ . O *id* da linha de produção poderia ser representado através de três letras que dêem um sentido mnemônico ao código, e o *id* do equipamento poderia ser representado através de um número seqüencial, o qual representa a ordem do equipamento no processo produtivo;

- *Operação*: devem ser determinadas as condições mínimas de operação dos equipamentos das linhas de produção selecionadas. Dentre estas condições mínimas pode-se citar quantidade mínima de insumos para a operação da máquina, tempo para setup dos equipamentos, entre outras;
- *Recursos compartilhados*: é importante se definir dentro das linhas de produção selecionadas, quais os recursos que são compartilhados entre as linhas de produção, e como este se comporta no momento do compartilhamento;
- *Sistema de armazenamento*: O armazenamento pode acontecer em diversas fases da produção, o que geralmente se chama de estoque de produto semi-acabado. É fundamental que se determine qual a capacidade de cada componente de armazenamento do sistema;

Podem existir pontos específicos dependendo de caso para caso que devem ser relatados no detalhamento das linhas de produção, entretanto a metodologia se propões em ser a mais genérica possível.

**Tabela 6.3** Detalhamento das linhas de produção

Equipamento	Compartilhamento	Controle de Qualidade	Custos	Falhas	Redundância
Lin1.001	Não	Não	MP;E;RH	Sim	Não
Lin1.002	Lin3.002	Não	MP;E;RH	Sim	Não
Lin1.003	Não	Não	MP;E;RH	Sim	Não
Lin3.001	Não	Não	MP;E;RH	Sim	Não
Lin3.002	Lin1.002	Não	MP;E	Sim	Não
Lin3.003	Não	Não	MP;E;RH	Sim	Não

A Tabela 6.3 resume as informações coletadas acerca das linhas de produção selecionadas. O identificador de cada equipamento das linhas de produção selecionadas, no caso a *Linha 1* e *Linha 3*, são definidos na primeira coluna. As demais colunas abordam detalhes destes equipamentos. No detalhamentos dos custos deste equipamentos foram utilizadas três elementos: *MP*, *E*, *RH*. O elemento *MP* indica que o custo de matéria-prima para este equipamento é relevante. Os elementos *E* e *RH* indicam que energia elétrica e recursos humanos são custos relevantes para esta linha de produção.

Não necessariamente, os pontos abordados nesta etapa da metodologia aparecerão nos modelos que serão construídos na metodologia, entretanto todos estes pontos são fundamentais para que sejam tomadas as melhores decisões na modelagem.

## 6.4 SELEÇÃO DAS MÉTRICAS DE DESEMPENHO

A seleção e detalhamento das linhas de produção, a qual foi discutida anteriormente, gera um quantitativo de informações acerca destas linhas, entretanto é necessário realmente se definir quais as métricas serão utilizadas para a avaliação de desempenho do sistema estudado. Estas métricas influenciarão diretamente na modelagem do sistema, e portanto devem ser definidas com cautela.

Naturalmente uma primeira métrica a ser definida é acerca da produtividade do sistema, isto é, quantos itens são produzidos em uma unidade de tempo. Esta métrica pode ser representada através do *throughput* do sistema. Obviamente, se o sistema estudado possui controle de qualidade, estes itens produzidos deverão respeitar algum tipo de especificação.

Obviamente, outras métricas de desempenho podem ser utilizadas para o sistema estudado. Ao se constatar que as paradas dos equipamentos são relevantes, seja em função de falha ou quebra, podem ser selecionadas métricas de desempenho capazes de capturar estas informações. Também podem ser selecionadas métricas relacionadas com o custo de produção do equipamento. Como já discutido, existem diversos custos relacionadas à produção. Por exemplo, custo com matéria-prima, com energia elétricas, etc.

Os custos envolvidos na produção, em se tratando de métricas de desempenho, devem ser abordados de maneira diferenciada das outras métricas de desempenho. Deve ser investigado se este custo é realmente atrelado à produtividade do sistema estudado, isto é, existe algum tipo de função que relaciona a produção a um custo. Caso esta seja uma função constante, não existe sentido em se selecionar uma métrica de desempenho para este custo.

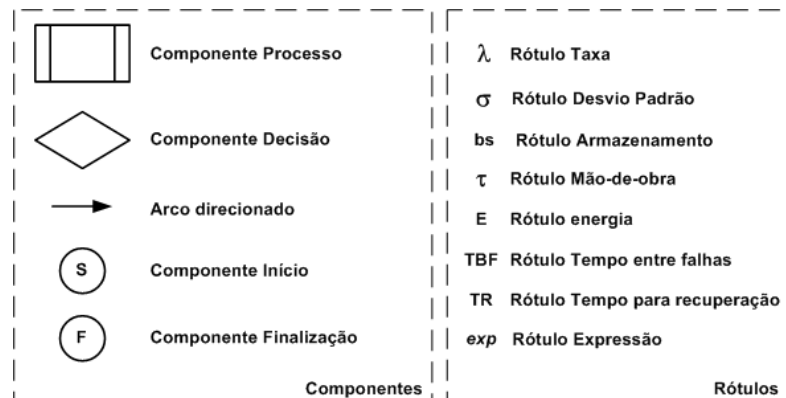
As métricas de desempenho podem ser consolidadas em uma tabela, como ilustrado na Tabela 6.4. Pode ser observado que a Tabela 6.4 é, na verdade, uma atualização da Tabela 6.3. A tabela mostra, por exemplo, que o equipamento *Lin1.001* não possui compartilhamento, nem controle de qualidade relacionado e apresenta energia elétrica, falhas e produtividade como métricas de desempenho relevantes para análise.

## 6.5 MODELAGEM DO WORKFLOW DAS LINHAS DE PRODUÇÃO

Até este ponto da metodologia, nenhuma representação esquemática gráfica foi utilizada para as linhas de produção. Uma representação gráfica permite, com certa facilidade,

**Tabela 6.4** Detalhamento das linhas de produção selecionadas com métricas de desempenho

Equipamento	Compartilhamento	Controle de Qualidade	Custos	Falhas	Produtividade	Redundância
Lin1.001	Não	Não	E	Sim	Sim	Não
Lin1.002	Lin3.002	Não	E	Sim	Sim	Não
Lin1.003	Não	Não	E;RH	Sim	Sim	Não
Lin3.001	Não	Não	E	Sim	Sim	Não
Lin3.002	Lin1.002	Não	E	Sim	Sim	Não
Lin3.003	Não	Não	E;RH	Sim	Sim	Não

**Figura 6.2** Componentes básicos do *workflow*

validar se todas as informações acerca destas linhas de produção, e inclusive, o funcionamento das mesmas estão corretas. Uma forma de se apresentar as linhas de produção graficamente é através de fluxogramas ou *workflows*.

Um *workflow* pode apresentar diversos tipos de componente, entretanto este trabalho apresenta alguns componentes pré-definidos. A Figura 6.2 apresenta estes componentes básicos.

O componente *Processo* pode ser utilizado para modelar qualquer processo de uma linha de produção, independentemente se o processo é um equipamento ou um conjunto de equipamentos. Um componente *Processo* pode receber quantos arcos de entrada quanto forem necessários. Da mesma forma ocorre para os arcos de saída. A presença de mais de um arco de entrada significa que este componente é compartilhado na linha de produção, e a presença de mais de um arco de saída indica que o compartilhamento foi finalizado e as linhas de produção podem produzir paralelamente.

O componente *Decisão* é utilizado para modelar uma situação de decisão na linha de produção. É comum existirem situações de decisão nos processos produtivos. Por exemplo, pode existir uma determinada condição para que a linha de produção possa dar prosseguimento ao processo. O componente *Decisão* recebe um arco de entrada e

pode apresentar dois arcos de saída. Cada um destes arcos de saída representa uma das possíveis decisões.

O componente *Arco dirigido* é utilizado para interconectar todos os componentes do *workflow*. A direção do arco indica o sentido do processo produtivo. Caso se deseje representar um processo circular, não é permitido que se utilize um arco bidirecionado, mas dois arcos direcionados.

Os componentes *Início* e *Finalização* são utilizados para representar o início e fim do processo produtivo, respectivamente. O componente *Início* pode ser conectado, através de um arco direcionado, a um componente *Processo* ou a um componente *Decisão*. O componente *Finalização* só pode ser conectado a um componente *Processo*. Esta regra é válida, dado que não há sentido em uma decisão sem uma ação posterior. O número de componentes *Início* e *Finalização* utilizados no *workflow* irá depender do número de linhas de produção modeladas.

Os componentes por si só não são suficientes para a definição da linha de produção através de um *workflow*. Para complementar a definição dos componentes, alguns rótulos podem ser utilizados para tal finalidade. O rótulo  $\lambda$  é utilizado para representar que um determinado componente é produtivo. Portanto, apenas os componentes *Processo* podem ser rotulados com  $\lambda$ .

O rótulo  $\sigma$  é utilizado para indicar que um determinado componente é produtivo, porém sua produtividade possui variação. Caso a não haja variabilidade, não é necessário que o rótulo  $\sigma$  seja utilizado, portanto o processo pode ser considerado determinístico. Naturalmente, apenas componentes *Processo* podem utilizar este rótulo.

O rótulo  $bs$  é utilizado para indicar que um determinado componente é um processo de armazenamento. Este rótulo é incompatível com o rótulo  $\lambda$ , pois os processos produtivos devem ser modelados separadamente dos processos de armazenamento.

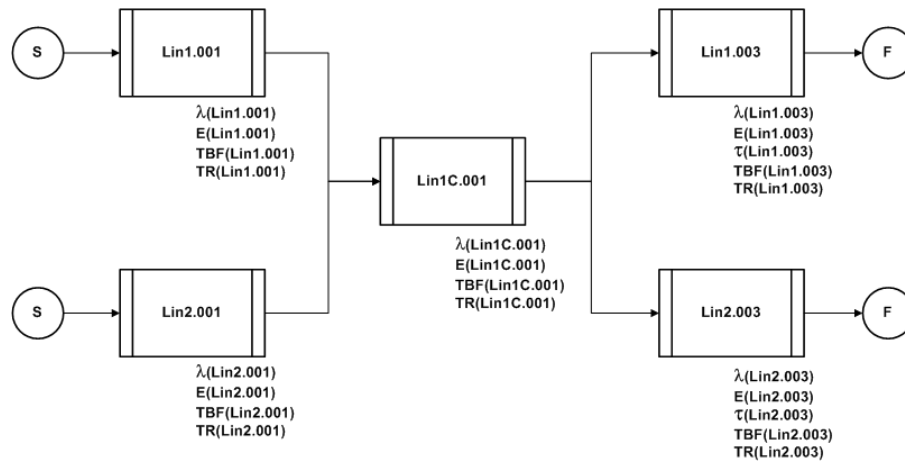
O rótulo  $\tau$  é utilizado para indicar que um determinado componente requer mão-de-obra, isto é, o processo é dependente de recursos humanos. A ausência do rótulo  $\tau$  não quer dizer que o componente não utiliza recursos humanos, mas que o quantitativo destes recursos não depende da produtividade do componente.

O rótulo  $E$  é utilizado para indicar que um determinado componente requer energia elétrica para a execução de suas atividades. De forma semelhante ao rótulo  $\tau$ , a ausência do rótulo  $E$  não indica que o processo não requer energia elétrica, mas que esta energia elétrica não é variável em relação à sua produtividade.

Os rótulos  $TBF$  e  $TR$  são utilizados para indicar que determinado componente pode

eventualmente falhar. Esta falha ocorre em um determinado intervalo de tempo ( $TBF$ ) e leva um certo tempo até que o equipamento esteja recuperado da falha ( $TR$ ).

O rótulo  $exp$  é utilizado para representar uma expressão livre. Ele pode ser utilizado para representar algum tipo de pré-condição ou pós-condição.



**Figura 6.3** Exemplo de um workflow

Um exemplo de aplicação do *workflow* é ilustrado na Figura 6.3. Como pode ser observado na figura, o workflow apresenta duas linhas de produção paralelas. Cada uma delas apresenta três componentes *Processo*, onde um deles, o componente  $Lin1C.001$ , é um componente compartilhado por estas duas linhas de produção. Inspeccionando detalhadamente a primeira linha de produção, identificada por  $Lin1$ , observa-se que a linha de produção tem início no componente  $Lin1.001$ , o qual é rotulado com os rótulos  $\lambda(Lin1.001)$ ,  $E(Lin1.001)$ ,  $TBF(Lin1.001)$  e  $TR(Lin1.001)$ . Isto implica em dizer que o componente  $Lin1.001$  é produtivo, que requer energia elétrica na sua produção e que pode eventualmente falhar.

O componente  $Lin1C.001$ , como já apresentado, é um componente compartilhado pelas duas linhas de produção. A partir dos rótulos utilizados no componente pode-se dizer que o componente é produtivo, que consome energia elétrica na produção, e que pode eventualmente falhar. É importante ressaltar um detalhe neste componente compartilhado. Caso a produtividade deste equipamento dependa da entrada, ou seja, dependa de qual linha de produção está alocando o recurso, é recomendável a utilização de pelo menos dois rótulos  $\lambda$ . Isto representará no *workflow* que o componente depende de qual linha o está alocando.

O componente  $Lin1.003$  é um componente produtivo, que depende de energia elétrica

na produção, que pode eventualmente falhar, e, diferentemente dos outros componentes, requer mão-de-obra na produção (indicado pela utilização do rótulo  $\tau$ ).

A modelagem das linhas de produção através do *workflow* deve determinar o nível de abstração a ser utilizado. Obviamente, uma decisão incorreta nesta etapa influenciará negativamente toda a execução da metodologia. É importante neste momento que todas as informações estratégicas envolvidas no sistema estejam alinhadas com a modelagem do *workflow*.

## 6.6 MODELO DE REDE DE PETRI ABSTRATO

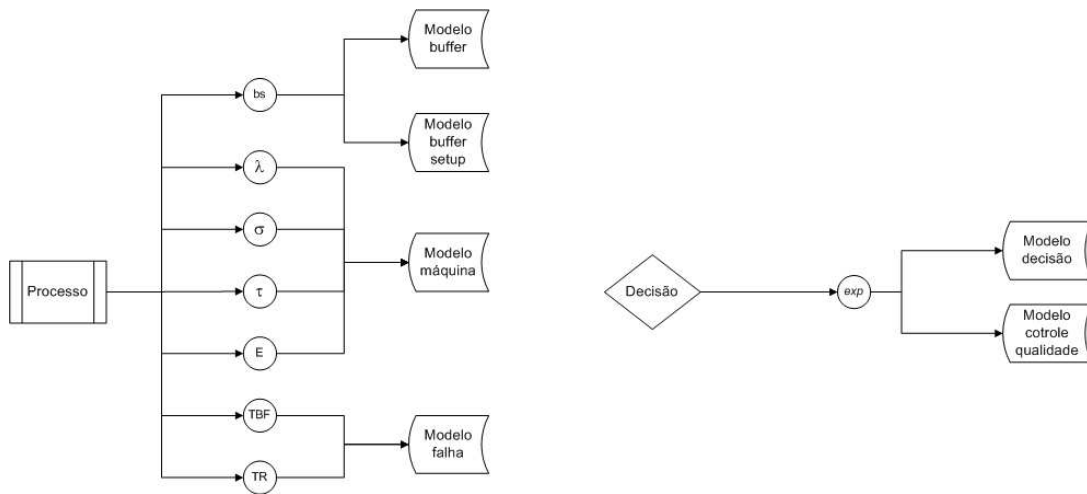
Uma das grandes vantagens em se utilizar redes de Petri como ferramenta formal de avaliação de desempenho é o seu apelo visual. A utilização de uma rede de Petri abstrata para representar um determinado *workflow*, além de fornecer uma ferramenta para validação do mesmo, fornecerá o modelo de redes de Petri base para as próximas etapas da metodologia.

