



Pós-Graduação em Ciência da Computação

**“Modelagem e Avaliação de Desempenho
Operacional e Ambiental em Cadeias de
Suprimentos Verdes”**

Por

Gabriel Alves de Albuquerque Júnior

Tese de Doutorado



Universidade Federal de Pernambuco
posgraduacao@cin.ufpe.br
www.cin.ufpe.br/~posgraduacao

RECIFE, FEVEREIRO/2013



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE INFORMÁTICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

GABRIEL ALVES DE ALBUQUERQUE JÚNIOR

“Modelagem e Avaliação de Desempenho Operacional e
Ambiental em Cadeias de Suprimentos Verdes”

*ESTE TRABALHO FOI APRESENTADO À PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO DO CENTRO DE INFORMÁTICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO COMO REQUISITO
PARCIAL PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIA DA
COMPUTAÇÃO.*

ORIENTADOR: Prof. Dr. Paulo Romero Martins Maciel
CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Ricardo Massa Ferreira Lima

RECIFE, FEVEREIRO/2013

Catálogo na fonte
Bibliotecária Monick Raquel Silvestre da Silva,
CRB4-1217

Albuquerque Júnior, Gabriel Alves de
Modelagem e avaliação de desempenho
operacional e ambiental em cadeias de suprimentos
verdes / Gabriel Alves de Albuquerque Júnior. -
Recife: O Autor, 2013.
210 f.: il., fig., tab.

Orientador: Paulo Romero Martins Maciel.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de
Pernambuco. CIn, Ciências da Computação, 2013.

Inclui bibliografia e apêndice.

1. Pesquisa operacional. 2. Avaliação de desempenho.
3. Desenvolvimento sustentável I. Maciel, Paulo Romero
Martins (orientador). II. Título.

003

CDD (23. ed.)

MEI2013 – 017



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE INFORMÁTICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Ata de Defesa de Tese de Doutorado do
Centro de Informática da Universidade Federal
de Pernambuco, 25 de junho de 2012.

Ao quarto dia do mês de fevereiro de dois mil e treze, às treze horas, no Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco, teve início a centésima septuagésima oitava defesa da Tese de Doutorado em Ciência da Computação, intitulada “**Modelagem e Avaliação de Desempenho Operacional e Ambiental em Cadeias de Suprimentos Verdes**”, orientada pelo **professor Paulo Romero Martins Maciel**, do candidato **Gabriel Alves de Albuquerque Junior** o qual já havia preenchido anteriormente as demais condições exigidas para a obtenção do grau de douto. A Banca Examinadora, composta pelos professores Paulo Roberto Freire Cunha, pertencente ao Centro de Informática desta Universidade, Nelson Souto Rosa, pertencente ao Centro de Informática desta Universidade, Henrique Pacca Loureiro Luna, pertencente ao Instituto de Computação da Universidade Federal de Alagoas, Virgílio Augusto Fernandes de Almeida, pertencente ao Departamento de Ciência da Computação da Universidade Federal de Minas Gerais e Fabio Santana Magnani, pertencente ao Departamento de Engenharia Mecânica desta Universidade, decidiu em exigência, dar o prazo de **trinta dias** para a entrega da versão final do trabalho, com as devidas correções propostas pelos examinadores. E para constar lavrei a presente ata que vai por mim assinada e pela Banca Examinadora. Recife, 4 de fevereiro de 2013.

Maria Lília Pinheiro de Freitas
(secretária)

Prof. Paulo Roberto Freire Cunha
Centro de Informática / UFPE

Prof. Nelson Souto Rosa
Centro de Informática / UFPE

Prof. Henrique Pacca Loureiro Luna
Instituto de Computação / UFAL

Prof. Virgílio Augusto Fernandes de Almeida
Departamento de Ciência da Computação / UFMG

Prof. Fabio Santana Magnani
Departamento de Engenharia Mecânica / UFPE

À minha família e amigos.

Agradecimentos

Gostaria de prestar meus sinceros agradecimentos àqueles que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Meu incomensurável agradecimento aos meus orientador e co-orientador, que me acompanharam desde o início desta jornada. Ao Professor Dr. Ricardo Massa, co-orientador, pelo apoio, dedicação e comentários de fundamental importância para o sucesso deste trabalho. Ao Professor Dr. Paulo Maciel, orientador, com sua cobrança, suporte e conselhos, sem os quais a qualidade deste trabalho e mesmo a sua conclusão, seriam postos em risco. Agradeço também a todos do grupo *MoDCS* pela amizade e parceria.

Meu muito obrigado a todos os meus amigos do trabalho, pelo apoio e paciência. Especialmente a Claudia Jardelino, que muito me ajudou desde o início. Aos meus amigos que compreenderam, às vezes, minha ausência durante o desenvolvimento deste trabalho. Especialmente a Adilson Arcoverde pela amizade e suporte para o desenvolvimento deste trabalho e a Adroaldo e Chico que sempre me apoiaram nos momentos de dificuldade.

À minha família, especialmente ao meu avô Alfredo (*in memorian*) pelo exemplo de homem. À minha mãe pelo amor incondicional. A Eliane e a meu Pai pelo apoio e amor. Aos meus irmãos Diogo, Roberto e Eduarda.

À minha sogra Dna. Mirtes (*in memorian*) que tanto torceu por mim, mas que infelizmente se foi antes de ver o término desta etapa; saudades. A Ju e a Pedro meu muito obrigado pelo carinho. E o meu muito obrigado à minha esposa, Mel, pelo seu companheirismo, amor e acima de tudo compreensão e apoio durante os momentos mais difíceis desta caminhada.

O saber a gente aprende com os mestres e com os livros. A sabedoria se aprende é com a vida e com os humildes.

—CORA CORALINA (Poetisa)

Resumo

As atuais exigências de questões ambientais fizeram com que a análise de cadeias de suprimentos e sistemas de manufatura precisasse levar em consideração indicadores de desempenho ambiental, além das tradicionais métricas de desempenho. A quantidade de energia consumida para produzir um bem de consumo e o total de emissões de gases de efeito estufa (GEE) são exemplos desses indicadores. Diversas organizações e empresas vêm se envolvendo na definição de metodologias e ferramentas que auxiliem na avaliação de desempenho ambiental (ADA). O *gerenciamento de cadeias de suprimentos verdes* (GSCM), do inglês *green supply chain management*, surgiu da necessidade de se avaliarem metas relacionadas ao desempenho das cadeias de suprimentos e seu impacto ambiental. As redes de Petri vêm sendo aplicadas constantemente na avaliação de sistemas de manufatura e cadeias de suprimentos. Este trabalho propõe um *framework* baseado na utilização das *stochastic Petri nets* (SPN), especificamente as *stochastic reward nets* (SRNs), para a modelagem e aferição de indicadores das atividades do GSCM. Para alcançar esse objetivo, utiliza-se uma abordagem baseada em componentes para modelar os elementos do sistema. A composição desses componentes resulta em um modelo cujas propriedades são garantidas e que provê um conjunto de indicadores de desempenho ambiental e do sistema.

Palavras-chave: Avaliação de Desempenho Ambiental, Gerenciamento de Cadeias de Suprimentos Verdes, Modelagem, Processos Estocásticos, Redes de Petri Estocásticas

Abstract

Due to recent environmental requirements, supply chains and manufacturing systems analysis must take into account new performance indicators besides the traditional ones. The amount of energy consumed for producing goods and the total emissions of greenhouse gases (GHG) of an activity are examples of such indicators. Several organizations and companies are making efforts in order to propose methodologies and tools that support the environmental performance evaluation (EPE). The *green supply chain management* (GSCM) has arisen from the requirement of evaluating goals related both to supply chain performance and to its environmental footprint. Petri nets have been widely used in the evaluation of manufacturing systems and supply chains. This work proposes a framework that uses *stochastic Petri nets* (SPN), more specifically the *stochastic reward nets* (SRNs), to model and assess GSCM activities indicators. In order to achieve such an objective, a component-based approach is used to model the elements of the system. The composition of such components results in a model whose properties are guaranteed and which is able to provide a set of indicators for both performance and environmental footprint.

Keywords: Environment Performance Evaluation, Green Supply Chain Management, Modeling, Stochastic Petri Nets, Stochastic Processes

Sumário

Capítulo 1—Introdução	1
1.1 Motivação	5
1.2 Justificativa	9
1.3 Objetivos	10
1.4 Organização da Tese	12
Capítulo 2—Trabalhos Correlatos	13
2.1 Redes de Petri e Cadeias de Suprimentos	13
2.2 Sustentabilidade e Cadeias de Suprimentos	17
2.3 Energia e Sustentabilidade	25
Considerações Finais	32
Capítulo 3—Gerenciamento de Cadeias de Suprimentos Verdes	34
3.1 Cadeias de Suprimentos	34
3.1.1 Projeto da Rede de Distribuição	36
3.1.2 Estratégias de Distribuição	39
3.1.3 Controle de Estoques	40
3.2 Sustentabilidade no Contexto das Cadeias de Suprimentos	41
3.2.1 A Série ISO 14000	44
3.2.2 Análise do Ciclo de Vida	45
3.3 Medindo a Sustentabilidade	47
3.3.1 O Potencial de Aquecimento Global	50
3.3.2 Introdução à Exergia	51
Considerações Finais	53
Capítulo 4—Introdução às Redes de Petri	54
4.1 As Redes de Petri Lugar-Transição	54
4.1.1 Estrutura Definida em Matriz	57

4.1.2	Propriedades	58
4.2	<i>Stochastic Petri Nets</i> (SPN)	63
4.2.1	Cadeias de Markov	69
4.2.2	Marcações <i>Vanish</i> e <i>Tangible</i>	71
4.2.3	<i>Rewards</i>	71
4.2.4	Aproximação por Fases	74
	Considerações Finais	76
Capítulo 5—Avaliando o Desempenho das Cadeias de Suprimento Verdes		77
5.1	Visão Geral	77
5.2	Indicadores de Desempenho Ambiental	81
5.2.1	Classificação dos Itens e seus Fatores GWP	84
5.3	Definindo <i>Rewards</i> para Indicadores Ambientais	86
5.4	Modelo de Otimização para a Criação de Cenários	91
	Considerações Finais	93
Capítulo 6—Modelos SRN e Ferramentas		95
6.1	Modelos Básicos	95
6.1.1	Temporizador	96
6.1.2	Política de Estoque de Revisão Contínua	98
6.1.3	Política de Estoque de Pedidos Periódicos	98
6.1.4	Política de Estoque de Revisão Periódica	99
6.1.5	Falhas	100
6.1.6	Falhas com Reparo Condicional	101
6.1.7	Manutenção de Recursos	103
6.1.8	Recursos	104
6.1.9	<i>Buffers</i>	105
6.1.10	Processos de Manufatura	106
6.1.11	Produtores	107
6.1.12	Consumidores	109
6.1.13	Intermediários	110
6.1.14	Fluxo de Informação e Produtos	111
6.1.15	Componentes para Demanda Empurrada	113
6.2	Métricas	115

6.3	Álgebra Composicional	116
6.4	Composição dos Modelos	121
6.5	Ferramental	125
	Considerações Finais	126
Capítulo 7— Estudos de Caso		128
7.1	Validando o Modelo com o Jogo da Cerveja	128
7.2	Utilização de Frota e <i>Backorders</i> na Cadeia de Suprimentos	137
7.3	Políticas de Estoque na Cadeia de Suprimentos	145
7.4	Falhas e Impacto Ambiental em uma Linha de Produção	149
7.5	Otimizando o Maquinário de uma Linha de Produção	163
	Considerações Finais	177
Capítulo 8— Considerações Finais		178
Referências Bibliográficas		183
Apêndice A— Manual da Ferramenta ModSPN		198
Apêndice B— Listagem de funções criadas no Sage		205

Lista de Figuras

1.1	Consumo e oferta energética mundiais.	9
2.1	Classificação dos indicadores de sustentabilidade.	19
2.2	Entradas e saídas da exergia durante o ciclo de vida do sistema.	27
3.1	Interfaces da logística com outras áreas da empresa.	35
3.2	Agrupamento dos clientes em zonas para uma região atendida.	37
3.3	Redução dos contatos da cadeia de suprimentos.	38
3.4	Esquema de uma cadeia de suprimentos verde.	42
3.5	Sistemas de gestão ambiental.	44
3.6	Classificação da análise do ciclo de vida quanto à sua abrangência.	46
4.1	Elementos de uma rede de Petri.	55
4.2	PN representando um dia.	55
4.3	Utilização de arcos com peso.	56
4.4	Modelo de um <i>buffer</i> limitado, utilizando <i>lugares duais</i>	57
4.5	Tornando uma rede pura através da inclusão de um par <i>dummy</i>	58
4.6	RdP modelando a exclusão mútua: as transições T_0 e T_2 não podem ser disparadas ao mesmo tempo.	60
4.7	Redução e refinamento para as redes de Petri.	62
4.8	Elementos das SPNs que estendem o comportamento das PNs.	65
4.9	Uma SPN que modela um sistema produtivo.	68
4.10	SPN, RG e EMC de um modelo para exclusão mútua.	70
4.11	Impacto da semântica de servidor na EMC de uma SPN.	71
4.12	SPN, RG e EMC de um modelo para exclusão mútua com transições imediatas.	72
4.13	Sub-rede SPN para representar distribuições polinômio-exponenciais – aproximação por fases utilizando <i>moment matching</i>	75

5.1	<i>Framework</i> proposto.	78
5.2	Modelo esquemático das funções de métricas das transições e lugares.	86
5.3	Exemplo de uma SRN.	87
6.1	Componente SRN para representar um temporizador.	97
6.2	Componente SRN para representar demandas de revisão contínua.	98
6.3	Componente SRN para representar demandas de pedidos periódicos.	99
6.4	Componente SRN para representar demandas de revisão periódica.	99
6.5	Componente SRN para representar falhas em atividades/ações.	100
6.6	Componente SRN para representar falhas em atividades/ações com pré- condição de reparo.	102
6.7	Componente SRN para representar manutenção de recursos.	103
6.8	Componente SRN para representar recursos.	104
6.9	Componente SRN para representar <i>buffers</i>	105
6.10	Componente SRN para representar um processo de manufatura.	106
6.11	Componente SRN para representar produtores.	108
6.12	Componente SRN para representar consumidores.	109
6.13	Componente SRN para representar intermediários.	110
6.14	Componente SRN para representar fluxos de informação/pedido.	111
6.15	Componentes SRN para demanda empurrada.	114
6.16	Componentes SRN para ações extras nos intermediários da cadeia de supri- mentos.	114
6.17	Renomeando a transição t_2 para t_1	118
6.18	União de N_2 (Figura 6.17(b)) e N_3	120
6.19	Passo a passo da redução do modelo resultante da composição $INT \sqcup FLW/\rho$	122
6.20	Redução do modelo resultante da composição $CSM \sqcup FLW/\rho$	123
6.21	Redução do modelo resultante da composição de dois consumi- dores com um intermediário e sua redução.	124
6.22	Redução do modelo <i>PRD</i>	124
6.23	Composição entre consumidores e produtores.	124
6.24	<i>Snapshot</i> da ferramenta ModSPN.	126
7.1	<i>Screenshot</i> da versão para computador do jogo da cerveja.	130

7.2	<i>Screenshots</i> dos ajustes de demanda externa e políticas de estoque no jogo da cerveja.	131
7.3	<i>Backorders</i> e estoque para uma simulação de 20 semanas a partir do programa.	132
7.4	Modelo da fábrica com atrasos na produção e processamento dos pedidos.	133
7.5	Modelo SRN para representar o jogo da cerveja, omitindo as aproximações por fases aplicadas sobre as transições estocásticas.	135
7.6	<i>Backorders</i> e estoque para uma simulação de 20 semanas a partir do modelo SRN.	136
7.7	Gráfico de Pareto considerando a quantidade transportada para as zonas aten- didas por tocos.	139
7.8	Modelo SRN abstrato para a distribuição de produtos.	142
7.9	Probabilidade de <i>backorders</i> variando-se a quantidade de tocos disponíveis.	143
7.10	Probabilidade de <i>backorders</i> variando-se a demanda das zonas.	144
7.11	Resultados obtidos por cenário.	147
7.12	Modelo BPM para a situação atual da linha de produção.	150
7.13	Análise da amostra.	152
7.14	Modelo SRN para a linha de produção c/ aproximação por fases.	153
7.15	<i>Global Warming Potential</i> da linha de produção.	161
7.16	Variação no GWP alterando-se a fonte energética utilizada.	162
7.17	Parte da SRN para a otimização do maquinário da linha de produção.	165
7.18	Capacidade ociosa dos <i>pools</i>	173
7.19	Indicadores relativos para os experimentos.	174
7.20	Comparação entre os experimentos.	176
A.1	<i>Snapshot</i> da ferramenta ModSPN.	198
A.2	Modelagem com a ModSPN.	200
A.3	Atribuindo valores para os argumentos de uma instância de um módulo.	201
A.4	Janela com as opções de análise com o SPNP.	202
A.5	Resultados da análise com o SPNP exportados para o Excel.	203
A.6	Definição de métricas na <i>ModSPN</i>	204

Lista de Tabelas

1.1	Consumo energético no Brasil e no mundo em 2008/2006 por setor.	7
1.2	Oferta interna de energia no Brasil e no mundo em 2008/2006 por fonte	7
1.3	Consumo energético no Brasil e no mundo em 2008/2006 no setor de transportes	8
3.1	Algumas das decisões tomadas nos níveis estratégico, tático e operacional.	37
3.2	Insumos e impactos em uma cadeia de suprimentos verde.	43
3.3	Custos e benefícios decorrentes da implantação de um EMS.	45
3.4	Valores comuns de φ para alguns combustíveis.	52
4.1	Algumas das métricas das SRNs.	74
5.1	Classificação dos itens a serem medidos para a avaliação	82
5.2	Detalhamento da classificação proposta para os insumos/resíduos que devem ser considerados na avaliação de cadeias de suprimentos verdes.	84
6.1	Entidades representadas pelos modelos por contexto.	97
6.2	Entradas e saídas dos elementos do componente de falhas.	102
6.3	Entradas e saídas dos elementos do componente de manutenção.	104
6.4	Entradas e saídas dos elementos do componente de recursos.	105
6.5	Entradas e saídas dos elementos do componente de <i>buffers</i>	106
6.6	Entradas e saídas dos elementos do componente de processos.	108
6.7	Entradas e saídas dos elementos do componente de fluxos.	113
6.8	Algumas métricas calculadas a partir dos modelos propostos.	116
7.1	Comparação dos resultados obtidos a partir da execução do programa e da simulação do modelo SRN (Estoque e <i>Backorders</i> em unidades).	134
7.2	<i>Teste-T emparelhado</i> dos valores de estoque via simulação e medição.	136
7.3	Resumo dos dados de viagens.	138
7.4	Parâmetros, por zona, utilizados para o modelo SRN.	141

7.5	Resultado das métricas variando-se a quantidade de tocos disponíveis.	143
7.6	Resultado das métricas variando-se a demanda das zonas.	145
7.7	Resultados obtidos considerando uma taxa de produção de 1/1,5.	147
7.8	Resultados obtidos considerando uma taxa de produção de 1/0,5.	148
7.9	Parâmetros do sistema por estágio da linha de produção.	151
7.10	Funções de <i>reward</i> e experimentos.	154
7.11	Eficiência exergética por fonte e utilização.	161
7.12	Classificação dos itens avaliados.	164
7.13	Parâmetros da linha de produção.	166
7.14	Quantidade de máquinas por <i>pool</i> para cada cenário.	170

Lista de Abreviaturas

ADA Avaliação de desempenho ambiental. Sigla proveniente do inglês *Environmental Performance Evaluation*.

BPM Modelagem de processos de negócio. Sigla proveniente do inglês *Business Process Modeling*.

BPMN Notação de modelagem de processos de negócio. Sigla proveniente do inglês *Business Process Modeling Notation*.

CM Cadeia de Markov. Sigla proveniente do inglês *Markov Chain*.

CMTC Cadeia de Markov de tempo contínuo. Sigla proveniente do inglês *Continuous Time Markov Chain*.

DMTC Cadeia de Markov de tempo discreto. Sigla proveniente do inglês *Discrete Time Markov Chain*.

MRM Modelo Markoviano de recompensa. Sigla proveniente do inglês *Markov Reward Model*.

EMC Cadeia de Markov embutida. Sigla proveniente do inglês *Embedded Markov Chain*.

EPA Agência de Proteção Ambiental. Sigla proveniente do inglês *Environmental Protection Agency*.

GEE Gases de efeito estufa. Também encontra-se a sigla proveniente do inglês *Green House Gases* (GHG).

GWP Potencial de aquecimento global. Sigla proveniente do inglês *Global Warming Potential*.

ISO *International Organization for Standards*.

LCA Análise do Ciclo de Vida. Sigla proveniente do inglês *Life Cycle Assessment*.

OCDE Organização de Cooperação e Desenvolvimento Econômico. Sigla proveniente do inglês *Organisation for Economic Co-operation and Development*.

P2 Prevenção à Poluição.

PN Rede de Petri. Sigla proveniente do inglês *Petri Net*.

SPN Rede de Petri estocástica. Sigla proveniente do inglês *Stochastic Petri Net*.

GSPN Rede de Petri estocástica generalizada. Sigla proveniente do inglês *Generalized Stochastic Petri Net*.

SRN Rede estocástica de recompensa. Sigla proveniente do inglês *Stochastic Reward Net*.

QoS Qualidade de Serviço. Sigla proveniente do inglês *Quality of Service*.

SC Cadeia de suprimentos. Sigla proveniente do inglês *Supply Chain*.

GSC Cadeia de suprimentos verde. Sigla proveniente do inglês *Green Supply Chain (GSC)*.

GSCM Gerenciamento de cadeias de suprimentos verdes. Sigla proveniente do inglês *Green Supply Chain Management*.

SCM Gerenciamento de cadeias de suprimentos. Sigla proveniente do inglês *Supply Chain Management*.

SGA Sistema de gerenciamento ambiental. Sigla proveniente do inglês *Environmental Management System*.

SKU *Stock Keep Unit*. A unidade de medida do produto estocado (ex.: tonelada, caixa, unidade).

WIP *Work-In-Process*. Indica a quantidade de produtos já solicitados mas que ainda não se encontram no estoque físico da organização.

CAPÍTULO 1

Introdução

O verdadeiro valor das coisas é o esforço e o problema de as adquirir.

—ADAM SMITH (Economista)

Quando a logística passou a ser utilizada nos meios empresariais, era inicialmente vista como uma atividade de suporte, pois estava associada à armazenagem e ao transporte de produtos das indústrias, as quais por sua vez, tinham a produção como atividade principal. Com o passar dos anos, a mudança no perfil do consumidor fez com que as empresas precisassem não apenas fornecer produtos de qualidade compatível com os anseios do cliente, mas também atender a outras necessidades como tempo, informação e localização.

Dentro desse contexto, as empresas precisaram buscar uma melhoria em seus processos. Isso porque, se por um lado era necessário melhorar a eficiência e o nível de serviço prestado ao cliente, por outro lado o mercado altamente competitivo as impelia a uma diminuição contínua dos custos, por exemplo, através da redução de estoques.

Segundo Arbache et al. (2004), o ciclo evolutivo da logística pode ser dividido em quatro fases. Na primeira fase, na década de 1960, não havia uma integração interna ou externa da logística, que, aliada ao fato de os sistemas de informação serem bastante rudimentares, elevava os prazos de entrega, fazendo com que as empresas mantivessem altos níveis de estoque. Na segunda fase, na década de 1970, as empresas buscaram integrar seus processos internos, com foco na redução dos seus custos globais, mesmo que para isso fosse necessário onerar alguns de seus processos.

Na década de 1980 ocorreu a terceira fase, na qual as empresas tiveram que se adaptar às novas necessidades do mercado, com o foco no cliente. Seus processos logísticos precisaram tornar-se mais flexíveis, o que exigiu uma crescente utilização de sistemas de informação. Na quarta fase, que se iniciou na década de 1990 e perdura até os dias atuais, a integração interna foi estendida para os agentes externos. As diversas empresas da cadeia de suprimentos (SC) precisaram passar a operar em conjunto com o intuito de suprir necessidades dos clientes

como qualidade, quantidade, localização, forma de aquisição e prazo. Esse cenário levou as companhias a reconhecer a relevância do gerenciamento de cadeias de suprimentos (SCM).

A otimização da SC permite que as empresas, além de reduzir custos, também consigam suprir o nível de serviço exigido pelos seus clientes. Porém, assim como ocorreu com a integração dos processos internos, alguns dos membros das SCs podem ser prejudicados com essa otimização. Nestes casos, quando essas entidades são de corporações diferentes, costuma-se realizar uma distribuição dos lucros obtidos entre elas através de mecanismos contratuais (Simchi-Levi et al., 2000).

Atualmente, devido a exigências contratuais dos clientes, ou mesmo por força de lei, o gerenciamento das SCs precisa levar em conta o impacto ambiental, além das próprias questões relacionadas ao negócio (Gungor e Gupta, 1999). Essa recente necessidade de considerar aspectos socioambientais impactados pelas SCs implicou a criação de uma nova disciplina: o gerenciamento de cadeias de suprimentos verdes (GSCM).

Com o GSCM, as empresas passaram a gerir seus negócios visando não apenas à maximização dos lucros e à redução dos custos imediatos, mas também buscando agregar mais valor aos seus produtos. Nesse caso, o conceito tradicional de valor agregado, que se refere apenas ao produto em si, cede espaço para um conceito mais amplo que considera todo o contexto socioeconômico e ambiental, impactado em qualquer etapa do ciclo de vida do produto. Observa-se que, muitas vezes, a adoção do GSCM em médio e longo prazo tende a aumentar o faturamento das empresas e reduzir seus custos. O aumento do faturamento decorre de uma maior aceitação do produto pelo mercado. Já a redução dos custos ocorre devido à diminuição do consumo e do desperdício de insumos na SC (Trust, 2006).

A logística das cadeias de suprimentos pode ser subdividida em (Simchi-Levi et al., 2000; Ballou, 2004):

logística de suprimentos: que trata dos aspectos envolvidos desde a extração das matérias-primas até a chegada desses insumos à manufatura;

logística de distribuição: que trata dos aspectos relacionados aos produtos acabados desde a sua manufatura até a sua entrega no cliente final;

logística interna: que lida com a movimentação de insumos e produtos dentro das companhias pertencentes à SC;

logística reversa: que observa questões relacionadas ao retorno de produtos e seus resíduos aos fornecedores.

Devido à complexidade, ou mesmo à impossibilidade, de se representarem os sistemas de outra forma (ex.: via prototipação), adota-se a modelagem como estratégia para se realizar uma análise qualitativa/quantitativa do sistema. Redes de Petri (PNs) (Petri, 1962), teoria das filas (Gross e Harris, 1985), cadeias de Markov (CMs) (Norris, 1998; Bolch et al., 2006) e diagramas de blocos de confiabilidade (RBD) (Blanchard et al., 1990) - do inglês *reliability block diagram* - são exemplos de técnicas de modelagem para a avaliação de dependabilidade e/ou desempenho de sistemas. Cada uma dessas técnicas possui características que a torna mais ou menos adequada para ser empregada em um determinado tipo de avaliação.

As *stochastic Petri nets* (SPNs) (Ciardo e Trivedi, 1993; Marsan et al., 1995; Balbo, 2001) são uma das extensões propostas para as PNs e vêm sendo usadas com sucesso para a modelagem de sistemas de manufatura e SCs (Koh e DiCesare, 1991; Desrochers e Al-Jaar, 1994; Viswanadham e Raghavan, 2000; Raghavan e Roy, 2005). Neste trabalho, propõe-se a utilização das SPNs como ferramenta de suporte ao GSCM.

Diversos motivos levaram à adoção das SPNs como técnica de modelagem. Essa técnica permite que as métricas sejam aferidas tanto via simulação quanto pela análise do espaço de estados. Neste último caso, a SPN pode ser convertida em uma CM para que então sejam aferidas as métricas desejadas. Considerando a possibilidade de avaliar o modelo via simulação, diversas ferramentas existentes permitem que se aproximem as taxas para diversas funções existentes (ex.: weibull, uniforme, erlang etc.) (Hirel et al., 2000).

Além disso, as SPNs proveem diversos recursos para modelagem, como funções de guarda, pesos, taxas dependentes de marcação, entre outros. Esses recursos garantem a essa técnica o mesmo poder de modelagem da máquina de Turing (Maciel et al., 1996), permitindo a representação de diferentes tipos de problema, como políticas de estoque e falhas, que serão contemplados nesta tese. As *stochastic reward nets* (SRNs) (Hirel et al., 2000), um tipo de SPN, ainda permitem a criação de *funções de recompensa*¹ cuja avaliação retorna os valores esperados das métricas considerando-se as marcações alcançáveis do modelo. Um dos principais motivos para a adoção das SPNs como técnica de modelagem é a possibilidade de se criarem modelos de forma componentizada, o que não seria possível através de técnicas analíticas ou das CMs, por exemplo.

Outro motivo para a escolha das SRNs é o fato destas darem suporte a diversas extensões propostas para as SPNs (ex.: guardas, funções dependentes da marcação etc.). Outrossim, essas redes incorporam o conceito de *rewards* às SPNs (Ciardo e Trivedi, 1993). Esses *rewards*

¹N. de T.: Tradução para *reward functions*.

auxiliam a definição das métricas do modelo. Nesta tese, busca-se criação/seleção de métricas, modelos e ferramentas, que dêem suporte à GSCM, utilizando as SRNs. Almeja-se, assim, desenvolver uma biblioteca reutilizável de componentes, que permita a modelagem do sistema sem a necessidade de um conhecimento aprofundado das SRNs. Esses componentes serão utilizados para modelar as SCs. A composição desses módulos deve resultar em um modelo final que possua propriedades desejadas em uma PN (ex.: limitação (Maciel et al., 1996)). Nesta tese, utiliza-se o termo *framework* para se referir a este conjunto de métricas, modelos e ferramentas propostos.

Aplicar as SRNs na modelagem de sistemas requer um alto grau de especialização por parte de quem utiliza essa técnica. Propriedades comportamentais e estruturais das SRNs podem interferir na aferição das métricas, ou mesmo fornecer métricas inválidas. A abordagem proposta, baseada na modelagem com componentes, visa à redução da complexidade inerente à utilização dessa técnica de modelagem. Assim, espera-se que, a partir de uma especificação em alto nível, seja possível gerar de maneira automática um modelo SRN capaz de fornecer métricas confiáveis que auxiliem no GSCM.

O modelo SRN resultante será utilizado para a obtenção de métricas relacionadas ao desempenho operacional e ambiental do sistema modelado. Para tanto, esse modelo deverá ser capaz de prover um conjunto bem definido de métricas, como a utilização de recursos de transporte, o consumo de energia/combustíveis, a exergia (Szargut et al., 1988) de entrada/saída de processos e a emissão de gases de efeito estufa (GEE), através do potencial de aquecimento global (GWP) (IPCC, 1995). Esta proposta usa a exergia na análise do consumo de fontes energéticas. Esse conceito permite avaliar a quantidade útil de energia aproveitada nos processos analisados, permitindo também a avaliação mais precisa referente aos impactos da alteração da fonte energética utilizada.