A validação do *workflow* das linhas de produção podem ocorrer de diversas maneiras. Uma primeira opção é realizar uma validação visual utilizando o recurso *token game*, que consiste em uma simulação visual da rede de Petri. Uma outra opção é a verificação de propriedades das redes de Petri. A validação através do *token game* garantirá que o modelo abstrato é equivalente, ao menos em termos de fluxos, ao *workflow*. A verificação de propriedades do modelo abstrato garantirá que o modelo respeita algumas propriedades fundamentais para a avaliação do sistema, como limitação [38], *liveness* e ausência de deadlock [11, 15], entre outras. Além disso a verificação de propriedades verifica se o modelo abstrato respeita uma determinada especificação.

A modelagem da rede de Petri abstrata, que representa o *workflow* das linhas de produção, deve respeitar algumas regras básicas. Cada componente definido na simbologia do *workflow*, juntamente com os seus rótulos, será representado por um dos modelos básicos apresentado no Capítulo 5. A Figura 6.4 ilustra as regras de como a modelagem do modelo de rede de Petri abstrato deve ser realizado a partir dos componentes e rótulos do *workflow*.

O componente *Processo* rotulado com o rótulo *bs* indica que este componente é um componente de armazenamento ou de *buffering*. Desta forma, um dos dois modelos básicos referentes a armazenamento, *Modelo buffer* e *Modelo buffer de setup*, devem ser utilizados.





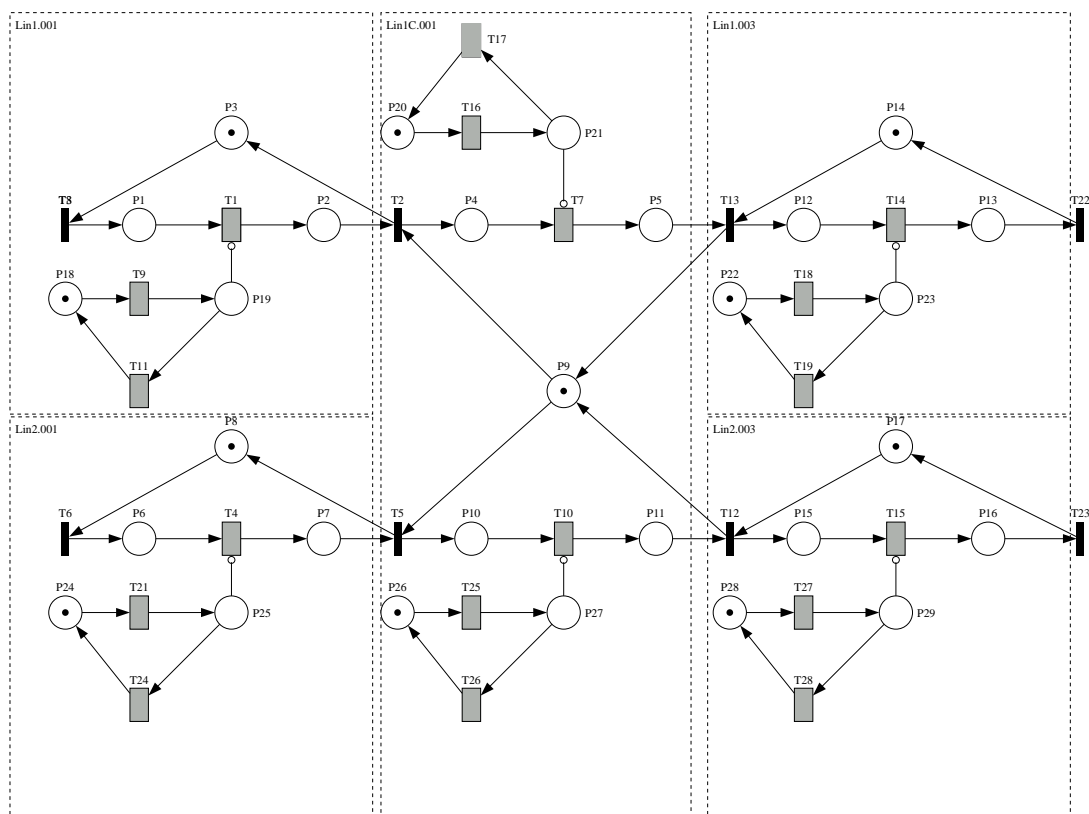
**Figura 6.4** Regras de construção do modelo de rede de Petri abstrato.

O componente *Processo* rotulado com os rótulos  $\lambda$ ,  $\sigma$ ,  $E$  e  $\tau$  indica que o processo é produtivo. Na verdade, apenas a presença do rótulo  $\lambda$  indica que o processo é produtivo. Desta forma o *Modelo máquina* deve ser utilizado na modelagem. Os rótulos *TBF* e *TR* quando utilizados juntamente com os demais apresentados para o componente *Processo*, indica que o processo que, além de o processo ser produtivo, ele pode eventualmente falhar. Sendo assim, o *Modelo falha* deve ser utilizado.

O componente *Decisão* permite apenas que um rótulo seja utilizado, que neste caso é o rótulo *exp*. Os modelos básicos equivalentes ao componente *Decisão* são *Modelo decisão* e *Modelo controle de qualidade*. O rótulo *exp* pode tanto indicar as opções de decisão a serem tomadas, como também pode indicar a probabilidade das decisões ocorrerem.

Definidas as regras de modelagem para a transformação do *workflow* para o modelo de redes de Petri abstrato, então o *workflow* ilustrado na Figura 6.3 pode ser modelado através de uma rede de Petri. A Figura 6.5 ilustra o modelo de rede de Petri abstrato equivalente ao *workflow*. Deve ser notado que ainda são utilizadas, no modelo abstrato, transições genéricas. Estas transições serão refinadas em etapas posteriores da metodologia.

Além da criação do modelo abstrato, esta etapa já deve definir as métricas que serão utilizadas para avaliação do sistema, mesmo que estas métricas estejam no nível abstrato. Uma primeira métrica que pode ser definida para tal modelo é o *throughput* do sistema, ou seja, a quantidade de itens que são produzidos pelo sistema em uma unidade de tempo. No caso deste modelo abstrato, o *throughput* do sistema, na verdade, deve ser



**Figura 6.5** Modelo de rede de Petri abstrato

representado pelo *throughput* da linha *Lin1* e o *throughput* da linha *Lin2*.

A definição formal do modelo abstrato através de uma *EHSPN* consiste em definir o mapeamento de consumo de energia e alocação de recursos humanos às transições através das funções  $E$  e  $\tau$ , respectivamente. Sendo assim o modelo abstrato pode ser definido formalmente como:

$$EHSPN = (N, E, \tau),$$

onde

$$E(t) = \begin{cases} x_E^{T1} & , t = t^{T1}; \\ x_E^{T4} & , t = t^{T4}; \\ x_E^{T7} & , t = t^{T7}; \\ x_E^{T10} & , t = t^{T10}; \\ x_E^{T14} & , t = t^{T14}; \\ x_E^{T15} & , t = t^{T15}; \\ 0 & , \text{ caso contrário.} \end{cases} \quad e \quad \tau(t) = \begin{cases} x_\tau^{T14} & , t = t^{T14}; \\ x_\tau^{T15} & , t = t^{T15}; \\ 0 & , \text{ caso contrário.} \end{cases}$$

As métricas relacionadas a consumo de energia e alocação de recursos humanos também podem ser definidas. As métricas podem ser definidas individualmente para cada equipamento do modelo, ou podem ser definidas para o sistema. A definição de tais métricas requer, novamente, a avaliação dos rótulos utilizados nos componentes do *workflow*. A presença dos rótulos  $E$  e  $\tau$  define se o componente consome energia e se requer mão-de-obra, respectivamente. Após análise do *workflow* percebe-se que todos os componentes requerem energia elétrica, e que apenas os componentes *Lin1.003* e *Lin2.003* realizam alocação de recursos humanos. A Tabela 6.5 mostra um resumo de métricas relacionadas a consumo de energia e alocação de recursos humanos que poderiam ser utilizadas para avaliação do modelo abstrato. Bem como o modelo, as métricas deverão ser refinadas em etapas posteriores da metodologia.

**Tabela 6.5** Resumo de métricas para o modelo abstrato

$TP(Lin1.003)$	$\Rightarrow TP(T14) = P\{M[T14 >]\} \times \lambda(T14)$
$TP(Lin2.003)$	$\Rightarrow TP(T15) = P\{M[T15 >]\} \times \lambda(T15)$
$Pw(Lin1.001)$	$\Rightarrow Pw(T1) = TP(T1) \times x_E^{T1}$
$Pw(Lin1.003)$	$\Rightarrow Pw(T14) = TP(T14) \times x_E^{T14}$
$Pw(Lin2.001)$	$\Rightarrow Pw(T4) = TP(T4) \times x_E^{T4}$
$Pw(Lin2.003)$	$\Rightarrow Pw(T15) = TP(T15) \times x_E^{T15}$
$Pw(Lin1C.001)$	$\Rightarrow Pw(T7) + Pw(T10) = [TP(T7) \times x_E^{T7}] + [TP(T10) \times x_E^{T10}]$
$SPw$	$\Rightarrow Pw(Lin1.001) + Pw(Lin1.003) + Pw(Lin2.001) + Pw(Lin1.003) + Pw(Lin1C.001)$
$PwT(Lin1.001)_{t_0}^{t_1}$	$\Rightarrow PwT(T1)_{t_0}^{t_1} = \int_{t_0}^{t_1} (TP(T1) \times x_E^{T1}) \times dt$
$PwT(Lin1.003)_{t_0}^{t_1}$	$\Rightarrow PwT(T14)_{t_0}^{t_1} = \int_{t_0}^{t_1} (TP(T14) \times x_E^{T14}) \times dt$
$PwT(Lin2.001)_{t_0}^{t_1}$	$\Rightarrow PwT(T4)_{t_0}^{t_1} = \int_{t_0}^{t_1} (TP(T4) \times x_E^{T4}) \times dt$
$PwT(Lin2.003)_{t_0}^{t_1}$	$\Rightarrow PwT(T15)_{t_0}^{t_1} = TP(T15) \times x_E^{T15}$
$PwT(Lin1C.001)_{t_0}^{t_1}$	$\Rightarrow PwT(T7)_{t_0}^{t_1} + PwT(T10)_{t_0}^{t_1} = [\int_{t_0}^{t_1} (TP(T7) \times x_E^{T7}) \times dt] + [\int_{t_0}^{t_1} (TP(T10) \times x_E^{T10}) \times dt]$
$SPwT_{t_0}^{t_1}$	$\Rightarrow PwT(Lin1.001)_{t_0}^{t_1} + PwT(Lin1.003)_{t_0}^{t_1} + PwT(Lin2.001)_{t_0}^{t_1} + PwT(Lin1.003)_{t_0}^{t_1} + PwT(Lin1C.001)_{t_0}^{t_1}$
$Mh(Lin1.003)$	$\Rightarrow Mh(T14) = TP(T14) \times x_\tau^{T14}$
$Mh(Lin2.003)$	$\Rightarrow Mh(T15) = TP(T15) \times x_\tau^{T15}$
$SMh$	$\Rightarrow Mh(Lin1.003) + Mh(Lin2.003)$
$MhT(Lin1.003)_{t_0}^{t_1}$	$\Rightarrow MhT(T14)_{t_0}^{t_1} = \int_{t_0}^{t_1} (TP(T14) \times x_\tau^{T14}) \times dt$
$MhT(Lin2.003)_{t_0}^{t_1}$	$\Rightarrow MhT(T15)_{t_0}^{t_1} = TP(T15) \times x_\tau^{T15}$
$SMh_{t_0}^{t_1}$	$\Rightarrow MhT(Lin1.003)_{t_0}^{t_1} + MhT(Lin2.003)_{t_0}^{t_1}$

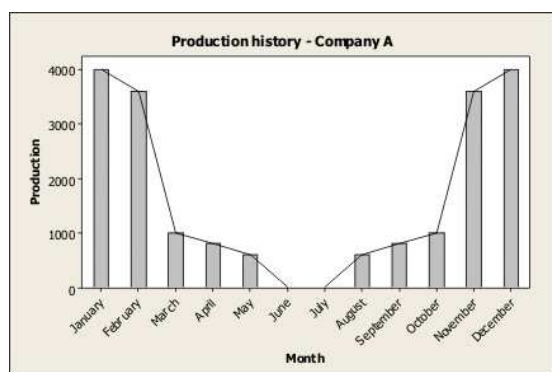
## 6.7 OBTENÇÃO DE DADOS HISTÓRICOS

Até esta etapa da metodologia, a abordagem da modelagem do sistema estava em um alto nível de abstração. Para que o sistema seja refinado, é necessário que se obtenha ou se colete dados precisos acerca de tal sistema. Os dados gerados a partir desta etapa

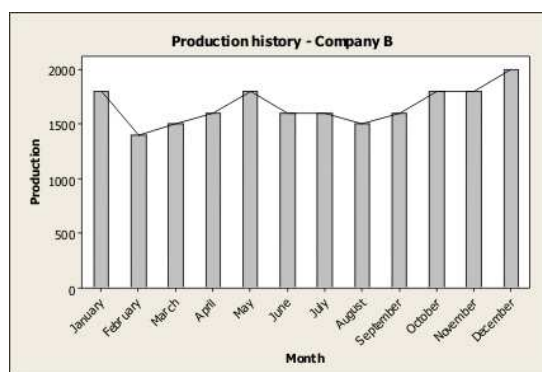
exercerão forte influência sobre as demais etapas, e sendo assim, deve ser realizada de forma mais criteriosa possível.

Duas são as situações que podem ser encontradas em relação aos dados históricos: a) Os dados históricos estão disponíveis e são confiáveis. b) Os dados históricos não estão disponíveis. Quando os dados históricos estão disponíveis, o que seria uma situação mais simples, é necessário que os dados sejam organizados e analisados. Esta organização se refere ao alinhamento dos dados ao nível de abstração selecionado. A análise consiste em avaliar se os dados apresentados realmente representam a realidade das linhas de produção.

Antes mesmo de os dados serem organizados e analisados, é necessário definir o tamanho da amostra dos dados históricos. Diversos sistemas produtivos são passivos de sazonalidade. Períodos sazonais não representam de forma fidedigna as linhas de produção, e portanto devem ser retirados da amostra dos dados históricos.



**Figura 6.6** Boletim anual de produção para a *Empresa A*



**Figura 6.7** Boletim anual de produção para a *Empresa B*

Por exemplo, vamos supor uma *Empresa A* a qual tem o seu boletim anual de produção ilustrado na Figura 6.6. Pode ser facilmente identificado que a *Empresa A* possui uma produção sazonal. Por exemplo, os meses de pico da produção são de novembro a fevereiro, enquanto os meses de recesso são junho e julho. Através de uma análise de Pareto, pode-se constatar que entre os meses de novembro e fevereiro é realizada 70% da produção anual da *Empresa A*.

Vamos supor agora uma *Empresa B* a qual tem o seu boletim anual de produção ilustrado na Figura 6.7. Visualmente pode-se observar que a produção para *Empresa B* não possui sazonalidade, e que através de uma análise de Pareto conclui-se que oito meses (67% do ano) são responsáveis por 70% da produção anual.

Uma situação mais complicada é quando os dados históricos não estão disponíveis. Esta situação é um tanto rara nos sistemas de manufatura atuais. A coleta destes dados deve ser realizada *in loco* nas linhas de produção. Além desta situação requerer mais esforço, pois a medição pode durar meses ou até um ano inteiro, métodos de controle estatísticos [34] devem ser utilizados para que dados confiáveis sejam coletados.

Infelizmente é impossível prever o comportamento anual da produção, a não ser que a amostragem dos dados seja no período de um ano. Sabe-se, então, que é inviável este tipo de amostragem. Uma primeira situação é a execução de um experimento da linha de produção simulando condições reais de produção. Uma outra solução seria a detecção, durante a entrevista de reconhecimento, do período ideal para a medição dos dados *in loco*.

Após a obtenção dos dados, seja através dos dados históricos ou através de medição *in loco*, é preciso que os dados sejam organizados para análise e um posterior tratamento estatístico. A modelagem das linhas de produção através de um *workflow* e um modelo de redes de Petri abstrato fornece o nível de abstração das linhas de produção que será usado na avaliação. Desta forma os dados obtidos nesta etapa da metodologia devem ser organizados para que o nível de abstração utilizado seja respeitado.

A Tabela 6.6 apresenta os dados históricos para o componente *Lin1.001* do workflow ilustrado na Figura 6.3. A tabela apresenta dados para este equipamento como o boletim diário de produção, e a quantidade de paradas por falha e tempo de recuperação. Uma breve análise desta amostra revela que o componente *Lin1.001* produz em média 7.184,56 ítems por dia com desvio padrão igual a 1.406,45, e que este equipamento permanece 4,5% do seu tempo parado em decorrência de paradas por falhas.

## 6.8 TRATAMENTO ESTATÍSTICO

O objetivo do tratamento estatístico é permitir que os dados obtidos na fase anterior da metodologia não apresentem anormalidades, ou melhor dizendo, não apresentem discrepâncias estatísticas.

Antes de realizar o tratamento estatístico dos dados gerados pela etapa anterior da metodologia, é importante observar algumas estatísticas destes dados como média, desvio-padrão<sup>1</sup> e variância, quartis, etc. A partir do cálculo destas estatísticas é possível realizar uma análise afim de retirar as anormalidades das séries de dados. Uma maneira de se

---

<sup>1</sup>A média e o desvio-padrão serão fundamentais no refinamento do modelo de redes de Petri.

**Tabela 6.6** Amostra de dados históricos para a linha de produção *Lin1*

Data	Lin1.001			Lin1C.001			Lin1.003		
	P*	SbF**	TR***	P	SbF	TR	P	SbF	TR
01/01/2006	5.736,83	0	0	5721,33	1	4	6748,38	0	0
02/01/2006	10.920,12	0	0	6223,58	0	0	3985,00	0	0
03/01/2006	6.590,06	1	1	6572,27	0	0	6024,58	0	0
04/01/2006	6.614,54	0	0	6560,65	0	0	5691,22	0	0
05/01/2006	6.502,36	0	0	6468,90	0	0	7112,48	0	0
06/01/2006	8.844,22	0	0	11354,21	0	0	7251,34	0	0
07/01/2006	6.562,76	1	3	6523,67	0	0	6364,47	0	0
08/01/2006	6.302,66	1	8	6252,47	0	0	7204,49	0	0
09/01/2006	7.250,99	1	0,5	7180,72	1	3,5	6350,38	0	0
10/01/2006	7.288,14	0	0	7280,22	0	0	6206,33	0	0
11/01/2006	8.198,96	1	2	8180,12	0	0	6559,95	0	0
12/01/2006	5.000,00	1	1,5	8499,05	0	0	7277,58	0	0
13/01/2006	7.260,32	1	0,3	6795,93	0	0	7090,03	0	0
14/01/2006	7.941,85	0	0	7908,74	0	0	7317,20	0	0
15/01/2006	6.754,54	0	0	1350,22	2	10	500,00	1	18

\* Produção

\*\* Parada por falha

\*\*\* Tempo de recuperação

detectar anormalidades ou *outliers* é baseado no método *IIQ* - *Intervalo Interquartil* ou *IQR* - *Interquartile range*[35]. Uma observação estatística é considerada um *outlier* caso se este está  $1,5 \times IIQ$  acima do terceiro quartil ou se este está  $1,5 \times IIQ$  abaixo do primeiro quartil. Uma maneira de visualizar o resultado da aplicação do método *IIQ* nos dados é através de gráfico de caixa, que na verdade é um resumo que contém o mínimo e máximo da série, o primeiro quartil e terceiro quartil, e a mediana, sendo os *outliers* identificados individualmente.

Através do *IIQ* os dados apresentados na Tabela 6.6 podem ser estatisticamente tratados. A Figura 6.8 ilustra o gráfico de caixa para os dados do modelo de redes de Petri abstrato. Após a remoção dos *outliers*, que são marcados com um asterisco, todas as estatísticas devem ser calculadas novamente. A Figura 6.9 e a Figura 6.10 ilustram um sumário das estatísticas do boletim diário de produção do componente Lin1.001 antes e depois do tratamento estatístico, respectivamente. A Tabela 6.7 mostra as estatísticas do componente *Lin1.001*.

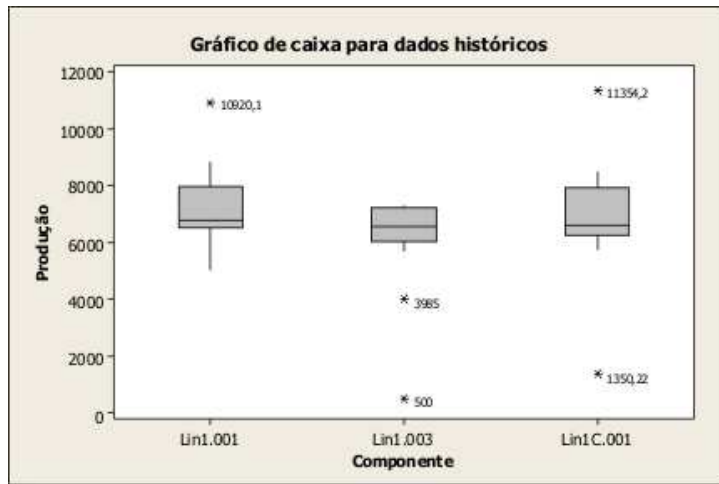


Figura 6.8 Gráfico de caixa para os dados do modelo abstrato.

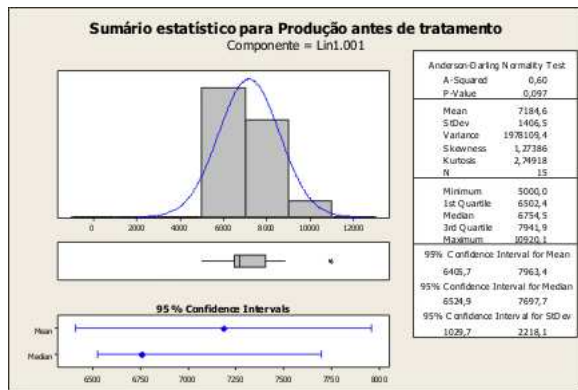


Figura 6.9 Sumário estatístico do boletim diário de produção do componente Lin1.001 antes de tratamento estatístico.

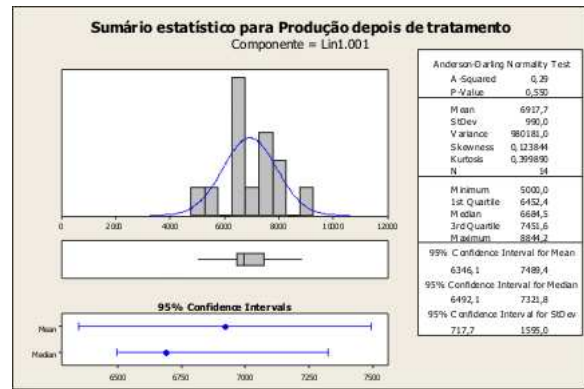


Figura 6.10 Sumário estatístico do boletim diário de produção do componente Lin1.001 depois de tratamento estatístico.

## 6.9 REFINAMENTO E ANÁLISE DO MODELO DE REDES DE PETRI

O modelo refinado de redes de Petri, o qual utiliza como o base o modelo abstrato produzido em etapas anteriores (Capítulo 6.6, deve ser capaz de permitir a medição de todas as métricas selecionadas. Na verdade, o modelo abstrato pode ser refinado quantas vezes forem necessárias, entretanto cada um destes modelos refinados devem ser equivalentes. Por exemplo, em um primeiro momento pode não se desejar a modelagem das falhas dos equipamentos. O refinamento do modelo abstrato deve seguir algumas etapas, entretanto alguns pontos devem ser observados:

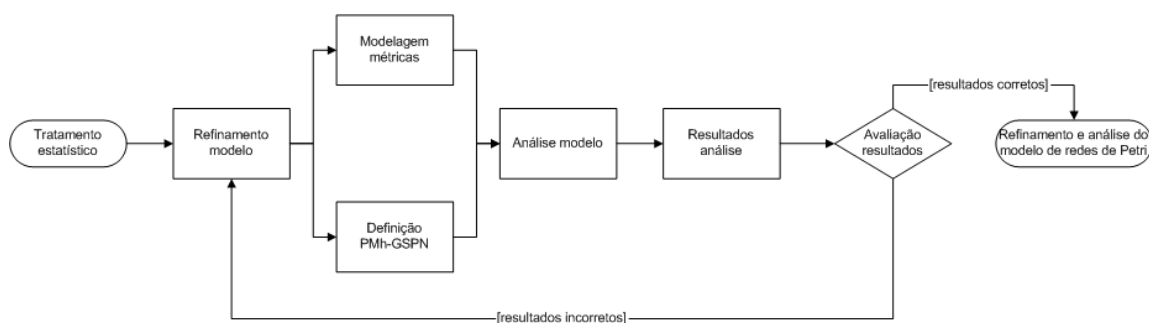
1. O nível de abstração utilizado no modelo abstrato pode não ser adequado para

**Tabela 6.7** Estatísticas para do componente Lin1.001

Estatística	Produção	Paradas por falhas	Tempo de reparo
Mínimo	5.000,00	0,00	0,00
1-Quartil	6.452,40	0,00	0,00
Mediana	6.684,50	0,50	0,15
3-Quartil	7.451,60	1,00	1,62
Máximo	8.844,20	1,00	8,00
Média	6.917,70	0,50	1,16
Desvio Padrão	990,00	0,52	2,17

avaliar o sistema de forma precisa, portanto o modelo abstrato pode ser desdobrado em vários outros modelos;

2. As GSPN's modelam apenas distribuições de probabilidade exponenciais, onde  $\mu_\lambda = \sigma_\lambda$ , entretanto é bastante comum se encontrar distribuições de probabilidade não-exponenciais, onde  $\mu_\lambda \neq \sigma_\lambda$ . Desrochers et. al.[16] mostram como modelar distribuições de probabilidade não-exponenciais utilizando uma abordagem de aproximação por fases.

**Figura 6.11** Fluxograma para refinamento do modelo abstrato

A Figura 6.11 ilustra o fluxograma para refinamento do modelo abstrato de redes de Petri. Um primeiro passo do fluxograma de refinamento, é o refinamento do modelo abstrato. O primeiro passo do fluxograma consiste em realizar um refinamento inicial do modelo abstrato. Em seguida, este modelo deve ser formalmente definido através de uma *EHSPN* e suas métricas devem ser definidas. A partir daí o modelo refinado deve ser analisado e seus resultados avaliados. Para esta análise, diversas ferramentas computacionais podem ser utilizadas, dentre elas o TimeNET[19, 56] e GreatSPN[9]. Caso os resultados estejam corretos e sejam satisfatórios o fluxograma termina, senão o modelo deve ser refinado novamente.





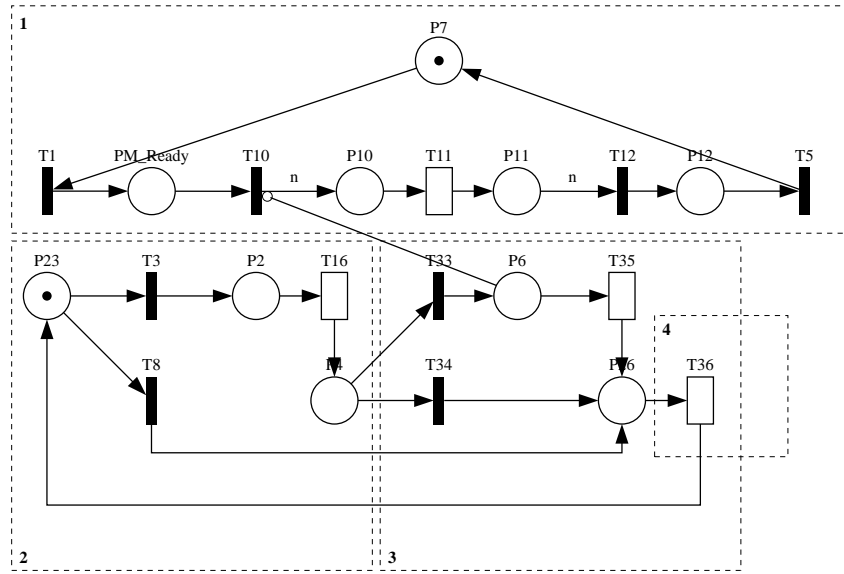


Figura 6.13 Um modelo refinado para o componente *Lin1.001*

cionadas. Como já discutido anteriormente uma *EHSPN* é uma GSPN com anotações de consumo de energia e alocação de recursos humanos, e é formalmente definida por  $PMh-GPSN = (N, E, \tau)$ , onde  $N$  é uma GSPN,  $E$  é uma função que associa o disparo de uma transição a um consumo de energia e  $\tau$  é uma função que associa o disparo de uma transição a uma alocação de recursos humanos. Sendo assim o modelo refinado pode ser formalmente definido como:

$$EHSPN = (N, E, \tau), \quad \text{onde}$$

$$E(t) = \begin{cases} x_E^{T7} & , t = t^{T7}; \\ x_E^{T11} & , t = t^{T11}; \\ x_E^{T24} & , t = t^{T24}; \\ x_E^{T27} & , t = t^{T27}; \\ x_E^{T32} & , t = t^{T32}; \\ x_E^{T54} & , t = t^{T54}; \\ 0 & , \text{ caso contrário.} \end{cases} \quad e \quad \tau(t) = \begin{cases} x_\tau^{T32} & , t = t^{T32}; \\ x_\tau^{T54} & , t = t^{T54}; \\ 0 & , \text{ caso contrário.} \end{cases}$$

Juntamente com a definição formal do modelo refinado, as métricas relacionadas a consumo de energia e alocação de recursos humanos devem ser modeladas. A Tabela 6.8 apresenta o resumo de métricas para o modelo refinado.