O impacto ambiental de diferentes recursos utilizados e detritos gerados é calculado através do potencial de aquecimento global (GWP). O GWP permite que se realize experimentos variado parâmetros como o tipo de combustível utilizado e em seguida seja aferido o impacto ambiental desta mudança, através da variação do GWP. Porém, alguns autores criticam esta métrica. Algumas críticas se baseiam na falta dados conclusivos que comprovem a importância da emissão de gases de efeito estufa nas mudanças climáticas. Outras se baseiam nas simplificações feitas na fórmula utilizada para calcular o GWP das substâncias. Apesar das críticas, o GWP ainda é uma das métricas mais aceitas por acadêmicos, governos e instituições para aferir o impacto ambiental. Tanto que o GWP é utilizado como medida quantitativa no protocolo de

Kyoto (Grubb et al., 1999).

Com o intuito de demonstrar a utilização dos modelos propostos, será criado um protótipo de uma ferramenta de modelagem para SRNs baseado em componentes. Esses componentes serão exatamente os modelos propostos para representar as atividades das cadeias de suprimentos verdes (GSCs). Ainda nessa ferramenta, deverá ser possível aferir as métricas de desempenho e sustentabilidade a partir de um conjunto bem definido de parâmetros de entrada dos modelos.

Com o *framework* proposto, espera-se otimizar o tempo e esforço da avaliação. Ademais, espera-se que seja possível analisar cenários diferentes do atual, podendo-se estimar o impacto das mudanças nos custos, no meio ambiente e no desempenho operacional. Os resultados obtidos da avaliação podem ser utilizados para dar suporte em um processo de tomada de decisão que procure maximizar o custo-benefício de fatores ambientais e operacionais.

1.1 Motivação

De acordo com (Henkoff, 1994) apud (Simchi-Levi et al., 2000), a indústria mundial de alimentos poderia economizar cerca de US\$ 30 bilhões, ou 10% de seus custos anuais, apenas utilizando estratégias mais eficazes para a SC. Peter Drucker (Drucker, 2009) dizia que não se pode administrar o que não se pode medir. Segundo (Simchi-Levi et al., 2000), para se avaliar o desempenho do transporte de cargas de uma organização, é importante considerar não apenas os fatores diretamente ligados ao transporte, mas também outros processos que acarretam gasto de tempo e espaço na SC como um todo. Ainda segundo esse autor, a análise de desempenho pode ser realizada com o intuito de monitorar e acompanhar as operações logísticas ou de alterar o comportamento da rede de distribuição e seus resultados.

Corroborando a afirmação de (Simchi-Levi et al., 2000), Alvarenga e Novaes (2000) afirma que na logística é necessária a avaliação do sistema como um todo (enfoque sistêmico). Segundo ele, ao se avaliar a empresa utilizando esse enfoque, é comum não se restringir a apenas uma solução viável, ampliando-se as análises para soluções alternativas, das quais são extraídas apenas as soluções viáveis.

Atualmente, corporações de diversos tamanhos e das mais diferentes áreas estão sendo empurradas para uma realidade que as obriga a se preocupar com questões de sustentabilidade. Essa preocupação pode ocorrer por exigências contratuais, por força de lei ou até pela pressão de seus clientes. Por isso, as empresas precisam de meios eficazes para avaliar o desempenho das suas operações e o seu impacto ambiental.

Ao avaliar uma SC, é importante que se utilize uma forma de investigar não apenas a sua situação atual. A realização de experimentos que permitam comparar diferentes aspectos, como custo, nível de serviço, utilização de recursos e impactos no meio ambiente, pode auxiliar em um processo de tomada de decisão.

A política de estoques adotada por um dos participantes da SC pode ter influência sobre todo o restante da cadeia, prejudicando a qualidade de serviço (QoS)² oferecida, os custos globais e até mesmo o impacto ambiental final. Um problema bastante conhecido nas SCs é o *efeito chicote* (Lee et al., 1997). Ele decorre do aumento da variabilidade dos pedidos ao longo da SC, o que leva as entidades a manterem níveis de estoque não otimizados.

Com o aumento dessa variação da demanda, as corporações precisam manter uma maior quantidade de estoque, o que também pode incorrer em um maior impacto ambiental devido aos recursos necessários para mantê-lo. Por exemplo, pode ser necessário aumentar a capacidade de estoque ou a quantidade de energia gasta para a refrigeração de certos tipos de produto. A utilização de métodos formais para a análise de uma SC é capaz de fornecer indicadores confiáveis do seu desempenho.

O consumo de energia é um dos grandes fatores de impacto ambiental em uma SC. A Tabela 1.1 mostra que, no Brasil, os setores de indústrias e transportes são responsáveis por mais de 60% do consumo energético. Na Organização de Cooperação e de Desenvolvimento Econômicos (OCDE)³ e no restante do mundo, o consumo desses setores é próximo a 50% do total de energia consumida. Nesta tabela os valores são em *tonelada equivalente de petróleo (tep)* (MME – Ministério de Minas e Energia, 2009), que compara o valor calorífico da substância com o de uma tonelada de petróleo (aproximadamente 42GJ).

A Tabela 1.2 apresenta a oferta interna de energia no Brasil e no mundo categorizada por fonte. A partir dos dados apresentados nessa tabela, nota-se que no Brasil a energia hidráulica possui uma grande participação na oferta interna, em comparação à sua participação no restante do mundo. No restante do mundo, esse tipo perde espaço para as fontes nucleares e o gás natural. Em todo o mundo, fontes energéticas derivadas de petróleo vêm perdendo espaço para outros tipos. Especialmente no Brasil, a utilização da cana para fins térmicos e para a produção do álcool carburante ocupou um lugar de destaque na suplantação dos derivados de petróleo, sendo ela, uma das principais responsáveis pela participação de 31,5% da biomassa na oferta interna de energia no País.

²N. de T.: Sigla proveniente do inglês *quality of service*.

³Organização criada desde 1960 com o objetivo de dar suporte ao desenvolvimento global. Site oficial: <http://www.oecd.org>.

Tabela 1.1 Consumo energético no Brasil e no mundo em 2008/2006 por setor.

Setor	Brasil - 2008		OCDE - 2006		Outros - 2006		Total - 2006	
	%	10 ⁶ tep						
Indústria	36,50	82,20	21,00	864,97	27,90	1237,64	24,88	2184,81
Transporte	27,80	62,61	31,60	1301,57	19,70	873,89	25,49	2238,07
Setor Energético	10,40	23,42	7,10	292,44	8,10	359,32	7,69	675,18
Outros	18,70	42,11	30,90	1272,74	36,60	1623,58	33,47	2938,43
Uso Não Energético	6,60	14,86	9,40	387,18	7,70	341,57	8,47	743,61
Total	100,00	225,20	100,00	4118,90	100,00	4436,00	100,00	8780,10

Fonte: MME – Ministério de Minas e Energia (2009)

Tabela 1.2 Oferta interna de energia no Brasil e no mundo em 2008/2006 por fonte

Fonte	Brasil - 2008		OCDE - 2006		Outros - 2006		Total - 2006	
	%	10 ⁶ tep						
Petróleo e Derivados	37,20	93,74	39,30	2196,87	29,64	1748,29	34,40	4038,90
Gás Natural	10,20	25,70	22,60	1263,34	18,95	1117,86	20,50	2406,91
Carvão Mineral	5,70	14,36	20,80	1162,72	31,79	1875,58	26,00	3052,66
Urânio	1,50	3,78	10,60	592,54	2,23	131,62	6,20	727,94
Hidráulica e Eletricidade	13,90	35,03	1,90	106,21	1,98	117,06	2,20	258,30
Biomassa	31,50	79,38	4,80	268,32	15,40	908,59	10,70	1256,29
Total	100,00	252,00	100,00	5590,00	100,00	5899,00	100,00	11741,00

Fonte: MME – Ministério de Minas e Energia (2009)

A Tabela 1.3 apresenta o consumo de energia no setor de transportes. Como pode ser observado, esse é um dos setores que mais demanda energia proveniente de derivados de petróleo. Apesar de no Brasil a biomassa, proveniente principalmente do álcool derivado da cana, amenizar o impacto do uso desses derivados, no mundo a sua participação representa pouco mais de 1%.

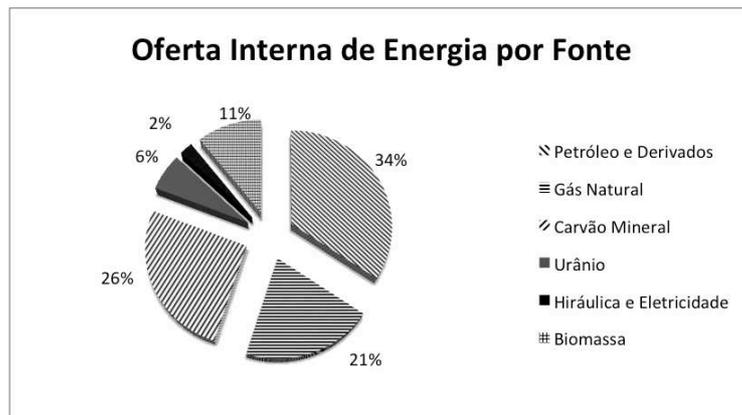
Tabela 1.3 Consumo energético no Brasil e no mundo em 2008/2006 no setor de transportes

Fonte	Brasil - 2008		OCDE - 2006		Outros - 2006		Total - 2006	
	%	10 ⁶ tep						
Derivados de Petróleo	78,60	49,28	96,20	1250,98	92,70	809,18	94,34	2109,45
Gás Natural	3,40	2,13	1,70	22,11	5,40	47,14	3,19	71,38
Carvão Mineral	0,00	0,00	0,00	0,00	0,40	3,49	0,16	3,49
Eletricidade	0,20	0,13	0,80	10,40	1,50	13,09	1,06	23,62
Biomassa	17,80	11,16	1,30	16,91	0,00	0,00	1,26	28,07
Total	100,00	62,70	100,00	1300,40	100,00	872,90	100,00	2236,00

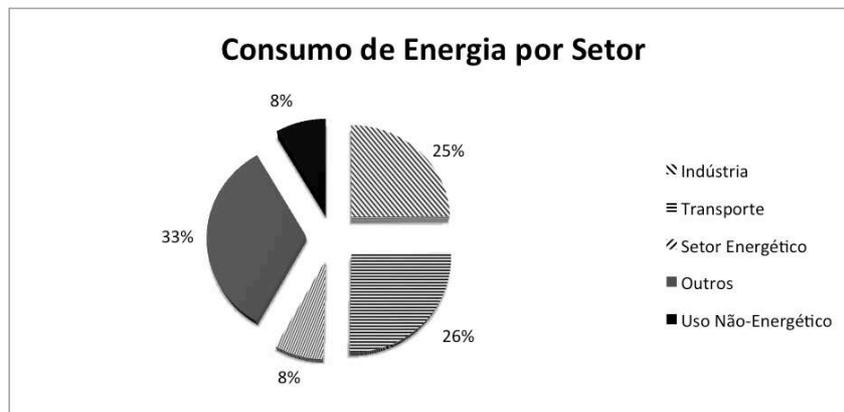
Fonte: MME – Ministério de Minas e Energia (2009)

Os dados do MME – Ministério de Minas e Energia mostram que os derivados de petróleo, apesar de estarem perdendo espaço para outras fontes, ainda representam uma grande parte do total de energia consumida no mundo. A Figura 1.1(a) mostra a oferta de energia no mundo por fonte. Esses dados também apontam para os setores industrial e de transportes como os maiores consumidores mundiais de energia, conforme pode ser observado na Figura 1.1(b). Dado o consumo de fontes poluentes (petróleo e derivados, gás natural, carvão mineral e urânio) e a alta participação de setores diretamente relacionados à cadeia de suprimentos no consumo de energia, é imprescindível que se observe a utilização de energia na avaliação de desempenho ambiental (ADA) das SCs.

O análise do ciclo de vida (LCA) permite que se avalie o consumo de diferentes materiais e seu impacto na produção de um bem. Porém, essa técnica não contempla a avaliação do desempenho operacional do sistema. Além disso, mudanças que visam melhorar o desempenho operacional podem impactar o desempenho ambiental de um sistema. Por exemplo, ao se incluir um novo intermediário em uma cadeia de suprimentos, ou ao se alterar a política de estoques de uma instalação, pode ocorrer uma variação no consumo de recursos, implicando um impacto nas métricas de sustentabilidade.



(a) Oferta de energia por fonte.



(b) Consumo de energia por setor.

Figura 1.1 Consumo e oferta energética mundiais.

1.2 Justificativa

As *stochastic Petri nets* (SPNs) (German, 2001) têm sido amplamente utilizadas para a avaliação de desempenho de sistemas. Outrossim, existe uma correspondência direta entre as SPNs e as cadeias de Markov (CMs), especificamente as cadeias de Markov de tempo contínuo (CMTCs). Assim, as métricas da SPN podem ser obtidas através da sua cadeia de Markov de tempo contínuo (CMTC) associada. Já as *stochastic reward net* (SRN) estendem as SPNs com a possibilidade de definir *rewards* associados às marcações e às transições de estado da CM. Além disso, as SRNs contemplam diversas extensões propostas sobre as SPNs iniciais (ex.: guardas e pesos de arcos e transições dependentes da marcação).

Apesar da relativa facilidade de utilização das SPNs/SRNs (Marsan et al., 1984; Balbo, 2001; German, 2001) para a modelagem de sistemas, aplicá-las de maneira que o modelo final

tenha algumas propriedades desejáveis (ex.: limitação e *liveness* (Maciel et al., 1996)), pode não ser uma tarefa trivial. Por isso, a criação de modelos bem definidos que possuam essas propriedades e que permitam a modelagem e análise de diferentes GSCs pode auxiliar a avaliação de desempenho ambiental (ADA). Contudo, os trabalhos que adotam as SPNs propõem modelos específicos que não podem ser reaproveitados para SCs diferentes. Além disso, os poucos trabalhos que procuram definir componentes ainda requerem uma intervenção manual que impede a descrição do sistema a partir de uma notação de alto nível. Ademais, esses trabalhos lidam com SCs sem considerar os impactos ambientais.

Os trabalhos que procuram avaliar os impactos ambientais nas cadeias de suprimentos geralmente utilizam técnicas matemáticas que não representam a interdependência dos elementos do modelo, como programação linear, programação por metas, análise hierárquica de processos (AHP) etc. Apesar dessas técnicas serem apropriadas para a otimização analítica e para o suporte a decisão, elas não são adequadas para representar relações de interdependência dos elementos de uma rede e para a modelagem estocástica, como ocorre com as SPNs. Essas técnicas também não permitem uma simulação do modelo, que só pode ser analisado analiticamente, ou através de heurísticas.

1.3 Objetivos

Esta tese tem o objetivo prover um conjunto de métricas, modelos e ferramentas que auxiliem avaliar tanto o desempenho ambiental quanto operacional das SCs. Adicionalmente, os modelos deverão dar suporte tanto à avaliação da situação atual da SC quanto a cenários alternativos, com o intuito de se otimizar a SC. Ao se avaliar a SC, é necessário considerar parâmetros como o meio de transporte utilizado; as estratégias de distribuição adotadas; o relacionamento entre produtores, intermediários e consumidores; e a estratégia de reabastecimento de estoques. Uma modelagem de alto nível pode auxiliar os experimentos de diferentes configurações da rede. Esses modelos também devem permitir a extração de métricas importantes durante um processo de tomada de decisão. Esta tese se refere ao conjunto de métricas, modelos e ferramentas propostos como *framework*.

Neste trabalho, a modelagem das SCs é realizada utilizando componentes SRN. Um cenário qualquer pode ser modelado através da composição de modelos básicos predefinidos. Parâmetros como a política de estoques adotada, o tempo de viagem, o tempo entre falhas/manutenção, o tempo de reparo/manutenção, a quantidade disponível de recursos e o consumo de recursos

naturais e energia poderão ser alterados para avaliar diferentes cenários. Após a composição dos modelos básicos, um modelo SRN que representa o sistema como um todo poderá ser gerado de maneira automática. Os modelos criados deverão possuir propriedades de PN, como *limitação e liveness*, que permitam a computação das métricas a partir do *regime transiente* ou do *regime estacionário*.

Ao avaliar um processo, estando inclusas as cadeias de suprimentos, é necessário que se escolham as métricas que indicarão o seu desempenho (Kleijnen e Smits, 2003; Beamon, 1999a). Os modelos foram criados de forma a permitir que um conjunto bem definido de métricas possa ser obtido. Exemplos delas são: a *média de veículos disponíveis*, a *probabilidade de não haver veículos disponíveis* e a *probabilidade de o estoque estar abaixo de um nível de segurança*. Diferentemente das PNs, que utilizam tempos determinísticos ou baseados em intervalo, as SRNs permitem que se obtenham métricas probabilísticas. Dada a natureza do problema e das métricas que se deseja aferir, optou-se pela utilização de modelos probabilísticos ao invés de modelos determinísticos. Além das métricas de desempenho tradicionais, os modelos propostos também contemplam indicadores de ADA, como a quantidade de energia e recursos consumidos, a exergia e o potencial de aquecimento global (GWP).

As SRNs ainda possuem uma vantagem adicional em relação às demais SPNs: a sua definição permite que sejam analisadas métricas sobre outras métricas. Por exemplo, caso uma métrica indique a quantidade de energia consumida e outra forneça a quantidade de lixo gerado, uma terceira métrica pode aferir o GWP total derivado do somatório das outras duas. Além disso, uma quarta ainda poderia calcular a probabilidade de esse GWP estar acima de um limite, ou mesmo o valor máximo emitido de GWP.

A análise do ciclo de vida (LCA) dos produtos (Cascio, 1999; Nielsen e Wenzel, 2002; Cash e Wilkerson, 2003) é uma técnica bastante utilizada para avaliar o impacto ambiental em uma SC. Esta técnica provê uma modelagem do sistema com foco no ciclo de vida do produto e não nos processos produtivos. Ou seja, não são contemplados aspectos dinâmicos como políticas de estoque, compartilhamento de recursos, falhas etc. Além disso, as ferramentas atuais (Yang et al., 2006) que dão suporte a essa técnica não contemplam a variabilidade do consumo de recursos, ou o fazem de maneira rudimentar. A utilização das SRNs para a modelagem do comportamento dinâmico das SCs, considerando aspectos ambientais relacionados com cada etapa da SC, permitirá que em um único modelo sejam analisados os indicadores ambientais e de desempenho dos processos e produtos das SCs. Esta análise não seria possível utilizando apenas o LCA.

Outros objetivos secundários deste trabalho são:

- definir um processo que auxilie na utilização do *framework* proposto;
- desenvolver uma ferramenta que auxilie na utilização dos modelos;
- realizar estudos de caso que comprovem a eficácia do *framework* proposto.

1.4 Organização da Tese

Neste capítulo introdutório foram apresentados a motivação, a justificativa e os objetivos desta tese. Além disso, foi feita uma contextualização dos assuntos relacionados a este trabalho. O restante desta tese é organizado como segue.

Alguns trabalhos relacionados são apresentados no Capítulo 2. Uma breve introdução ao GSCM é apresentada no Capítulo 3. No Capítulo 4, são apresentados os conceitos relacionados às redes de Petri. O Capítulo 5 detalha o processo de modelagem proposto, porém sem detalhar os componentes concebidos utilizando as SRNs. Tais componentes são apresentados no Capítulo 6, que também apresenta alguns exemplos de modelos criados com estes componentes. Alguns estudos de caso reais são apresentados no Capítulo 7. Por fim, no Capítulo 8, apresentam-se as considerações finais.

Trabalhos Correlatos

Tudo evolui; não há realidades eternas: tal como não há verdades absolutas.

—FRIEDRICH NIETZSCHE (Filósofo)

Neste capítulo, apresentam-se alguns trabalhos correlatos à presente tese. Este capítulo foi dividido em seções para proporcionar uma melhor leitura do conteúdo. Cada seção apresenta alguns trabalhos agrupados por tópicos relacionados à pesquisa desenvolvida.

Este trabalho utiliza as redes de Petri (PNs) para a modelagem de aspectos relacionados às cadeias de suprimentos verdes (GSCs). Com base em um único modelo, busca-se aferir métricas relativas ao desempenho operacional e ambiental da GSC. Como será possível observar ao longo desta seção, os trabalhos existentes focam apenas questões de desempenho operacional ou a avaliação de desempenho ambiental (ADA). Ademais, as abordagens propostas utilizando modelos em PNs usam a modelagem *ad hoc* ou *semi-ad hoc*. Isso impede uma conversão direta de um modelo de alto nível para PNs, necessitando, ainda que minimamente, de uma intervenção por parte de um especialista em PNs.

2.1 Redes de Petri e Cadeias de Suprimentos

Nesta seção, apresentam-se alguns trabalhos que utilizam PNs para modelar SCs. Diversos tipos de PNs (ex.: coloridas, hierárquicas, estocásticas etc.) já foram utilizados com essa finalidade. Como será visto, alguns desses trabalhos visam modelar aspectos específicos, como políticas de estoque, enquanto outros buscam contemplar a interação entre as instalações das SCs.

Exceto pelo trabalho apresentado em Dotoli e Fanti (2005), nenhuma das abordagens que utilizam modelos probabilísticos (ex.: *generalized stochastic Petri net* (GSPN)) procura sistematizar a construção dos modelos finais a partir de componentes. Ainda assim, como será ressaltado, os modelos apresentados por Dotoli e Fanti (2005) requerem uma intervenção de um

especialista na sua conversão para o modelo final. Por outro lado, esta tese pretende prover uma conversão de forma direta para um modelo em PNs, a partir de uma biblioteca de componentes.

Diversos tipos de PNs já foram utilizados para modelar sistemas logísticos, de cadeias de suprimentos e de *workflow*. Van der Aalst, por exemplo, propõe uma abordagem baseada em *redes de Petri coloridas de alto nível* (Jensen, 1997) para a modelagem de sistemas de logística (van der Aalst, 1992). Além disso, esse tipo de PN permite a diferenciação dos *tokens* dos lugares através do conceito de *cor*. Nesses modelos, o tempo é associado aos *tokens* e especificado por um intervalo que determina os seus limites inferior e superior. Por esse motivo, torna-se difícil representar naturalmente o tempo associado à execução de atividades, representadas por transições, como ocorre em outros modelos temporizados.

Ainda em (van der Aalst, 1992), o autor concebeu alguns componentes que modelam as entidades das cadeias de suprimentos, além de propor algumas análises de propriedades desse tipo de PN. Nessas PNs, e consequentemente nos componentes propostos, o comportamento dos modelos é definido utilizando-se *linguagens de programação funcionais*, como ML (Milner et al., 1990), através de ferramentas como o CPNTools (Jensen, 1991) e o ExSpect (van der Aalst e Waltmans, 1991). Nesse tipo de PN as métricas são calculadas a partir da simulação de um programa gerado a partir da especificação em PN e das anotações comportamentais criadas com as linguagens funcionais, considerando os limites máximo e mínimo dos tempos, a partir dos quais se deriva a média. É difícil determinar a vantagem da utilização da técnica adotada sobre outras técnicas de simulação como a apresentada em (Altiok e Melamed, 2007). Tais técnicas podem apresentar tantas ou mais facilidades para modelar diversos tipos de sistemas, incluindo diferentes distribuições temporais e monitores de métricas do modelo. Porém, assim como ocorre com as PN citadas, as métricas só podem ser obtidas via simulação.

Na década de 1960, o *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) desenvolveu o *Jogo da Cerveja* (Lee et al., 1997; Simchi-Levi et al., 2000) com o intuito de ilustrar o *efeito chicote* ao longo da cadeia de suprimentos. Em Makajic-Nikolic et al. (2004), esse jogo foi modelado utilizando-se *redes de Petri coloridas de alto nível*. Experimentos foram realizados, utilizando os modelos criados, com o intuito de analisar o impacto de diferentes políticas de estoque sobre os custos globais e de cada participante da cadeia. O único objetivo desse trabalho é mostrar a possibilidade de utilizar as referidas redes para modelar um já tradicional jogo utilizado para ilustrar o *efeito chicote*.

Além das redes *redes de Petri coloridas de alto nível* citadas, algumas PNs associam o conceito de cor às *stochastic Petri nets* (SPNs). Estas redes mantêm a capacidade analítica das

SPNs. Um tipo específico de *stochastic colored Petri nets* (Zimmermann, 2007) é utilizado para avaliar sistemas de logística da General Motors em Zimmermann et al. (2007). Esse trabalho procura aferir o tempo entre a solicitação do cliente e o envio do pedido ao cliente, procurando alternativas para minimizá-lo. Nesse trabalho, os modelos são criados de maneira *ad hoc*.

Uma cadeia de suprimentos (SC) também pode ser modelada com um *workflow*. Em van der Aalst et al. (1994), o autor propõe uma estratégia de modelagem para *workflows*, denominada *WF-Nets*. São propostas algumas estruturas para modelar os fluxos básicos de roteamento (ex.: *AND-Split*, *AND-Join*, *OR-Split* e *OR-Join*) e outros elementos como tarefas, atividades, mensagens etc. A composição dos modelos é realizada pela fusão dos lugares de entrada de um componente com os lugares de saída do outro. Em van der Aalst e ter Hofstede (2005), os autores propõem uma nova linguagem para a modelagem de *workflows*, a *Yet Another Workflow Language* (YAWL), que é uma solução híbrida que tem como base as PNs. Os *workflows* não são modelos para o domínio específico das SCs. Logo, o modelo PN resultante das referidas abordagens não é otimizado para a avaliação de desempenho de SCs. Ademais, o usuário precisa dominar a modelagem com *workflows* para criar um modelo que forneça as métricas desejadas da SCs.

Um dos principais pontos a ser observado ao analisar uma SC é a política de estoque adotada pelas instalações. Estas políticas definem como uma instalação repõe o seu estoque. Por exemplo, na política (r, Q) uma quantidade fixa de produtos Q é solicitada a cada intervalo de tempo r . Em Viswanadham e Raghavan (2000), os autores avaliam a utilização de políticas de estoque dos tipos *make-to-stock* (MTS), no qual as mercadorias são produzidas e mantidas em estoque até que sejam solicitadas, e *assembly-to-order* (ATO), no qual se mantém um estoque de produtos semiacabados até que se receba um pedido, que acarreta a montagem do produto acabado. Alguns experimentos são realizados com o intuito de comparar essas políticas. No caso da política ATO, os autores também procuram avaliar a localização ideal para se manterem os estoques de produtos semiacabados e para realizar a montagem do produto acabado. Os experimentos são conduzidos sobre modelos GSPN criados de forma *ad hoc* para esta finalidade específica. Nesse trabalho, os autores não consideram, por exemplo, a utilização de recursos para realizar a distribuição dos produtos.

Uma cadeia de suprimentos que adota uma política de estoque do tipo MTS com múltiplos pontos de estoque é avaliada em Raghavan e Roy (2005), através de modelos GSPN. Os autores modelam de maneira *ad hoc* uma cadeia de suprimentos e comparam a utilização das políticas de estoque (r, s, S) e (r^*, s, S) , sendo esta última proposta pelos autores. Na política (r, s, S) , a

cada *intervalo de revisão* r , se a posição de estoque i estiver abaixo de um nível s , realiza-se um pedido de $S - i$ itens. A política (r^*, s, S) diferencia-se apenas no *intervalo de revisão*, de forma que, neste caso, se utiliza o valor máximo entre um intervalo de revisão predeterminado r e o tempo w para que o nível de estoque caia abaixo do estoque mínimo s .

Uma das poucas propostas que utilizam SPNs de forma modularizada para a avaliação de cadeias de suprimentos é apresentada em Dotoli e Fanti (2005). As entidades e os fluxos são representados pela composição desses componentes, porém o processo de composição requer que alterações sejam realizadas nos modelos básicos. Apesar desses módulos darem suporte à modelagem das SCs, a falta de um processo de composição bem definido impede que se crie automaticamente uma GSPN a partir de uma especificação de alto nível.

Nesse trabalho, o autor compara o efeito das políticas de estoque do tipo MTS e *make-to-order* (MTO) sobre uma SC. Nas conclusões dos estudos realizados, o autor mostra que, com a política MTO, um incremento da produção nos níveis inferiores da SC implica um aumento do custo total, devido ao incremento do estoque nos níveis intermediários. Já o incremento da demanda no último estágio da cadeia reduz os estoques, reduzindo também o custo total. O autor ainda conclui que um aumento da quantidade de agentes de transporte acarretaria um aumento dos custos de estoque. Porém, essa afirmação indica que possivelmente existe um gargalo gerando resultados discrepantes. Com o aumento da quantidade de agentes de transporte, os custos com atrasos também deveriam ser reduzidos, o que não ocorre. Possivelmente, essa falha deve-se à adoção de transições *single-server* (e não *infinite-server*) no modelo de transporte.

Na comparação da política MTO com a política MTS, o autor conclui que os custos de estoque aumentam com a política MTS, o que é esperado, mas que os custos por pedido pendente permanece praticamente constante. Logo, o autor conclui que a política MTO reduz os custos de estoque e de pedidos pendentes no sistema. No caso da política MTS, outra falha pode ter levado a essa interpretação. O tempo associado às transições de produção é fixo (política (r, Q)). Não se adotam políticas mais sofisticadas, como estoques mínimo e máximo $((s, S), (r, s, S))$. Com isso, dependendo do tempo associado ao período de reposição r (taxa da transição), o estoque pode ficar com um valor bem acima do necessário, aumentando os custos de estoque.

Um novo tipo de PN, denominado *batch deterministic and stochastic Petri nets* (BDSPN), foi proposto em Chen et al. (2002) para a modelagem e avaliação de cadeias de suprimentos. Esse modelo estende as *deterministic and stochastic Petri nets* (Marsan e Chiola, 1987) com o conceito de *lugares e tokens batch*. Esse novo tipo de lugar é utilizado para modelar o fluxo de

informação, enquanto os fluxos financeiro e de produtos são representados por lugares e *tokens* normais. Os *lugares batch* armazenam uma coleção ordenada de inteiros não negativos para representar os *tokens*. Cada elemento deste conjunto representa um *token* de tamanho igual ao inteiro. Esses *lugares batch* podem representar, por exemplo, a chegada de pedidos dos clientes. Poucos trabalhos foram realizados com esse tipo de PN, além de existir uma carência de ferramentas que deem suporte a ele, dificultando sua adoção na modelagem de sistemas.

Vale salientar que nenhuma das propostas apresentadas permite a modelagem do sistema sem a intervenção de um especialista em PNs, uma vez que requerem a criação dos modelos de maneira *ad hoc*, ou os componentes propostos não são suficientemente autocontidos de forma que permita uma conversão direta a partir de um modelo de alto nível diretamente para PNs. Além disso, nenhum dos modelos se mostra capaz de representar diferentes políticas de estoque MTS ou políticas híbridas, que são geralmente utilizadas na prática.

2.2 Sustentabilidade e Cadeias de Suprimentos

Esta seção apresenta alguns trabalhos relacionados à sustentabilidade no contexto das cadeias de suprimentos (SCs). As SCs possuem uma grande importância na avaliação de impactos ambientais, sendo responsáveis pelo consumo de recursos naturais, pela geração de resíduos e pelo consumo de diferentes fontes de energia (renováveis e não-renováveis).