**Tabela 6.8** Resumo de métricas para o modelo refinado

$TP(Lin1.003)$	$\Rightarrow$	$TP(T32) = P\{M[T32 >]\} \times \lambda(T32)$
$TP(Lin2.003)$	$\Rightarrow$	$TP(T54) = P\{M[T54 >]\} \times \lambda(T54)$
$Pw(Lin1.001)$	$\Rightarrow$	$Pw(T11) = TP(T11) \times x_E^{T11}$
$Pw(Lin1.003)$	$\Rightarrow$	$Pw(T32) = TP(T32) \times x_E^{T32}$
$Pw(Lin2.001)$	$\Rightarrow$	$Pw(T7) = TP(T7) \times x_E^{T7}$
$Pw(Lin2.003)$	$\Rightarrow$	$Pw(T54) = TP(T54) \times x_E^{T54}$
$Pw(Lin1C.001)$	$\Rightarrow$	$Pw(T24) + Pw(T27) = [TP(T24) \times x_E^{T24}] + [TP(T27) \times x_E^{T27}]$
$SPw$	$\Rightarrow$	$Pw(Lin1.001) + Pw(Lin1.003) + Pw(Lin2.001) + Pw(Lin1.003) + Pw(Lin1C.001)$
$PwT(Lin1.001)_{t_0}^{t_1}$	$\Rightarrow$	$PwT(T11)_{t_0}^{t_1} = \int_{t_0}^{t_1} (TP(T11) \times x_E^{T11}) \times dt$
$PwT(Lin1.003)_{t_0}^{t_1}$	$\Rightarrow$	$PwT(T32)_{t_0}^{t_1} = \int_{t_0}^{t_1} (TP(T32) \times x_E^{T32}) \times dt$
$PwT(Lin2.001)_{t_0}^{t_1}$	$\Rightarrow$	$PwT(T7)_{t_0}^{t_1} = \int_{t_0}^{t_1} (TP(T7) \times x_E^{T7}) \times dt$
$PwT(Lin2.003)_{t_0}^{t_1}$	$\Rightarrow$	$PwT(T54)_{t_0}^{t_1} = TP(T54) \times x_E^{T54}$
$PwT(Lin1C.001)_{t_0}^{t_1}$	$\Rightarrow$	$PwT(T24)_{t_0}^{t_1} + PwT(T27)_{t_0}^{t_1} = [\int_{t_0}^{t_1} (TP(T24) \times x_E^{T24}) \times dt] + [\int_{t_0}^{t_1} (TP(T27) \times x_E^{T27}) \times dt]$
$SPwT_{t_0}^{t_1}$	$\Rightarrow$	$PwT(Lin1.001)_{t_0}^{t_1} + PwT(Lin1.003)_{t_0}^{t_1} + PwT(Lin2.001)_{t_0}^{t_1} + PwT(Lin1.003)_{t_0}^{t_1} + PwT(Lin1C.001)_{t_0}^{t_1}$
$Mh(Lin1.003)$	$\Rightarrow$	$Mh(T32) = TP(T32) \times x_\tau^{T32}$
$Mh(Lin2.003)$	$\Rightarrow$	$Mh(T54) = TP(T54) \times x_\tau^{T54}$
$SMh$	$\Rightarrow$	$Mh(Lin1.003) + Mh(Lin2.003)$
$MhT(Lin1.003)_{t_0}^{t_1}$	$\Rightarrow$	$MhT(T32)_{t_0}^{t_1} = \int_{t_0}^{t_1} (TP(T32) \times x_\tau^{T32}) \times dt$
$MhT(Lin2.003)_{t_0}^{t_1}$	$\Rightarrow$	$MhT(T54)_{t_0}^{t_1} = TP(T54) \times x_\tau^{T54}$
$SMh_{t_0}^{t_1}$	$\Rightarrow$	$MhT(Lin1.003)_{t_0}^{t_1} + MhT(Lin2.003)_{t_0}^{t_1}$

Após a definição formal do modelo refinado e da modelagem das métricas, o modelo refinado deve ser analisado e seus resultados avaliados. A avaliação destes resultados visa verificar se o modelo refinado está produzindo resultados coerentes com os dados reais. A Tabela 6.9 apresenta um exemplo de resultado da análise do modelo refinado. Caso os resultados estejam corretos e sejam satisfatórios, o fluxograma de refinamento finaliza avançando para a próxima etapa da metodologia, senão o modelo deve ser refinado novamente.

**Tabela 6.9** Resultados da análise do modelo refinado

Componente	$TP$	$Pw$	$Mh$	$PwT_0^8$	$MhT_0^8$
Lin1.001	2,45	1000	0	8000	0
Lin1.003	2,45	1248	10	9984	80
Lin2.001	2,69	841	0	6728	0
Lin2.003	2,69	650	15	5200	120
Lin1C.001	2,45	1226	0	9808	0
Lin1C.002	2,69	1347	0	10776	0
		6312	25	50496	200
		$SPw$	$SMh$	$SPwT_0^8$	$SMhT_0^8$

## 6.10 EXPERIMENTAÇÃO COM SIMULAÇÃO/ANÁLISE ESTACIONÁRIA

Antes de iniciar a discussão desta etapa da metodologia, é necessário criar a definição de experimento. Um experimento é um conjunto de várias simulações ou análises sobre o mesmo modelo de redes de Petri, onde um único parâmetro da rede sofre uma variação com um determinado incremento. Por exemplo, suponha um modelo A, o qual possui vários parâmetros, como taxas de disparos, marcações, pesos de arcos e assim por diante. Um dos parâmetros, digamos  $\lambda(t_n) = x$  é a taxa de disparo da transição  $t_n$ . Fazendo o valor de  $x$  variar de  $x' = x - k$  até  $x'' = x + k$  com uma taxa de incremento  $i$  será produzido um experimento com  $\frac{x''-x'}{i} = \frac{2k}{i}$  simulações ou análises. O resultado de cada simulação ou análise define como o sistema reage através da variação dos parâmetros do modelo.

Sendo assim, o objetivo desta etapa da metodologia é criar diversos experimentos sobre o modelo refinado, onde cada um destes experimentos irá variar um parâmetro do modelo. Estes experimentos, na verdade, representam situações hipotéticas para o sistema de manufatura modelado, onde os resultados destes experimentos definem como o sistema de manufatura iria reagir caso os parâmetros do sistema fossem alterados. A idéia da execução de diversos experimentos tem o objetivo de criar um banco de dados de situações hipotéticas, o qual através de interpretação, produzirá informações para tomada de decisão. Obviamente, quanto mais informações utilizadas em processo de tomada de decisão, maior a probabilidade da decisão ser correta. Cada observação ou entrada deste banco de dados deve conter como atributos os parâmetros do modelo e os resultados produzidos por cada métrica utilizada na avaliação do modelo. Uma pergunta, por exemplo, que poderia ser respondida através da interpretação deste banco de dados é qual seria a melhor situação hipotética<sup>2</sup> produzida pelos experimentos.

A Tabela 6.10 apresenta um exemplo de execução de experimentos através de simulação/análise estacionária. O experimento realizou uma variação da taxa de disparo do componente de 3,14 até 5,24 com uma taxa de incremento de 0,0127 para cada simulação/análise. A tabela apresenta cinco métricas, dentre elas o *throughput*, a potência dissipada pelo sistema, o esforço humano requisitado pelo sistema, a potência dissipada pelo sistema em um intervalo de tempo  $\Delta t = 10$ , e o esforço humano requisitado pelo sistema em um intervalo de tempo  $\Delta t = 10$ .

Esse experimento é, na verdade, bastante simples. Para uma avaliação mais ade-

---

<sup>2</sup>A definição de melhor situação hipotética é relativa a cada sistema de manufatura modelado.

quada, é necessário pelo menos um experimento para cada componente do sistema de manufatura. Além disso, os experimentos poderiam ainda ser mais sofisticados, realizando uma variação, no mesmo experimento, de mais de um parâmetro do sistema. Entretanto, isto não será abordado neste trabalho.

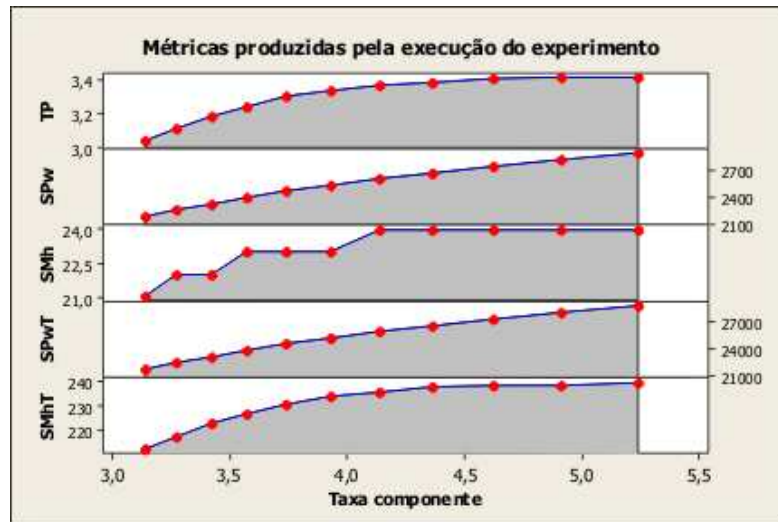
**Tabela 6.10** Um exemplo de resultado da execução de um experimento

Delay componente	Taxa componente	$TP$	$PwT$	$MhT$	$PwT_0^{10}$	$MhT_0^{10}$
0,1909	5,24	3,42	2887,49	24	28875	240
0,2037	4,91	3,42	2802,52	24	28025	239
0,2164	4,62	3,41	2727,49	24	27275	239
0,2291	4,36	3,39	2658,44	24	26584	238
0,2418	4,14	3,37	2592,43	24	25924	236
0,2546	3,93	3,34	2526,47	23	25265	234
0,2673	3,74	3,30	2459,72	23	24597	231
0,2800	3,57	3,24	2390,63	23	23906	227
0,2928	3,42	3,18	2318,47	22	23185	223
0,3055	3,27	3,11	2245,02	22	22450	217
0,3182	3,14	3,03	2170,88	21	21709	212

## 6.11 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

A última etapa da metodologia consiste na criação de informação para os dados produzidos durante toda a execução da metodologia, e na preparação da apresentação dos resultados para os possíveis tomadores de decisão. É importante ressaltar que nem sempre os tomadores de decisão não possuem conhecimentos técnicos ou ainda estão mais interessados em detalhes relacionados a negócio. Interpretar e apresentar os dados produzidos durante a metodologia não é apenas a última etapa da metodologia, mas é determinante para o sucesso de todo o trabalho. Portanto, se os tomadores de decisão não são capazes de entender os resultados, todo o esforço utilizado na execução da metodologia será em vão.

Para analisar o banco de dados e então extrair daí a melhor situação hipotética, das que foram geradas pelos experimentos, este trabalho apresenta duas abordagens de análise: uma análise visual, e uma análise estatística. A análise visual consiste em criar, por exemplo, diversos gráficos que representam visualmente o resultado dos experimentos. A Figura 6.14 ilustra um gráfico com o resultado dos experimentos. Toda as cinco métricas são apresentadas no gráfico. Dependendo do sistema em avaliação e como o sistema foi modelado, a análise visual dos resultados pode se tornar um tanto complexa



**Figura 6.14** Experiments results chart for a single component

e ineficaz. Suponha um sistema com  $n$  componentes. Como a etapa *Experimentação com simulação/análise estacionária* deve produzir ao menos um experimento para cada componente do sistema, os tomadores de decisão teriam que avaliar pelo menos vinte variáveis. Uma solução mais adequada neste caso seria uma análise estatística dos resultados.

A avaliação estatística consiste em avaliar matematicamente cada uma das situações hipotéticas produzidas pelos experimentos. Esta avaliação pode ser feita definindo-se algum tipo de função peso. Uma função peso  $\omega$  é nada mais que uma função que retornará o valor de uma situação hipotética. A função peso  $\omega$  recebe como entrada um conjunto de parâmetros dos experimentos, e a partir destes parâmetros se retorna um valor real, o qual representa o valor da situação hipotética. A função peso pode ser interpretada como uma função de custo-benefício, onde cada parâmetro de entrada deve possuir um peso específico  $w$ . Desta forma, pode-se definir o impacto de cada parâmetro na função peso.

**Definição 6.1.** Seja  $pr_i \in Pr$  um parâmetro pertencente ao conjunto  $Pr$  de parâmetros,  $w_i$  um peso associado ao parâmetro  $pr_i$ , a função peso  $\omega : Pr \times \dots \times Pr \Rightarrow IR^+ \cup \{0\}$ , que calcula o valor de uma situação hipotética, é calculada como se segue:

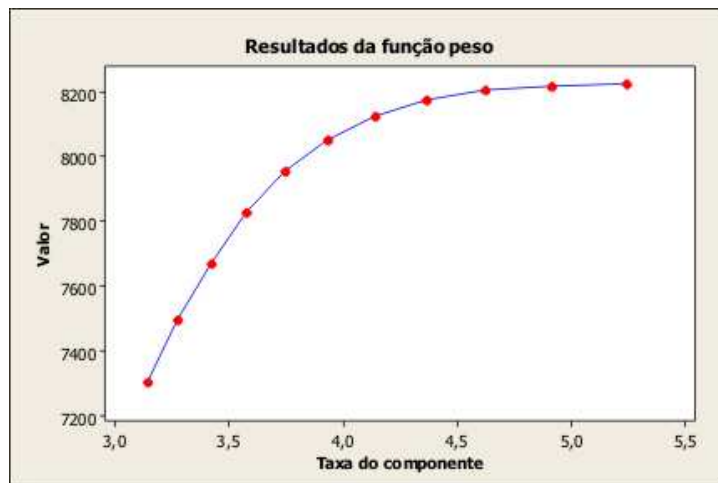
$$\omega(pr_1, \dots, pr_i) = \pm(w^{pr_1} \times pr_1) \pm \dots \pm (w^{pr_i} \times pr_i) \quad (6.1)$$

Após a definição de uma função peso é necessário selecionar a melhor situação hipotética. Obviamente, a melhor situação é aquela que maximiza a função peso. Desta forma, pode-

se definir a Eq. 6.2, a qual retorna o maior valor encontrado pela função peso aplicada às  $n$  simulações/análises dos  $k$  experimentos.

$$\omega^{max} = \max\{\omega((pr_1)_1^1, \dots, (pr_i)_1^1), \dots, \omega((pr_1)_1^n, \dots, (pr_i)_1^n), \dots, \omega((pr_1)_2^1, \dots, (pr_i)_2^1), \dots, \omega((pr_1)_k^n, \dots, (pr_i)_k^n)\} \quad (6.2)$$

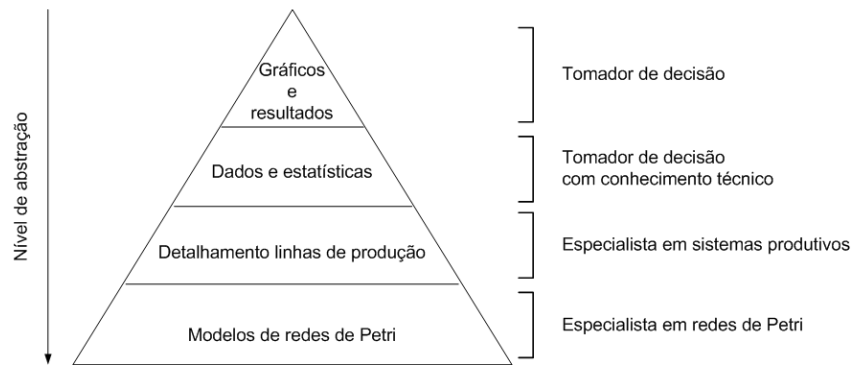
A Figura 6.15 ilustra graficamente o resultado da aplicação da função peso em função da taxa de disparo de um componente.