A série 14000 da ISO define padrões relacionados à sustentabilidade. O padrão ISO 14031 procura definir o processo de avaliação de desempenho ambiental (ADA) (ISO, 1999; Jasch, 2000; Matthews, 2003; Cascio, 1999). Além da ISO, outras propostas também procuram padronizar a ADA, como o EMAS (EEC, 1993; The European Parliament and the Council of the European Union, 2001) que é uma regulação da União Europeia para o gerenciamento e a auditoria ambiental. Jasch compara o padrão ISO 14031 e o EMAS Jasch (2000) apresentando exemplos de indicadores de desempenho ambiental e o esquema do padrão ISO 14031. Esse trabalho se propõe a servir como um guia para a implantação de um sistema de gestão ambiental (SGA), baseando-se nos insumos e detritos nas atividades avaliadas.

Extrapolando o padrão ISO, Veleva propõe uma metodologia para o monitoramento e a avaliação de indicadores para sistemas de produção sustentáveis (Veleva et al., 2001; Veleva e Ellenbecker, 2001). O autor determina cinco níveis de abstração para a avaliação dos sistemas, de forma que, para cada nível, se utiliza um conjunto diferente de indicadores de sustentabilidade relevantes. No primeiro nível, é averiguado se a empresa está em conformidade com os

padrões e leis que a regulam. No segundo nível, afere-se o desempenho e os insumos/resíduos das atividades da instalação. No terceiro nível, medem-se os efeitos da companhia sobre os seus funcionários, a saúde pública e o meio ambiente. No quarto nível, trata-se da cadeia de suprimentos e do ciclo de vida do produto da companhia. Finalmente, no quinto nível, checa-se como a companhia se posiciona no contexto de toda a sociedade (local e global) no que tange à sustentabilidade. Abaixo, são apresentados exemplos de indicadores por nível:

Nível 1: Número de empregados que receberam treinamento sobre materiais perigosos; valor pago em multas.

Nível 2: Quantidade consumida de energia, em kWh, por quantidade de produto; quantidade de dias sem acidentes.

Nível 3: Quantidade de CO_2eq gerada por ano; quantidade de substâncias acidificantes por ano, medida em SO_2eq .

Nível 4: Percentual de produtos projetados para serem facilmente reutilizados ou reciclados; toneladas de GEE geradas no transporte dos produtos.

Nível 5: Percentual da utilização de água pela capacidade de reposição na região; percentual do total da energia utilizada pela quantidade de energia obtida de fontes sustentáveis.

A Figura 2.1 apresenta um esquema que representa a classificação dos indicadores de sustentabilidade. Esses indicadores podem ser classificados como: social, ambiental ou econômico. Em cada uma dessas categorias, os indicadores ainda podem ser quantificados objetivamente ou subjetivamente (van Bellen, 2006; Lettieri et al., 2009).

Com relação a esses indicadores de sustentabilidade, a pesquisa a ser apresentada nesta tese se enquadra na avaliação de indicadores ambientais objetivos, ou seja, que podem ser quantificados objetivamente. Além disso, alguns indicadores econômicos e de desempenho também serão contemplados pelos modelos e métricas propostos. Alguns dos indicadores que podem ser aferidos listados a seguir. Apesar de ser possível aferir indicadores financeiros, este trabalho será focado mais nos indicadores de desempenho e ambientais.

Ambientais: Quantidade absoluta/relativa de energia e água consumidas, quantidade de recursos naturais consumidos, quantidade de resíduos gerados, probabilidade de um indicador ambiental estar acima ou abaixo de um limiar etc.;

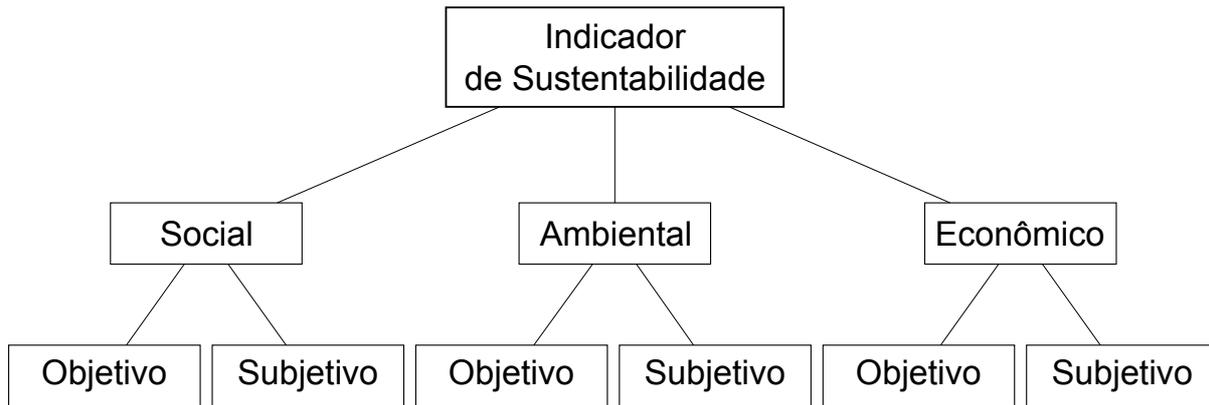


Figura 2.1 Classificação dos indicadores de sustentabilidade.

Financeiros: Custo total, custo por unidade produzida, receita etc.;

Desempenho: Quantidade de pedidos pendentes (*backorders*), estoque médio e probabilidade de estoque acima ou abaixo de um limite, quantidade de recursos (ex.: máquinas, pessoal, caminhões) disponíveis, tempo de atendimento de pedido etc.

Um levantamento bastante amplo do estado da arte sobre gerenciamento de cadeias de suprimentos verdes (GSCM) é apresentado em Srivastava (2007). Nesse trabalho, o autor classifica a literatura existente de acordo com a subárea relativa a essa disciplina e à técnica utilizada. Algumas das subáreas do GSCM classificadas pelo autor são: manufatura e remanufatura de produtos, LCA, logística reversa e projeto da rede e o gerenciamento do lixo. Quanto à técnica utilizada, o autor cita desde métodos empíricos à modelagem matemática, que inclui programação linear (Louwers et al., 1999), teoria das filas (Guide et al., 2005; van der Laan et al., 1996), cadeias de Markov (CMs) (van der Laan e Salomon, 1997; Fleischmann et al., 2002) e PNs (Moore et al., 1998, 2001).

Uma metodologia para o desenvolvimento de novos produtos levando em consideração aspectos ambientais é proposta em Nielsen e Wenzel (2002). O autor mostra, passo a passo, como utilizar a LCA de um produto de referência para estimar os impactos do novo produto. Com isso, permite-se que sejam tomadas decisões que impliquem em um menor impacto ambiental antes mesmo que o produto comece a ser produzido. Diversos são os trabalhos que focam na análise LCA. Porém, esta análise não tem por objetivo aferir o desempenho da SC, focando-se apenas no impacto proveniente da existência de um produto. Logo, por si só, a LCA não é capaz de fornecer dados importantes para o GSCM, como utilização de recursos, níveis de estoque, custos etc.

Muitos trabalhos procuram aferir o desempenho ambiental e operacional das SC utilizando técnicas de modelagem matemática. Estas técnicas em geral visam maximizar/minimizar funções-objetivo que buscam balancear variáveis que representam o desempenho ambiental (ex.: consumo de recursos energéticos, geração de resíduos etc.) e operacional (ex.: custo, tempo de entrega, níveis de estoque etc.).

Em Beamon e Fernandes (2004), utiliza-se a técnica de *Programação Linear* (Schrijver, 1998) para maximizar uma função objetivo que visa minimizar os custos atuais de uma cadeia de suprimentos reversa. Nesse trabalho a cadeia é modelada matematicamente considerando um conjunto predeterminado de parâmetros, como a distância entre suas instalações, o percentual de produtos em condições de serem remanufaturados e o percentual de produtos retornados por zona de consumo. As autoras realizam uma análise de sensibilidade da função objetivo variando estes parâmetros em busca das melhores configurações para a SC.

Zhou combina as técnicas de *Programação por Metas* (GP¹) (Charnes et al., 1955; Charnes e Cooper, 1961; Jones e Tamiz, 2010) e a *Processo Analítico Hierárquico* (AHP) (Saaty, 1980) para avaliar processos industriais em Zhou et al. (2000). O autor utiliza uma ponderação de objetivos conflitantes, como os econômicos e os ambientais, com o intuito de determinar configurações possíveis dentro dos objetivos e restrições do sistema. Além disso, a combinação das duas técnicas permite que se criem restrições obrigatórias ou desejáveis para a avaliação dos processos. A função objetivo é então calculada variando-se alguns dos parâmetros propostos. Com isso, a autora busca avaliar as configurações mais adequadas. A abordagem utilizada por ela impossibilita a modelagem de parâmetros como o compartilhamento de recursos, falhas e variações na política de estoques dos produtores. Por isso, essa abordagem não é adequada para uma modelagem completa da GSC levando em conta fatores de suma importância como os supracitados.

A avaliação de desempenho de GSCs é abordada em Shuwang et al. (2005) utilizando lógica difusa (Nguyen e Walker, 2005; Kerre e Mordeson, 2005). O objetivo desse trabalho é criar um índice único capaz de representar o desempenho de toda a GSC. Para isso, propõe-se a classificação dos fatores que impactam o desempenho em seis categorias: valor financeiro, proteção ambiental, valor da informação, nível de serviço, custo e flexibilidade da operação. Cada um desses fatores possui uma série de indicadores, como o tempo de ciclo de pedidos, os custos com recursos humanos e fluxo de materiais, a utilização de energia e a taxa do fluxo de informação. A esses indicadores, são atribuídos pesos que representam sua importância em

¹N. de T.: Sigla proveniente do inglês Goal Programming.

cada uma das atividades ou instalações a serem avaliadas na GSC. Após aplicar a metodologia, encontra-se um valor que representa a qualidade (ex.: excelente, boa, ruim) de cada uma das seis categorias propostas. Essa proposta é capaz de mensurar o desempenho atual da GSC, porém não é aplicável para a avaliação de configurações diferentes da cadeia.

Sarkis (2003) propõe um *framework* para dar suporte à tomada de decisão em GSCs. Para tanto, o autor emprega o AHP e o *Processo Analítico em Rede* (ANP) (Saaty e Vargas, 2006). Assim, ele classifica os fatores que impactam a tomada de decisão nas GSCs em seis grupos: melhorias nas práticas da GSC, ciclo de vida do produto, ciclo de vida operacional, critérios de desempenho do sistema, práticas ambientalmente relevantes da organização e configurações alternativas viáveis para a GSC. Para cada um desses fatores, o autor propõe a associação de um conjunto predeterminado de critérios. Por exemplo, para as práticas ambientalmente relevantes da organização, são elencados os critérios de redução de matérias-primas, reciclagem, remanufatura e disposição de resíduos. Após isso, são criadas matrizes de pesos entre os critérios de cada um dos fatores por ele propostos. Com a aplicação da técnica AHP sobre uma matriz criada com base nas matrizes de pesos, o autor visa responder perguntas, como o quão mais importante é a reciclagem em relação ao custo ou ao tempo de produção.

As técnicas de avaliação supracitadas baseiam-se na otimização de funções matemáticas com o objetivo de minimizar ou maximizar determinadas variáveis. Apesar de serem bastante úteis para auxiliar um processo de tomada de decisão, essas técnicas não são apropriadas para a representação das condições de interdependência dos elementos de uma rede. Este tipo de representação é essencial ao se criar modelos para as SCs.

Nesta tese, procura-se prover meios de modelar GSCs e aferir indicadores de desempenho ambiental e operacional a partir desses modelos. Essa modelagem deve permitir que parâmetros como quantidade de clientes/produtores, políticas de estoque, tempo entre falhas, entre outros, sejam alterados. Com isso, será possível, por exemplo, determinar o impacto do aumento da demanda sobre o estoque da empresa, permitindo que sejam experimentadas outras políticas de estoque mais adequadas à variação da demanda. Apesar de o foco deste trabalho não ser o processo de tomada de decisão, os resultados que se espera obter a partir dos modelos propostos podem ser utilizados como entrada de ferramentas de tomada de decisão, como as apresentadas em Sarkis (2003) ou Shuwang et al. (2005).

A modelagem e simulação de redes logísticas permitem a avaliação do desempenho atual do sistema, possibilitando ainda a análise de situações alternativas (“*what-if*”). Com essa estratégia, podem-se realizar experimentos alterando-se parâmetros do sistema, bem como o próprio

projeto da rede. Em complemento à modelagem utilizando técnicas matemáticas de otimização, modelos como teoria das filas permitem uma representação mais detalhada da SC. Alterações nos parâmetros dos modelos permitem, por exemplo, que seja medido o impacto de se alterar o tempo de entrega para um determinado cliente sobre o estoque médio de uma instalação da SC. Ou seja, este tipo de modelo é capaz de representar as relações causais do sistema. Quando se utiliza técnicas como a otimização matemática, estas relações causais geralmente são “estimadas”.

Em Kara et al. (2007), o *software* ARENA (Altiok e Melamed, 2007) foi utilizado para simular uma rede logística reversa de eletrodomésticos da linha branca (ex.: geladeira, fogão etc.). Nesse trabalho, o autor realiza experimentos variando a quantidade de eletrodomésticos descartados por ano, a quantidade de componentes que podem ser reaproveitados e a capacidade dos caminhões utilizados no transporte. Os resultados do estudo apontam para algumas situações em que os custos de transporte e carga/descarga dos veículos seriam otimizados no sistema. Por exemplo, considerando uma quantidade de eletrodomésticos descartados entre 50 mil e 800 mil, o autor mostra que o custo ótimo do sistema modelado por componentes é obtido quando essa quantidade está entre 300 mil e 500 mil eletrodomésticos.

Weber et al. (2009) apresenta uma comparação entre uma operação que utiliza um sistema de *e-commerce* e outra que utiliza o sistema tradicional de vendas por varejistas. A emissão de CO_2 e o consumo de energia são comparados entre os dois cenários. O autor conclui que a utilização do *e-commerce* reduz em pouco mais de 20% o total de emissões de CO_2 por entrega e em quase 25% o consumo de energia. No caso da cadeia tradicional, os fatores que mais contribuem para a emissão de CO_2 são o deslocamento de/para o atacadista (65% do total) e o armazenamento de produtos (26%). Quando é adotada a estratégia de *e-commerce*, os fatores que mais contribuem na emissão de CO_2 são o armazenamento de produtos (31%), a utilização de embalagens individuais (22%) e a entrega dos produtos para o cliente final (32%). Nesse estudo, o autor avalia um sistema específico através da simulação de um modelo criado. O objetivo dele é aferir os dados de consumo de energia e emissão de CO_2 , e não propriamente realizar uma avaliação do desempenho do sistema.

A teoria das filas foi utilizada para modelar a montagem e desmontagem de produtos que chegam para ser remanufaturados em Guide et al. (2005). No sistema apresentado, dois tipos diferentes de produto, *A* e *B*, podem ser remanufaturados. Destes, o produto *A* é desmontado em duas partes, *A1* e *A2*, enquanto o produto *B* não passa pelo processo de desmontagem. Além disso, duas instalações são utilizadas para a remontagem das partes de *A* e *B*. Enquanto a

primeira instalação é responsável pela montagem da parte $A1$, a segunda instalação processa as partes $A2$ e B . Ou seja, a segunda instalação é compartilhada, enquanto a primeira é exclusiva para o processamento de $A1$. O objetivo do autor é mostrar que a utilização de uma política de atendimento baseada na priorização do item a ser processado pela instalação apresenta pouco ganho em relação a uma política de atendimento do tipo *first-come-first-served* (FCFS). Para tanto, são realizados experimentos que mostram que a média ponderada do tempo de espera total no sistema é equivalente em ambos os casos. O trabalho desse autor pode servir como base para a modelagem de sistemas de manufatura/remanufatura.

A teoria das filas também é utilizada para modelar e analisar o retorno de produtos à manufatura em van der Laan et al. (1996). Nesse trabalho, utiliza-se a política de estoques (s, Q) , na qual uma ordem de produção de um lote de Q itens é gerada quando a posição de estoque chega a um nível mínimo s . Segundo o autor, a não disposição de produtos retornados à manufatura pode resultar em altos níveis de estoque, o que implicaria custos desnecessários para o sistema. O objetivo desse trabalho é achar o ponto ótimo de uma função objetivo do custo do sistema, variando-se os parâmetros s e Q da política de estoques e a taxa de retorno de produtos.

Em van der Laan e Salomon (1997), o autor estende sua proposta anterior (van der Laan et al., 1996) visando contemplar as políticas de estoque puxado e empurrado (Simchi-Levi et al., 2000) para controlar a manufatura/remanufatura de produtos. Nesse trabalho, o autor lança mão das CMs para a modelagem do sistema. Assim como ocorre em seu trabalho anterior, a disposição dos produtos retornados à manufatura é incorporada às políticas de estoque. Propõe-se então que, a partir de um nível predeterminado, os produtos retornados que estão aguardando pela remanufatura sejam dispostos.

Diferentemente das propostas de van der Laan e Salomon, Fleischmann et al. (2002) procura modelar um sistema de retorno de produtos à manufatura incluindo outros aspectos, como custos fixos do sistema. Para tanto, o autor utiliza as CMs para representar o sistema de remanufatura, procurando otimizar a função objetiva de custos variando a taxa de retorno de produtos. O autor também propõe uma maneira de calcular os valores ótimos de s e Q para uma política de estoques do tipo (s, Q) , considerando a taxa de retorno de produtos. Experimentos numéricos são realizados levando-se em conta algumas políticas de estoque com e sem a disposição dos produtos retornados. Nesse caso, o autor faz algumas simplificações e considera que o custo final do sistema é resultado de uma soma ponderada dos custos de disposição, *backorders* (pedidos pendentes), estoques de produtos acabados, remanufaturados e o *Work-In-Process* (WIP) na manufatura e remanufatura.

Apesar de os trabalhos apresentados por van der Laan e Salomon serem totalmente aplicáveis para a análise específica da remanufatura de produtos, este trabalho foca a análise de uma única instalação da SC. Entidades como armazéns, centros de distribuição e diferentes zonas de consumo não são incluídas na análise. A inclusão dessas outras instalações da SC, poderia tornar inviável a utilização do modelo proposto pelos autores.

Moore propõe uma metodologia baseada em PNs para modelar de maneira automática o processo de desmontagem de produtos enviados para reciclagem/remanufatura em Moore et al. (1998). Essa metodologia baseia-se na criação de uma matriz de precedência para a desmontagem do produto a partir da qual se cria automaticamente uma PN. Essa PN resultante é utilizada para gerar um plano de desmontagem otimizado do produto.

Em Moore et al. (2001), o autor estende seu trabalho original, apresentando detalhadamente o algoritmo de criação do plano de desmontagem do produto e das matrizes de precedência para esta atividade. O autor mostra que a PN resultante do processo automático de geração é *live*, *limitada* e *reversível*. Assim, o modelo pode ser analisado considerando-se a sua árvore de alcançabilidade. Com a árvore de alcançabilidade da rede, o algoritmo proposto procura as melhores soluções em termos de custo, características das partes dos produtos etc.

Bat'a propõe a utilização de PNs coloridas para modelar o fluxo de tratamento de lixo biodegradável em municípios (Bat'a et al., 2008). Nesse trabalho, os autores modelam de maneira *ad hoc* a coleta e o tratamento do lixo. Lugares são utilizados para modelar os resíduos gerados no tratamento e no transporte do lixo e os insumos necessários para o tratamento. O *software* utilizado, Umberto (Umberto – know the flow, 2009), produz uma PN a partir da qual deriva métricas específicas (ex.: custo, refugos do sistema).

A ferramenta Umberto objetiva representar o fluxo de materiais e energia (eletricidade) em sistemas de produção. Esse *software* utiliza uma notação proprietária baseada em PNs de alto nível para a modelagem de sistemas. Devido à técnica de modelagem utilizada, o cálculo das métricas é realizado através do uso de simulação. Como o foco dessa ferramenta é a modelagem do fluxo de materiais e energia, modelos específicos, como compartilhamento de recursos e falhas, não são contemplados. Diferentemente da abordagem apresentada nesta tese, que utiliza PNs temporizadas, essa ferramenta não é capaz de realizar análises como tempo de ciclo de pedido dos clientes, tempo entre falhas, entre outras que dependem do tempo de execução das atividades.

Em meio às propostas que utilizam modelos como teoria das filas, CM, PN (Guide et al., 2005; van der Laan et al., 1996; van der Laan e Salomon, 1997; Fleischmann et al., 2002; Moore

et al., 1998, 2001), salienta-se a possibilidade de realizar experimentos que permitam avaliar as relações causais da variação dos parâmetros do sistema. Pode-se, por exemplo, determinar o tempo médio de espera de atendimento de um pedido variando-se a demanda dos clientes. Apesar disso, as propostas apresentadas utilizam modelos *ad hoc* que não podem ser reutilizados para modelar problemas similares sem que haja um alto grau de especialização do avaliador. Nesse aspecto é que a presente proposta mais se diferencia, permitindo que os componentes sejam conectados de maneira sistemática, utilizando-se uma estratégia *bottom-up*, para formar um modelo que represente uma SC ou um sistema de manufatura. A proposição de métricas específicas baseadas no potencial de aquecimento global (GWP) e na exergia também se mostra como um diferencial da proposta. A definição de exergia será apresentada na seção a seguir.

2.3 Energia e Sustentabilidade

A *energia* pode ser definida como o potencial de uma matéria ou radiação realizar trabalho. De acordo com a primeira lei da termodinâmica, a energia não pode ser criada ou destruída, apenas transformada. A segunda lei da termodinâmica mostra que *quantidade* e *qualidade* são propriedades intrínsecas da energia, e que a transformação da energia não pode ocorrer sem que haja perda da qualidade. O motor de um carro utiliza a energia proveniente de seu combustível (ex.: álcool, gasolina etc.) para movimentar o carro. Nesse processo, não é possível ocorrer um aproveitamento total da energia original (Çengel e Boles, 2005).

A *exergia* indica o potencial de trabalho máximo que pode ser obtido em um sistema até que este entre em equilíbrio termodinâmico com o ambiente (Gibbs, 1873; Kotas, 1985; Szargut, 1980; Çengel e Boles, 2005). Por esse motivo, os termos *energia útil*, *energia disponível*, ou simplesmente *disponibilidade* são empregados como sinônimos de exergia. Kotas (1985) mostra como aferir a exergia química de diversos tipos de substância com base na sua composição química.

Diferentemente do conceito de energia, a exergia de um sistema depende tanto do sistema quanto do ambiente. Um sistema que esteja em equilíbrio termodinâmico com o ambiente possui 0 (zero) de exergia. Nesse caso, diz-se que o sistema está no estado “morto”, uma vez que não pode realizar trabalho. Como a maior parte dos sistemas tende a entrar em equilíbrio com o ambiente, a exergia do sistema sempre tende a ser decrementada, ou no máximo permanecer constante. Esse é o *princípio do decaimento da exergia*. Nota-se que, diferentemente da energia, a exergia de um sistema pode ser destruída (Çengel e Boles, 2005).

Em geral, a análise da exergia no contexto da sustentabilidade busca maximizar a eficiência do uso da energia, ou avaliar a degradação de recursos naturais (Wall e Gong, 2001; Gong e Wall, 2001; Dewulf et al., 2008). Existem diversas propostas que visam utilizar a análise da exergia como métrica de sustentabilidade. A contabilização estendida da exergia (EEA)² (Sciubba, 2003), o consumo cumulativo de exergia (CEC)³ (Szargut e Morris, 1985; Szargut, 1987), a análise da exergia do ciclo de vida (LCEA)⁴ (Gong e Wall, 1997) e a avaliação do ciclo de vida exergético (ELCA)⁵ (Ayres et al., 1998; Cornelissen e Hirs, 2002) são algumas das principais propostas que utilizam, ou foram adaptadas com o intuito de utilizar, a exergia para a ADA. Essas abordagens buscam aferir a exergia consumida ou destruída em um processo. Logo, quanto menor for o consumo ou a destruição de exergia no processo, maior será o seu grau de sustentabilidade. Algumas propostas também procuram unificar a exergia, os custos e outros aspectos para prover um indicador único sobre o desempenho do processo analisado (Rosen e Dincer, 2003; Sciubba, 2003).

No LCEA, busca-se calcular a quantidade total de entradas e saídas de exergia no ciclo de vida de um produto, incluindo as diferenças entre recursos renováveis e não renováveis. Essa técnica divide os recursos naturais em fluxos naturais (ex.: luz solar, vento, oceano etc.), depósitos - ou estoques “mortos” - (ex.: petróleo, minerais, metais etc.) e fundos - ou estoques “vivos” - (ex.: florestas, plantações etc.). Os fluxos naturais e os fundos referem-se a recursos renováveis, enquanto os depósitos representam recursos não renováveis. No LCEA, consideram-se três fases diferentes de um sistema: criação, operação e disposição. Na fase de criação e disposição, o sistema apenas consome exergia ($E_{indirect}$). Durante a operação, o sistema também consome exergia indiretamente para a sua manutenção ($E_{indirect}$). Além disso, o sistema consome exergia diretamente (E_{in}) para a geração de seu produto final, que também possui um valor exergético (E_{pr}). A exergia do produto é dada pela exergia de saída menos a exergia destruída por irreversibilidades no processo.

No caso da utilização de recursos não renováveis, sempre ocorrerá uma degradação dos recursos, logo $E_{pr} < E_{indirect} + E_{in}$. No caso da utilização de recursos renováveis, o LCEA desconsidera a exergia de entrada proveniente desses recursos. Sendo assim, em um tempo $t_{payback}$, toda a exergia indiretamente consumida será compensada pela exergia produzida pelo sistema. Nesse caso, a exergia gerada a partir desse tempo é denominada *exergia líquida do*

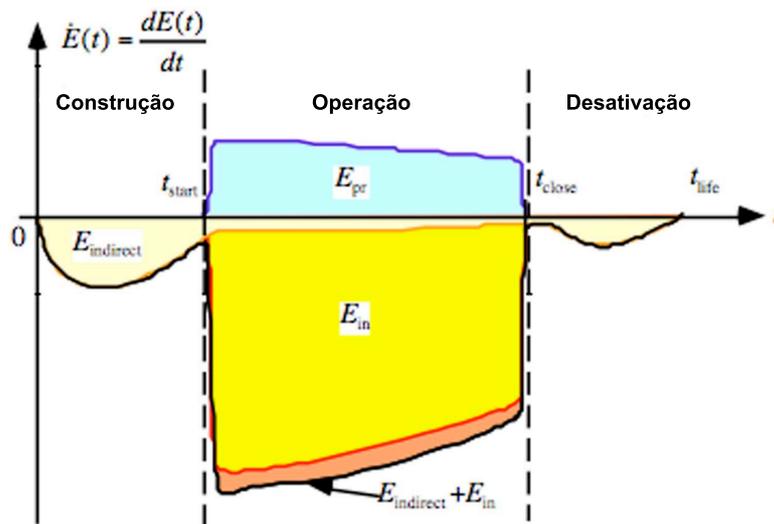
²N. de T.: *extended exergy account* (EEA).

³N. de T.: *cumulative exergy consumption* (CEC).

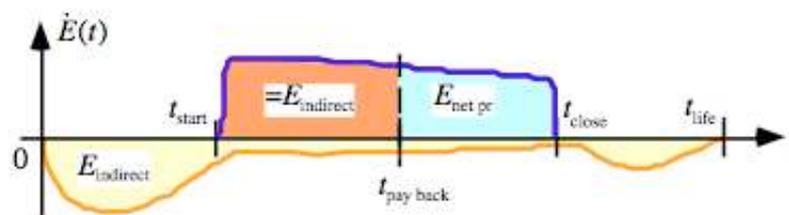
⁴N. de T.: *life cycle exergy analysis* (LCEA).

⁵N. de T.: *exergetic life cycle assessment* (ELCA).

produto ($E_{net,pr}$), sendo: $E_{net,pr} = E_{pr} - E_{indirect}$. A Figura 2.2 mostra a diferença entre o ciclo de vida de um processo que utiliza recursos não renováveis e um processo que utiliza recursos renováveis. Nesse trabalho, o autor ainda advoga quanto à importância de se criar um modelo do fluxo da exergia para realizar a sua análise. Como os modelos criados nesta proposta serão construídos utilizando-se SPN para a modelagem dos processos de negócio, o fluxo inerente à estrutura das PNs representará de maneira natural o fluxo da exergia no sistema.



(a) Com recursos não renováveis.



(b) Com recursos renováveis.

Figura 2.2 Entradas e saídas da exergia durante o ciclo de vida do sistema.

Outra técnica que procura utilizar a exergia como medida para a análise do ciclo de vida (LCA) é a ELCA (Cornelissen e Hirs, 2002), que visa utilizar a destruição da exergia, devido às irreversibilidades do sistema, como medida na depreciação de recursos naturais. No ELCA, as irreversibilidades do sistema são capazes de expressar corretamente a depreciação dos recursos naturais quando não se utilizam recursos renováveis. Porém, mesmo quando se consideram recursos renováveis, uma alta irreversibilidade pode representar o consumo ineficiente desses

recursos. Nesse sentido, a depreciação de recursos naturais (não renováveis) no meio ambiente é medida subtraindo-se a exergia proveniente dos recursos renováveis do total das irreversibilidades do sistema. A depreciação dos recursos é dada por:

$$D_{natural\ resource} = I_{life\ cycle} - E_{renewables}$$

, onde $I_{life\ cycle}$ é o total das irreversibilidades do ciclo de vida do processo e $E_{renewables}$ é a quantidade total de exergia proveniente de fontes renováveis. A irreversibilidade de cada processo é calculada como $I = X_{out} - X_{in}$, onde X_{out} e X_{in} são, respectivamente, a exergia química de saída e entrada de cada processo.

Rosen e Dincer (2001) apresenta um estudo que busca ressaltar a relevância de se considerar a exergia na avaliação do impacto ambiental de recursos e fontes energéticas em sistemas sustentáveis. Nesse trabalho, o autor associa a eficiência exérgica a um maior grau de sustentabilidade do sistema. Um exemplo que mostra a diferença na comparação da eficiência de um sistema considerando a energia e a exergia também é realizado. É mostrado que perdas internas do sistema não são contabilizadas quando se realiza um estudo com base na energia. Por outro lado, essas perdas são contabilizadas quando se utiliza a exergia. Essa diferença é inerente ao *princípio do decaimento da exergia* e não teria como ser observada considerando-se a energia. Em Rosen et al. (2008), o autor reforça as conclusões encontradas em seu trabalho original, incluindo alguns modelos matemáticos que visam quantificar a eficiência exérgica de um sistema.

Diversos trabalhos foram realizados, na área das cadeias de suprimentos, buscando utilizar a exergia para comparar e graduar o impacto ambiental de sistemas, operações ou mesmo SCs (Sciubba, 2003; Lettieri et al., 2009; Weber et al., 2009). Nesses trabalhos, busca-se determinar a quantidade de exergia consumida e/ou dissipada/destruída no sistema. Assim como ocorre com os trabalhos que aplicam o LCA, os que procuram avaliar o consumo exérgico são focados exclusivamente nesse aspecto, ignorando questões como desempenho operacional, disponibilidade e falhas. Esses aspectos, por outro lado, serão contemplados pela presente proposta que abrange a aferição de indicadores ambientais, de desempenho e de disponibilidade.

Sciubba (2003) propõe a EEA para contabilizar fatores não energéticos, como custos e impacto ambiental, na análise de processos. Essa metodologia consiste em definir um sistema como um diagrama de blocos no qual cada bloco representa um processo (ex.: extração de matéria-prima, manufatura etc.). Para cada bloco são definidas as seguintes entradas e saídas:

Entradas: Matérias-primas (I_1), suprimento de energia (I_2), custos (I_3) e trabalho humano (I_4).