**Figura 6.15** Resultados da função peso

Finalmente depois das informações serem geradas, esta última etapa da metodologia deve produzir um relatório contendo não somente os resultados produzidos nesta etapa da metodologia, mas deve conter todos os resultados produzidos em todas as etapas. Entretanto, é necessário que se entenda qual o perfil dos clientes deste relatório. Estes perfis podem ser classificados como se segue:

- Tomadores de decisão: quando o cliente é um tomador de decisão, o relatório final deve apresentar gráficos e tabelas de dados sintéticas detalhando os resultados obtidos na avaliação do sistema;
- Tomadores de decisão com conhecimento técnico: quando o cliente é um tomador de decisão com conhecimento técnico, ou seja, quando o tomador de decisão possui a habilidade de entender detalhes matemáticos, o relatório final deve apresentar os dados e resultados obtidos na avaliação, bem como todas as técnicas estatísticas utilizadas para tratamento dos dados;
- Especialistas em sistema de produção: quando o cliente é um especialista em sistema de produção, o relatório final deve conter os dados e resultados obtidos na avaliação



**Figura 6.16** Um guia hierárquico para organização e detalhamento do relatório final

do sistema e deve apresentar detalhes das linhas de produção, como *workflows* e um modelo de redes de Petri abstrato;

- Especialista em redes de Petri: quando o cliente é especialista em redes de Petri, o relatório final deve apresentar todos os detalhes já descritos acima, bem como todos os modelos de redes de Petri produzidos bem como os resultados da análise destes modelos.

A Figura 6.16 ilustra a hierarquia de como o relatório final deve ser organizado e quais os detalhes que devem ser apresentados. Esta hierarquia utiliza uma abordagem *top-down*.

## 6.12 RESUMO

Este capítulo apresentou uma metodologia de avaliação de sistemas de manufatura levando em consideração métricas relacionadas a consumo de energia e alocação de recursos humanos.

Nesta metodologia são definidas todas as etapas, desde a entrevista de reconhecimento do sistema de manufatura até a interpretação dos dados e apresentação dos resultados, necessárias para a avaliação desses sistemas. Cada etapa é apresentada de forma detalhada, fornecendo um guia para a avaliação de desempenho.

A metodologia tem o seu início em uma entrevista de reconhecimento do sistema avaliado. Esta entrevista cria uma visão geral do sistema, reportando detalhes importantes como informações do planejamento estratégico, linhas de produção do sistema, e quantidade de produtos produzidos e como estes participam na produção geral do sistema.

Em seguida as linhas de produção são selecionadas, e então detalhadas. Este detal-



hamento cria uma visão da linha de produção no nível de equipamentos, e como estes estão relacionados, e fases de produção desta linha de produção. Posteriormente, devem ser selecionadas as métricas relevantes para as linhas de produção selecionadas e detalhadas.

Com o detalhamento das linhas de produção e seleção de métricas deve ser construído um fluxograma ou *workflow* para representar estas linhas de produção. Cada componente do *workflow* deve possuir determinados rótulos, de forma que as métricas selecionadas possam ser medidas.

Em seguida deve ser definido um modelo de redes de Petri abstrato, o qual permite a validação do *workflow* proposto. A construção deste modelo abstrato segue algumas regras. Cada componente do *workflow*, juntamente com os seus rótulos, são refinados em modelos básicos de redes de Petri. Com a construção do modelo abstrato, as técnicas de avaliação de redes de Petri como o *tokengame* e verificação de propriedades podem ser utilizadas. Ainda nesta etapa, o modelo abstrato é definido formalmente por uma *EHSPN* e as métricas selecionadas são modeladas.

Em continuidade à metodologia, os dados históricos referentes às linhas de produção avaliadas são obtidos. Duas são as situações que podem ser encontradas. A primeira delas é quando existem dados históricos das linhas de produção e estes dados são confiáveis. A segunda é quando não existem estes dados históricos, e conseqüentemente estes dados são medidos *in loco*.

A partir da obtenção dos dados históricos, seja através dos dados já existentes ou seja através de medição *in loco*, estes dados devem ser estatisticamente tratados. O objetivo deste tratamento é localizar e remover observações anormais ou *outliers*. Para tanto é utilizado um tratamento baseado no método *IIQ* (Intervalo interquartil).

O refinamento do modelo é então a próxima etapa da metodologia. A partir do modelo abstrato e dos dados históricos estatisticamente tratados, o modelo da linha de produção pode ser refinado. Este modelo é definido formalmente como uma *EHSPN* e as métricas selecionadas são refinadas. Após sua definição, o modelo deve ser analisado de forma a validar os resultados produzidos pelo modelo em relação aos resultados produzidos pelo sistema.

A experimentação com simulação/análise estacionária permite a criação de situações hipotéticas do sistema. Situações estas que são inviáveis de serem executadas no sistema real. A idéia da experimentação é criar estes cenários hipotéticos a partir da variação de determinados parâmetros do modelo e medição de como o sistema reage com estas

variações. Com os resultados destes experimentos, é construído um banco de dados que possui como atributos os parâmetros do modelo e o resultado das métricas selecionadas.

O banco de dados produzido pelos resultados dos experimentos devem ser avaliados. Esta avaliação pode ser visual, através de gráficos que representam os resultados. Em diversas situações não será possível avaliar visualmente os sistemas, dado a complexidade que os resultados podem apresentar. Uma outra forma de avaliar os resultados é através de uma avaliação matemática. Esta avaliação é realizada através de uma função peso  $\omega$ , a qual calcula, para cada cenário hipotético, o seu custo-benefício. A partir daí, é possível definir qual seria o melhor cenário hipotético. Por fim, os resultados obtidos devem ser apresentados e detalhados em um relatório. Este relatório deve ser montado de acordo com o perfil do cliente do estudo.

## CAPÍTULO 7

### ESTUDO DE CASO

*Este capítulo apresenta um estudo de caso realizado em uma indústria de processamento de carne, o São Mateus Frigorífico, que é uma das maiores indústrias deste segmento da região Nordeste do Brasil. O objetivo do estudo de caso é validar, tanto o modelo proposto EHSPN, como validar a metodologia de avaliação de desempenho. Para tanto, todas as etapas da metodologia foram executadas, bem como diversas métricas relacionadas a consumo de energia e alocação de recursos humanos foram definidas. Como resultado, observa-se que o modelo proposto, dentro do contexto de uma metodologia de avaliação, apresenta resultados aproximados dos resultados do sistema. Além disso são apresentados resultados financeiros produzidos pela realização do estudo de caso.*

---

#### 7.1 INTRODUÇÃO

Uma alternativa para validação, tanto do modelo proposto *EHSPN*, quanto da metodologia de avaliação de desempenho de sistemas de manufatura considerado métricas relacionadas a consumo de energia e alocação de recursos humanos, é a realização de um estudo de caso real. O objetivo é mostrar que, modelo e metodologia, produzem resultados consistentes com as informações produzidas pelo sistema real. Para o estudo de caso foi selecionada a empresa nordestina São Mateus Frigorífico.

O São Mateus Frigorífico é uma das maiores indústrias de processamento de carne do Nordeste brasileiro. A indústria possui capacidade de produzir mais de cinco mil toneladas de alimentos processados de carne por mês. Seu faturamento anual é de aproximadamente cem milhões de dólares. Atualmente a empresa possui duas plantas de produção, com as quais mais de cem produtos são produzidos. Exemplos destes produtos são: salsichas, mortadelas, presunto, hambúrguers, espetinhos, empanados de frango, etc.

A empresa emprega atualmente algo próximo de mil funcionários, e desta forma a São Mateus é uma empresa representativa para a sociedade e economia do Nordeste.

## 7.2 APLICANDO A METODOLOGIA

### 7.2.1 Entrevista de reconhecimento

Como resultado da primeira etapa da metodologia, um relatório detalhado com as características da empresa, linhas de produção e mix de produtos produzidos em suas duas plantas de produção. Uma informação importante produzida nesta primeira etapa foi a participação dos produtos na produção geral da empresa. A Tabela 7.1 apresenta a distribuição das famílias de produto na produção geral.

**Tabela 7.1** Participação das famílias de produto da São Mateus

Bacon	0,30%	Lingüiças	12,70%
Defumados	0,40%	Mortadela	27,20%
Espetinhos	1,50%	Presunto	0,30%
Hambúrguer	17,10%	Salsicha	30,50%
Lanches	10,00%		

### 7.2.2 Seleção das linhas de produção

Após a avaliação da participação dos produtos, uma determinada linha de produção foi selecionada para análise<sup>1</sup>. O resultado desta segunda etapa da metodologia foi um relatório detalhado acerca desta linha de produção. Cada fase de produção desta linha foi detalhado no relatório, chegando-se a nível de componentes desta linha. O resultado do detalhamento foi a observação que a linha possui mais de trinta componentes distribuídos em cinco grandes fases de produção. Neste trabalho, serão consideradas três fases, as quais encapsulam as cinco grandes fases. As fases da linha de produção serão nomeadas como *Fase 1*, *Fase 2* e *Fase 3*.

Diversos detalhes foram investigados durante o detalhamento da linha de produção. Por exemplo, foi detectado que esta linha de produção possui um grande número de paradas de produção em decorrência de falha de equipamentos. Esta falha, além de reduzir a produtividade da linha, é responsável por um grande número de horas extra dos recursos humanos.

---

<sup>1</sup>Por razões de confidencialidade, não será especificada qual linha de produção foi analisada

Esta investigação aponta outro detalhe importante: perdas no processo produtivo. Estas perdas são, na verdade, compostas por perdas inerentes ao processo produtivo, como perda de água, e perdas relacionadas a controle de qualidade. O controle de qualidade final é realizado na fase *Fase 3* que inspeciona o produto afim de verificar se o mesmo condiz com suas especificações. Caso o produto seja aprovado pelo controle de qualidade, o mesmo é direcionado ao estoque de produtos acabados, senão é reprocessado.

Foi observado, durante o detalhamento da linha de produção, a utilização de recursos humanos nas fases produtivas. O resultado foi a conclusão que a fase *Fase 3* é a única que possui atividades manuais, ou seja, é a única que depende de recursos humanos para a sua produtividade. Foi observado que o consumo de energia é relevantes para as três fases da linha de produção.

### 7.2.3 Seleção das métricas

A terceira etapa da metodologia é a seleção das métricas que serão utilizadas na avaliação do sistema. O relatório com o detalhamento das linha de produção provê um referencial para a seleção das métricas. Naturalmente a própria produtividade da linha de produção deve ser considerada através do *throughput*. Adicionalmente, deve ser considerado o consumo de energia e a alocação de recursos humanos.

### 7.2.4 Modelagem do workflow das linhas de produção

A quarta etapa da metodologia é a modelagem do *workflow* da linha de produção. Naturalmente, o *workflow* deve representar as informações contidas no relatório de detalhamento da linha de produção. A Figura 7.1 ilustra o *workflow* da linha de produção de Salsicha. O primeiro processo a ser modelado é a entrada matéria-prima na linha de produção. Posteriormente são apresentadas as três fases de produção, e finalmente são apresentados o controle de qualidade e a estocagem do produto acabado. Deve ser notado que nem a entrada de matéria-prima nem a estocagem do produto acabado são rotulados. Isso implica em dizer que estes processos não serão detalhados.

### 7.2.5 Modelo de rede de Petri abstrato

A idéia de criar um modelo de rede de Petri abstrato, que é a quinta etapa da metodologia, é criar uma visão geral abstrata da linha de produção. O *workflow* produzido an-

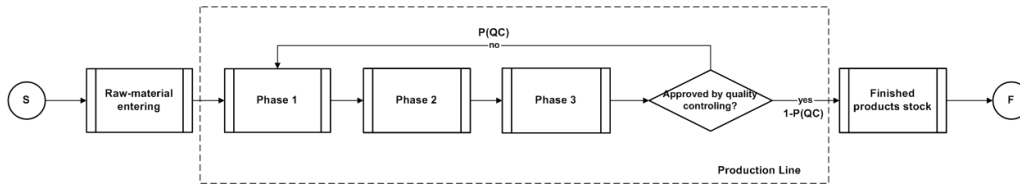


Figura 7.1 Workflow da linha de produção

teriormente, juntamente com o detalhamento da linha de produção, fornecem elementos suficientes para a construção do modelo de rede de Petri abstrato. A Figura 7.2 ilustra o modelo de rede de Petri abstrato da linha de produção de Salsicha. O modelo é baseado nas três fases de produção já discutidas. O sistema funciona, na verdade, como uma linha de transferência ou em outros termos, como um *pipeline*. Cada um dos componentes da linha são conectados seqüencialmente aos demais componentes. Entretanto, cada um destes componentes podem produzir em paralelo em relação aos outros. Devem ser observados dois detalhes: o modelo abstrato mantém os rótulos utilizados no *workflow*, e o modelo abstrato não modela nem a entrada de matéria-prima nem a estocagem de produtos acabados.