Saídas: Produtos (O_1 e O_2), energia descartada (O_3), energia reciclada (αO_3), subprodutos (O_4), resíduos (O_5), resíduos reciclados (αO_5) e perdas de exergia (E_λ).

Cada uma das entradas e saídas descritas pelo autor pode ser referenciada por um dado processo. Caso o processo não contemple a entrada ou saída, é atribuído 0 (zero) ao seu valor. Com base na definição apresentada, o autor propõe fórmulas que visam contabilizar a eficiência produtiva do processo, o custo exergético total, a exergia despendida por hora de trabalho, entre outros.

Como os resultados apresentados pela metodologia sempre retornam valores em $kJ/(kg \text{ de produto})$ ou $kJ/(kJ \text{ de trabalho humano})$ (Sciubba, 2003), o autor afirma que uma das vantagens de sua metodologia é o fato de não requerer que nenhuma conversão extra seja realizada para calcular o trabalho humano necessário ou o impacto ambiental. Além disso, o autor afirma que, atribuindo-se um custo por kJ de exergia, é possível calcular diretamente o custo monetário final do sistema.

Porém, a abordagem proposta necessita que seja realizada uma aproximação do custo exergético, uma vez que este pode variar de acordo com a fonte utilizada (ex.: eletricidade, gasolina etc.). Logo, o “custo exergético” deve ser, na verdade, calculado com base em uma média ponderada do custo de cada fonte energética. A metodologia proposta também não permite que se avaliem questões de desempenho do sistema como a disponibilidade de recursos.

Em Apaiah et al. (2006), apresenta-se um estudo da exergia despendida em uma cadeia de suprimentos alimentícia, desde a produção da matéria-prima até o consumo do produto final. Para isso, as operações realizadas são mapeadas e, para cada uma delas, são definidas as suas entradas (ex.: gás natural, eletricidade, pesticidas) e saídas (ex.: lixo).

As entradas e saídas de cada processo (ex: preparação do solo, transporte, embalagem etc.) realizado nas diferentes etapas da SC (ex.: extração de matéria-prima, manufatura etc.) são utilizadas para calcular a diferença exergética. Com base no somatório das diferenças exergéticas, o autor apresenta o impacto ambiental de três cadeias de suprimentos de alimentos. Além disso, também se apresenta o consumo e a geração detalhados de cada entrada/saída das SCs avaliadas.

Lettieri et al. (2009) propõe a utilização da LCEA para a avaliação do impacto ambiental decorrente de sistemas tecnológicos. O autor compara essa técnica com outras técnicas conhecidas, como a análise da energia do sistema e a LCA. Um estudo de caso com base em um sistema de *data centers* é apresentado neste trabalho visando mostrar as suas conclusões.

O autor ainda propõe uma série de parâmetros que devem ser utilizados para a avaliação do

consumo da exergia nos *data centers*, como o consumo de exergia para extração e processamento das matérias-primas, o consumo exergético para os diferentes meios de transporte, entre outros.

Em Marwah et al. (2009), realiza-se um estudo semelhante ao apresentado em Lettieri et al. (2009). Porém, agora o autor realiza estudos de disponibilidade e LCEA dos recursos do *data center*. Nesse trabalho, busca-se comparar alternativas diferentes para a arquitetura do *data center*, provendo uma análise do seu impacto sobre a exergia, a disponibilidade e o custo do sistema. A análise da disponibilidade do sistema é realizada utilizando-se as SPNs, porém a análise do LCEA é realizada em separado. Apesar de citar a possibilidade de utilizar o GWP na comparação, nenhum estudo comparativo é realizado.

A *energia embarcada* em um produto ou serviço, ou simplesmente *emergia*, é um conceito datado dos anos 1970 (Odum, 1971). A *emergia* indica a quantidade de energia utilizada direta ou indiretamente para fazê-lo, comparando-a com a energia solar (medida em *equivalente de energia solar sej*⁶). Odum mostra que a *emergia* quantifica todo o trabalho derivado de recursos naturais ou humanos.

Em Hau e Bakshi (2004), apresenta-se uma metodologia para avaliar o impacto ambiental utilizando o indicador de *consumo ecológico cumulativo da exergia* (ECEC)⁷. Esse indicador procura unificar os conceitos de *emergia* e *exergia* na análise de atividades industriais. O autor mostra que ambos os métodos são equivalentes quando são guardadas algumas restrições, como as fronteiras dos sistemas analisados.

A quantidade de *exergia* consumida pelo ecossistema durante a produção de matéria-prima é incorporada ao total consumido pelo processo produtivo. Alguns modelos matemáticos são propostos para quantificar o fluxo de *exergia* entre as entidades de uma SC. Além dos modelos matemáticos, o autor ainda apresenta um algoritmo para realizar o cálculo do ECEC.

Considerando uma série de restrições específicas para fronteiras do sistema, Hammond e Jones (2008) apresenta um estudo da *emergia* em materiais de construção. Segundo o próprio autor, os dados apresentados nesse trabalho são aproximados, e “não pode ser garantida a precisão dos resultados”. Essa “imprecisão” se deve à complexidade de se avaliar todo o caminho desde a extração até o uso de cada uma das matérias-primas utilizadas.

De fato, um dos principais problemas para aplicar a LCA, levando em conta todo o ciclo de vida do produto, é a dificuldade de aferir as métricas em todas as diversas etapas desse ciclo. Esse problema se torna mais grave quando se considera a *emergia*, devido ao fato de essa

⁶N. de T.: Sigla proveniente do inglês *solar-equivalent Joules*.

⁷N. de T.: Ecological Cumulative Exergy Consumption (ECEC).

métrica necessitar que todo o ciclo de vida seja contemplado para que seus resultados sejam corretos. Essa dificuldade se deve às fronteiras do sistema analisado. Ao analisar a produção de um produto que utilize madeira entre suas matérias-primas, a energia dessa madeira dependerá, dentre outros, da origem (floresta nativa, reflorestamento ou cultivo), da forma de extração e do modal de transporte utilizado (rodoviário, aquaviário, aéreo).

Caso a madeira utilizada seja originária de cultivo próprio, precisa-se contabilizar a energia da água utilizada na irrigação, a mão de obra utilizada etc. Caso tenha sido transportada pelo modal rodoviário, precisa-se considerar a energia do caminhão utilizado, da estrada etc. Esse exemplo deixa clara a complexidade de se utilizar a energia para a análise do impacto ambiental nas SCs. Analogamente, uma análise completa do LCA também se torna complexa pelos mesmos motivos da adoção da energia na análise.

Dado o problema exposto, esta tese busca fornecer um *framework* que permita a análise separada das atividades específicas e do seu impacto ambiental. Essa análise se baseia na variação porta a porta do LCA. Tal estratégia visa mostrar o impacto específico do processo avaliado desprezando-se a origem/destino dos insumos. Excetua-se, nesse contexto, o destino de insumos descartados, que deverá ser indicado, uma vez que se refere a impactos gerados diretamente pela atividade avaliada.

Com base nos dados obtidos, a análise pode ser estendida para todo o ciclo de vida caso as demais atividades também possuam uma análise porta a porta. Indicadores como a utilização de insumos com certificação ambiental também podem ser utilizados para apontar o direcionamento de pontos de melhoria ambiental nos processos. Esses indicadores, porém, não serão cobertos nesta tese, uma vez que já são suficientemente detalhados por trabalhos existentes (Cascio, 1999; Morris, 2000).

O consumo de energia é de fundamental importância em uma análise de desempenho ambiental de sistemas. Como a exergia é capaz de expressar tanto o consumo quanto as perdas do insumo utilizado, ela será utilizada em métricas referentes ao consumo energético (ex.: combustíveis, energia elétrica etc.) nesta tese. Será utilizada uma abordagem semelhante ao ELCA, na qual se busca aferir as perdas da exergia do sistema. No caso de recursos não energéticos, métricas de GWP serão utilizadas para determinar o impacto ambiental dos processos.

Essa decisão se deve à dificuldade de se aferir de maneira precisa a exergia de todos os materiais utilizados em um processo de manufatura (ou uma SC) (Ayres et al., 1998; Gong e Wall, 2001), o que dificultaria uma aplicação prática dos modelos propostos. Além disso, os resultados obtidos a partir de uma análise exérgica diferem dos valores obtidos a partir da

análise baseada no GWP, conforme apresentado em Gong e Wall (2001). Gong advoga que a utilização da exergia proveria valores melhores, quanto ao impacto ambiental em um LCA, do que a utilização do *Eco-indicator 95* (Goedkoop, 1995; Goedkoop et al., 2000), que se baseia no GWP. Porém, o próprio autor reconhece que “este tipo de estudo requer mais esforço, pesquisa e dados, além de sofrer pela falta de um padrão quanto à sua utilização para prover os dados precisos sobre o impacto ambiental de um processo ou produto”.

A diferença entre os resultados também iria acarretar problemas para avaliar o desempenho do processo, uma vez que dificultaria, se não impossibilitasse, um processo de *benchmarking* (Stapenhurst, 2009) comparando os resultados da empresa com o de outras empresas. Apesar disso, a utilização da exergia nesta tese provê duas grandes vantagens: a possibilidade de avaliar mais precisamente o impacto ambiental da utilização de diferentes fontes energéticas e avaliar a eficiência no consumo dessas fontes.

Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados alguns dos principais trabalhos observados durante a pesquisa bibliográfica desta tese. Os trabalhos aqui mostrados foram agrupados em três seções. Na Seção 2.1 apresentou-se os principais trabalhos que utilizam PNs para a modelagem de SCs. Algumas das abordagens que utilizam PNs de alto nível buscam definir componentes, porém, dentre as redes estocásticas, a utilização da modelagem *ad-hoc* prevalece. Mesmo quando procurando adotar uma modelagem baseada em componentes, esses trabalhos requerem uma intervenção manual para se obter o modelo final.

Na Seção 2.2, foram mostrados os trabalhos que buscam aferir a sustentabilidade em SCs. Os trabalhos nesta área geralmente adotam a modelagem matemática com técnicas como a programação linear e a AHP. Estas técnicas se mostram eficazes para a otimização dos sistemas, porém não são adequadas para representar as relações de interdependência dos componentes do sistema, como ocorre em técnicas utilizadas para modelagem de redes como SPNs e teoria das filas.

Por fim, a Seção 2.3 apresentou os trabalhos que utilizam a energia para aferir a sustentabilidade do sistema. Mesmo os autores que defendem o uso desta abordagem, consideram que utilizar esta técnica pode ser muito complicado devido à necessidade de se avaliar as atividades desde a extração até o uso de cada uma das matérias-primas utilizadas, além da necessidade de se determinar a composição química de cada uma delas.

Como será apresentado, esta tese pretende utilizar as SPNs para modelar SCs. As métricas ambientais e operacionais são extraídas de um único modelo SPN. Além disso, a exergia é aferida apenas para recursos consumidos com o objetivo de gerar energia, simplificando a aplicação desta métrica. Mesmo com esta simplificação, há um ganho na qualidade da avaliação do impacto ambiental proveniente da utilização de recursos energéticos, quando comparamos com os métodos tradicionais que não usam a exergia.

Gerenciamento de Cadeias de Suprimentos Verdes

A espada da ciência tem dois gumes. Sua força terrível impõe a todos nós [...] uma nova responsabilidade - mais atenção às consequências de longo prazo da tecnologia, uma perspectiva que ultrapasse as fronteiras dos países e das gerações... Os erros estão se tornando caros demais.

—CARL SAGAN (Cientista, Astrofísico e Escritor)

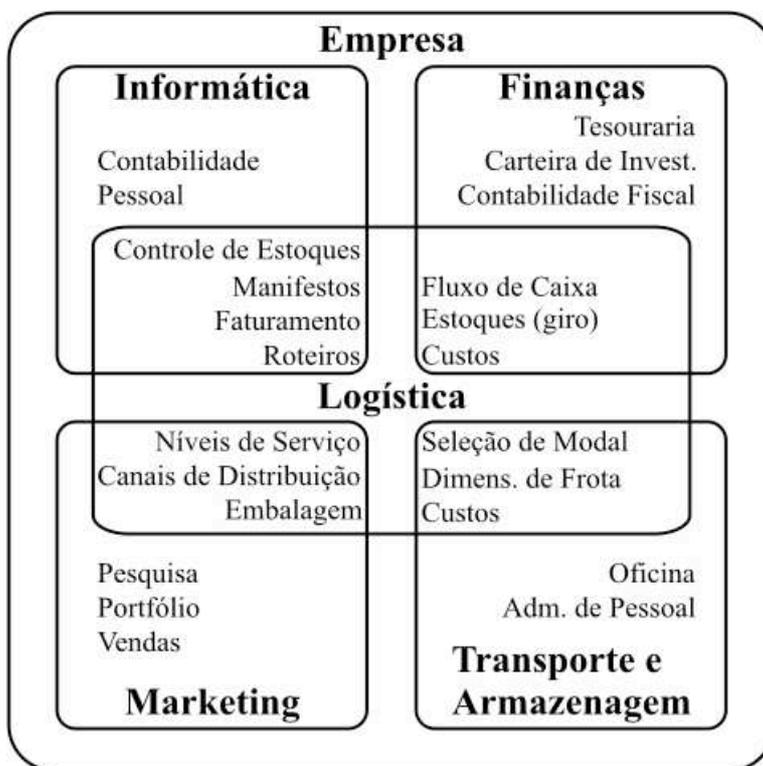
Este capítulo apresenta alguns conceitos relativos ao gerenciamento de cadeias de suprimentos verdes (GSCM), necessários ao longo deste trabalho. Antes de apresentar os conceitos específicos do GSCM, serão tratados alguns aspectos gerais do gerenciamento de cadeias de suprimentos (SCM), sem tratar a sustentabilidade das atividades e produtos da SC.

3.1 Cadeias de Suprimentos

A logística começou a ganhar força graças aos meios militares a partir das Guerras Napoleônicas. Segundo (Arbache et al., 2004), isso possivelmente ocorreu com a utilização de armamentos pesados, inseridos no campo de batalha devido à Primeira Revolução Industrial, e toda a sua complexidade de deslocamento. Após sua aplicação na área militar, a logística passou a ser valorizada pelas indústrias civis.

O *Council of Supply Chain Management Professionals* (CSCMP) (CSCMP - Council of Supply Chain Management Professionals, 2009) afirma que o *gerenciamento logístico* envolve tarefas como transporte interno e externo, gerenciamento de frota, armazenagem, cumprimento dos pedidos, desenho da rede logística, gerenciamento de estoque, planejamento de demanda e suprimentos e gerenciamento dos serviços logísticos prestados por terceiros. Assim, para realizar uma avaliação logística é necessário avaliar diversas atividades diferentes das mais diversas áreas da empresa, conforme denota a Figura 3.1.

Apesar da logística não tratar apenas de estoque e distribuição, é comum confundir-la com estas atividades. Isso se deve ao fato de essas serem as atividades que mais requerem recursos



Fonte: Arbache et al. (2004), pg. 24

Figura 3.1 Interfaces da logística com outras áreas da empresa.

e de, no início, elas terem uma maior atenção devido aos seus custos. Isso mudou quando se notou que toda a cadeia de suprimentos (SC) precisa ser considerada para que se obtenha uma situação ótima (Simchi-Levi et al., 2000; Arbache et al., 2004; Ballou, 2004).

Ainda de acordo com o CSCMP, além de todas as atividades relacionadas à logística, o gerenciamento de cadeias de suprimentos (SCM) também trata da coordenação e colaboração entre os parceiros de canais, que podem ser fornecedores, intermediários, prestadores de serviço e clientes, integrando suprimento e demanda entre as companhias. Assim, esse gerenciamento, e uma consequente avaliação, deve considerar não apenas os índices da empresa, mas de todas ou de parte das entidades envolvidas, pois muitas vezes a redução dos custos locais da empresa pode acarretar um aumento do custo geral da SC (Simchi-Levi et al., 2000).

A logística de uma empresa pode ser dividida em duas etapas: antes e depois da manufatura dos produtos. A *logística de suprimentos*, também conhecida como *logística de entrada* ou *inbound logistics*¹, trata da movimentação dos produtos (ex.: matérias-primas) desde os

¹N. de T.: termo também utilizado em português.

fornecedores até a empresa. A *logística de distribuição* trata do processo pelo qual passam os produtos acabados a partir de sua produção, ou seja, desde seu armazenamento até que sejam entregues aos clientes. São sinônimos desta atividade: *logística de saída*, *distribuição*, *distribuição física* ou *outbound logistics*².

Além desses dois macroprocessos, também se pode analisar a *logística interna*, ou *de operações*, e a *logística reversa*. A primeira diz respeito ao controle das movimentações e dos estoques em processo (WIP³) nas linhas de produção. A segunda refere-se ao fluxo de produtos a partir dos *clientes* para os *fornecedores*. Segundo (Arbache et al., 2004), esse processo ganhou força nos últimos anos, com a disseminação da reciclagem e a responsabilização de algumas empresas no que tange ao destino de seus produtos utilizados, como ocorre com baterias e pneus.

Os níveis das decisões tomadas no gerenciamento de uma cadeia de suprimentos são classificados como (Simchi-Levi et al., 2000):

Nível estratégico: Trata de decisões de longo prazo, o que inclui, por exemplo, decisões que dizem respeito ao número, à localização e à capacidade dos depósitos e plantas de produção.

Nível tático: As decisões são, geralmente, revistas em períodos trimestrais ou anuais. Nesse nível de decisão, consideram-se a estratégia de compras, as políticas de estoques e as estratégias de transporte.

Nível operacional: Refere-se às questões do cotidiano da empresa, como roteamento e carregamento de caminhões.

Este trabalho atém-se às decisões estratégicas e táticas. A Tabela 3.1 fornece um exemplo de algumas decisões tomadas em cada um dos níveis descritos.

3.1.1 Projeto da Rede de Distribuição

Para que se realize uma boa conceituação e implementação da logística de distribuição de uma empresa, são necessárias as corretas representação e análise da *rede de distribuição*. Segundo (Alvarenga e Novaes, 2000), essa rede é “*a representação físico-espacial dos pontos de origem*

²N. de T.: termo também utilizado em português.

³N. de T.: sigla proveniente do inglês *Work-In-Process*.

Tabela 3.1 Algumas das decisões tomadas nos níveis estratégico, tático e operacional.

Área	Nível		
	Estratégico	Tático	Operacional
Localização das instalações	Quantidade, área e localização de armazéns, plantas de produção e terminais		
Estoques	Localização de estoques e normas de controle	Níveis de estoque de segurança	Quantidade e momento de reposição
Transporte	Seleção de modal	Leasing de equipamentos	Roteamento e despacho de veículos
Processamento de pedidos	Projeto do sistema de entrada, transmissão de pedidos e processamento		Processamento de pedidos e atendimento de pedidos pendentes
Serviço aos clientes	Padrões de procedimentos	Regras de priorização dos pedidos dos clientes	Preparação de remessas
Armazenagem	Seleção do material de deslocamento, layout da instalação	Escolhas de espaços sazonais e utilização de espaços privados	Separação de pedidos e reposição de estoques
Compra	Desenvolvimento de relações fornecedor-comprador	Contratação, seleção de fornecedores, compras antecipadas	Liberação de pedidos e compras emergenciais

Fonte: Ballou (2004), pg. 53

e destino das mercadorias, bem como de seus fluxos e demais aspectos relevantes, de forma a possibilitar a visualização do sistema logístico no seu todo”.

Em uma rede de distribuição física, o ponto de origem dos produtos são as fábricas, responsáveis pela transformação das matérias-primas em produtos acabados. O ponto final das redes são os clientes. Além disso, podem existir vários intermediários (ex.: atacadistas e representantes) entre a fábrica e o cliente.

Devido à grande quantidade de clientes em uma cadeia de suprimentos, é comum agrupá-los em *zonas*. Uma *zona* é composta por diversos clientes de uma mesma região geográfica que possuem características comuns de consumo e são atendidos pelo mesmo meio de transporte com uma dada periodicidade (Alvarenga e Novaes, 2000). A Figura 3.2 mostra um esquema de agrupamento dos clientes em zonas para uma determinada região atendida por um depósito.

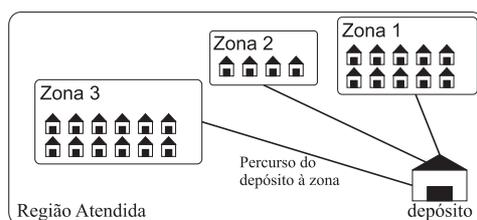


Figura 3.2 Agrupamento dos clientes em zonas para uma região atendida.

Os *intermediários* de uma cadeia de suprimentos têm a função de dar suporte à distribuição de produtos acabados das fábricas. Esses *intermediários* podem ser atacadistas, distribuidores, representantes ou mesmo depósitos/centros de distribuição da empresa. Sua função é manter estoques de produtos acabados, que são distribuídos para os clientes finais. Muitas vezes, esses intermediários disponibilizam um *mix* mais diversificado de produtos, melhorando a qualidade do serviço prestado, reduzindo os *lead times* e a quantidade de pedidos pendentes dos clientes. Entendem-se por *lead time* os atrasos que ocorrem ao longo da cadeia, seja no fluxo de informações ou na entrega dos produtos.

Na Figura 3.3(a), é apresentada uma cadeia de suprimentos em que três fábricas distribuem seus produtos para três zonas. Nesse cenário, são necessários nove contatos para que se realize a distribuição. Alterando-se esse cenário de forma que as fábricas entreguem seus produtos a um intermediário, que por sua vez os distribui para as zonas, obtém-se uma rede semelhante à descrita na Figura 3.3(b).



(a) Cadeia de suprimentos sem intermediários.

(b) Cadeia de suprimentos com um intermediário.

Fonte: Kotler e Keller (2005), pg. 468

Figura 3.3 Redução dos contatos da cadeia de suprimentos.

Observe que os intermediários podem fazer parte da mesma corporação da empresa (ex.: armazéns), ou mesmo ser empresas independentes (ex.: atacadistas). O primeiro caso é, geralmente, empregado quando a fábrica distribui seus produtos para clientes de uma região distante. Assim, um armazém, mais próximo aos clientes, pode reduzir os custos de transporte e ainda melhorar o nível de serviço. Nesse caso, nota-se claramente a vantagem da utilização do intermediário.

No segundo caso, porém, quando o intermediário é uma empresa independente, a vantagem de sua utilização pode não ser claramente percebida. Porém, esses intermediários têm a importante função de “*diminuir a distância entre a variedade de mercadorias e serviços oferecida pelo fabricante e a variedade necessária para atender à demanda exigida pelo consumidor*” (Kotler e Keller, 2005). Isso ocorre porque, em geral, os fabricantes produzem uma variedade

limitada de produtos em grande quantidade, enquanto os clientes demandam uma quantidade limitada de uma grande variedade de produtos.

Além disso, os intermediários ainda possibilitam que os produtos de um fabricante sejam entregues a clientes de localidades cujo atendimento não seria economicamente viável caso fosse realizado diretamente pelo fabricante (Simchi-Levi et al., 2000).

Quanto ao gerenciamento das informações, as cadeias de suprimentos podem ser classificadas como *descentralizadas* ou *centralizadas*. Nas cadeias *descentralizadas*, cada entidade possui informação apenas sobre ela própria, e suas decisões são tomadas visando a uma *otimização local*. Muitas vezes, a otimização local onera a cadeia de suprimentos como um todo, acarretando, por exemplo, níveis de estoque mais elevados, quando se analisa o total de estoque na cadeia de suprimentos.

Nos sistemas *centralizados*, a informação é compartilhada entre as diversas instalações da cadeia de suprimentos. Nesse tipo de sistema, as decisões são tomadas objetivando a *otimização global* da SC. Quando a rede de distribuição é composta por instalações de uma mesma organização, torna-se mais fácil de implantar essa estratégia. Porém, mesmo quando diversas organizações participam da rede, pode-se adotar essa estratégia, repartindo os lucros por meios contratuais (Simchi-Levi et al., 2000). Esse tipo de sistema auxilia a previsão de demanda reduzindo a variabilidade dos pedidos ao longo da rede, amenizando o *efeito chicote* (Lee et al., 1997) e melhorando os *níveis de serviço*.

3.1.2 Estratégias de Distribuição

A distribuição dos produtos acabados, geralmente, emprega uma ou mais das seguintes *estratégias de distribuição* (Simchi-Levi et al., 2000):

Remessa direta: Os produtos acabados são enviados diretamente da fábrica para os consumidores e varejistas, sem a utilização de intermediários.

Estoques em armazéns: É a estratégia clássica, na qual os estoques são mantidos em armazéns/depósitos, a partir dos quais os pedidos dos clientes são atendidos.

Cross-docking: Os itens são distribuídos para os clientes de forma contínua, através de depósitos que, ao contrário da estratégia anterior, não mantêm estoque. Os itens que chegam a esses estoques não costumam ser estocados por mais de 15 horas.

Na estratégia de *remessa direta*, os fabricantes evitam a utilização de centros de distribuição e depósitos, entregando seus produtos diretamente para varejistas ou mesmo para os clientes finais. Com essa estratégia, os custos decorrentes da utilização de depósitos são reduzidos, além de se obter uma redução dos *lead times*. Porém, como se faz necessário o envio de caminhões menores para diversos destinos, devido ao aumento do número de contatos da rede, os custos de transporte aumentam. Essa estratégia se mostra bastante eficaz em setores que lidam com produtos de alta perecibilidade, uma vez que os *lead times* são reduzidos.

O *cross-docking* procura evitar a armazenagem de produtos acabados, transferindo o estoque físico para *estoques em trânsito* (Simchi-Levi et al., 2000). Para adotá-lo, são necessários diversos investimentos e um gerenciamento complexo e caro. Além disso, essa estratégia requer que as informações sejam compartilhadas entre as entidades da cadeia de suprimentos, uma vez que, para se obter um bom gerenciamento do fluxo de produtos através da SC é necessário que as previsões de demanda sejam as mais próximas possíveis da realidade.

Raramente utiliza-se apenas uma dessas estratégias para realizar a distribuição dos produtos acabados. Estratégias diferentes podem ser adotadas para clientes e/ou famílias de produtos diferentes. Produtos de alta perecibilidade, por exemplo, podem precisar ser entregues através de remessa direta. Varejistas podem necessitar de que estratégias específicas como o *cross-docking* sejam utilizadas, e clientes de uma dada região podem ser melhor atendidos com o uso da estratégia clássica, ou seja, através de depósitos que lhes propiciem um melhor nível de serviço podendo, ainda, resultar em uma redução de custos.

3.1.3 Controle de Estoques

Outro fator preponderante ao se otimizar a cadeia de suprimentos é o *controle de estoques*. O excesso de estoques leva a um aumento desnecessário dos custos, enquanto sua escassez impacta consideravelmente a qualidade do serviço prestado.

Duas estratégias podem ser utilizadas com relação ao gerenciamento dos estoques dos intermediários: *puxar* ou *empurrar*⁴. Nos *sistemas puxados*, a reposição dos estoques dos intermediários do canal de distribuição (ex.: armazéns) é feita a partir da solicitação realizada pelos próprios intermediários aos seus fornecedores. Já nos *sistemas empurrados*, a reposição destes estoques é dada a partir de previsões realizadas pelo próprio fornecedor, que envia seus produtos aos intermediários (Kotler e Keller, 2005; Ballou, 2004). O gerenciamento dos estoques em

⁴N. de T.: é comum se referir a estas estratégias utilizando-se os termos em inglês *pull* e *push*, respectivamente.

sistemas puxados pode ser realizado de diferentes maneiras, sendo as principais:

(r,Q): Pedidos de Q unidades realizados a cada intervalo de tempo r . O intervalo r é denominado *período de revisão*⁵.

(r,S): A cada intervalo de tempo r , é realizado um pedido de $S - IP$, onde IP é a *posição de estoque* atual e S é o nível máximo de estoque.

(s,Q): Quando o estoque atinge um nível mínimo s , realiza-se um pedido de Q unidades.

(s,S): Quando o estoque atinge um nível mínimo s , realiza-se um pedido de $S - IP$, onde IP é a *posição de estoque* atual e S é o nível máximo de estoque.

(r,s,Q): Semelhante à política (s, Q) , porém o nível de estoque só é aferido a cada *período de revisão* r .

(r,s,S): Semelhante à política (s, S) , porém o nível de estoque só é aferido a cada *período de revisão* r .

A *posição de estoque* de uma fábrica ou um intermediário é obtida pela soma do seu estoque armazenado com o estoque em processo (WIP), ou seja, os itens solicitados que ainda não chegaram⁶. A política (r, S) pode ser denominada como *política de estoque-base* quando o *período de revisão* é 1 ($r = 1$). Essas políticas apresentadas são do tipo *make-to-stock* (MTS), no qual as mercadorias são produzidas e armazenadas até que sejam solicitadas pelos clientes. Na fábrica, a produção ainda pode ser controlada com uma política do tipo *make-to-order* (MTO), na qual a produção ocorre após a fábrica receber o pedido dos clientes.

3.2 Sustentabilidade no Contexto das Cadeias de Suprimentos

A Agência de Proteção Ambiental (EPA) define sustentabilidade como “*alcançar as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de alcançar suas próprias necessidades*” (EPA – Environmental Protection Agency, 2009). Diversos aspectos precisam ser considerados no que diz respeito à sustentabilidade de uma atividade. Aspectos sociais e

⁵N. de T.: do inglês *review period*.

⁶Uma variante dessa abordagem também considera os pedidos pendentes ao calcular a *posição de estoque* (Ballou, 2004).

econômicos, a utilização de recursos e o impacto ambiental estão diretamente relacionados com esse conceito. Além disso, esses aspectos podem ser conflitantes entre si.

O conceito de *ecoeficiência* pode ser definido simplesmente como produzir mais com menos. A redução de resíduos e poluição e a utilização de menos energia e matéria-prima são exemplos de ações que melhoram a ecoeficiência de uma cadeia de suprimentos. Além de reduzirem o impacto ambiental, algumas delas, como a utilização de menos energia, também podem reduzir custos das empresas, mesmo que necessitem de um maior investimento inicial (The Lexington Group, 2000).

A Prevenção à Poluição (P2) também está diretamente relacionada à ecoeficiência da SC. A EPA regula a política de P2 nos Estados Unidos declarando que toda poluição deve ser evitada ou reduzida sempre que possível; a poluição que não puder ser evitada deve ser reciclada de forma ecologicamente segura; a poluição que não puder ser reciclada deve ser tratada de forma ecologicamente segura; como último recurso, a poluição deve ser descartada no meio ambiente de forma ecologicamente segura (Environmental Protection Agency – EPA, 1990).

O gerenciamento de cadeias de suprimentos verdes (GSCM) trata de questões que podem acarretar um impacto ambiental em qualquer estágio do ciclo de vida de um produto. A Figura 3.4 apresenta o esquema de uma cadeia de suprimentos, considerando o fluxo reverso de materiais (logística reversa). Esse esquema foi criado com base em Fleischmann et al. (1997), Beamon (1999b) e Cash e Wilkerson (2003).

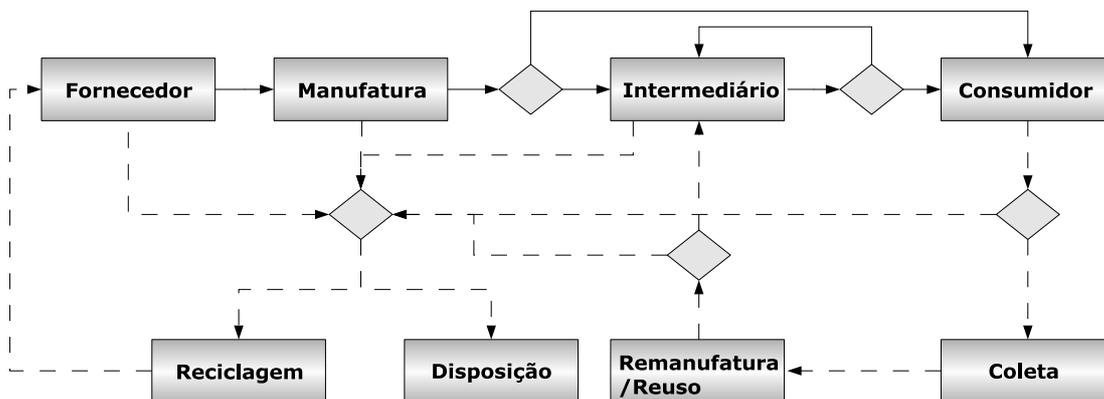


Figura 3.4 Esquema de uma cadeia de suprimentos verde.

Nesse esquema, as linhas sólidas representam o fluxo de materiais ao longo da cadeia de suprimentos, enquanto as linhas tracejadas representam o fluxo da logística reversa. Essa movimentação dos produtos/resíduos na cadeia pode requerer que seja realizado o transporte físico dos mesmos. No fluxo principal, a movimentação de produtos entre os fornecedores e a ma-

nufatura representa a logística de suprimentos, enquanto o fluxo a partir da manufatura até o consumidor representa a logística de distribuição.

Os produtos consumidos e os resíduos gerados em qualquer etapa da cadeia de suprimentos podem ser enviados para disposição em aterros ou para compostagem, podendo ainda ser reciclados. Após consumidos, os produtos acabados podem ainda ser enviados para um processo de remanufatura ou ser reutilizados. Neste caso, faz-se necessária a coleta dos produtos a partir dos próprios clientes ou em pontos de estocagem desses produtos. Por exemplo, um computador defeituoso pode ser reenviado para a indústria a fim de ser remanufaturado ou para que se reaproveitem seus componentes.

Tendo em vista o esquema da GSC apresentado, a Tabela 3.2 mostra os possíveis insumos e impactos ambientais em cada atividade/estágio da cadeia de suprimentos. Essa tabela foi adaptada de (Cash e Wilkerson, 2003), incluindo a utilização de água e energia dos intermediários e o consumo de energia no transporte dos produtos/resíduos.

Tabela 3.2 Insumos e impactos em uma cadeia de suprimentos verde.

Etapa	Insumo	Impacto
Fornecedor	Água, Energia	Ar, Água, Solo
Manufatura	Água, Energia	Ar, Água, Solo
Intermediário	Água, Energia	Ar, Água, Solo
Consumidor	Energia	Ar, Água, Solo
Coleta	Energia	Ar
Remanufatura/Reuso	Água, Energia	Ar, Água, Solo
Disposição	Energia	Ar, Água, Solo
Reciclagem	Água, Energia	Ar, Água, Solo
Transportador	Energia	Ar

As operações relacionadas à cadeia de suprimentos e à manufatura possuem grande impacto ambiental. Algumas das fontes mais comuns provêm de retraços de matérias-primas, utilização de plástico e copos descartáveis, perda de solventes por evaporação, entre outras. Visto que os resíduos constituem um sério problema para o GSCM, faz-se necessário ter uma atenção especial com a disposição deles. Os seguintes métodos podem ser utilizados para produtos não perigosos:

Compostagem: É um método que utiliza micro-organismos para acelerar o processo de decomposição de materiais orgânicos. Dentre os materiais que podem utilizar este método

de disposição tem-se comida, papel e madeira.

Combustão: Consiste em um processo controlado de queima do resíduo que pode reduzir seu volume em até 90%. Após a queima do material, este pode ser disposto utilizando o método de compostagem, ou mesmo o aterro. Uma das vantagens desse método é que a energia resultante do processo, pode ser reaproveitada. Os gases produzidos precisam ser controlados visando evitar um dano maior à atmosfera.

Aterro: É utilizado para a disposição de materiais não perigosos, que são colocados em áreas que respeitam a regulação ambiental da região.

3.2.1 A Série ISO 14000

Atualmente, diversas organizações buscam propor práticas e técnicas de gerenciamento que visam auxiliar o desenvolvimento de produtos e serviços ambientalmente responsáveis. A *International Organization for Standards* (ISO) criou a série ISO 14000 com esse objetivo (ISO – International Organization for Standards, 2009; Cascio, 1999; Morris, 2000). A proposta da ISO para os sistemas de gestão ambiental (SGAs) baseia-se no ciclo *plan-do-check-act* (PDCA) (Deming, 2000), como representado na Figura 3.5 (Braga et al., 2005).

ISO 14001 e ISO 1004 - Sistemas de Gestão Ambiental

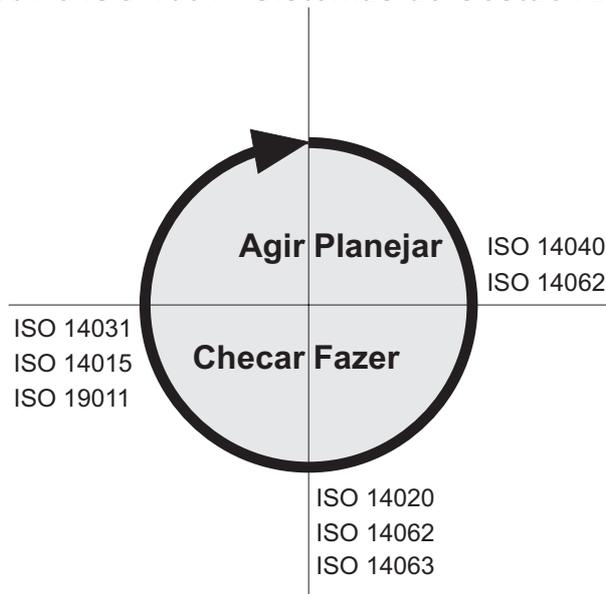


Figura 3.5 Sistemas de gestão ambiental.

Um sistema de gestão ambiental (SGA) é uma maneira sistêmica de gerenciar os problemas e as oportunidades ambientais nas empresas. A ISO 14001 (ISO, 2004) define um SGA como “a parte ou todo o sistema de gerenciamento que inclui a estrutura da organização e o planejamento de atividades, responsabilidades, práticas, procedimentos, processos e recursos para desenvolver, executar, revisar e manter a política ambiental”. Os principais elementos que compõem um SGA em uma organização são:

- uma política ambiental;
- um processo de planejamento visando à integração ambiental com o gerenciamento do negócio e das operações da organização;
- uma estrutura organizacional que considere as responsabilidades dos funcionários;
- sistemas que auxiliem a implementação e o controle operacional;
- sistemas de medição e auditoria;
- sistemas para a revisão periódica do SGA.

Os custos e benefícios da implantação de um SGA podem ser observados na Tabela 3.3 (Morris, 2000). Ela mostra que, apesar de a implantação de um SGA implicar custos, alguns destes podem ser minimizados ou mesmo gerar um aumento no lucro, devido aos benefícios decorrentes da implantação do EMS.

Tabela 3.3 Custos e benefícios decorrentes da implantação de um EMS.

Custos	Benefícios
<ul style="list-style-type: none"> • Gerenciamento • Treinamento • Mudanças nas operações • Equipamentos para a redução de poluição 	<ul style="list-style-type: none"> • Redução no consumo de energia • Redução de matérias-primas (redução de resíduos) • Redução dos custos de seguros • Redução de multas por infração na legislação • Aumento nas vendas • Melhorias na eficiência da operação

3.2.2 Análise do Ciclo de Vida

A análise do ciclo de vida (LCA) de um produto ou serviço busca avaliar o seu impacto socioeconômico e ambiental (ISO, 2006; Cascio, 1999). Este último é mensurado considerando todo

o seu ciclo de vida, ou seja, a produção/extração de matéria-prima, a fabricação, a distribuição, o uso e a disposição. A LCA pode ser aplicada tanto para um único produto como para uma empresa como um todo. Quanto às fronteiras da análise, a LCA pode ser classificada em:

Porta a porta: Considera apenas uma parte da SC, avaliando as atividades realizadas entre duas instalações subjacentes.

Berço a porta: Avalia os processos desde a manufatura do produto, levando em conta suas matérias-primas (berço), até a sua saída da fábrica (porta). Essa análise considera apenas as operações e os insumos anteriores ao envio do produto para o cliente.

Berço a túmulo: Além dos fatores utilizados pela análise berço a porta, considera o restante do ciclo de vida do produto até a sua disposição (túmulo).

Berço a berço: Além dos fatores utilizados pela análise do berço a túmulo, considera o retorno dos produtos por parte do cliente (logística reversa/reciclagem).

Essa classificação da abrangência da LCA pode ser melhor visualizada no diagrama apresentado na Figura 3.6.

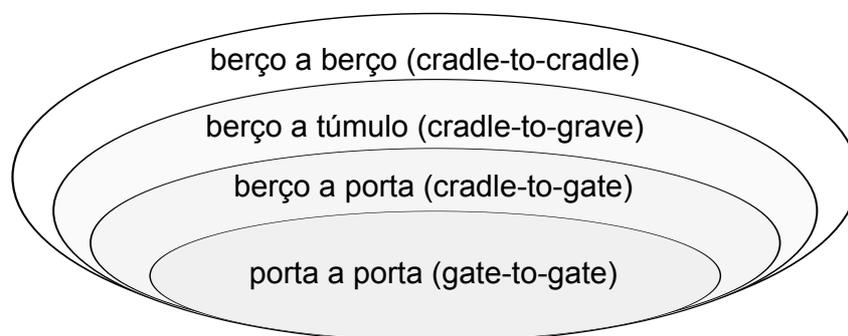


Figura 3.6 Classificação da análise do ciclo de vida quanto à sua abrangência.

No caso específico do consumo de combustíveis para o modal rodoviário, a LCA pode ser classificada em:

Tanque a roda (*tank-to-wheel*): Considera o fluxo do produto desde o tanque de combustível do automóvel até a geração da energia cinética para o mesmo.

Posto a roda (*station-to-wheel*): Considera o fluxo do produto desde o seu armazenamento no posto de gasolina (posto) até a sua utilização final na geração da energia cinética para o automóvel (roda).

Fonte a posto (*well-to-station*): Considera o fluxo do produto desde a sua extração (fonte) até o seu armazenamento no posto de gasolina (posto).

Fonte a tanque (*well-to-tank*): Considera o fluxo do produto desde a sua extração (fonte) até o abastecimento do automóvel (tanque).

Fonte a roda (*well-to-wheel*): Considera o fluxo do produto desde a sua extração (fonte) até a sua utilização final na geração da energia cinética para o automóvel (roda).

3.3 Medindo a Sustentabilidade

A ISO 14031 (ISO, 1999) orienta a seleção e a utilização dos indicadores para uma ADA em uma organização. Apesar desta norma não apresentar metas ou limites para a ADA, alguns exemplos de indicadores são apresentados no anexo dessa norma. Estes podem estar relacionados diretamente a questões sociais, ambientais ou econômicas, conforme apresentado na Figura 2.1. Este trabalho irá focar indicadores que possuem relação direta com o impacto no meio ambiente que podem ser quantificados objetivamente. A listagem abaixo apresenta alguns dos indicadores de sustentabilidade, extraídos da referida norma e de outras fontes (Veleva et al., 2001; Beamon, 1999b; Cascio, 1999; Jasch, 2000). Vale salientar que essa listagem inclui indicadores que não serão contemplados nesta tese, como os de implementação de políticas e programas e os de conformidade, alguns indicadores de desempenho financeiro e os relativos à sociedade. Estes indicadores fogem do escopo definido desta tese que se concentra nos indicadores impactados pelos fatores operacionais que são representados no modelo como tempo de viagem, políticas de estoque, frota disponível etc.

• Implementação de Políticas e Programas

- Quantidade de objetivos e metas alcançados.
- Quantidade de unidades que contemplam objetivos e metas ambientais.
- Quantidade de funcionários que possuem requisitos ambientais em suas tarefas.
- Quantidade de funcionários que participam de programas ambientais (ex.: reciclagem).
- Quantidade de funcionários que possuem treinamento e que precisam de treinamento.
- Quantidade de sugestões de melhoria ambiental propostas por funcionários.

- Quantidade de fornecedores que atendem a questões ambientais (ex.: possuem um SGA e/ou uma certificação ambiental).
- Quantidade de produtos projetados visando a P2.
- **Conformidade**
 - Grau de adequação às normas por parte da empresa e de fornecedores.
 - Tempo para resolver incidentes ambientais.
 - Quantidade de ações corretivas tomadas e não tomadas.
 - Despesas com multas.
 - Quantidade e frequência de atividades como auditorias.
 - Quantidade de auditorias planejadas e finalizadas.
 - Quantidade de desvios encontrados pelas auditorias por período.
 - Frequência da revisão dos processos operacionais.
- **Desempenho Financeiro**
 - Custos relacionados a aspectos ambientais de processo e produtos.
 - Retorno sobre investimento de projetos de melhoria ambiental.
 - Reduções de custo devidas a redução de recursos utilizados, P2 e reciclagem de resíduos.
 - Investimento em projetos de pesquisa e desenvolvimento sobre aspectos ambientais.
- **Sociedade**
 - Quantidade de comunicados na imprensa sobre o desempenho ambiental da organização.
 - Quantidade de programas educacionais e materiais ambientais disponibilizados para a sociedade.
 - Recursos aplicados em programas ambientais na sociedade.
 - Quantidade de instalações que possuem relatórios ambientais.
 - Quantidade de iniciativas de reciclagem/remoção de lixo patrocinadas ou implementadas pela organização.
- **Recursos**
 - Quantidade de matérias-primas utilizadas por unidade de bem produzida.
 - Quantidade de matérias-primas e insumos secundários reciclados ou reutilizados no processo e por unidade de bem produzida.

- Percentual de matérias-primas provenientes de material reciclado/reutilizado.
 - Quantidade de embalagens descartadas ou reutilizadas por unidade de bem produzida.
 - Quantidade de água utilizada por bem produzido.
 - Quantidade de água reutilizada.
 - Quantidade de materiais perigosos utilizados no processo ou no bem produzido.
- **Energia**
 - Quantidade de energia (total e categorizada por fonte) utilizada por ano e por bem produzido.
 - Quantidade de energia utilizada por processo ou cliente.
 - Quantidade de energia economizada devido a programas de conservação de energia.
 - Quantidade de energia gerada.
- **Instalações e Transporte**
 - Consumo médio de combustível da frota.
 - Quantidade diária de entregas por modal de transporte.
 - Área (terreno) utilizada para a produção.
 - Quantidade de veículos da frota equipados com tecnologia de redução de poluição.
 - Quantidade de viagens de negócios evitadas por conta da utilização de outros meios de comunicação.
 - Quantidade de viagens de negócios por modal de transporte.
- **Produtos**
 - Quantidade de produtos que podem ser reutilizados ou reciclados.
 - Percentual do conteúdo dos produtos que podem ser reutilizados ou reciclados.
 - Taxa de produtos defeituosos.
 - Quantidade de energia consumida durante a fase de utilização do produto.
 - Vida útil do produto.
 - Quantidade de produtos com instruções de uso e descarte seguros para o meio ambiente.
- **Resíduos**
 - Quantidade de resíduos por ano e por bem produzido.

- Quantidade de resíduos perigosos, reciclados e reutilizados por ano e por bem produzido.
 - Quantidade de resíduos enviados a aterros por ano e por bem produzido.
 - Quantidade de resíduos armazenados pela organização.
 - Quantidade de resíduos controlados por órgãos governamentais ou não governamentais.
- **Outros**
- Quantidade de emissões diretas por ano e por bem produzido.
 - Quantidade de emissões provenientes de resíduos por ano e por bem produzido.
 - Quantidade de SO_2 emitidas por kW de energia produzida.
 - Quantidade de energia desperdiçada descartada no solo ou em água (ex.: óleo combustível).

3.3.1 O Potencial de Aquecimento Global

O potencial de aquecimento global (GWP) foi proposto pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) para comparar a capacidade do efeito radioativo de diferentes substâncias em um intervalo de tempo (IPCC, 2001). Assim, a capacidade de absorver radiação infravermelha e o tempo de decaimento são alguns dos fatores considerados ao calcular o GWP de uma substância.

O dióxido de carbono (CO_2) é o gás utilizado como referência para o cálculo do GWP das demais substâncias (DEFRA - Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2009; MME – Ministério de Minas e Energia, 2008; EPA – Environmental Protection Agency, 2009). Consequentemente, a unidade do GWP é o equivalente de CO_2 (CO_2eq), sendo 1 o GWP do CO_2 . O GWP total de um recurso utilizado em um produto, ou de um dado resíduo gerado em um processo produtivo, é calculado multiplicando-se a sua massa pelo fator GWP da substância.

O *Protocolo de Kyoto* (Grubb et al., 1999) determina a utilização dos fatores do GWP fornecidos pelo IPCC para um horizonte de tempo de 100 anos (IPCC, 1995). Este protocolo determina a utilização dos valores do GWP para comparar o efeitos das emissões dos diferentes gases de efeito estufa (GEE), utilizando o CO_2eq . O fator do GWP de diferentes materiais é fornecido pela DEFRA (DEFRA - Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2009) e pelo ecoinvent (Frischknecht et al., 2005).

3.3.2 Introdução à Exergia

No Capítulo 2, foram apresentados alguns trabalhos que utilizam a exergia com o intuito de aferir a sustentabilidade dos sistemas. Esta seção apresenta os principais conceitos relacionados à exergia.

De acordo com a *Primeira Lei da Termodinâmica* (PLT), a energia não pode ser criada nem destruída. Logo, em qualquer fluxo, a quantidade de energia consumida precisa ser igual à energia gerada somada às perdas relativas ao fluxo no regime permanente. Sejam E , X e A as quantidades de energia, exergia e anergia. A Equação (3.1) representa a PLT. Outra forma de expressar essa relação é através de um fator de eficiência energética α , conforme descrito na Equação (3.2).

$$E = X + A \quad (3.1)$$

$$X = \alpha E \therefore A = (1 - \alpha)E \quad (3.2)$$

Sejam E_{in} , E_{out} e E_{diss} as quantidades de energia de entrada, de saída e dissipada em um processo. Uma vez que $E_{diss} = (1 - \eta_I)E_{in}$, onde η_I é a eficiência energética do processo, a PLT é representada matematicamente através da Equação (3.3).

$$E_{in} = E_{out} + E_{diss} \therefore \eta_I = \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (3.3)$$

A *Segunda Lei da Termodinâmica* (SLT) indica que sempre haverá perda de qualidade ao se converter uma fonte energética em outro tipo de energia. O conceito de *exergia* está diretamente relacionado à SLT, uma vez que ela determina a quantidade de energia que pode ser convertida em trabalho útil, ou seja, a qualidade da energia. Por isso, *energia disponível*, *trabalho disponível* ou simplesmente *disponibilidade* são utilizados como sinônimos para *exergia*. A quantidade de energia que não pode ser convertida em trabalho útil é denominada *anergia*.

Considerando-se a PLT e a SLT, é possível inferir que, enquanto a quantidade de energia permanece constante ao longo do tempo, a quantidade de exergia sempre diminui. Sejam X_{in} , X_{out} , X_{diss} e X_{dest} as quantidades de exergia de entrada, de saída, dissipada e destruída em um processo. Uma vez que $X_{dest} = (1 - \eta_{II})X_{in} - X_{diss}$, onde η_{II} é a eficiência exérgica do processo, a SLT é matematicamente representada pela Equação (3.4).

$$X_{in} = X_{out} + X_{diss} + X_{dest} \therefore \eta_{II} = \frac{X_{out}}{X_{in}} \quad (3.4)$$

Através da Equação (3.3) e da Equação (3.2), a relação apresentada na Equação (3.5) será respeitada em qualquer processo que consuma energia.

$$\eta_{II} = \frac{\alpha_{out}E_{out}}{\alpha_{in}E_{in}} = \frac{\alpha_{out}}{\alpha_{in}}\eta_I \therefore \frac{\eta_{II}}{\eta_I} = \frac{\alpha_{out}}{\alpha_{in}} \quad (3.5)$$

A exergia química x_{ch} de uma substância pode ser calculada a partir de sua composição química (Kotas, 1985). Esse valor denota a quantidade de energia disponível (em kJ) para cada kg da substância (Kotas, 1985; Ayres et al., 1998; Gong e Wall, 2001). A relação entre a exergia química de um combustível e seu valor calorífico líquido (NCV) ⁷ é representada por φ ($\varphi = x_{ch}/NCV$). A Tabela 3.4 mostra valores típicos de φ para alguns combustíveis. A variação nos valores se deve principalmente ao ambiente de referência adotado. Em Szargut et al. (2005), os autores propõem a adoção de um ambiente de referência para a medição da exergia das substâncias. Além disso, eles também listam e comparam com os valores de outros trabalhos a exergia de diversos compostos (sólidos, líquidos e gasosos).

Tabela 3.4 Valores comuns de φ para alguns combustíveis.

Combustível	$\varphi = x_{ch}/NCV$
Carvão	1,06-1,10
Madeira	1,15-1,30
Óleos combustíveis e petróleo	1,04-1,08
Gás natural	1,04±0,5%
Hidrogênio	0,985
Monóxido de carbono	0,973
Enxofre	2,017

Fonte: Kotas (1985), pg. 269

A Equação (3.6) denota a exergia química total X_{ch} (em kJ) para uma massa m (em kg) de um material com exergia química de x_{ch} (em kJ/kg). A exergia de um fluxo é composta pelas suas exergias física e química. A Equação (3.7) calcula a exergia de um fluxo que possui energia cinética ke , energia potencial pe , entalpia h , entropia s e j elementos na sua composição química, em um ambiente de referência com entalpia h_0 , entropia s_0 e temperatura T_0 . Considerando que o fluxo está no regime permanente, a exergia total do fluxo é dada pela sua exergia química. A utilização da exergia nesta tese será detalhada no Capítulo 6. Como será mostrado, esta é aplicada com o objetivo de aferir o impacto de diferentes fontes de energia nos processos produtivos, considerando-se que o fluxo está no regime permanente.

$$X_{ch} = mx_{ch} \quad (3.6)$$

$$X = ke + pe + [(h - h_0) - T_0(s - s_0)]m + \sum_j X_{ch,j} \quad (3.7)$$

⁷N. de T.: Sigla proveniente do inglês *Net Calorific Value*.

Considerações Finais

Este capítulo apresentou conceitos relacionados ao gerenciamento de cadeias de suprimentos verdes (GSCM). Primeiramente foram tratados os assuntos que também são abordados no cadeia de suprimentos (SC) tradicionais. Entre eles, cita-se os tipos de logística, os níveis de decisão no SCM, os tipos de estratégia de distribuição, o transporte de cargas e as políticas de estoque. Em seguida, foram apresentados os assuntos específicos do GSCM, como a destinação de resíduos e alguns dos indicadores de desempenho ambiental. Mostrou-se também que a série ISO 14000 propõe padrões como a análise do ciclo de vida (LCA) e a avaliação de desempenho ambiental (ADA) que auxiliam a aferição de indicadores para o GSCM. Por fim, foi dada uma introdução aos principais conceitos relacionados à exergia.

Introdução às Redes de Petri

*Quando achamos a matemática e a física teórica muito difíceis,
voltamo-nos para o misticismo.*

—STEPHEN HAWKING (Físico Teórico)

Este capítulo faz uma introdução às redes de Petri (PNs) (Petri, 1962), focando-se nas *stochastic Petri nets* (SPNs) (Marsan et al., 1984, 1995; Balbo, 2001). Neste trabalho, utiliza-se um tipo específico de SPN: as *stochastic reward nets* (SRNs). Por isso, neste capítulo procura-se dar mais ênfase a estas redes, incluindo seu mapeamento para as cadeias de Markov (CMs) (Bolch et al., 2006) e a utilização de *rewards*.

4.1 As Redes de Petri Lugar-Transição

As PNs foram propostas por Carl Adam Petri em 1962, na sua tese de doutoramento (Petri, 1962). Sendo inicialmente uma extensão da teoria dos autômatos, tornou-se um formalismo amplamente utilizado nas mais diferentes áreas, tais como Ciências da Computação, Engenharia Eletrônica, Engenharia Química, indústrias etc. Desde sua criação, diversas extensões, como o conceito de tempo, foram propostas para esse formalismo.

As PNs fornecem mecanismos para a especificação, análise e verificação de propriedades e a correteza dos sistemas modelados. Algumas das extensões propostas, como a inclusão do tempo, aumentam seu poder de análise, possibilitando a obtenção de métricas de avaliação de desempenho, o que torna sua aplicação viável em *sistemas de apoio à decisão*.

Graficamente, as PNs são representadas por lugares (Figura 4.1(a)), transições (Figura 4.1(b)), arcos (Figura 4.1(c)) e *tokens*¹ (Figura 4.1(d)). Uma PN é um grafo dirigido, sendo os lugares e as transições os seus vértices, interligados através de arcos dirigidos. Se a origem de um arco for um lugar, seu destino precisa necessariamente ser uma transição e

¹N. de T.: termo também utilizado em português. *Marcas* e *fichas* são sinônimos aplicáveis. Ao longo deste trabalho, o termo *token* será preferencialmente empregado.

vice-versa. A distribuição dos *tokens* nos lugares da PN determinam o estado do sistema.

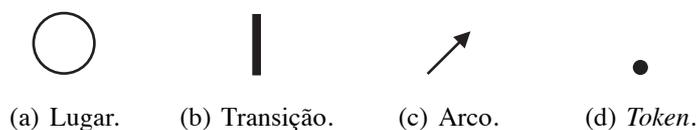


Figura 4.1 Elementos de uma rede de Petri.

Na Figura 4.2, apresenta-se uma PN na qual os lugares representam os períodos do dia (*dia* e *noite*), enquanto as transições representam os eventos que alteram o período do dia (*amanhecer* ou *anoitecer*). Nesse exemplo, o arco dirigido do lugar *dia* para a transição *anoitecer* indica que, para que anoiteça, é necessário que haja um *token* no lugar *dia*. De maneira análoga, o arco dirigido do lugar *noite* para a transição *amanhecer* indica que, para que amanheça, é necessário que haja um *token* no lugar *noite*. A localização do *token* na rede indicará, portanto, se é dia (Figura 4.2(a)) ou noite (Figura 4.2(b)).

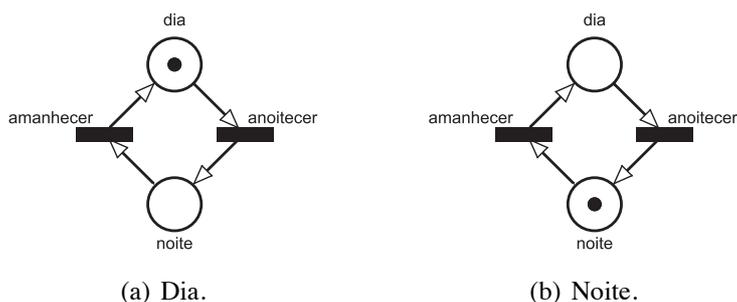


Figura 4.2 PN representando um dia.

Um lugar pode ser conectado a uma transição através de diversos arcos ou vice-versa. Esses arcos podem ser substituídos por um único arco com um peso associado. Quando uma transição é disparada, ela consome os *tokens* dos lugares de entrada, colocando outros *tokens* nos lugares de saída. A quantidade de *tokens* consumidos e colocados nos lugares de saída é dada pelo peso do arco que conecta os lugares a essa transição. A Figura 4.3 mostra essa dinâmica das PNs. Observe que, nessa figura, os *tokens* do lugar *P2* foram substituídos por um número que representa a marcação desse lugar. É comum utilizar essa prática para facilitar a visualização do modelo.

Definição 4.1 (Redes de Petri). Uma rede de Petri (PN) é uma 5-tupla $N = (P, T, I, O, M_0)$, onde:

- P é o conjunto ordenado de lugares;

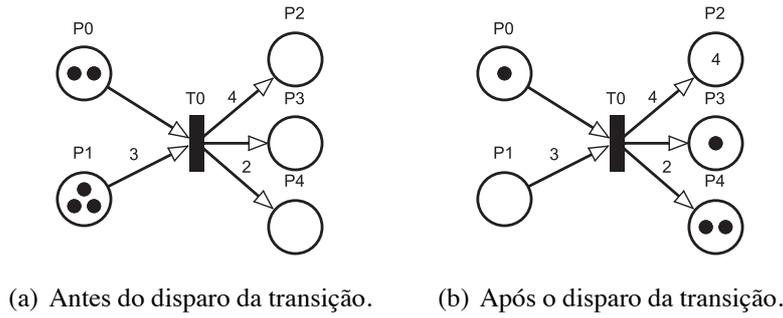


Figura 4.3 Utilização de arcos com peso.

- T é o conjunto ordenado de transições, $P \cap T = \emptyset$;
- $I, O \in \mathbb{N}^{|P| \times |T|}$ são matrizes que denotam os lugares de entrada e saída das transições, respectivamente;
- $M_0 \in \mathbb{N}^{|P|}$ é um vetor que denota a marcação inicial dos lugares da rede.

As matrizes I e O descrevem, respectivamente, os arcos de entrada e saída entre as transições e os lugares da PN. Sejam $p_j \in P$ e $t_k \in T$ um lugar e uma transição da PN, então os pesos de um arco de entrada de t_k a partir de p_j e de saída de t_k para p_j são representados por I_{jk} (ou $I[j, k]$) e O_{jk} (ou $O[j, k]$), respectivamente. O conjunto de lugares de entrada e de saída de uma dada transição pode ser definido conforme mostra a Definição 4.2.

Definição 4.2 (Lugares de Entrada e de Saída). Os conjuntos de lugares de entrada e de saída de uma transição $t_k \in T$ são, respectivamente:

$$\bullet t_k = \{p_j \in P | I[j, k] > 0\} \text{ e } t_k^\bullet = \{p_j \in P | O[j, k] > 0\}$$

De maneira análoga, os conjuntos de transições de entrada e de saída de um dado lugar podem ser definidos conforme mostra a Definição 4.3.

Definição 4.3 (Transições de Entrada e de Saída). Os conjuntos de transições de entrada e de saída de um lugar $p_j \in P$ são, respectivamente:

$$\bullet p_j = \{t_k \in T | O[j, k] > 0\} \text{ e } p_j^\bullet = \{t_k \in T | I[j, k] > 0\}$$

O lugar dual (p_-), ou complementar, de um lugar p de uma PN é normalmente utilizado para garantir que a marcação nesse lugar p nunca irá exceder uma quantidade X (Murata, 1989). Essa estrutura pode ser utilizada para garantir a capacidade máxima do lugar p (vide Definição 4.4).