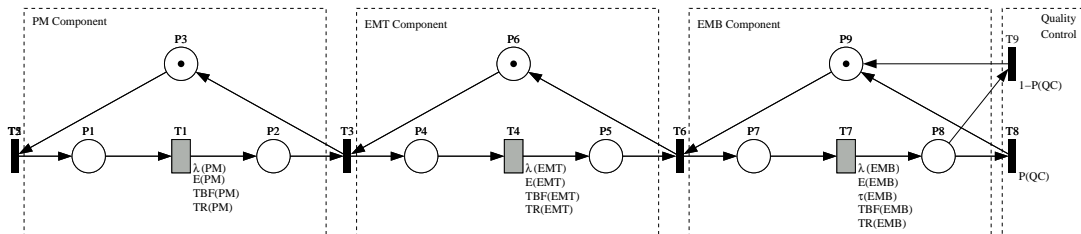


Figura 7.2 Modelo de redes de Petri abstrato da linha de produção

Após a definição e validação do modelo abstrato junto ao *workflow* é necessário definir a *EHSPN* correspondente a este modelo abstrato. Como já discutido anteriormente, a *EHSPN* é uma GSPN com anotações de consumo de energia e alocação de recursos humanos, e pode ser formalmente definida pela tripla  $EHSPN = (N, E, \tau)$ , onde  $N$  é uma GSPN,  $E$  é a função que associa consumo de energia às transições da GSPN, e  $\tau$  é a função que associa alocação de recursos humanos às transições da GSPN. Desta forma, o modelo abstrato apresentado na Figura 7.2 pode ser formalmente definido por uma

*EHSPN* como se segue:

$$EHSPN = (N, E, \tau),$$

$$E(t) = \begin{cases} x_E^{T1} & , t = T1; \\ x_E^{T4} & , t = T4; \\ x_E^{T7} & , t = T7; \\ 0 & , \text{ caso contrário.} \end{cases} \quad \tau(t) = \begin{cases} x_\tau^{T7} & , t = T7; \\ 0 & , \text{ caso contrário.} \end{cases}$$

onde  $x_E^{T1}$ ,  $x_E^{T4}$  e  $x_E^{T7}$  são os consumos de energia relacionados às transições  $T1$ ,  $T4$  e  $T7$ , respectivamente, e  $x_\tau^{T7}$  é o esforço humano necessário para realizar a atividade representada pelo disparo da transição  $T1$ .

As métricas selecionadas para a avaliação do modelo também devem ser modeladas. As métricas selecionadas foram o *throughput* e aquelas relacionadas a consumo de energia e alocação de recursos humanos. A Tabela 7.2 apresenta um resumo com as métricas selecionadas para o modelo abstrato da linha de produção.

**Tabela 7.2** Resumo de métricas para o modelo abstrato da linha de produção

---

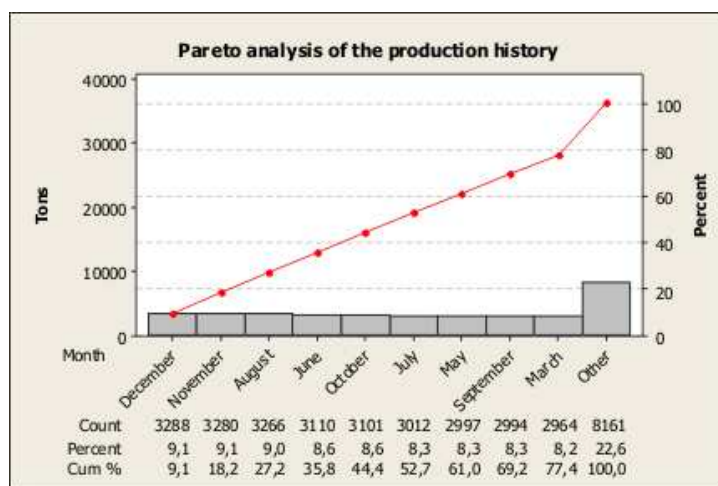
$TP(T7) = P\{M[T7 >]\} \times \lambda(T7)$
$Pw(T1) = TP(T1) \times E(T1)$
$Pw(T4) = TP(T4) \times E(T4)$
$Pw(T7) = TP(T7) \times E(T7)$
$SPw(T1, T4, T7) = Pw(T1) + Pw(T4) + Pw(T7)$
$SMh(T7) = Mh(T7) = TP(T7) \times \tau(T7)$
$PwT(T1)_{t_0}^{t_1} = \int_{t_0}^{t_1} Pw(T1) \times dt$
$PwT(T4)_{t_0}^{t_1} = \int_{t_0}^{t_1} Pw(T4) \times dt$
$PwT(T7)_{t_0}^{t_1} = \int_{t_0}^{t_1} Pw(T7) \times dt$
$SPwT(T1, T4, T7)_{t_0}^{t_1} = PwT(T1)_{t_0}^{t_1} + PwT(T4)_{t_0}^{t_1} + PwT(T7)_{t_0}^{t_1}$
$SMhT(T7)_{t_0}^{t_1} = MhT(T7)_{t_0}^{t_1} = \int_{t_0}^{t_1} Mh(T7) \times dt$

---

### 7.2.6 Obtenção de dados históricos

Após a criação do modelo de redes de Petri abstrato, é necessário obter os dados históricos, que é a sexta etapa da metodologia. Como já discutido anteriormente, existem duas situações possíveis para esta etapa. Uma ocorre quando a empresa possui dados históricos confiáveis, e a outra é quando a empresa não possui dados, onde uma medição *in loco* é necessária. Neste estudo de caso, a empresa possuía dados históricos confiáveis.

Primeiramente, os dados históricos foram analisados com o objetivo de determinar se a empresa possui ou não uma produção sazonal. Como ilustrado na Figura 7.3, a produção da empresa é não-sazonal. Sendo assim, foram considerados na obtenção dos dados históricos, o boletim de produção de um período de seis meses.



**Figura 7.3** Análise de Pareto do histórico de produção da São Mateus

É muito importante lembrar um fato neste ponto. A linha de produção possui mais de trinta componentes. Como poderia ser esperado, os dados não estariam no mesmo nível de abstração utilizado no *workflow* e no modelo de redes de Petri abstrato. Por exemplo, enquanto o boletim diário de produção estavam descritos na forma das fases produtivas, os dados referentes a falhas e recuperação de equipamentos estavam no nível de equipamento. Como o nível de abstração utilizado neste estudo de caso foi considerar apenas as três fases de produção, os dados referentes a falhas e recuperação foram encapsulados nestas fases. A Tabela 7.3 apresenta uma amostra do boletim diário da linha de produção para as três fases produtivas.

**Tabela 7.3** Amostra do boletim diário de produção da linha de produção

Data	15/09/05	16/09/05	17/09/05	19/09/05	20/09/05	21/09/05	22/09/05	23/09/05	24/09/05
Fase 1	32.576,00	35.501,00	37.421,00	37.560,00	36.923,00	50.221,00	37.266,00	35.789,00	41.174,00
Fase 2	32.488,00	35.340,00	37.320,00	37.254,00	36.733,00	50.184,00	37.044,00	35.504,00	40.775,00
Fase 3	38.320,00	30.775,00	34.210,00	32.317,00	40.387,50	41.176,00	36.140,00	40.910,00	36.060,00



### 7.2.7 Tratamento Estatístico

A sétima etapa da metodologia é o tratamento estatístico dos dados históricos. Como discutido anteriormente, é necessário detectar e remover as anormalidades estatísticas ou *outliers*. Para tanto, foi utilizada uma técnica estatística baseada no método *IIQ*, onde uma observação é uma anormalidade caso esteja  $1,5 \times IIQ$  acima do terceiro quartil ou esteja  $1,5 \times IIQ$  abaixo do primeiro quartil. Após aplicar esta técnica aos dados históricos, concluiu-se que os dados históricos apresentavam poucos *outliers*. Esta conclusão confirma que os dados históricos são confiáveis. Um gráfico de caixa, ilustrado na Figura 7.4, representa visualmente a técnica estatística utilizada no tratamento dos dados do boletim diário da linha de produção. Com os dados históricos livre de *outliers* é possível calcular as estatísticas referentes a estes dados. Estas estatísticas são fundamentais para o refinamento do modelo de redes de Petri.

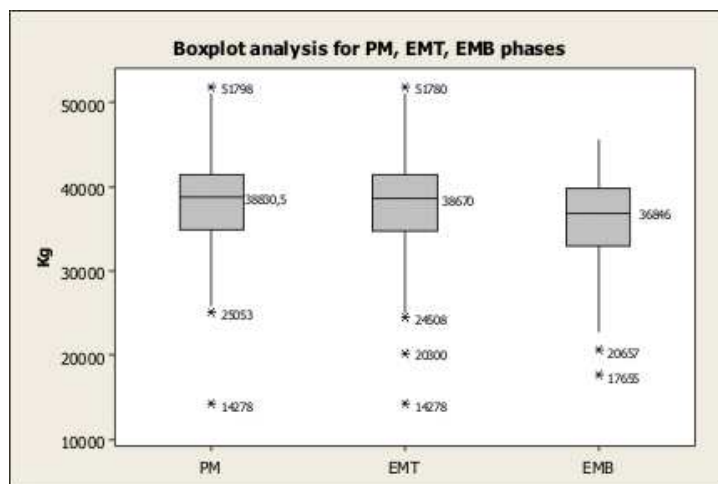


Figura 7.4 Gráfico de caixa para o boletim diário da linha de produção de Salsicha

### 7.2.8 Refinamento e análise do modelo de redes de Petri

A próxima etapa da metodologia é o refinamento do modelo de redes de Petri abstrato. Como já discutido anteriormente, podem existir quantos modelos refinados forem necessários. Entretanto, cada um destes modelos devem ser equivalentes um ao outro. Neste estudo de caso, foram definidos três modelos:

- i. Um primeiro modelo que considera as três fases produtivas sem falhas e sem controle de qualidade;

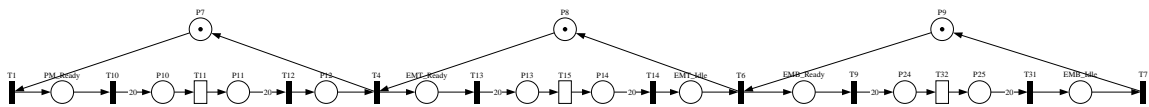
- ii. Um segundo modelo que considera as três fases produtivas com falhas, porém sem controle de qualidade;
- iii. Um terceiro modelo que considera as três fases produtivas com falhas inclusive com o control de qualidade.

O primeiro passo do refinamento do modelo é determinar quais as distribuições de probabilidade devem ser utilizadas no refinamento das transições genéricas do modelo. Segundo [16], a distribuição de probabilidade pode ser determinada realizando uma comparação entre a média ( $\mu_\lambda$ ) e o desvio padrão ( $\sigma_\lambda$ ) dos dados. Quando  $\mu_\lambda = \sigma_\lambda$ , então uma distribuição de probabilidade exponencial deve ser utilizada. Quando  $\mu_\lambda > \sigma_\lambda$ , então uma distribuição de probabilidade Erlang deve ser utilizada. Quando  $\mu_\lambda < \sigma_\lambda$ , então uma distribuição de probabilidade Hiperexponencial deve ser utilizada. A Tabela 7.4 apresenta um resumo das distribuições de probabilidades utilizadas no modelo refinado.

**Tabela 7.4** Resumo das distribuições de probabilidade do modelo refinado da São Mateus

Dado	Comparação Estatísticas	Distribuição de probabilidade
PM Production	$\mu_\lambda > \sigma_\lambda$	Erlang
EMT Production	$\mu_\lambda > \sigma_\lambda$	Erlang
EMB Production	$\mu_\lambda > \sigma_\lambda$	Erlang
PM Failure	$\mu_\lambda \cong \sigma_\lambda$	Exponential
EMT Failure	$\mu_\lambda \cong \sigma_\lambda$	Exponential
EMB Failure	$\mu_\lambda < \sigma_\lambda$	Hyperexponential
PM recovery	$\mu_\lambda \cong \sigma_\lambda$	Exponential
EMT recovery	$\mu_\lambda \cong \sigma_\lambda$	Exponential
EMB recovery	$\mu_\lambda \cong \sigma_\lambda$	Exponential

As Figuras 7.5, 7.5 e 7.5 ilustram os três modelos refinados da linha de produção da São Mateus.



**Figura 7.5** Modelo refinado da linha de produção sem falhas e sem controle de qualidade

Após a definição do modelo refinado é necessário o definir formalmente através de uma *EHSPN*. Como os modelos da Figura 7.5 e da Figura 7.5 não apresentam transições não-imediatas que possuem consumo de energia e alocação de recursos humanos associados, que não às já apresentadas no modelo da Figura 7.5, a definição formal como uma *EHSPN* dos três modelos são equivalentes, bem como as suas métricas de desempenho. Os três modelos podem ser definidos formalmente como se segue:

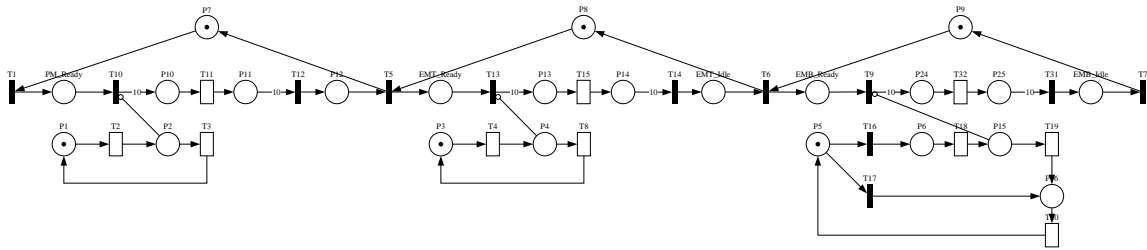


Figura 7.6 Modelo refinado da linha de produção com falhas e sem controle de qualidade

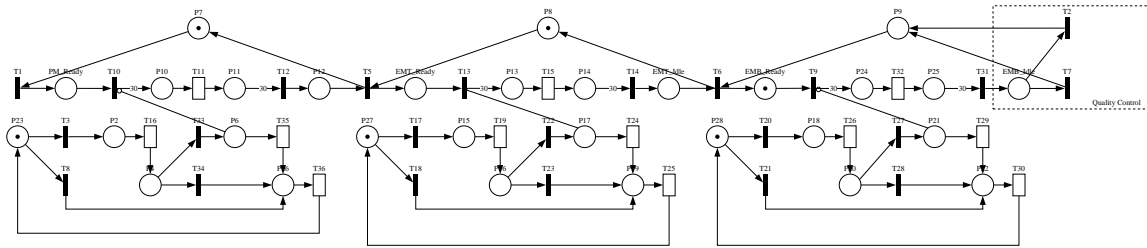


Figura 7.7 Modelo refinado da linha de produção com falhas e com controle de qualidade

$$EHSPN = (N, E, \tau), \quad \text{onde}$$

$$E(t) = \begin{cases} x_E^{T11} & , t = T11; \\ x_E^{T15} & , t = T15; \\ x_E^{T32} & , t = T32; \\ 0 & , \text{ caso contrário.} \end{cases} \quad e \quad \tau(t) = \begin{cases} x_\tau^{T32} & , t = T32; \\ 0 & , \text{ caso contrário.} \end{cases}$$

As métricas selecionadas para a avaliação dos modelos também devem ser definidas. As métricas selecionadas, como já discutido, foram o *throughput* e as métricas relacionadas a consumo de energia e alocação de recursos humanos. A Tabela 7.5 apresenta um resumo com as métricas selecionadas para os modelos refinado da linha de produção.