Definição 4.4 (Lugares Duais). Dois lugares $p_i, p_j \in P$ são ditos duais se e somente se:

$$(p_i^\bullet = \bullet p_j) \wedge (\bullet p_i = p_j^\bullet) \wedge O[i, n] = I[j, n], 0 \leq n < |T| \wedge I[i, n] = O[j, n], 0 \leq n < |T|$$

Nesses lugares, a soma de suas marcações nunca irá exceder uma quantidade X . No exemplo da Figura 4.4, observa-se um modelo de um *buffer* limitado, de capacidade 5. Observe que os lugares *bufferLimit* e *buffer* são lugares duais, e que a soma da marcação nesses lugares nunca será maior que 5.

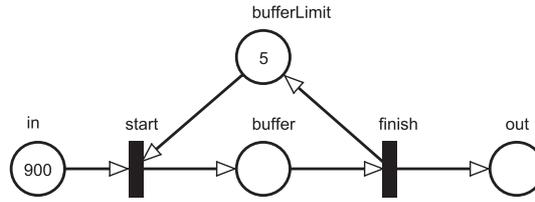


Figura 4.4 Modelo de um *buffer* limitado, utilizando *lugares duais*.

4.1.1 Estrutura Definida em Matriz

A *estrutura* de uma PN pode ser representada exclusivamente por I e O . A *matriz de incidência* de uma PN é obtida conforme apresentado na Definição 4.5.

Definição 4.5 (Matriz de Incidência). Seja uma PN $N = (P, T, I, O, M_0)$, então sua matriz de incidência C , de ordem $|P| \times |T|$, é obtida como $C = O - I$.

Nessa matriz, as linhas representam os lugares da rede, enquanto as colunas representam suas transições. Abaixo, pode-se observar o cálculo da matriz de incidência da PN apresentada na Figura 4.2.

$$\begin{aligned}
 I &= \begin{matrix} & \begin{matrix} amanhecer & anoitecer \end{matrix} \\ \begin{matrix} dia \\ noite \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \text{ e } O = \begin{matrix} & \begin{matrix} amanhecer & anoitecer \end{matrix} \\ \begin{matrix} dia \\ noite \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \\
 C &= \begin{matrix} & \begin{matrix} amanhecer & anoitecer \end{matrix} \\ \begin{matrix} dia \\ noite \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} - \begin{matrix} & \begin{matrix} amanhecer & anoitecer \end{matrix} \\ \begin{matrix} dia \\ noite \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \\
 C &= \begin{matrix} & \begin{matrix} amanhecer & anoitecer \end{matrix} \\ \begin{matrix} dia \\ noite \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

A matriz de incidência não consegue representar corretamente redes que contenham *self-loops*. Um *self-loop* ocorre quando um mesmo lugar é pré-condição e pós-condição de uma transição da rede. Uma rede é dita *pura* se não tiver *self-loops*.

Definição 4.6 (Rede Pura). Uma PN é dita pura se e somente se:

$$I[m, n] \times O[m, n] = 0, 0 \leq m < |P| \wedge 0 \leq n < |T|$$

Observe que, ao se calcular a matriz de incidência de uma rede impura, $C[m, n] = 0$ para todos os seus *self-loops*. Dessa forma, a matriz de incidência não consegue representar corretamente a estrutura da rede. Uma rede impura pode ser transformada em uma rede pura através da introdução de pares *dummy*, que correspondem a um lugar e uma transição que refinam um *self-loop*. Esse refinamento pode ser observado na Figura 4.5.



Figura 4.5 Tornando uma rede pura através da inclusão de um par *dummy*.

4.1.2 Propriedades

Existem diversas propriedades das PNs que podem ser obtidas a partir de um modelo (Murata, 1989; Maciel et al., 1996), permitindo a sua verificação. Elas podem ser subdividas em *comportamentais*, que dependem da marcação, e *estruturais*, que não dependem da marcação. Nesta seção, serão apresentadas as propriedades comportamentais de *limitação* e *liveness* e as propriedades estruturais de *limitação estrutural*, *conservação* e *repetitividade*. Para as definições a seguir, considere-se RS e RG os respectivos *conjunto de marcações alcançáveis* e *grafo de alcançabilidade* (Maciel et al., 1996).

Definição 4.7 (Limitação (*Boundedness*)). Dado um lugar $p_j \in P$, esse lugar é dito *k-limitado*, ou simplesmente *limitado*, se e somente se:

$$M[j] \leq k, \forall M \in RS \wedge k \in \mathbb{N} - \{\infty\}$$

Caso a propriedade acima não seja observada, o lugar é dito *não limitado*. Note que o limite k é o número máximo de *tokens* que o lugar pode acumular, para qualquer marcação alcançável do RS. Na PN do *buffer* limitado, apresentada anteriormente na Figura 4.4, os lugares *buffer* e *bufferLimit* são 5-limitados, enquanto os lugares *in* e *out* são 900-limitados. Uma rede é dita limitada se todos os seus lugares forem limitados.

Definição 4.8 (Rede Limitada). Uma PN é dita limitada se e somente se:

$$M[j] \leq k, \forall p_j \in P \wedge \forall M \in RS \wedge k \in \mathbb{N} - \{\infty\}$$

A propriedade de *liveness* está fortemente relacionada à ausência de *deadlocks*. Em uma PN, o *deadlock* ocorre quando não existe a possibilidade de disparo de nenhuma transição. Uma PN é dita *live* se, para qualquer marcação alcançável, todas as transições da PN puderem ser disparadas a partir de uma sequência de disparos.

Definição 4.9 (Rede Live). Uma PN N é dita *live* se, para toda marcação $M \in RS$, é possível disparar quaisquer transições de N através de uma sequência de disparos $\sigma \in L(M_0)$.

A seguir, são apresentados os conceitos das propriedades estruturais de *limitação estrutural*, *conservação*, *repetitividade* e *consistência* (Maciel et al., 1996).

Definição 4.10 (Rede Estruturalmente Limitada). Uma PN é dita *estruturalmente limitada* se for limitada para qualquer marcação inicial M_0 . Ou seja, existe um vetor de inteiros positivos W tal que $|W| = |C| \wedge W \times C \leq 0$.

Definição 4.11 (Rede Conservativa). Uma PN é dita *conservativa* (ou *parcialmente conservativa*) em relação a um vetor de inteiros positivos (ou não negativos) W se e somente se:

$$\sum (W[i] \times M[i]) = \sum (W[i] \times M_0[i]), \forall p_i \in P \wedge \forall M \in RS \wedge \forall W[i] \in \mathbb{N}$$

Definição 4.12 (Rede Repetitiva). Uma PN é dita *repetitiva* (ou *parcialmente repetitiva*) se existe uma sequência de disparos σ tal que $M_0[\sigma > M$ e toda (ou alguma) $t \in T$ dispara um número infinito de vezes em σ .

Definição 4.13 (Rede Consistente). Uma PN é dita *consistente* (ou *parcialmente consistente*) se existe uma sequência σ de disparos tal que $M_0[\sigma > M_0$ e toda (ou alguma) transição $t \in T$ dispara um número infinito de vezes em σ .

Essas propriedades podem ser utilizadas para se realizar a verificação do sistema modelado. As redes *limitadas*, por exemplo, garantem que o RG será finito, ou seja, que o sistema possui uma quantidade limitada de estados. Já se a PN for *repetitiva*, então uma ação do sistema modelado nunca deixará de ocorrer, seja qual for o estado em que ele esteja. De maneira complementar, se o modelo for *consistente*, então o sistema também deverá retornar ao seu estado inicial.

Em uma PN, os *invariantes de transição* estão relacionados com os *componentes repetitivos estacionários* do modelo, enquanto os *invariantes de lugar* denotam seus *componentes conservativos*. Esses invariantes permitem que se descubram esses componentes sem a necessidade de explorar exhaustivamente o RG da PN (Maciel et al., 1996).

Definição 4.14 (Invariante de Transição). Dada uma PN e um vetor de inteiros *não negativos* It , este será um invariante de transição da rede se e somente se $C \times It = 0$.

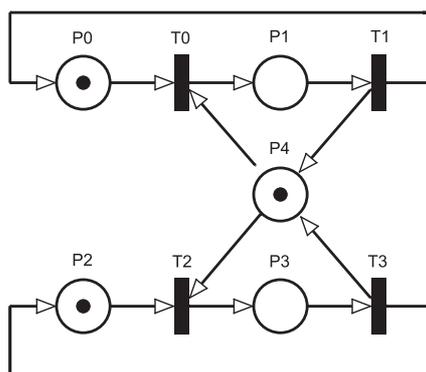


Figura 4.6 RdP modelando a exclusão mútua: as transições $T0$ e $T2$ não podem ser disparadas ao mesmo tempo.

Dada a PN que modela exclusão mútua, apresentada na Figura 4.6, sua matriz de incidência será:

$$C = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

Para essa rede, tem-se o seguinte vetor de invariantes de transição:

$$It = (w_1, w_2, w_3, w_4)$$

Logo, para se obterem os invariantes de transição é necessário resolver sistema de equações abaixo:

$$C \times It = \begin{cases} -w_1 + w_2 = 0 \\ w_1 - w_2 = 0 \\ -w_3 + w_4 = 0 \\ w_3 - w_4 = 0 \\ -w_1 + w_2 - w_3 + w_4 = 0 \end{cases}$$

Resolvendo o sistema de equações, tem-se:

$$It = (r_2, r_2, r_1, r_1)$$

Os resultados apresentados acima mostram que o sistema possui infinitas soluções, tal que $r_1, r_2 \in \mathbb{R}$. Como descrito na Definição 4.14, um invariante de transição precisa ser composto de inteiros não negativos. Considerando $r_1 = 1$ e $r_2 = 0$, tem-se $It = (0, 0, 1, 1)$, que é um dos possíveis invariantes de transição da rede.

Definição 4.15 (Invariante de Lugar). Dados uma PN e um vetor de inteiros *não negativos*, Ip será um invariante de transição da rede se e somente se $C^t \times Ip = 0$, onde C^t é a matriz de incidência transposta.

Para a rede apresentada, tem-se o seguinte vetor de invariantes de lugar:

$$Ip = (w_1, w_2, w_3, w_4, w_5)$$

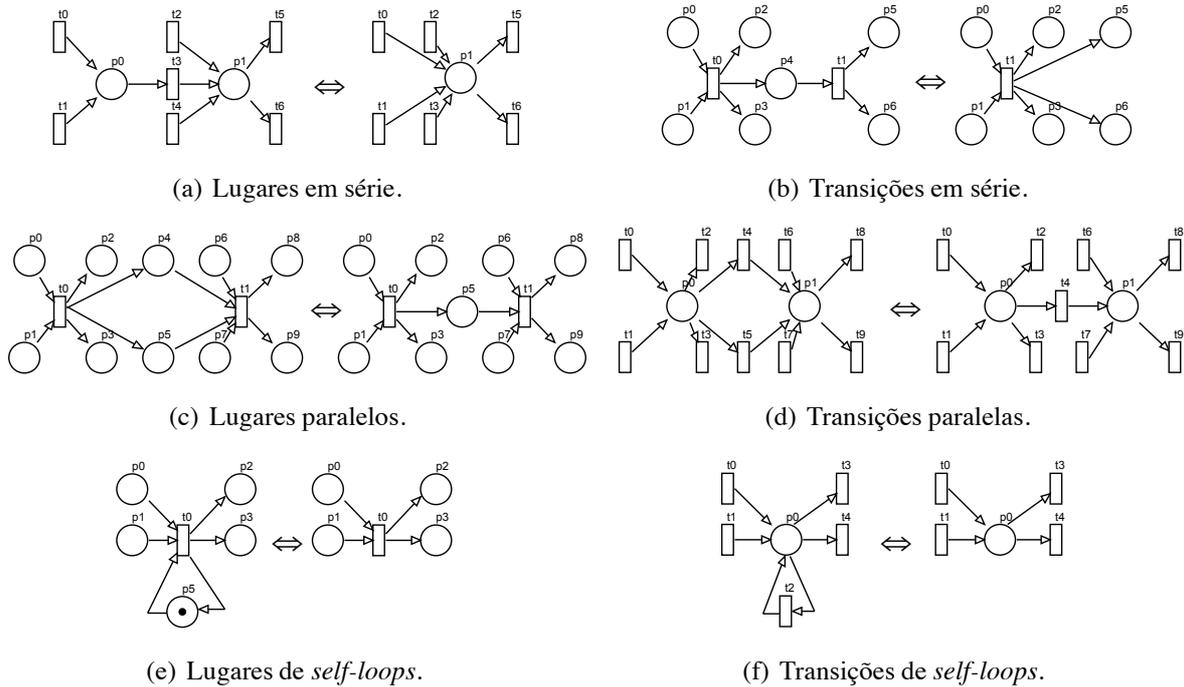
Logo, para se obterem os invariantes de lugar, é necessário resolver sistema de equações abaixo:

$$C^t \times Ip = \begin{cases} -w_1 + w_2 - w_5 = 0 \\ w_1 - w_2 + w_5 = 0 \\ -w_3 + w_4 - w_5 = 0 \\ w_3 - w_4 + w_5 = 0 \end{cases}$$

Resolvendo o sistema de equações, tem-se:

$$Ip = (-r_1 + r_3, r_3, -r_1 + r_2, r_2, r_1)$$

Os resultados apresentados acima mostram que o sistema possui infinitas soluções, tal que $r_1, r_2, r_3 \in \mathbb{R}$. Como descrito na Definição 4.15, um invariante de lugar precisa ser composto



Fonte: Murata (1989), pg. 553

Figura 4.7 Redução e refinamento para as redes de Petri.

de inteiros positivos. Considerando $r_1 = 0$, $r_2 = 0$ e $r_3 = 1$, tem-se $I_p = (1, 1, 0, 0, 0)$, que é um dos possíveis invariantes de transição da rede.

Definição 4.16 (Rede Coberta por Invariantes de Transição). Uma PN é *coberta por invariantes de transição* se e somente se existe um vetor de inteiros *positivos* I_t tal que $C \times I_t = 0$.

Definição 4.17 (Rede Coberta por Invariantes de Lugar). Uma PN é *coberta por invariantes de lugar* se e somente se existe um vetor de inteiros *positivos* I_p tal que $C^t \times I_p = 0$.

Uma PN coberta por invariantes de transição é *repetitiva e consistente*. Ademais, se ela for coberta por invariantes de lugar, também será *estruturalmente limitada e conservativa* (Desrochers e Al-Jaar, 1994).

A técnica de *redução/refinamento* das PN pode ser utilizada para simplificar/refinar o modelo sem que se alterem algumas de suas principais propriedades (ex.: limitação e repetitividade) (Murata, 1989). A Figura 4.7 apresenta seis dessas possíveis transformações.

4.2 Stochastic Petri Nets (SPN)

O tempo é um aspecto bastante importante ao se analisarem problemas reais. Diversas extensões foram propostas para as redes de Petri de maneira a incorporar esse conceito aos modelos (Ramchandani, 1994; Molloy, 1981; Florin e Natkin, 1982; Marsan et al., 1984; Zuberek, 1980; Sifakis, 1977; Wong et al., 1985; Jensen, 1991; Ghezzi et al., 1991). Ao considerarem o tempo, as PNs, além de poderem realizar análises como *reversibilidade* e *deadlock-freedom*, passam a considerar aspectos temporais como *deadlines*, tempo de duração das atividades, tempo de espera etc.

Nas *stochastic Petri nets* (SPNs) (Florin e Natkin, 1982; Marsan et al., 1984, 1995; Ciardo, 1994; Balbo, 2001; German, 2001) o tempo é descrito através de funções de distribuição probabilística. Neste trabalho, utilizam-se as *stochastic reward nets* (SRNs) (Ciardo et al., 1993), que possuem tempos estocásticos associados às transições.

Diversas extensões também foram incorporadas às primeiras SPNs. *Arcos inibidores*, *transições imediatas* (Marsan et al., 1995), *transições determinísticas* (Marsan e Chiola, 1987), *transições com distribuições genéricas* (German, 1994), *guardas de transições, propriedades dependentes da marcação* (ex.: peso das transições e dos arcos, taxa das transições etc.) (Ciardo et al., 1993) são algumas delas.

As SRNs incorporam o *peso dos arcos dependentes das marcações* (Ciardo, 1994) e as *guardas* (Ciardo e Miner, 2000), também conhecidas como *função de habilitação*². A primeira permite que o peso dos arcos do modelo seja definido utilizando-se uma expressão baseada na marcação dos lugares da rede. Essa extensão precisa ser utilizada com cautela, já que pode alterar os invariantes de transição e de lugar da rede.

Já a utilização de guardas permite que se associe a uma transição uma expressão, tal que aquela só estará habilitada caso esta seja avaliada como *verdadeira*. Podem-se aplicar as guardas, por exemplo, quando o uso de arcos para a habilitação (ou inibição) de uma transição resultaria em um modelo difícil de ser visualizado. Observe que, caso a guarda de uma transição nunca seja avaliada como verdadeira para nenhuma marcação M alcançável ($M \in RS$), essa transição nunca ficará habilitada, o que poderá resultar em um *deadlock* no sistema. A Definição 4.18 apresenta as SRNs (Ciardo e Trivedi, 1993; Ciardo et al., 1993; Bolch et al., 2006).

Definição 4.18 (*Stochastic Reward Nets*). Uma *stochastic reward net* (SRN) é uma 10-tupla

²N. de T.: do inglês *enabling function*.

$SRN = (P, T, I, O, H, \Pi, G, M_0, W, \mathcal{R})$, onde:

- P é o conjunto ordenado de lugares;
- T é o conjunto ordenado de transições, $P \cap T = \emptyset$;
- $I \in (\mathbb{N}^{|P|} \rightarrow \mathbb{N})^{|P| \times |T|}$ é a matriz de pesos dependentes da marcação dos arcos de entrada. Se p_j é um lugar de entrada de uma transição t_k , então $I[j, k] \geq 1$ senão $I[j, k] = 0$;
- $O \in (\mathbb{N}^{|P|} \rightarrow \mathbb{N})^{|P| \times |T|}$ é a matriz de pesos dependentes da marcação dos arcos de saída. Se p_j é um lugar de saída de uma transição t_k , então $O[j, k] \geq 1$ senão $O[j, k] = 0$;
- $H \in (\mathbb{N}^{|P|} \rightarrow \mathbb{N})^{|P| \times |T|}$ é a matriz de pesos dependentes da marcação dos arcos inibidores. Se p_j é um lugar inibidor de uma transição t_k , então $H[j, k] \geq 1$ senão $H[j, k] = 0$;
- $\Pi \in \mathbb{N}^{|T|}$ é o vetor com as funções de prioridade das transições. Se t_k é uma transição imediata, então $\Pi[k] \geq 1$ senão $\Pi[k] = 0$;
- $G \in (\mathbb{N}^{|P|} \rightarrow \{true, false\})^{|T|} \rightarrow \{true, false\}$ é o vetor com as guardas dependentes da marcação. Se uma transição t_k está habilitada para um vetor $\mathbb{N}^{|P|}$, então $G[k] = true$ senão $G[k] = false$;
- $M_0 \in \mathbb{N}^{|P|}$ é o vetor com as marcações iniciais, tal que $M_0[j] \geq 0, \forall p_j \in P$;
- $W \in (\mathbb{N}^{|P|} \rightarrow \mathbb{R}^+)^{|T|}$ é o vetor que indica os pesos dependentes da marcação das transições imediatas e as taxas dependentes da marcação das transições temporizadas. Seja t_k o k -ésimo elemento de T , então se t_k for uma transição imediata, $W[k]$ pode ser representado por w_k , que determina o peso da transição. Porém, se t_k for uma transição temporizada, $W[k]$ pode ser representado por λ_k , que determina a taxa da transição. Neste caso, é obrigatório que a taxa seja maior que zero $\lambda_k > 0$;
- \mathcal{R} é um conjunto finito e ordenado com os *rewards* de N . Cada elemento $\mathcal{r}_i \in \mathcal{R}$ é uma tripla (ρ_i, r_i, ψ_i) que representa o i -ésimo *reward* de N , onde: ρ é a taxa de *reward*, r é um impulso de *reward* e ψ é um *reward* calculado a partir dos resultados de outros *rewards*.

Nesta seção, serão discutidos os elementos comuns entre algumas SPNs e as SRNs. Os conceitos específicos destas, incluindo-se o detalhamento do conjunto \mathcal{R} , serão tratados posteriormente neste capítulo na Seção 4.2.3. Nas SRNs, podem existir transições *imediatas* e *temporizadas*. As *transições imediatas* não possuem tempo associado, enquanto às *transições*

temporizadas atribui-se uma taxa que respeita uma distribuição exponencial. A *taxa* da transição é inversamente proporcional ao tempo. Assim, uma transição com tempo x associado terá uma taxa de $1/x$.

Os *arcos inibidores* são utilizados para inibir o disparo das transições da rede. De maneira semelhante aos arcos tradicionais, eles também podem ter um peso associado. Graficamente, as transições estocásticas e os arcos inibidores costumam ser representados conforme mostra a Figura 4.8. Estes, porém, podem ser substituídos por guardas associadas às transições.

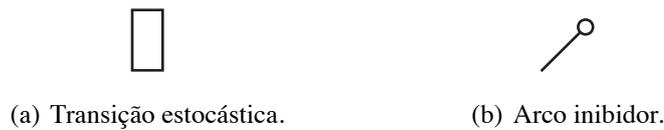


Figura 4.8 Elementos das SPNs que estendem o comportamento das PNs.

Na Definição 4.18, alguns elementos são definidos em função da marcação através do vetor $\mathbb{N}^{|P|}$. Uma vez que as taxas das transições temporizadas são definidas em função da marcação, elas podem representar as semânticas de servidor do tipo *single-*, *k-* ou *infinite-server*, de forma análoga à Teoria das Filas (Ciardo et al., 1993). Seja N uma SRN em que $p_j \in P$ é o único lugar de entrada de uma transição $t_k \in T$, com taxa $0,5$. As semânticas de servidor citadas podem ser representadas por $\lambda_k = 0,5$, $\lambda_k = 0,5 \times \min(m_j, L)$ e $\lambda_k = 0,5 \times m_j$, respectivamente, onde m_j é a marcação do lugar p_j no estado atual e L é o limite máximo da semântica *k-server* (Bolch et al., 2006; Baarir et al., 2009).

Nesses casos, as métricas da SRN podem ser obtidas a partir de uma cadeia de Markov (CM) criada automaticamente a partir do modelo. Algumas SPNs não Markovianas permitem a associação de distribuições diferentes da exponencial às taxas de disparo das transições. Estas SPNs podem ser analisadas via simulação. Em alguns casos específicos, a SPN também pode ser convertida em um processo semi-Markoviano, ou semi-Markoviano generalizado, a fim de se calcularem suas métricas (Ciardo et al., 1993).

Em uma SPN/SRN, quando duas ou mais transições temporizadas estão habilitadas em uma marcação, o conflito referente a qual transição deverá ser disparada é resolvido através de uma *política de corrida* (*race policy*) (Marsan et al., 1995). Já no caso das transições imediatas, este conflito é resolvido com base nas suas *prioridades* e nos seus *pesos*. A prioridade das transições temporizadas será sempre zero, que é a menor prioridade possível, enquanto a das transições imediatas será sempre maior que zero. Assim, caso o modelo esteja em uma marcação capaz de habilitar tanto uma transição imediata quanto uma transição temporizada, a transição imediata sempre será disparada primeiro. De maneira análoga, se em uma dada marcação existem duas

transições imediatas habilitadas, a transição com a prioridade mais alta sempre será disparada primeiro.

Porém, se o conflito ocorre entre duas transições imediatas que possuem uma mesma prioridade, ele será resolvido com base em seus pesos. Os pesos são utilizados para resolver o conflito de maneira probabilística. Se, por exemplo, em uma dada marcação ocorre um conflito entre as transições t_0 e t_1 e $\Pi[0] = \Pi[1]$, então se tentará resolver esse conflito probabilisticamente, através de seus pesos. Assim, se $W[0] = 3 \wedge W[1] = 5$, e essas são as únicas transições habilitadas, a probabilidade de ocorrer o disparo de t_0 ou t_1 é dada, respectivamente, por $3/(3+5)$ e $5/(3+5)$. Ou seja, nessa marcação, existe uma probabilidade de 37,5% de ocorrer o disparo de t_0 e de 62,5% de t_1 disparar.

As funções de guarda associam equações baseadas na marcação da rede às transições. Para que uma transição esteja efetivamente habilitada em uma SRN, a quantidade de *tokens* em cada lugar de entrada da transição tem que ser maior ou igual ao peso do arco que conecta o respectivo lugar à transição e a função de guarda precisa ser avaliada como verdadeira. Seja $t_0 \in T$ uma transição com uma função de guarda $G[0]$ associada, então alguns exemplos dessas guardas são:

- $M[0] = 0$, em que a transição só estará habilitada se a marcação do lugar p_0 for igual a zero;
- $M[0] \leq M[1]$, em que a transição só estará habilitada se a marcação do lugar p_0 for menor ou igual à marcação de p_1 ;
- *true*, em que a transição sempre estará habilitada para qualquer marcação;
- *false*, em que a transição nunca estará habilitada para qualquer marcação.

As definições das funções de arcos I , O e H foram estendidas para contemplar a dependência da marcação. Assim, os pesos dos arcos podem ser definidos como um inteiro positivo constante para qualquer marcação, ou ainda como uma expressão dependente da marcação da rede, de forma que a avaliação dessa expressão resulte em um número natural. Assim, $I[j, k](M)$ denota o peso de um arco de entrada de uma transição $t_k \in T$ a partir de um lugar $p_j \in P$ em uma marcação $M \in RS$.

Logo abaixo, são apresentadas novamente algumas definições que são impactadas pelos conceitos adicionais incorporados às SPNs/SRNs.

Definição 4.19 (Lugares de Entrada, de Saída e Inibidores). Os conjuntos de lugares de entrada, de saída e inibidores de uma transição $t_k \in T$ são, respectivamente:

$$\bullet t_k = \{p_j \in P \mid \exists M \in RS : I[j, k](M) > 0\}, t_k^\bullet = \{p_j \in P \mid \exists M \in RS : O[j, k](M) > 0\} \text{ e } \circ t_k = \{p_j \in P \mid \exists M \in RS : H[j, k](M) > 0\}$$

Definição 4.20 (Transições de Entrada, de Saída e Inibidas). Os conjuntos de transições de entrada e de saída de um lugar $p_j \in P$ são, respectivamente:

$$\bullet p_j = \{t_k \in T \mid \exists M \in RS : O[j, k](M) > 0\}, p_j^\bullet = \{t_k \in T \mid \exists M \in RS : I[j, k](M) > 0\} \text{ e } p_j^\circ = \{t_k \in T \mid \exists M \in RS : H[j, k](M) > 0\}$$

Definição 4.21 (Transição Disparável). Uma transição $t_k \in T$ está habilitada em uma marcação M se e somente se todas as condições abaixo forem respeitadas:

- $g_k(M) = true$;
- $\forall p_j \in \bullet t_k : M[j] \geq O[j, k](M)$;
- $\forall p_j \in \circ t_k : M[j] < H[j, k](M)$;
- $\forall t_l \in T : t_l \neq t_k$; se t_l também respeita as condições acima, $\Pi_k \geq \Pi_l$.

Definição 4.22 (Disparo). Se $t_k \in T$ é uma transição que está habilitada em uma marcação M , o disparo dessa transição gera uma nova marcação M' tal que:

- $\forall p_j \in \bullet t_k : M'[j] = M[j] - O[j, k](M)$;
- $\forall p_j \in t_k^\bullet : M'[j] = M[j] + I[j, k](M)$.

A Figura 4.9 apresenta uma SPN que será utilizada para exemplificar a utilização dessas extensões. Essa rede modela um sistema produtivo no qual podem ocorrer falhas e os produtos são armazenados em dois estoques de maneira balanceada, ou seja, tenta-se manter a mesma quantidade de produtos armazenados em cada um dos estoques. Nessa figura, utiliza-se a notação $\#p$ para denotar a marcação de um lugar p da rede.

A ordem para produzir os produtos é modelada pela transição $tProducingOrder$, que irá disparar a cada $1/\lambda_{tProducingOrder}$ unidades de tempo. Quando essa transição for disparada, será gerada uma ordem para que se produzam $\#pProduce1Item + 2 \times \#pProduce2Items$ itens. Essa equação é baseada na marcação dos lugares $\#pProduce1Item$ e $\#pProduce2Items$ e está associada ao arco que conecta $pProducing$ a $tProducingOrder$. Note que os lugares $\#pProduce1Item$

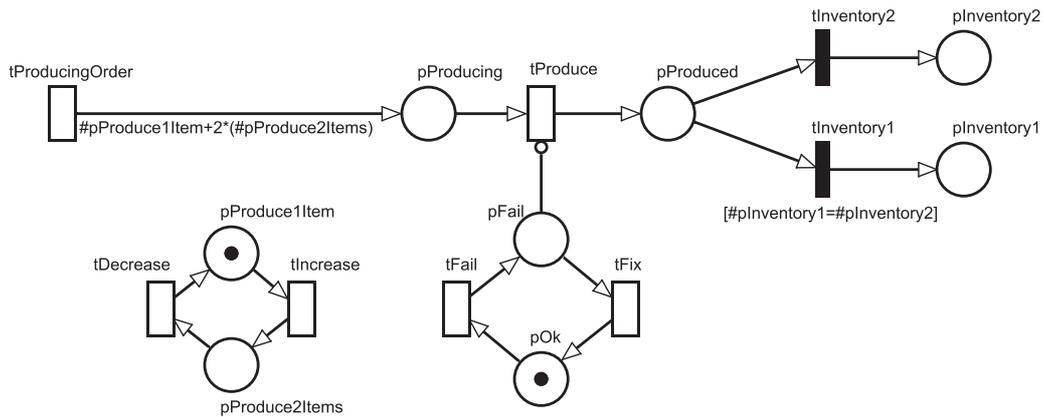


Figura 4.9 Uma SPN que modela um sistema produtivo.

e $\#pProduce2Items$ pertencem a uma sub-rede que é executada paralelamente à sub-rede que representa o sistema de produção.

Uma vez que é criada uma solicitação para que se produzam os itens, será colocado um *token* em $pProducing$ para cada item que se deseja produzir. Esses itens serão produzidos a uma taxa $\lambda_{tProduce}$. Porém, como existe um arco inibidor, com peso 1, do lugar $pFail$ para essa transição, ela só poderá disparar caso não exista nenhum *token* em $pFail$. Esse lugar terá um *token* a cada $1/\lambda_{tFail}$ unidades de tempo, que será removido em $1/\lambda_{tFix}$ unidades de tempo. Esse modelo representa, por exemplo, a quebra de uma máquina na linha de produção.

Uma vez que os itens são produzidos, eles serão armazenados no estoque. A escolha deste é realizada pelo disparo da transição $tInventory1$ ou $tInventory2$, que colocará o produto no estoque representado pelo lugar $pInventory1$ ou $pInventory2$, respectivamente. Supondo $\pi(tInventory1) > \pi(tInventory2)$, sempre que ambas as transições estiverem habilitadas, $tInventory1$ será disparada primeiro. Porém, como essa transição possui a guarda $\#pInventory1 = \#pInventory2$ associada, uma vez que a quantidade de *tokens* em $pInventory1$ seja maior que em $pInventory2$, essa transição não estará mais habilitada. Quando $tInventory2$ for disparada, a quantidade de *tokens* em $pInventory1$ e $pInventory2$ será igual. Assim, a função de guarda $g(tInventory1)$ será avaliada como verdadeira novamente, habilitando $tInventory1$. Esse modelo representa o balanceamento entre os estoques da empresa, de modo que as quantidades de produtos armazenados nos estoques 1 ($pInventory1$) e 2 ($pInventory2$) serão sempre próximas, se não iguais.

4.2.1 Cadeias de Markov

As métricas de um modelo SPN podem ser computadas através da sua simulação exaustiva. Porém, também é possível obter as soluções de maneira analítica através da cadeia de Markov (CM) gerada a partir da SPN (Desrochers e Al-Jaar, 1994; Bolch et al., 2006). As CMs podem ser de tempo discreto (cadeia de Markov de tempo discreto (DMTC)), ou de tempo contínuo (cadeia de Markov de tempo contínuo (CMTC)). Nas cadeias de Markov de tempo discreto (DMTCs), as transições entre os estados da CM ocorrem em intervalos de tempo uniformes. Já nas CTMCs, essas transições ocorrem em intervalos de tempo estocásticos.

A partir das SPNs, pode-se obter uma CM isomórfica à rede, que costuma ser denominada *embedded Markov chain* (EMC) (Marsan et al., 1995). Caso o modelo SPN seja *k-limitado*, a CMTC será finita. Se o modelo, além de *k-limitado*, também for *live*, a CMTC será ergódica (Bolch et al., 2006), podendo ser analisada através do sistema de equações lineares da Equação (4.1). A resolução desse sistema fornece as probabilidades das marcações no estado estacionário.

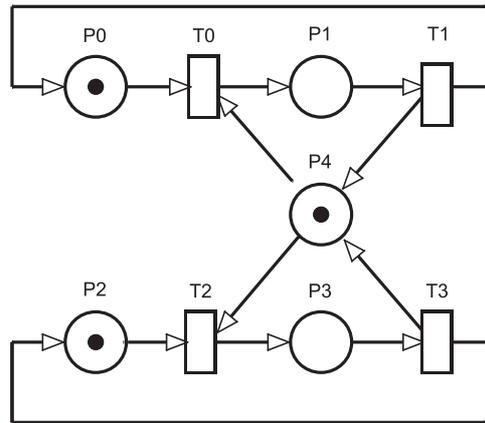
$$\begin{cases} \pi \times Q = 0 \\ \sum \pi_i = 1 \end{cases} \quad (4.1)$$

Considere a SPN da Figura 4.10 e sua *embedded Markov chain* (EMC). Sejam π_0 , π_1 e π_2 as probabilidades correspondentes às marcações $M_0 = (1, 0, 1, 0, 1)$, $M_1 = (0, 1, 1, 0, 0)$ e $M_2 = (1, 0, 0, 1, 0)$, respectivamente. A matriz de taxas Q dessa EMC é dada por:

$$Q = \begin{pmatrix} -\lambda_{T0} - \lambda_{T2} & \lambda_{T0} & \lambda_{T2} \\ \lambda_{T1} & -\lambda_{T1} & 0 \\ \lambda_{T3} & 0 & -\lambda_{T3} \end{pmatrix}$$

Exceto pela diagonal principal, os elementos dessa matriz são obtidos pela taxa com que o sistema vai de um estado M_i (linha) para um estado M_j (coluna). Os elementos da diagonal principal são obtidos subtraindo-se os valores dos outros elementos da linha da matriz. Resolvendo o sistema de equações lineares abaixo, obtêm-se as probabilidades para as marcações M_0 , M_1 e M_2 no regime estacionário.

$$\begin{cases} -(\lambda_{T0} + \lambda_{T2})\pi_0 + \lambda_{T1}\pi_1 + \lambda_{T3}\pi_2 = 0 \\ \lambda_{T0}\pi_0 - \lambda_{T1}\pi_1 = 0 \\ \lambda_{T2}\pi_0 - \lambda_{T3}\pi_2 = 0 \\ \pi_0 + \pi_1 + \pi_2 = 1 \end{cases}$$



(a) SPN modelando exclusão mútua.



(b) RG da SPN.

(c) EMC da SPN.

Figura 4.10 SPN, RG e EMC de um modelo para exclusão mútua.

Tem-se como resultado:

$$\pi_0 = \frac{\lambda_{T1}\lambda_{T3}}{(\lambda_{T0} + \lambda_{T1})\lambda_{T3} + \lambda_{T1}\lambda_{T2}}, \pi_1 = \frac{\lambda_{T0}\lambda_{T3}}{(\lambda_{T0} + \lambda_{T1})\lambda_{T3} + \lambda_{T1}\lambda_{T2}},$$

$$\pi_2 = \frac{\lambda_{T1}\lambda_{T2}}{(\lambda_{T0} + \lambda_{T1})\lambda_{T3} + \lambda_{T1}\lambda_{T2}}$$

Supondo que $\lambda_{T0} = 6$, $\lambda_{T1} = 9$, $\lambda_{T2} = 7$ e $\lambda_{T3} = 10$ e substituindo os respectivos valores nas equações acima, obtém-se:

$$\pi_0 = \left(\frac{30}{71}\right), \pi_1 = \left(\frac{20}{71}\right), \pi_2 = \left(\frac{21}{71}\right)$$

Com base nas probabilidades de cada estado da EMC, podem-se derivar as métricas da SPN. Por exemplo, para se obter a probabilidade de $\#P1 > \#P3$, basta observar os estados em que essa situação ocorre (M_0 e M_1). Logo, essa probabilidade seria dada por $\pi_0 + \pi_1 = 70\%$.

Nas SPNs, a semântica de servidor é simulada através de uma aproximação das taxas das transições temporizadas. Essa aproximação é realizada fazendo-se com que a taxa da transição seja dependente do seu grau de habilitação, ou seja, da quantidade de *tokens* nos seus lugares de entrada (Performance Evaluation group, 2001; Baarir et al., 2009). A Figura 4.11 apresenta

o impacto da semântica de servidor sobre a EMC de uma SPN. Nesse exemplo, considera-se que as taxas das transições t_0 e t_1 são, respectivamente, r_0 e r_1 . É possível observar que o RG da SPN não é alterado pela semântica do servidor.

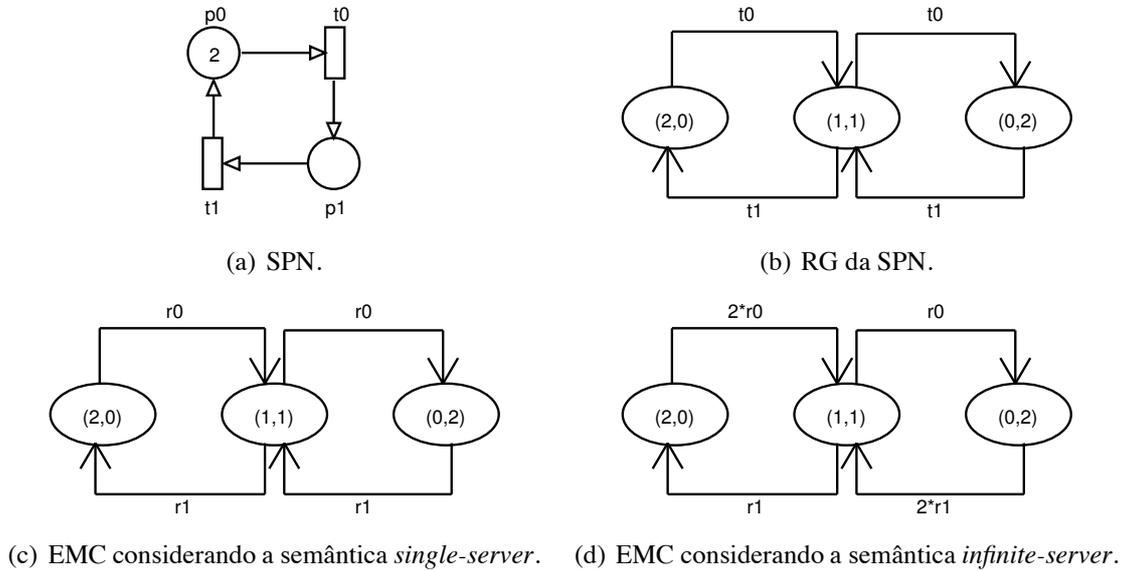


Figura 4.11 Impacto da semântica de servidor na EMC de uma SPN.

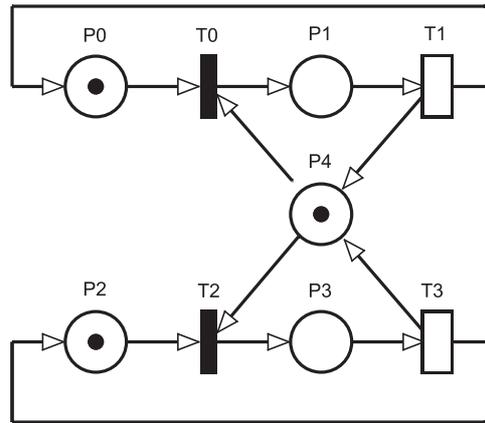
4.2.2 Marções *Vanish* e *Tangible*

Um modelo SPN pode possuir transições imediatas e transições temporizadas. Seja $M \in RS$ uma marcação na qual apenas transições imediatas estão habilitadas, então se diz que M é uma marcação *vanish*. Porém, se nessa marcação as transições habilitadas forem temporizadas, diz-se que M é uma marcação *tangible*.

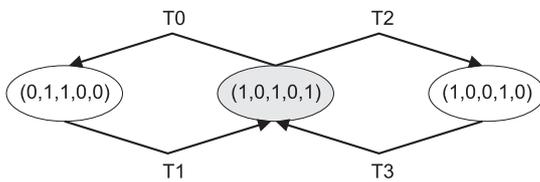
Uma SPN que contenha marcações *vanish* e *tangible* ainda é equivalente às CMs. A *embedded Markov chain* (EMC) associada à SPN pode ser obtida removendo-se as marcações *vanish* do grafo de alcançabilidade (RG) da rede. A Figura 4.12 apresenta o modelo de exclusão mútua para uma SPN utilizando transições imediatas, seu RG e sua EMC.

4.2.3 Rewards

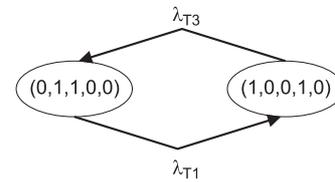
Um *processo estocástico* $\{X(t), t \in T\}$ é uma família de variáveis aleatórias ao longo de um conjunto de índices T (Allen, 1990; Papoulis et al., 2002). Apesar de não ser explicitado na definição formal dos processos estocásticos, t normalmente representa o tempo. Para cada



(a) SPN modelando exclusão mútua com transições imediatas.



(b) RG da SPN. Marcação *vanish* em cinza.



(c) EMC da SPN.

Figura 4.12 SPN, RG e EMC de um modelo para exclusão mútua com transições imediatas.

$t \in T$, $X(t)$ é uma variável aleatória, cujo valor denota o estado do processo. Vale salientar que X pode retornar valores idênticos para valores diferentes de t . Consequentemente, o *espaço de estados* do processo estocástico é dado pelo conjunto de todos os valores possíveis de $X(t)$.

Um processo estocástico é dito *contínuo*, se $t \in \mathbb{R}$, ou *discreto*, se $t \in \mathbb{Z}$. Normalmente, os processos discretos são representados como $\{X_n, n \in T\}$ ou $\{X^{[n]}, n \in T\}$. O espaço de estados de um processo estocástico também pode ser discreto, caso seja finito e contável, ou contínuo, caso seja um intervalo (finito ou infinito) (Papoulis et al., 2002).

Os elementos $P, T, I, O, H, \Pi, G, M_0, W$ das SRNs são comuns a diversas SPNs (Definição 4.18). Uma vez que as taxas das transições temporizadas seguem uma distribuição exponencial, esses elementos descrevem o processo estocástico discreto (Trivedi, 2001): $\{(t^{[n]}, \theta^{[n]}, \mu^{[n]}), n \in \mathbb{N}\}$, com $t^{[0]} = NULL$, $\theta^{[0]} = 0$ e $\mu^{[0]} = M_0$. Para $n > 0$, $t^{[n]} \in T$ é a n -ésima transição a ser disparada em uma marcação $\mu^{[n-1]}$, levando a uma nova marcação $\mu^{[n]}$ em um tempo $\theta^{[n]}$. Esse processo estocástico descreve completamente o processo semi-Markoviano (SMP) associado à SRN (Ciardo et al., 1993; Muppala et al., 1994; Bolch et al., 2006), em que $\mu^{[n-1]}[t^{[n]} > \mu^{[n]}$ representa a mudança de uma marcação $n - 1$ para n e $\theta^{[n]} - \theta^{[n-1]} \geq 0$ é o tempo que o processo permanece no estado representado pela marcação $\mu^{[n-1]}$. Nesse SMP, se

o tempo de permanência em uma marcação é zero, então essa é uma marcação *vanish*. Caso contrário, a marcação será *tangible* (Marsan et al., 1995; Bolch et al., 2006). A expressão $\theta^{[n]} - \theta^{[0]}$ denota o tempo total decorrido desde a marcação inicial até a marcação $\mu^{[n]}$ (Ciardo et al., 1993).

O conjunto de todos os valores possíveis de $\mu^{[n]}$ denota o conjunto de alcançabilidade (*RS*) da SRN. O elemento $\theta^{[n]}$ representa o tempo no qual a transição $t^{[n]}$ é disparada. A *embedded Markov chain* (EMC) pode ser totalmente descrita pelo processo estocástico, considerando apenas as marcações *tangible* (Ciardo et al., 1993). Levando em conta o processo estocástico discreto que representa o comportamento das SRNs, a marcação em qualquer tempo $x \geq 0$ é: $\mu(x) = \mu_{\max\{n:\theta^{[n]} \leq x\}}$. Logo, $\mu(x)$ é a marcação $\mu^{[n]}$, sendo $\theta^{[n]}$ no máximo igual a x .

As SRNs permitem que as métricas sejam definidas de uma forma mais focada no sistema modelado que as métricas tradicionais das SPNs. As SRNs associam *rewards* com os disparos das transições e com as marcações em nível de modelo. A CM associada à SPN é então transformada em um *Markov reward model* (MRM) (Ciardo et al., 1993). Um *Markov reward model* (MRM) associa *rewards* a cada estado ou mudança de estados da CM (Tijms, 2003). Nos MRMs, as *taxas de reward* referem-se à *taxa com que um reward é acumulado enquanto o sistema está em um estado s_i* . Já os *impulsos de reward* referem-se à *quantidade de reward que é instantaneamente acumulada quando o sistema passa de um estado s_i para um estado s_j* . Nas SRNs, $\mathcal{R} = \{(\rho_0, r_0, \psi_0), (\rho_1, r_1, \psi_1), \dots, (\rho_{|\mathcal{R}|}, r_{|\mathcal{R}|}, \psi_{|\mathcal{R}|})\}$ é o seu conjunto finito de *rewards*, em que $\mathcal{z}_i = (\rho_i, r_i, \psi_i)$ é o i -ésimo *reward*. Logo, a taxa e o impulso do i -ésimo *reward* do MRM gerado a partir de uma SRN são descritos pelos elementos ρ_i e r_i da tripla (ρ_i, r_i, ψ_i) da SRN.

Em uma SRN, as funções de taxa e impulso de *reward* são dependentes da marcação. Dado um *reward \mathcal{z}_i* de uma SRN, a sua função ρ_i é definida como $\rho_i : \mathbb{N}^{|P|} \rightarrow \mathbb{R}$, onde P é o conjunto de lugares da SRN. Assim, $\rho_i(\mu)$ representa a taxa com que o *reward* é acumulado enquanto a SRN está na marcação μ (Ciardo e Trivedi, 1993). Por sua vez, o impulso de *reward r_i* é definido como $\forall t \in T, r_{i,t} : \mathbb{N}^{|P|} \rightarrow \mathbb{R}$, onde P e T são os conjuntos de lugares e transições da SRN. Assim, $r_{i,t}(\mu)$ denota a quantidade com que o *reward* é acumulado quando t dispara enquanto a SRN está em uma marcação μ . A definição de r foi reescrita exatamente como apresentada por (Ciardo e Trivedi, 1993). Porém, essa função poderia ser reescrita como $r_i : \mathbb{N}^{|T|} \times \mathbb{N}^{|P|} \rightarrow \mathbb{R}$, mantendo a mesma semântica, porém simplificando o seu entendimento. Dessa forma, o elemento r_i pode ser visto como uma única função cujo resultado depende da transição disparada e da marcação da rede. O processo estocástico $\{(t^{[n]}, \theta^{[n]}, \mu^{[n]}), n \in$

\mathbb{N} }, juntamente com as funções ρ e r , define um novo processo estocástico $\{Y(\theta), \theta \geq 0\}$ relacionado à SRN. A quantidade total acumulada de um *reward* até um tempo θ é calculada conforme a Equação (4.2) (Ciardo et al., 1993).

$$Y(\theta) = \int_0^\theta \rho(\mu(u))du + \sum_{j=1}^{\max\{n:\theta^{[n]}\leq\theta\}} r_{i^{[j]}}(\mu^{[j-1]}) \quad (4.2)$$

O terceiro elemento da tripla (ρ, r, ψ) é uma função que calcula um valor a partir do processo estocástico $\{Y(\theta), \theta \geq 0\}$ descrito na Equação (4.2). Essa função é definida como $\psi : R \rightarrow \mathbb{R}$, onde R é um conjunto de processos estocásticos. A Tabela 4.1 apresenta algumas métricas que podem ser calculadas a partir da definição de *rewards* das SRNs (Ciardo et al., 1993).

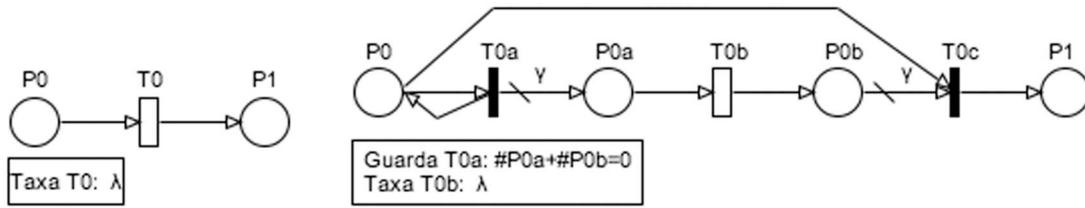
Tabela 4.1 Algumas das métricas das SRNs.

Descrição	Regime estacionário	Regime transiente (até tempo θ)
Reward acumulado	$E[\lim_{\theta \rightarrow \infty} Y(\theta)]$	$E[Y(\theta)]$
Média do reward	$E[\lim_{\theta \rightarrow \infty} \frac{Y(\theta)}{\theta}]$	$E[\frac{Y(\theta)}{\theta}]$
Reward Instantâneo	-	$E[\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{Y(\theta+\delta)-Y(\theta)}{\delta}]$
Quantidade de disparos das transições	-	$E[Y(\theta)], \text{ onde } \rho = 0 \text{ and } r = 1$
Prob. do reward acumulado ser maior que x	$P[\lim_{\theta \rightarrow \infty} Y(\theta) > x]$	$P[Y(\theta) > x]$
Prob. do reward médio ser maior que x	$P[\lim_{\theta \rightarrow \infty} \frac{Y(\theta)}{\theta} > x]$	$P[\frac{Y(\theta)}{\theta} > x]$
Supremum da taxa de reward	$\sup_{n \geq 0} \{ \rho(\mu) : Pr(\mu^{[n]} = \mu) > 0 \}$	-

4.2.4 Aproximação por Fases

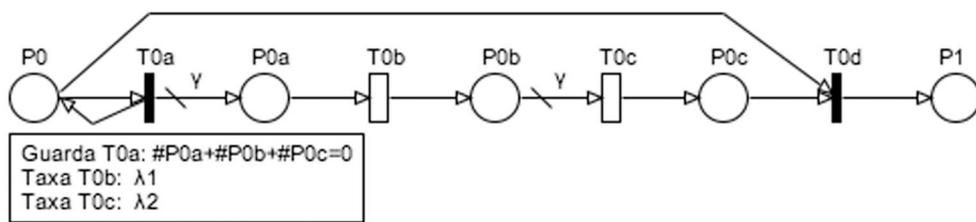
As transições das SPNs podem ser apenas imediatas ou estocásticas, e seu tempo respeita uma distribuição exponencial. Apesar disso, é possível utilizar uma técnica conhecida como *aproximação por fases* para representar tempos que sigam outra distribuição (Desrochers e Al-Jaar, 1994; Malhotra e Reibman, 1993). Essa técnica pode ser utilizada para representar funções polinômio-exponenciais como Erlang, Hipoexponencial e Hiperexponencial (Trivedi, 2001).

A aproximação é realizada através da construção de uma sub-rede cujo *throughput* segue a distribuição desejada, conforme mostra a Figura 4.13. Essa sub-rede é construída utilizando-se o *moment matching*, visando-se igualar os dois primeiros momentos da distribuição, a partir do coeficiente de variação $C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}}$ da amostra. A partir dos valores encontrados para C_v , utiliza-

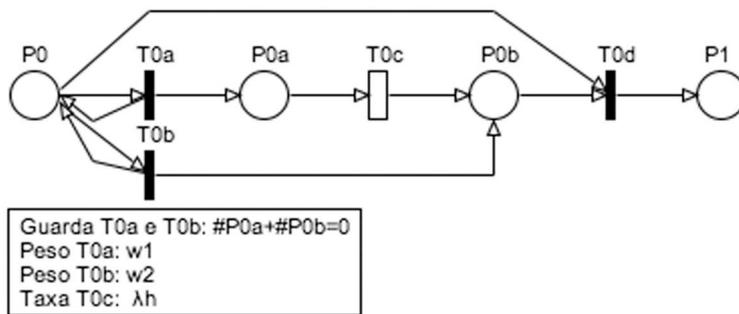


(a) Exponencial.

(b) Erlang.



(c) Hipoexponencial.



(d) Hiperexponencial.

Figura 4.13 Sub-rede SPN para representar distribuições polinômio-exponenciais – aproximação por fases utilizando *moment matching*.

se o algoritmo a seguir para realizar a aproximação por fases. Para as expressões abaixo, considera-se que \bar{x} se refere à média de tempo, enquanto λ se refere à taxa.

1. $C_v = 1$ – **Distribuição Exponencial (Figura 4.13(a))**: Basta utilizar uma transição exponencial. Seus parâmetros são dados por:

$$\lambda = \frac{1}{\bar{x}} \tag{4.3}$$

2. $C_v < 1 \wedge C_v^{-1} \in \mathbb{Z}$ – **Distribuição Erlang (Figura 4.13(b))**: Seus parâmetros são dados por:

$$\gamma = C_v^{-2} \quad (4.4)$$

$$\lambda = \frac{\gamma}{\bar{x}} \quad (4.5)$$

3. $C_v < 1$ – **Distribuição Hipoexponencial (Figura 4.13(c))**: Seus parâmetros são dados por:

$$C_v^{-2} - 1 \leq \gamma < C_v^{-2} \quad (4.6)$$

$$\lambda_1 = \frac{\gamma + 1}{\bar{x} \mp \sqrt{\gamma(\gamma + 1)\sigma^2 - \gamma\bar{x}^2}} \quad (4.7)$$

$$\lambda_2 = \frac{\gamma(\gamma + 1)}{\gamma\bar{x} \pm \sqrt{\gamma(\gamma + 1)\sigma^2 - \gamma\bar{x}^2}} \quad (4.8)$$

4. $C_v > 1$ – **Distribuição Hiperexponencial (Figura 4.13(d))**: Seus parâmetros são dados por:

$$w_1 = \frac{2\bar{x}^2}{\bar{x}^2 + \sigma^2} \quad (4.9)$$

$$w_2 = 1, 0 - w_1 \quad (4.10)$$

$$\lambda_h = \frac{2\bar{x}}{\bar{x}^2 + \sigma^2} \quad (4.11)$$

Considerações Finais

As redes de Petri vêm sendo utilizadas nas mais diversas áreas desde a sua criação. Desde sua proposta original, diversas extensões foram propostas para este formalismo, equiparando seu poder de modelagem ao da *máquina de Turing* (Ciardo et al., 1993; Maciel et al., 1996). Neste trabalho, utiliza-se as SRNs, cujas transições temporizadas seguem uma distribuição exponencial.

Ao criar modelos utilizando PNs é importante atentar às propriedades estruturais e comportamentais do modelo gerado, propriedades estas apresentadas neste capítulo. Os modelos propostos nesta tese foram definidos de tal forma que o modelo resultante da sua composição possua algumas propriedades necessárias para que seja analisado tanto por simulação, quanto pela análise da CM associada.

Avaliando o Desempenho das Cadeias de Suprimento Verdes

Todos os erros humanos são frutos da impaciência, interrupção prematura de um processo ordenado, obstáculo artificial levantado ao redor de uma realidade fictícia.

—FRANZ KAFKA (Escritor)

Este capítulo apresenta o *framework* que esta tese propõe para auxiliar o gerenciamento de cadeias de suprimentos verdes (GSCM)s (Alves et al., 2011b, 2013). São apresentadas as métricas e o processo de avaliação propostos. Um esquema do referido *framework* pode ser visto na Figura 5.1. As ferramentas criadas e/ou utilizadas dão suporte à modelagem e à aferição das métricas do sistema. Os modelos foram criados como componentes, visando à sua utilização para a especificação em alto nível das cadeias de suprimentos verdes (GSCs) e serão utilizados a fim de se calcular os indicadores selecionados para avaliar o desempenho operacional e ambiental da cadeia de suprimentos (SC). Neste capítulo, trata-se especificamente do processo de avaliação proposto e dos indicadores de desempenho do *framework*. As ferramentas e os modelos SRN serão detalhados no Capítulo 6.

5.1 Visão Geral

Ao avaliar o desempenho ambiental e operacional de um sistema devem-se realizar diversas atividades que vão desde a definição do problema até a análise dos dados. Estas atividades são detalhadas a seguir.

Uma avaliação de desempenho requer que o analisador possua um bom conhecimento sobre o sistema que está sendo avaliado. Quando o analista não possui este conhecimento, faz-se necessário realizar uma entrevista de reconhecimento com os especialistas no sistema. Gerentes e coordenadores das empresas, por exemplo, podem contribuir neste processo. Deve-se adquirir

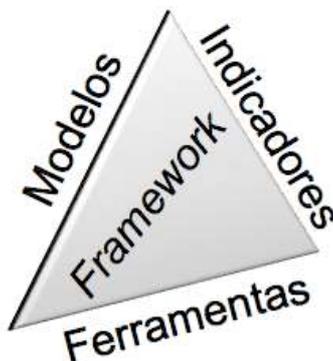


Figura 5.1 Framework proposto.

conhecimento não apenas sobre o design do sistema, mas também sobre os problemas mais comumente enfrentados. Estes problemas servirão como base para a definição do escopo da avaliação.

Na modelagem de cadeias de suprimentos é necessário selecionar os clientes e instalações que farão parte da avaliação. Dado o grande número de partes envolvidas em uma cadeia de suprimentos, muitas vezes é necessário selecionar apenas os elementos de maior importância. Nesse caso, é comum se adotar uma *classificação ABC (lei de Pareto)* (Simchi-Levi et al., 2000) para realizar esta seleção. Em uma empresa típica é possível observar que (Alvarenga e Novaes, 2000):

- poucos clientes participam muito nas vendas dos produtos, enquanto muitos clientes participam pouco;
- poucos produtos participam muito no faturamento da empresa, enquanto muitos produtos participam pouco;
- poucos insumos possuem um custo de aquisição muito elevado, enquanto muitos insumos possuem um baixo custo de aquisição;
- no transporte dos produtos, observa-se que poucos itens possuem uma grande participação no peso/volume do veículo, enquanto muitos itens possuem uma baixa participação;

A partir da lei de Pareto, pode-se reduzir o tamanho da rede de distribuição a ser analisada, desconsiderando alguns clientes, regiões, veículos e/ou famílias de produtos. No caso da avaliação de uma linha de produção, pode-se por exemplo utilizar esta análise para selecionar as

linhas que devem ser analisadas com base no impacto econômico que estas representam para a empresa.

Após a definição do escopo da avaliação, o analista deve selecionar os indicadores que farão parte da avaliação. A Seção 5.2 trata dos indicadores ambientais propostos. Já dentre os indicadores operacionais, podem-se citar:

- o **tempo de ciclo** que denota o *lead time* desde a colocação de um pedido por parte do cliente até o recebimento dos produtos solicitados;
- o **nível de serviço** que representa a qualidade do serviço prestado ao cliente. São três indicadores principais: o percentual de pedidos atendidos a partir dos estoques, a quantidade de pedidos aguardando serem atendidos (*backorders*) e a probabilidade do tempo de ciclo ficar dentro de um prazo acordado com o cliente;
- os **níveis de estoque** relativos a: *matéria prima*, *WIP* (produtos sendo produzidos e semi-acabados), *produtos acabados* e *peças sobressalentes* e;
- a **utilização de recursos** que pode ser avaliada para diferentes recursos da cadeia de suprimentos, tais como: os armazéns, os veículos utilizados para transportar os produtos, os estoques, as máquinas de uma linha de produção e os *buffers* do sistema.

Uma vez selecionados os indicadores, inicia-se a fase de modelagem do sistema. Antes de criar o modelo de avaliação de desempenho com SRNs, pode-se criar um modelo utilizando a notação de modelagem de processos de negócio (BPMN) (OMG – Object Management Group, 2009). Esse modelo, apesar de não ser necessário, pode prover um bom entendimento do escopo da análise tanto por parte do analista quanto por parte dos demais interessados na avaliação (ex.: gerentes da empresa avaliada). Esse modelo também tem a função de validar o escopo da avaliação.

Um modelo SRN equivalente ao modelo criado com a notação de modelagem de processos de negócio (BPMN) deve então ser criado. Esse modelo será utilizado para a avaliação de desempenho ambiental e operacional do sistema. O Capítulo 6 trata da modelagem utilizando SRNs, apresentando os modelos propostos. Esse capítulo também trata das métricas do modelo. Já a definição das métricas ambientais é tratada na Seção 5.3.

A complexidade de um modelo SPN/SRN pode impactar a obtenção de suas métricas. Por isso, propõe-se que as atividades das SCs sejam divididas em subatividades. Para cada uma destas, um conjunto de componentes será utilizado para modelar o sistema. Nesta tese os modelos

deverão ser criados separadamente para cada parte da SC: logística de suprimentos, logística de distribuição, logística reversa e processos de manufatura. Com isso, os modelos finais serão menos complexos, o que simplifica a obtenção das métricas. Com a biblioteca de componentes SRN proposta, não se faz necessário realizar uma verificação do modelo gerado, desde que sejam respeitadas as regras de composição apresentadas no Capítulo 6. Como será demonstrado, garante-se que os componentes propostos geram modelos que possuem propriedades que permitem sua análise ou simulação no regime transiente ou estacionário.

Apesar de não ser necessário verificar o modelo, deve-se realizar uma validação *quantitativa* para garantir que a SRN está representando corretamente o sistema real. Para isso podem-se criar algumas métricas que, dada uma série de parâmetros de entrada, os seus resultados esperados são conhecidos através dos dados históricos coletados nas fases anteriores. A taxa de chegada de pedidos no produtor é um valor que pode ser facilmente obtido, tanto no modelo quanto nos dados históricos e pode ser utilizado para essa validação. Tendo-se os dados históricos e os resultados obtidos pelo modelo, um teste de hipóteses pode ser aplicado com o objetivo de checar a equivalência estatística entre esses dados. Em casos mais simples, pode-se analisar o erro existente entre o valor obtido pelo modelo e o valor medido no sistema real. Caso o erro esteja dentro de um limite desejado para a avaliação (ex.: abaixo de 10%), considera-se o modelo válido.