Para que os modelos refinados fossem validados, foi realizada uma simulação estacionária dos três modelos, e os valores das métricas resultantes destas simulações foram, então, comparados com os resultados apresentados pelo sistema modelado. A Tabela 7.6 apresenta um comparativo entre os resultados medidos no sistema e os resultados produzidos pela simulação estacionária dos três modelos refinados. Foram utilizadas na avaliação sete métricas: o *throughput* do sistema ( $TP$ ), a potência dissipada pelo sistema ( $SPw$ ), o esforço humano requerido pelo sistema ( $SMh$ ), o tempo médio entre falhas do equipamento da *Fase 1* ( $TBF(Fase1)$ ), o tempo médio entre falhas do equipamento da *Fase 2*

**Tabela 7.5** Resumo de métricas para os modelos refinados da linha de produção de Salsicha

$$\begin{aligned}
TP(T32) &= P\{M[T32 >] \times \lambda(T32) \\
Pw(T11) &= TP(T11) \times E(T11) \\
Pw(T15) &= TP(T15) \times E(T15) \\
Pw(T32) &= TP(T32) \times E(T32) \\
SPw(T11, T15, T32) &= Pw(T11) + Pw(T15) + Pw(T32) \\
SMh(T32) &= Mh(T32) = TP(T32) \times \tau(T32) \\
PwT(T11)_{t_0}^{t_1} &= \int_{t_0}^{t_1} Pw(T11) \times dt \\
PwT(T15)_{t_0}^{t_1} &= \int_{t_0}^{t_1} Pw(T15) \times dt \\
PwT(T32)_{t_0}^{t_1} &= \int_{t_0}^{t_1} Pw(T32) \times dt \\
SPwT(T11, T15, T32)_{t_0}^{t_1} &= PwT(T11)_{t_0}^{t_1} + PwT(T15)_{t_0}^{t_1} + PwT(T32)_{t_0}^{t_1} \\
SMhT(T32)_{t_0}^{t_1} &= MhT(T32)_{t_0}^{t_1} = \int_{t_0}^{t_1} Mh(T32) \times dt
\end{aligned}$$

( $TBF(Fase2)$ ), o tempo médio entre falhas do equipamento da *Fase 3* ( $TBF(Fase3)$ ), e o controle de qualidade.

**Tabela 7.6** Comparação dos resultados do sistema com os resultados das simulações dos modelos refinados

Métrica	Dados históricos	Desv. Pad.	Modelo 1	Dif(%)	Modelo 2	Dif(%)	Modelo 3	Diff(%)
TP	3,6806	13%	3,6839	-0,09%	3,6889	-0,22%	3,7028	-0,60%
SPw	732,68	12%	704,30	3,87%	702,77	4,08%	700,88	4,34%
SMh	24,00	0%	24,02	-0,09%	24,05	-0,22%	24,14	-0,60%
TBF(Fase 1)	223	94%	-	-	221,58	0,64%	221,57	0,64%
TBF(Fase 1)	45,84	99%	-	-	43,83	4,39%	43,83	4,39%
TBF(Fase 2)	29	110%	-	-	30,77	-6,09%	30,77	-6,09%
Controle de qualidade	10,50%	0%	-	-	-	-	10,50%	0,00%

Como pode ser observado, as métricas medidas pelos modelos e as métricas medidas pelo sistema possuem um valor próximo, com exceção da potência dissipada pelo sistema. Entretanto, o desvio padrão dos resultados produzidos pelo sistema é maior do que a diferença da medição das métricas pelo sistema e dos modelos refinados.

### 7.2.9 Experimentação com simulação/análise estacionária

A próxima etapa da metodologia é a experimentação com simulação/análise estacionária. Como já apresentado, um experimento é um conjunto de diversas simulações/análises onde um parâmetro do modelo sofre uma variação. Para este estudo de caso, foi considerado apenas o modelo refinado sem falhas e sem controle de qualidade, onde três parâmetros foram selecionados para a avaliação do modelo refinado: a taxa de disparo

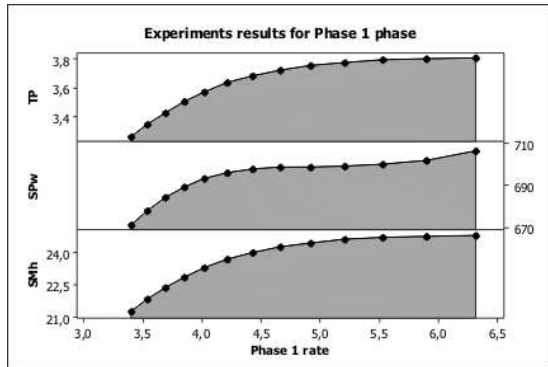
do componente *Fase 1* ( $\lambda(Fase1)$ ), a taxa de disparo do componente *Fase 2* ( $\lambda(Fase2)$ ), e a taxa de disparo do componente *Fase 3* ( $\lambda(Fase3)$ ). O critério utilizado na experimentação foi variar cada parâmetro de 70% até 130% do seu valor original, realizando um incremento de 5%. A partir da execução destes experimentos, as métricas selecionadas foram então armazenadas em um banco de dados. Os resultados dos experimentos no modelo refinado são apresentados na Tabela 7.7.

**Tabela 7.7** Resultados dos experimentos com simulação estacionária do modelo refinado

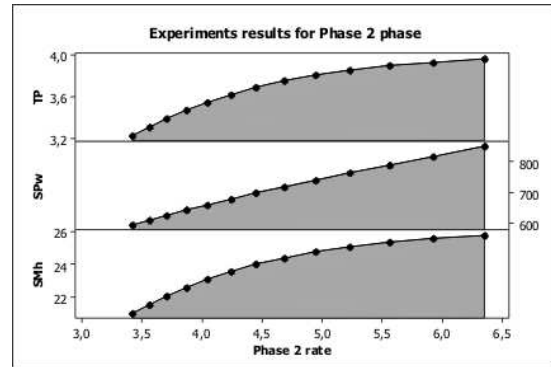
ID	$\lambda(Fase1)$	$\lambda(Fase2)$	$\lambda(Fase3)$	<i>TP</i>	Comp <i>TP</i>	<i>SPw</i>	Comp <i>SPw</i>	<i>SMh</i>	Comp <i>SMh</i>	$\omega$
1	6,3211	4,4464	4,1701	3,8095	3,4077%	706,5544	1,2231%	24,8401	3,4077%	1748,99
2	5,8997	4,4464	4,1701	3,8034	3,2423%	702,2500	0,6065%	24,8003	3,2423%	1746,48
3	5,5310	4,4464	4,1701	3,7933	2,9687%	700,0712	0,2943%	24,7346	2,9687%	1741,88
4	5,2056	4,4464	4,1701	3,7778	2,5470%	699,2243	0,1730%	24,6333	2,5470%	1734,57
5	4,9164	4,4464	4,1701	3,7553	1,9358%	698,9994	0,1408%	24,4865	1,9358%	1723,87
6	4,6577	4,4464	4,1701	3,7243	1,0966%	698,7710	0,1081%	24,2849	1,0966%	1709,18
<b>7</b>	<b>4,4248</b>	<b>4,4464</b>	<b>4,1701</b>	<b>3,6839</b>	0,0000%	<b>698,0167</b>	0,0000%	<b>24,0215</b>	0,0000%	<b>1690,03</b>
8	4,2141	4,4464	4,1701	3,6335	-1,3686%	696,3442	-0,2396%	23,6927	-1,3686%	1666,19
9	4,0225	4,4464	4,1701	3,5732	-3,0053%	693,5145	-0,6450%	23,2996	-3,0053%	1637,76
10	3,8476	4,4464	4,1701	3,5039	-4,8872%	689,4472	-1,2277%	22,8475	-4,8872%	1605,14
11	3,6873	4,4464	4,1701	3,4270	-6,9754%	684,2041	-1,9788%	22,3459	-6,9754%	1569,00
12	3,5398	4,4464	4,1701	3,3442	-9,2209%	677,9541	-2,8742%	21,8065	-9,2209%	1530,20
13	3,4037	4,4464	4,1701	3,2577	-11,5714%	670,9276	-3,8809%	21,2419	-11,5714%	1489,64
14	4,4248	6,3532	4,1701	3,9578	7,4346%	850,5691	21,8551%	25,8074	7,4346%	1806,62
15	4,4248	5,9277	4,1701	3,9275	6,6123%	817,6198	17,1347%	25,6099	6,6123%	1795,17
16	4,4248	5,5586	4,1701	3,8919	5,6438%	789,0016	13,0348%	25,3772	5,6438%	1780,77
17	4,4248	5,2301	4,1701	3,8496	4,4961%	763,2073	9,3394%	25,1015	4,4961%	1762,97
18	4,4248	4,9407	4,1701	3,8011	3,1803%	739,9421	6,0064%	24,7854	3,1803%	1742,00
19	4,4248	4,6795	4,1701	3,7455	1,6707%	718,2203	2,8944%	24,4228	1,6707%	1717,49
<b>20</b>	<b>4,4248</b>	<b>4,4464</b>	<b>4,1701</b>	<b>3,6839</b>	0,0000%	<b>698,0167</b>	0,0000%	<b>24,0215</b>	0,0000%	<b>1690,03</b>
21	4,4248	4,2355	4,1701	3,6165	-1,8308%	678,8496	-2,7459%	23,5817	-1,8308%	1659,66
22	4,4248	4,0420	4,1701	3,5432	-3,8201%	660,3751	-5,3926%	23,1038	-3,8201%	1626,46
23	4,4248	3,8670	4,1701	3,4663	-5,9079%	642,8104	-7,9090%	22,6023	-5,9079%	1591,44
24	4,4248	3,7051	4,1701	3,3854	-8,1038%	625,7857	-10,3480%	22,0748	-8,1038%	1554,48
25	4,4248	3,5575	4,1701	3,3030	-10,3408%	609,5828	-12,6693%	21,5375	-10,3408%	1516,73
26	4,4248	3,4200	4,1701	3,2186	-12,6316%	593,9133	-14,9142%	20,9872	-12,6316%	1477,98
27	4,4248	4,4464	5,9559	3,9239	6,5135%	743,4820	6,5135%	25,5861	6,5135%	1800,11
28	4,4248	4,4464	5,5586	3,9090	6,1080%	740,6511	6,1079%	25,4887	6,1080%	1793,25
29	4,4248	4,4464	5,2138	3,8862	5,4898%	736,3358	5,4897%	25,3402	5,4898%	1782,81
30	4,4248	4,4464	4,9068	3,8533	4,5963%	730,0995	4,5963%	25,1256	4,5963%	1767,71
31	4,4248	4,4464	4,6339	3,8089	3,3918%	721,6919	3,3918%	24,8363	3,3918%	1747,35
32	4,4248	4,4464	4,3898	3,7524	1,8573%	710,9806	1,8572%	24,4676	1,8573%	1721,42
<b>33</b>	<b>4,4248</b>	<b>4,4464</b>	<b>4,1701</b>	<b>3,6839</b>	0,0000%	<b>698,0167</b>	0,0000%	<b>24,0215</b>	0,0000%	<b>1690,03</b>
34	4,4248	4,4464	3,9714	3,6049	-2,1465%	683,0337	-2,1465%	23,5059	-2,1465%	1653,75
35	4,4248	4,4464	3,7908	3,5171	-4,5285%	666,4073	-4,5285%	22,9337	-4,5285%	1613,50
36	4,4248	4,4464	3,6258	3,4231	-7,0808%	648,5920	-7,0807%	22,3206	-7,0808%	1570,36
37	4,4248	4,4464	3,4746	3,3252	-9,7367%	630,0534	-9,7366%	21,6826	-9,7367%	1525,48
38	4,4248	4,4464	3,3356	3,2258	-12,4353%	611,2165	-12,4353%	21,0343	-12,4353%	1479,87
39	4,4248	4,4464	3,2082	3,1275	-15,1039%	592,5893	-15,1038%	20,3933	-15,1039%	1434,77

### 7.2.10 Interpretação dos dados e apresentação dos resultados

A última etapa da metodologia é a interpretação dos dados e apresentação dos resultados. A interpretação dos dados consiste em extrair informações do banco de dados produzido pelos experimentos. Uma maneira simples de extrair estas informações é realizar uma avaliação de como as métricas reagiram à variação dos parâmetros para cada experimento.



**Figura 7.8** Resultados dos experimentos para o componente Fase 1



**Figura 7.9** Resultados dos experimentos para o componente Fase 2

Os gráficos ilustrados pelas Figuras 7.8, 7.9 e 7.10 ilustram os resultados dos experimentos realizados para os componentes *Fase 1*, *Fase 2* e *Fase 3*, respectivamente.

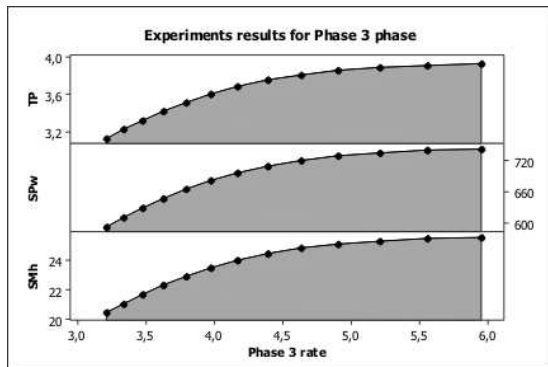
É importante, depois da execução dos experimentos realizar uma análise estatística dos resultados produzidos. Como já discutido, esta análise pode ser realizada através de uma função peso  $\omega$ . Considerando que as métricas utilizadas na avaliação foram o *throughput*, a potência dissipada pelo sistema, e o esforço humano requisitado pelo sistema, estas devem estar contidas na definição da função peso  $\omega$ . A função peso do São Mateus é definida como se segue:

$$\omega(TP, E, \tau) = \underbrace{500 \times TP}_{\text{ganho}} - \underbrace{[(0.09 \times SPw) + (3.71 \times SMh)]}_{\text{custo}} \quad (7.1)$$

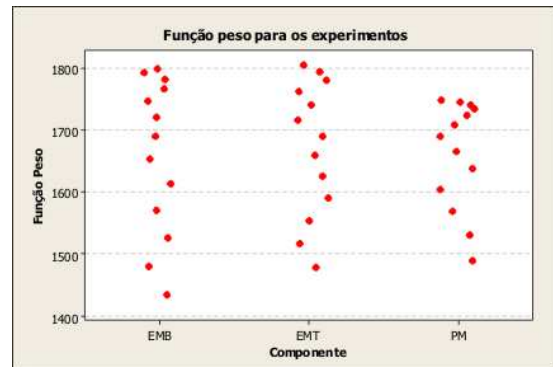
Aplicando a equação da função peso  $\omega$  para cada linha de entrada da Tabela 7.7, é possível achar a situação hipotética com o melhor custo-benefício. A Figura 7.11 ilustra graficamente o resultado da função peso  $\omega$  para os experimentos realizados nos três componentes do modelo refinado do São Mateus.

Fazendo uma análise sobre os resultados da função peso aplicada aos experimentos do São Mateus, é possível tirar as seguintes conclusões:

1. Analisando os experimentos através dos resultados produzidos pela função objetivo, é possível afirmar que o componente *Fase 1* representa o pior custo-benefício para um investimento. Isto é justificável, pois este componente encontra um gargalo na linha de produção, dado que a curva do *throughput* é mais amortecida a partir de uma determinada configuração do que para os outros componentes. Na verdade, funções de aproximação da curva do *throughput* utilizando o método de



**Figura 7.10** Resultados dos experimentos para o componente Fase 3



**Figura 7.11** Gráfico da função peso da São Mateus aplicada aos experimentos

regressão linear mostram que a *Fase 1* apresenta a menor inclinação das funções de aproximação;

2. Os resultados da função objetivo mostra que o sistema apresenta a melhor reação quando os parâmetros da *Fase 2* são alterados. Portanto, a *Fase 2* apresenta a melhor relação custo-benefício para um possível investimento, isto é, o custo cresce numa proporção menor do que o ganho nesta fase da produção. Este fato pode ser facilmente visualizado com as métricas produzidas pelos experimentos;
3. Analisando os dados da tabela entre as linhas 1 e 6, quando a *Fase 1* sofre variações no seu parâmetro, uma situação interessante pode ser observada. É possível incrementar o *throughput* do sistema com um incremento mínimo da potência dissipada. Por exemplo, a configuração do sistema da linha 6 incrementaria o *throughput* do sistema na ordem de 1,09%, enquanto que a potência dissipada seria incrementado na ordem de 0,10%;
4. Em contrapartida, a pior relação entre o *throughput* do sistema e a potência dissipada pode ser observada entre as linhas 14 e 15 da tabela. Estas incrementam o *throughput* do sistema na ordem de 7,4346% e 6,6123%, respectivamente, enquanto a potência dissipada seria incrementada em 21,8551% e 17,1347%, respectivamente.

### 7.3 RESULTADOS

Ao final do estudo de caso, aproximadamente um ano após o seu início, alguns resultados (acadêmicos e econômicos) relevantes foram obtidos.

A partir da realização do estudo de caso no São Mateus, foi possível não somente

validar o modelo proposto por este trabalho, a *EHSPN*, como também foi possível validar a metodologia de avaliação de performance de sistemas de manufatura considerando consumo de energia e alocação de recursos humanos.

Após apresentação dos resultados do estudo de caso para a Diretoria do São Mateus, e após sucessivas discussões, a empresa decidiu considerar os resultados produzidos por este estudo de caso, e este estudo de caso foi desdobrado em diversas ações. A primeira ação foi abortar um outro projeto que estava sendo executado, onde o objetivo do projeto era investir na fase de produção *Fase 3*. Tal investimento estava previsto em US\$150.000,00. Como apresentado, um investimento na fase *Fase 3* apresentaria uma melhor relação custo-benefício para a empresa.

Como a fase de produção *Fase 2* foi a indicada para investimento, a empresa pôde substituir o investimento na ordem de US\$ 150.000,00 por um investimento na ordem de US\$ 70.000,00. É importante ressaltar que esse investimento é aproximadamente 46% do investimento inicial. Além de reduzir o volume de investimento inicial, este estudo de caso apontou uma oportunidade de melhoria, onde a empresa poderia economizar um volume de aproximadamente US\$ 300.000,00 por ano através da melhoria de suas práticas de produção. Os efeitos colaterais, como, por exemplo, maior disponibilidade de equipamentos, não foram medidos.

No momento de escrita deste trabalho, as ações resultantes deste estudo de caso ainda estão sendo executadas.

## 7.4 RESUMO

Este capítulo apresentou a realização de um estudo de caso no São Mateus Frigorífico, um das maiores indústrias deste segmento no Nordeste brasileiro. Os objetivos do estudo de caso foram validar o modelo proposto, o *EHSPN*, o qual considera consumo de energia e alocação de recursos humanos, e validar a metodologia de avaliação de desempenho de sistemas de manufatura com métricas relacionadas a consumo de energia e alocação de recursos humanos.

Para a validação da metodologia de avaliação de desempenho foi considerada uma determinada linha de produção. Foram executados todos as etapas desta, desde o início do processo, na *Entrevista de reconhecimento*, até a finalização do processo, na *Interpretação dos dados e apresentação dos resultados*. A linha de produção se mostra como uma linha de produção complexa, a qual conta com mais de trinta equipamentos, divididas em cinco



grandes fases de produção. Estas cinco fases foram encapsuladas em três fases, chamadas de *Fase 1*, *Fase 1* e *Fase 1*.

Especificamente na etapa da metodologia *Refinamento e análise do modelo de redes de Petri*, são propostos três modelos refinados para a linha de produção onde o primeiro modelo considera as três fases de produção sem falhas e sem controle de qualidade, o segundo modelo considera as falhas dos equipamentos e o terceiro modelo considera tanto as falhas como o controle de qualidade. A partir da definição formal deste modelo como uma *EHSPN* e da definição das métricas relacionadas a consumo de energia e alocação de recursos humanos, a análise destes modelos permitiu realizar uma comparação entre as métricas medidas pelos modelos e as métricas medidas pelo sistema. Os dados mostram que as métricas medidas pelos modelos se aproximam das métricas medidas pelo sistema.

Através da execução de experimentos no modelo refinado sem falhas e sem controle de qualidade, pôde-se gerar diversos cenários hipotéticos, os quais são inviáveis realizar no sistema produtivo, que representam a reação do sistema quando determinados parâmetros variam. Com a definição de uma função peso  $\omega$ , os dados gerados pelos experimentos foram avaliados. Em resultado desta avaliação, indicou-se a fase *Fase 2* como a fase que possui a melhor relação custo-benefício em relação a investimentos.

Como resultado econômico do estudo de caso são apresentados alguns fatos. Foi abortado um projeto, o qual tinha objetivo de realizar um investimento na fase *Fase 3* na ordem de US\$150.000,00. O investimento, então, foi direcionado para a fase *Fase 3* na ordem de US\$70.000,00. Além disso, oportunidades de melhoria foram detectadas as quais podem gerar uma economia na ordem de US\$ 300.000,00 por ano.

Os efeitos colaterais das mudanças propostas, como, por exemplo, disponibilidade de equipamentos, não foram considerados no resultado deste estudo de caso.



## CAPÍTULO 8

# CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. Barbalho. *Conception et Mise en Oeuvre de la Fonction Coordination pour une Commande Distribuée d'Atelier*. PhD thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1985.
- [2] L. Barroca and J. McDemid. Formal methods: Use and relevance for development of safety-critical systems. In *The Computer Journal*, 1992.
- [3] T. Barros. Uma técnica de modelagem por redes de petri voltada a automação da manufatura. Master's thesis, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1990.
- [4] G. Bolch, S. Greiner, H. de Meer, and K. Trivedi. *Queueing Networks and Markov Chains*. Wiley, 1998.
- [5] G. Brams. *Réseaux de Petri: Théorie et Pratique, tome 1*. Masson Editions, 1983.
- [6] W. Brauer. Net theory and applications. In *Lecture Notes on Computer Science (LNCS)*, volume 84.
- [7] G. Bruno and P. Biglia. Performance evaluation and validation of tool handling in flexible manufacturing systems using petri nets. In *Proceedings of IEEE Int. Workshop Timed Petri nets*, pages 64–71, 1985.
- [8] F. Carvalho. Avaliação estocástica de consumo de energia no projeto de sistemas embarcados. Master's thesis, Universidade Federal de Pernambuco, 2004.
- [9] G. Chiola, G. Franceschinis, R. Gaeta, and M. Ribaud. Greatspn 1.7: Graphical editor and analyzer for timed and stochastic petri nets. In *Performance Evaluation, special issue on Performance Modeling Tools.*, pages 47–68, 1995.
- [10] G. Ciardo, J. Muppala, and K. Trivedi. On the solution of gspn reward models. In *Software Productivity Consortium*, 1996.

- [11] F. Commoner. *Deadlock in Petri Nets*. Applied Data Research Inc., 1972.
- [12] I. Corrêa and H. Gianesi. *Just in time, MRP II e OPT: um enfoque estratégico*, volume 2. Atlas, São Paulo, 2nd edition, 1993.
- [13] M. Courvoisier. *Systèmes de Commande en Temps Réel*. SCM Editions, 1980.
- [14] P. Cunha and T. Mainbaum. A synchronization calculus for message oriented programming. In *2nd International Conference on Distributed Computing Systems*, Paris, France.
- [15] A. Datta and S. Ghosh. Synthesis of a class of deadlock free petri nets. In *Journal of the Association for Computing Machinery*, 1986.
- [16] A. Desrochers and R. Al-Jaar. *Application of Petri Nets in Manufacturing Systems: Modeling, Control and Performance Analysis*. 1995.
- [17] M. Fanti and M. Zhou. Deadlock control methods in automated manufacturing systems. In *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A*, volume 34.
- [18] G. Florin and S. Natkin. Les reseaux de petri stochastiques. In *Technique et Science Informatiques*, volume 4, 1985.
- [19] R. German, C. Kelling, A. Zimmermann, and G. Hommel. Timenet: A toolkit for evaluating non-markovian stochastic petri nets. In *Performance Evaluation*, volume 24, pages 69–87, 1995.
- [20] R. Goldblatt. Axiomatizing the logic of computer programming. In *Lecture Notes on Computer Science (LNCS)*. Springer-Verlag, 1982.
- [21] P. Haas. *Stochastic Petri Nets: Modelling, Stability, Simulation*. Springer-Verlag, New York, 2002.
- [22] C. Hoare. *Communicating Sequential Processes*. Prentice Hall International, 1985.
- [23] M. Holliday and M. Vernon. A generalized timed petri net model for performance analysis. In *Proceedings Int. Workshop on Timed Petri Nets*, pages 88–96, Torino, Italy, 1985. IEEE-CS Press.
- [24] ISO. Lotos: A formal description technique based on the temporal ordering of observational behaviour. Technical report, ISO, Geneva, 1989.

- [25] K. Jensen. Coloured petri nets: Basic concepts, analysis methods and practical uses. In *EACTS Monographs on Theoretical Computer Science*. Springer-Verlag, 1994.
- [26] C. Kuo and H. Huang. Failure modeling and process monitoring for flexible manufacturing systems using colored timed petri nets. In *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, volume 16.
- [27] P. Maciel, R. Lins, and P. F. Cunha. *Introdução às Rede de Petri e Aplicação*. X Escola de Computação- Campinas SP, Centro de Informática. Universidade Federal de Pernambuco, Julho 1996.
- [28] A. Marsan, G. Balbo, and G. Conte. A class of generalized stochastic petri nets for the performance analysis of multiprocessor systems. In *ACM Transactions on Computing Systems*, volume 2, pages 93–122. ACM, 1984.
- [29] M. A. Marsan, G. Balbo, G. Conte, S. Donatelli, and G. Franceschinis. Modelling with generalized stochastic petri nets. *SIGMETRICS Perform. Eval. Rev.*, 26(2):2, 1998.
- [30] P. Martins and F. Laugeni. *Admininistração da Produção*, volume 2. Saraiva, 5th edition, 2001.
- [31] P. Merlin and D. Faber. Recoverability of communication protocol: Implications of theoretical study. In *IEEE Transaction on Communications*, volume 24(9), pages 1036–1043, 1976.
- [32] R. Milner. *Communication and Concurrency*. Prentice Hall International, 1989.
- [33] M. K. Molloy. *On the Integration of Delay and Throughput Measures in Distributed Processing Model*. PhD Thesis, UCLA, Los Angeles, CA, 1981.
- [34] D. Moore and G. McCabe. *Introdução à Prática da Estatística*, chapter 3, pages 151–162. 1999.
- [35] D. Moore and G. McCabe. *Introdução à Prática da Estatística*, chapter 1, pages 27–28. 1999.
- [36] D. Moreira. *Admininistração da Produção e Operações*, volume 1. Pioneira Thomson Learning, São Paulo, 1st edition, 2004.

- [37] T. Murata. Modelling and analysis of concurrent systems. *Handbook of Software Engineering*.
- [38] T. Murata. Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, 77(4):541–580, April 1989.
- [39] J. Noe and G. Nutt. Macro e-nets representation of parallel systems. In *IEEE Transactions on Computers*, volume 31(9), pages 718–727, 1973.
- [40] NRDC. <http://www.nrdc.org/globalwarming>, 2007.
- [41] A. Pagnoni. Stochastic nets and performance evaluation. In *Advances in Petri nets 1986, Petri Nets: Central Models and Their Properties*, pages 460–478, 1987.
- [42] J. Peterson. *Petri Nets: an Introduction*. Prentice-Hall Inc., 1981.
- [43] C. A. Petri. Kommunikation mit automaten. Technical Report 1, University of Bonn, Griffiss Air Force Base, New York, NY, USA, 1962.
- [44] C. Ramamoorthy and G. Ho. Performance evaluation of asynchronous concurrent systems using petri nets. In *IEEE Transactions on Software Engineering*, volume 6, pages 440–449, 1980.
- [45] C. Ramchandani. Analysis of asynchronous concurrent systems by timed petri net. Technical Report 120, Laboratory of Computer Science, MIT, Cambridge, MA, USA., 1973.
- [46] W. Reisig. Petri nets: An introduction. 4, 1985.
- [47] W. Reisig and G. Rozenberg, editors. *Lectures on Petri Nets I: Basic Models, Advances in Petri Nets, the volumes are based on the Advanced Course on Petri Nets, held in Dagstuhl, September 1996*, volume 1491 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 1998.
- [48] P. Richardson, A. Taylor, and J. Gordon. A strategic approach to evaluating manufacturing performance. In *Interfaces*, volume 15, pages 15–27, 1985.
- [49] A. D. R.Y. Al-Jaar. Performance evaluation of automated manufacturing systems using generalized stochastic petri nets. In *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION*, volume 6, pages 621–639, 1990.



- [50] W. Skinner. *Manufacturing: the formidable competitive weapon*, volume 2. John Willey and Sons, New York, 4th edition, 1985.
- [51] N. Slack, S. Chambers, and R. Johnston. *Administração da Produção*. Editora Atlas, São Paulo, 2nd edition, 2002.
- [52] J. Spivey. *Z Notation - A Reference Manual*. Prentice Hall International, 1989.
- [53] F. Symons. *Modeling and Analysis of Communication Protocols Using Numerical Petri Nets*. PhD thesis, University of Essex, 1978.
- [54] N. Viswanadham and Y. Narahari. *Performance Modeling of Automated Manufacturing Systems*, volume 2. Editora Atlas, 1992.
- [55] T. Vollmann, W. Berry, and D. Whybark. *Manufacturing planning and control systems*, volume 2. Irwin, Illinois, 3rd edition, 1992.
- [56] A. Zimmermann, J. Freiheit, R. German, and G. Hommel. Petri net modelling and performability evaluation with timenet 3.0. In *Lecture Notes in Computer Science. Computer Performance Evaluation. Modelling Techniques and Tools: 11th International Conference, TOOLS 2000, Schaumburg, IL, USA, March 2000.*, volume Volume 1786/2000, page 188, 2000.
- [57] W. Zuberek. Timed petri nets and preliminary performance evaluation. In *Proceedings of 7th Annual Symposium on Computer Architectures*, pages 88–96, La Baule, France, 1980.
- [58] R. Zurawski and M. Zhou. Petri nets and industrial applications: A tutorial. In *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELETRONICS*, volume 41, pages 567–583, 1994.