Nem todas as métricas dos modelos precisam ser validadas. Por exemplo, supondo um cenário no qual consome-se 0,5 kg de uma matéria-prima *B* e 1,0 kg de outra matéria-prima *C* para produzir 1,0 kg de um produto *A*. Sabe-se ainda que é gerado 0,2 kg de um detrito *D*. Como o consumo das matérias-primas *B* e *C* e a geração do detrito *D* dependem da quantidade de *A* produzida, estes valores não precisam ser validados. A validação deve então ser feita com o modelo criado para representar o cenário atual do sistema. Assim, define-se uma métrica que retorne a quantidade produzida de *A* e atribui-se os valores medidos no sistema aos parâmetros do modelo. O valor da métrica obtido com o modelo precisa ser estatisticamente equivalente ao medido no sistema real. Caso estes valores sejam estatisticamente equivalentes, infere-se que os valores das métricas derivadas da quantidade produzida de *A* também o serão e que o modelo é válido.

A partir do modelo validado, é possível avaliar cenários alternativos com o objetivo de encontrar configurações que melhorem o desempenho do sistema real. Para tanto, o analista deve variar os parâmetros do modelo (ex.: tempo de entrega, periodicidade de pedidos, tamanho da carga transportada etc.). Geralmente, esses cenários alternativos são criados utilizando-se

valores definidos empiricamente pelo analista. Alternativamente, pode-se utilizar um modelo de otimização matemática para selecionar estes parâmetros, conforme proposto na Seção 5.4.

5.2 Indicadores de Desempenho Ambiental

Ao se utilizar SPNs para a modelagem de processos de negócio (BPM), é importante converter as métricas desse formalismo para o domínio do processo modelado. Logo, enquanto uma SPN provê informações como a quantidade esperada de *tokens* em um lugar e o *throughput* de uma transição, no contexto da avaliação de desempenho ambiental (ADA) pretende-se responder perguntas como a quantidade de água consumida por uma atividade ou a probabilidade de um sistema expelir uma quantidade de GEE maior que um limite máximo. Por esse motivo, as SRNs foram escolhidas para a criação e avaliação dos modelos. Conforme apresentado no Capítulo 4, essas redes permitem que se associem *rewards* às marcações e ao disparo das transições da rede.

Nesta seção, apresenta-se a abordagem proposta para aferir os indicadores de desempenho ambiental a partir das SRNs (Alves et al., 2011a, 2013). Os modelos criados buscam traduzir o processo de negócio das SCs, representando o fluxo de produtos e informação através da estrutura das SRNs. As métricas referentes ao consumo/geração de insumos, energia, custo e potencial de aquecimento global (GWP) relacionados às atividades e recursos do processo de negócio são então calculadas a partir dos *rewards*.

No contexto das SCs, um lugar e a sua marcação podem representar, por exemplo, um estoque e a quantidade de produtos armazenados nele, respectivamente. Adicionalmente, uma transição pode representar a ação de produzir bens, enquanto o seu *throughput* determina a quantidade de bens produzidos por unidade de tempo.

Em ambos os casos, é possível existirem outros aspectos relacionados com a produção de bens e a quantidade de produtos armazenados. Por exemplo, a produção de bens pode exigir uma determinada quantidade de energia e expelir GEE. Assim, percebe-se que diversos aspectos podem estar associados a uma única ação de um sistema. No caso de uma SRN, esses indicadores estariam relacionados a uma transição do modelo. Analogamente, o armazenamento de produtos pode consumir uma dada quantidade de energia por hora e expelir GEE, estando esses indicadores associados aos lugares da SRN.

Em uma SPN tradicional, os insumos (e/ou resíduos) de uma ação, modelada como uma transição, poderiam ser representados por lugares de entrada (e/ou saída). Porém, como des-

tacado, podem haver diversos insumos e detritos relacionados a uma única ação do processo. Representá-los na estrutura da rede iria conferir ao modelo uma complexidade desnecessária, o que possivelmente interferiria, inclusive, em suas propriedades estruturais e comportamentais. Além disso, uma abordagem nesse sentido certamente levaria a uma explosão do espaço de estados (Valmari, 1998). Com a utilização de *rewards*, procura-se não interferir na estrutura dos modelos, evitando o impacto sobre o espaço de estados.

Ao se realizar uma avaliação de desempenho ambiental (ADA) em um sistema, faz-se necessário obter dados que deem suporte à apuração de indicadores ambientais. A ISO 14031 apresenta alguns exemplos (ISO, 1999). Após o mapeamento das atividades que serão modeladas, alguns dos principais aspectos que precisam ser observados para cada uma dessas atividades e cada um dos recursos (ex.: estoque, máquinas) envolvidos são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Classificação dos itens a serem medidos para a avaliação

Categoria	Descrição
Energia	A quantidade de energia consumida (por hora, ou por unidade produzida), categorizada por tipo (ex.: eletricidade, biomassa, gasolina, diesel).
Insumo	A quantidade de materiais utilizados para produzir um bem ou para realizar uma atividade (por hora, ou por unidade produzida). Esses insumos devem ser categorizados por tipo (ex.: água, madeira, plástico, materiais tóxicos) e origem (ex.: primeiro uso, reciclagem, reuso).
Resíduos	A quantidade de resíduos gerados (por hora, ou por unidade produzida) pelas atividades a serem modeladas, categorizados por tipo (ex.: madeira, papelão, plástico) e por destinação (ex.: reciclagem, aterro, compostagem).

É importante ressaltar que um mesmo material pode ser utilizado como fonte energética ou insumo, ou até ser um resíduo de uma atividade de um processo. Um bloco de madeira, por exemplo, pode ser utilizado como matéria-prima para a produção de um bem, enquanto uma parte dele é descartada como resíduo de produção. Essa mesma madeira também pode servir como fonte de energia, por exemplo, em um forno. Para cada item classificado, também deve ser indicado se ele é uma entrada ou saída do sistema. Essa indicação serve para determinar o sinal a ser utilizado na função de *reward*. Um resíduo classificado como saída do sistema possui um impacto ambiental negativo. Por outro lado, caso o sistema utilize resíduo como entrada, este é retirado do meio ambiente, gerando um impacto positivo.

A classificação proposta busca estabelecer meios de calcular separadamente as métricas de potencial de aquecimento global (GWP) e as entradas, saídas e irreversibilidades da exergia para cada atividade/processo. Dependendo da classificação, uma mesma substância pode possuir valores diferentes de GWP ou eficiência exergética associados. A presente classificação foi criada com base nos fatores de conversão providos pela DEFRA (DEFRA - Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2009) e ecoinvent (Frischknecht et al., 2005) a fim de proporcionar uma descrição suficientemente detalhada do GWP dos processos avaliados. Buscou-se também evitar incluir demasiadamente detalhes que onerariam o processo de avaliação sem prover resultados que compensassem a sua inclusão.

A seguir, serão apresentadas as formulas utilizadas para aferir a exergia de entrada e de saída por fonte energética e o GWP. Os conjuntos de atividades/lugares, fontes energéticas, matérias-primas e tipos de resíduos considerados na avaliação são representados por A , E , RM e W , respectivamente. Ademais, a notação a_i , e_i , rm_i , e w_i é utilizada para se referir ao i -ésimo elemento dos respectivos conjuntos. A exergia de saída de uma fonte energética e_i em uma atividade a_j é denotada por $X_{out_{e_i,a_j}}$ conforme a Equação (5.1), onde $\eta_{II_{e_i,a_j}}$ é a eficiência exergética de e_i em a_j , m_{e_i,a_j} é a quantidade de e_i usada em a_j , e x_{che_i} é a exergia química de e_i .

A quantidade necessária de uma fonte de energia alternativa e_k necessária para substituir a fonte energética original e_i na atividade a_j , pode ser calculada considerando-se que a exergia de saída na atividade precisa permanecer inalterada, independentemente da fonte energética. A Equação (5.1) mostra esta relação, sendo $X_{out_{e_i,a_j}}$ a exergia de saída de e_i em a_j , $X_{out_{e_k,a_j}}$ a exergia de saída de e_k em a_j , $\eta_{II_{e_k,a_j}}$ a eficiência exergética de e_k em a_j , e $X_{in_{e_k,a_j}}$ a exergia de entrada de e_k em a_j . A Equação (5.1) considera que o sistema está em equilíbrio termodinâmico e que as eficiências exergéticas $\eta_{II_{e_i,a_j}}$ e $\eta_{II_{e_k,a_j}}$ dependem da fonte energética. Outrossim, a exergia da eletricidade é de $3600kJ/kWh$ e a exergia de outras fontes energéticas é de calculada pela Equação (3.6).

$$X_{out_{e_i,a_j}} = \eta_{II_{e_i,a_j}} X_{in_{e_i,a_j}} = X_{out_{e_k,a_j}} = \eta_{II_{e_k,a_j}} X_{in_{e_k,a_j}} \quad (5.1)$$

Sejam q_{r_i} e g_{r_i} a quantidade consumida de um recurso r_i (em $un.$) e o fator GWP (em $kgCO_2eq/un.$). Assim, se a quantidade consumida de um recurso é aferida em m^3 , o fator GWP precisa ser contabilizado em $kgCO_2eq/m^3$. A GWP total relacionado ao consumo do recurso (GWP_{r_i}) é aferido utilizando-se a Equação (5.2). Essa equação calcula a quantidade de GWP resultante do consumo de fontes energéticas, matérias-primas e geração de resíduos. A despeito das matérias-primas, o fator GWP g_{r_i} pode variar dependendo da sua origem (ex.:

reuso). No caso dos resíduos, este fator depende da destinação do resíduo (ex.: reciclagem).

$$GWP_{r_i} = q_{r_i} g_{r_i} \quad (5.2)$$

Uma vez que fontes energéticas diferentes possuem fatores GWP diferentes, as Equações 5.1 e 5.2 permitem que seja realizada uma estimativa do impacto ambiental (em $kgCO_2eq$) de diferentes fontes de energia.

5.2.1 Classificação dos Itens e seus Fatores GWP

A Tabela 5.2 apresenta os insumos/resíduos que devem ser utilizados ao se realizar a avaliação de desempenho ambiental (ADA) nas cadeias de suprimentos verdes (GSCs). Os fatores de conversão apresentados nessa tabela baseiam-se principalmente nos dados fornecidos em DEFRA - Department for Environment, Food and Rural Affairs (2009). Alguns desses fatores podem variar dependendo da localização do sistema analisado. O fator de conversão da eletricidade, por exemplo, depende das fontes usadas para a geração de energia. Fontes renováveis acarretam um fator de GWP menor. Logo, esse fator será menor em regiões que fazem uso mais intensivo desse tipo de fonte energética na geração de eletricidade. Esta tabela mostra o valor para do GWP da eletricidade consumida no reino unido DEFRA - Department for Environment, Food and Rural Affairs (2009).

Tabela 5.2: Detalhamento da classificação proposta para os insumos/resíduos que devem ser considerados na avaliação de cadeias de suprimentos verdes.

Insumo/Resíduo	Unidade	Tipo	Detalhamento	Fator GWP (kgCO₂eq)
Água	m ³	Insumo		0,2760
Gasolina de Avião	l	Energia		2,5540
Carvão	ton	Energia		2338,1000
Diesel	l	Energia		2,6694
Gás Natural	m ³	Energia		2,0133
GLP	l	Energia		1,4968
Biodiesel	l	Energia		2,8605

continua na próxima página...

Tabela 5.2 – continuação da página anterior

Insumo/Resíduo	Unidade	Tipo	Detalhamento	Fator GWP (kgCO₂eq)
Eletricidade	kW	Energia		0,5442
Lubrificantes	ton	Insumo		3181,5000
Refrigeração Automotiva	h	Insumo		0,0113
Refrigeração Industrial	h	Insumo		0,0602
Refrigeração Carga	h	Insumo		60,1852
CO ₂	kg	Resíduo		1
Papel/Papelão	ton	Resíduo	Aterro	550,0000
		Resíduo	Compostagem	57,0000
		Resíduo	Reciclagem	-240,0000
Lixo Alimentício	ton	Resíduo	Aterro	365,0000
		Resíduo	Compostagem	30,0000
Lixo Orgânico	ton	Resíduo	Aterro	230,0000
		Resíduo	Compostagem	39,0000
		Resíduo	Reciclagem	44,0000
Madeira	ton	Resíduo	Aterro	930,0000
		Resíduo	Compostagem	250,0000
		Resíduo	Reciclagem	250,0000
Textil	ton	Resíduo	Aterro	300,0000
		Resíduo	Reciclagem	-3800,0000
Plástico (denso)	ton	Resíduo	Aterro	40,0000
		Resíduo	Reciclagem	-1500,0000
Plástico (filme)	ton	Resíduo	Aterro	35,0000
		Resíduo	Reciclagem	-1000,0000
Metal Ferroso	ton	Resíduo	Aterro	10,0000
		Resíduo	Reciclagem	-1300,0000
Metal Não Ferroso	ton	Resíduo	Aterro	10,0000
		Resíduo	Reciclagem	-9000,0000
Vidro	ton	Resíduo	Aterro	10,0000
		Resíduo	Reciclagem	-315,0000

5.3 Definindo *Rewards* para Indicadores Ambientais

Seja N uma SRN que modela o sistema analisado. \mathcal{I} é um conjunto com os itens classificados conforme a Tabela 5.1. Para cada elemento de \mathcal{I} , deverá ser definido um *reward* $r_i \in \mathcal{R}$ relacionado com a entrada/saída desse item do sistema. Por conveniência, o conjunto com os *rewards* básicos será representado por $\mathcal{R}_{\mathcal{I}}$, onde $\mathcal{R}_{\mathcal{I}} \subseteq \mathcal{R}$.

A definição de *rewards* das SRNs não faz distinção entre os lugares e as transições da rede. Um único *reward* é calculado para todas as transições e marcações alcançáveis. Porém, especialmente quando se utilizam as SRNs para avaliar processos de negócio, é importante obter uma visão detalhada de cada atividade ou conjunto de atividades, do processo. Assim, nesta tese, os *rewards* devem ser definidos separadamente para cada transição e/ou lugar da SRN, conforme o esquema apresentado na Figura 5.2. Logo, para cada item classificado no conjunto \mathcal{I} , será definido um *reward* $r \in \mathcal{R}_{\mathcal{I}}$ para cada elemento (transições e/ou lugares) da SRN que representa atividades/localidades do sistema relacionadas ao consumo/disposição do item.

Esse modelo procura separar as entradas e saídas das transições e dos lugares. O esquema mostrado na figura representa a utilização dos insumos representados por $i1$, $i2$ e $i3$, com a resultante saída dos insumos representados por $o1$, $o2$ e $o3$, cada vez que a ação representada pela transição é executada. Comportamento semelhante ocorre com as entradas e saídas do lugar. Porém, nesse caso as entradas e saídas indicam o quanto é consumido ou gerado no ambiente *por unidade de tempo* (taxa). O referido esquema ainda mostra que é possível haver uma mesma entrada ($i2$) e/ou saída ($o3$) comum para transições e lugares do modelo.

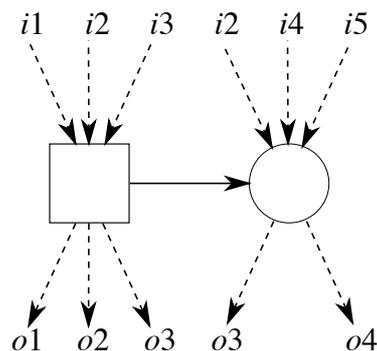


Figura 5.2 Modelo esquemático das funções de métricas das transições e lugares.

Com essa separação dos *rewards* por elemento da SRN, o valor total do *reward* relacionado a um item classificado em \mathcal{I} pode ser derivado da soma dos *rewards* dos elementos. Assim,

pode-se aferir o valor do *reward* para um subconjunto de elementos da SRN. Sejam $N, P' \subseteq P$ e $T' \subseteq T$ uma SRN e seus respectivos subconjuntos de lugares e transições, para os quais se deseja aferir o *reward* $z_i \in (\mathcal{R} - \mathcal{R}_g)$. Então, z_i é definido conforme a Equação (5.3).

$$z_i = \sum_{j=0}^{j=|\mathcal{R}'|} z_j \quad (5.3)$$

onde $\mathcal{R}' \subseteq \mathcal{R}$ é o conjunto de *rewards* relacionados a z_i e que foram definidos para $p \in P'$ e $t \in T'$. Essa definição permite, por exemplo, aferirem-se métricas para um caminho do fluxo de negócio modelado pela SRN. Seja $\mu'[\sigma > \mu'', \mu' \in RS, \mu'' \in RS$, onde σ é uma sequência de disparos de transições que determinam o caminho para o qual se deseja aferir as métricas. Os conjuntos de transições T' e lugares P' seriam definidos como $T' = \{t \in T | t \text{ faz parte de } \sigma\}$ e $P' = \{p \in P | p \in \bullet t \vee p \in t \bullet, t \in T'\}$.

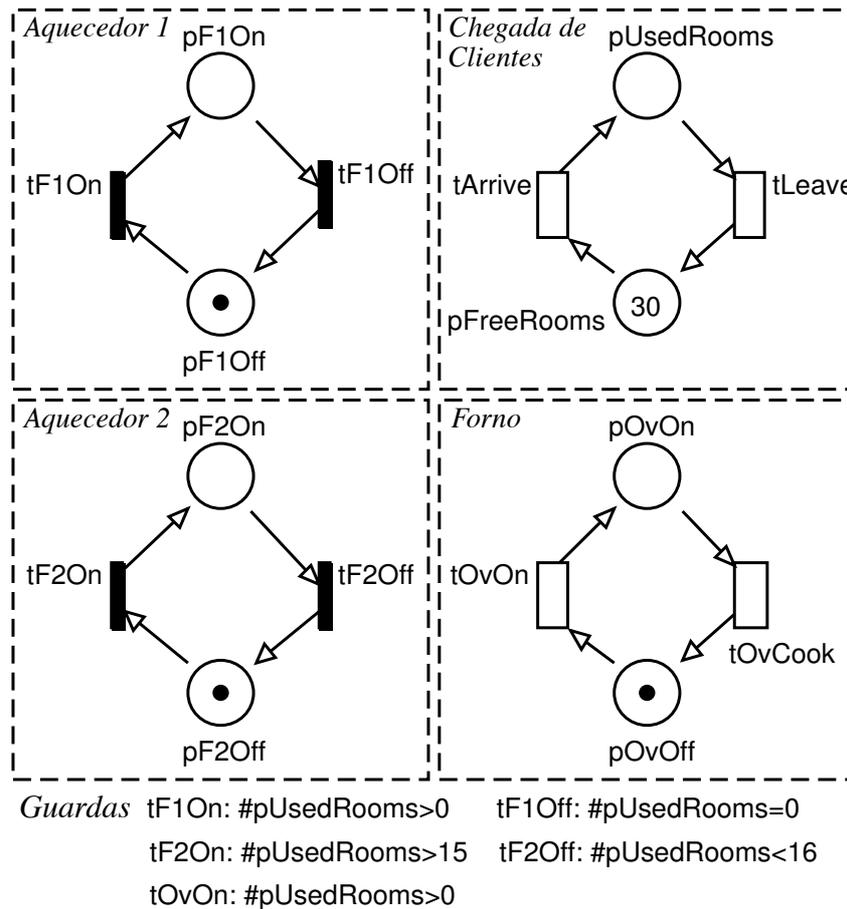


Figura 5.3 Exemplo de uma SRN.

A SRN representada na Figura 5.3 é utilizada para exemplificar a definição das métricas

apresentada. Essa SRN modela um hotel com 30 quartos disponíveis ($pFreeRooms$). Os quartos são climatizados por 2 aquecedores centrais, cada um com capacidade de aquecer 15 quartos. Esses aquecedores são utilizados de tal forma que o segundo é ligado apenas quando houver mais de 15 quartos ocupados. Ambos funcionam à base de gás natural, porém com um consumo diferente, com taxas de $x_0 + n_0\lambda_0$ e $x_1 + n_1\lambda_1$, respectivamente, onde n_0 e n_1 indicam a quantidade de quartos aquecidos, λ_0 e λ_1 são a taxa de consumo por quarto ocupado e x_0 e x_1 representam um consumo constante. Além disso, a transição $tOvCook$ representa a utilização de um forno que possui um consumo fixo z do mesmo gás, toda vez que é utilizado. A função de *reward* z_0 que representa o consumo de gás no sistema seria definida como:

$$\begin{aligned} z_0 &= (\rho_0, r_0, \psi_0), \text{ onde} \\ \rho_0 &= \#PF1On(x_0 + (\min\{\#pUsedRooms, 15\})\lambda_0) + \\ &\quad \#PF2On(x_1 + (\max\{\#pUsedRooms - 15, 0\})\lambda_1) \\ r_{0,t} &= z, t = t_0 \wedge r_{0,t} = 0, t \neq t_0 \quad \text{e} \quad \psi_0 = 0 \end{aligned}$$

A definição acima não diferencia o elemento que foi responsável pelo consumo de gás natural. Assim, não seria possível aferir separadamente a quantidade de gás consumido pelos aquecedores 1 e 2 ou pelo forno. Conforme definido anteriormente, essa função de *reward* deveria ser separada em:

- aquecedor 1 ($PF1On$):

$$\begin{aligned} z_0 &= (\rho_0, r_0, \psi_0), \text{ onde} \\ \rho_0 &= \#PF1On(x_0 + (\min\{\#pUsedRooms, 15\})\lambda_0), \\ r_{0,t} &= 0, \forall t \in T \quad \text{e} \quad \psi_0 = 0; \end{aligned}$$

- aquecedor 2 ($PF2On$):

$$\begin{aligned} z_1 &= (\rho_1, r_1, \psi_1), \text{ onde} \\ \rho_1 &= \#PF2On(x_1 + (\max\{\#pUsedRooms - 15, 0\})\lambda_1), \\ r_{1,t} &= 0, \forall t \in T \quad \text{e} \quad \psi_1 = 0; \end{aligned}$$

- forno (t_0):

$$\begin{aligned} z_2 &= (\rho_2, r_2, \psi_2), \text{ onde} \\ r_{2,t} &= z, t = t_0 \wedge r_{2,t} = 0, t \neq t_0, \\ \rho_2 &= 0 \quad \text{e} \quad \psi_2 = 0; \end{aligned}$$

- sistema:

$$\begin{aligned} z_3 &= (\rho_3, r_3, \psi_3), \text{ onde} \\ \psi_3 &= z_0 + z_1 + z_2, \\ \rho_3 &= 0 \quad \text{e} \quad r_{3,t} = 0, \forall t \in T, \end{aligned}$$

onde $\{z_0, z_1, z_2\} \subseteq \mathcal{R}_{\mathcal{G}}$ e $z_3 \in (\mathcal{R} - \mathcal{R}_{\mathcal{G}})$.

No caso de o sistema avaliado produzir bens reais (e não virtuais, como ocorre em algumas áreas de TI), o *balanço de massa* pode ser realizado diretamente a partir da soma dos materiais de entrada e saída, conforme especificado pela Equação (5.4).

$$z_i = \frac{m_{good}}{\sum_{j=0}^{j=|\mathcal{R}'|} z_j}, \quad (5.4)$$

onde $\mathcal{R}' \subseteq \mathcal{R}$ é o conjunto de *rewards* que representam insumos utilizados na produção do bem e m_{good} é a quantidade produzida do bem (em $kg/un. tempo$). Em uma SRN, essa quantidade é geralmente obtida a partir do *throughput* de uma transição, que simboliza o ato de produzir.

Além do *balanço de massa*, mais três *rewards* importantes devem ser definidos em função dos *rewards* $z_i \in \mathcal{R}_{\mathcal{G}}$. São eles: o custo, o GWP e a exergia de entrada e saída. Para cada *reward* $z_i \in \mathcal{R}_{\mathcal{G}}$, um *reward* de custo $z_j \in (\mathcal{R} - \mathcal{R}_{\mathcal{G}})$ deve ser definido (Equação (5.5)). O *reward* de custo deve associar perdas (sinal negativo) ou ganhos (sinal positivo) financeiros relacionados ao item classificado.

$$z_j = K + \beta \times z_i, \quad (5.5)$$

onde K é uma constante e β é o custo/ganho unitário para o item representado por *reward* z_i .

O custo/ganho financeiro total será dado pela soma dos *rewards* financeiros. Para cada *reward* $z_i \in \mathcal{R}_{\mathcal{G}}$, um *reward* referente ao GWP $z_j \in (\mathcal{R} - \mathcal{R}_{\mathcal{G}})$ precisa ser criado, conforme apresentado na Equação (5.6).

$$z_j = g \times z_i, \quad (5.6)$$

onde g é o fator GWP para cada unidade do item classificado, cujo *reward* é representado por z_i .

Analogamente aos ganhos financeiros, o GWP total é definido através da soma dos *rewards* de GWP. Para cada *reward* $z_i \in \mathcal{R}_{\mathcal{G}}$, que se refere ao consumo de energia, devem ser definidos três *rewards*, referentes à entrada (Equação (5.7)), à saída (Equação (5.8)) e à perda

(Equação (5.9)) de exergia, tal que $\{z_j, z_k, z_l\} \subset (\mathcal{R} - \mathcal{R}_{\mathcal{J}})$, como:

$$z_j = x_{ch} \times z_l \quad (5.7)$$

$$z_k = \eta_{II} \times z_j \quad (5.8)$$

$$z_l = z_k - z_j, \quad (5.9)$$

onde η_{II} e x_{ch} são as médias ponderadas da eficiência exergética e da exergia química da fonte utilizada.

No caso da eficiência, essa média ponderada deve considerar todas as atividades do sistema real que são representadas pelo elemento (transição ou lugar) do modelo. De forma análoga aos *rewards* financeiros e de GWP, a soma dos *rewards* de exergia denota o seu total.

Os trabalhos já existentes, que empregam a exergia como indicador de sustentabilidade, procuram expressar todos os indicadores (ex.: consumo de água, matéria-prima etc.) em função da exergia (Szargut e Morris, 1985; Gong e Wall, 1997; Ayres et al., 1998; Cornelissen e Hirs, 2002; Hau e Bakshi, 2004). Nesta tese, as métricas de exergia são aplicadas apenas para recursos consumidos com o objetivo de gerar energia (ex.: gás natural, óleo diesel etc.). Essa estratégia foi adotada devido à dificuldade de se encontrarem valores precisos da exergia química de todos os insumos, detritos e produtos da cadeia de suprimentos (SC) (Ayres et al., 1998; Gong e Wall, 2001) e devido à diferença entre os valores resultantes das análises baseadas no GWP e na exergia (Gong e Wall, 2001). A dificuldade inerente à aferição da exergia para todo o ciclo de vida dos produtos torna complicada a utilização prática dos modelos propostos em outros trabalhos (Gong e Wall, 1997; Ayres et al., 1998; Cornelissen e Hirs, 2002; Hau e Bakshi, 2004). Já a diferença entre os valores de GWP e exergia dificulta um processo de *benchmarking*.

As métricas referentes às saídas de exergia podem ser utilizadas para comparar a utilização de diferentes fontes de exergia (vide Equação (5.1)), apenas variando-se os parâmetros x_{ch} e η_{II} . Uma vez que cada fonte de energia também possui fatores GWP diferentes, uma comparação do impacto da utilização de diferentes fontes sobre o GWP pode ser realizada.

Cada insumo/resíduo contemplado deverá ser representado por um indicador \mathcal{I}_i , conforme especificado na Seção 5.3. No caso de indicadores de resíduo, cada elemento \mathcal{I}_i deverá representar o próprio e a sua forma de disposição. Por exemplo, enquanto a disposição de madeira em um aterro é representada por \mathcal{I}_0 , a compostagem desse material teria de ser representada por um outro indicador \mathcal{I}_1 .

5.4 Modelo de Otimização para a Criação de Cenários

Uma vez que um modelo SRN é criado para o sistema avaliado, deve-se validar o modelo para observar se este está representando corretamente o modelo. Uma vez validado, é comum que se realizem experimentos alterando-se parâmetros do modelo. Estes experimentos visam encontrar uma ou mais configurações que tornem o sistema mais eficiente, seja do ponto de vista operacional e/ou ambiental. Nesse caso, é possível realizar um experimento fatorial, variando-se um ou mais parâmetros do sistema. Porém, também é possível realizar experimentos no modelo SRN, atribuindo-se aos seus parâmetros valores calculados através de um modelo de otimização matemática (Alves et al., 2013).

Do ponto de vista ambiental, o objetivo de uma avaliação deve ser a redução do consumo de fontes energéticas (eo) e matérias-primas (ro), da geração de resíduos (wo), das perdas exergéticas (xo), e, conseqüentemente, do GWP relativo ao sistema (go). Do ponto de vista operacional, uma avaliação pode ter diferentes objetivos operacionais (bo_i) como: maximizar a utilização de máquinas e estoques, a maximização dos lucros, a minimização dos *lead times* e *backorders* etc. Esse problema pode ser representado por um modelo de otimização.

Esta tese propõe que este modelo de otimização seja resolvido utilizando a *Programação por Metas* (GP ¹) (Charnes et al., 1955; Jones e Tamiz, 2010), que visa reduzir as variáveis de desvio positivo e negativo nd_x e pd_x de cada meta G_x . Logo, os valores das metas G_{eo} , G_{ro} , G_{wo} , G_{xo} , G_{go} , G_{bo_i} , $G_{bo_{i+1}}$, ..., $G_{bo_{n-1}}$ e G_{bo_n} devem ser definidos para os respectivos objetivos eo (consumo de fontes energéticas), ro (matérias-primas), wo (geração de resíduos), xo (perdas exergéticas), go (GWP), bo_i (i -ésimo objetivo operacional), bo_{i+1} , ..., bo_{n-1} e bo_n . Estas metas podem ser definidas empiricamente pelos especialistas no negócio, ou através de um modelo de otimização de programação (não-)linear que busque otimizar uma única variável.

Por exemplo, um modelo de programação linear pode ser definido para o sistema com o objetivo único de otimizar o i -ésimo objetivo de negócio bo_i . O valor encontrado para a variável bo_i neste modelo, deve então ser atribuído à meta G_{bo_i} do modelo de otimização geral. Esse processo deve ser repetido para cada objetivo, para só então resolver o modelo de otimização geral. Com isso, este modelo irá tentar aproximar as variáveis de objetivo tal que elas sejam o mais próximo possível do seu valor ótimo, considerando ainda o peso (w_o) que cada objetivo possui para a avaliação.

O modelo GP a seguir representa o problema de otimização descrito. Seja C o conjunto de

¹N. de T.: Sigla proveniente do inglês Goal Programming.

restrições de desigualdades do modelo, a penúltima restrição define os limites inferior (lb_j) e superior (ub_j) para a j -ésima restrição de desigualdade $c_j \in C$. Por sua vez, a última restrição impede que uma meta G_x tenha ao mesmo tempo um desvio negativo ($nd_x > 0$) e positivo ($pd_x > 0$), restrição esta comum a todos os modelos que utilizam GP.

$$\begin{aligned} \text{minimizar } & \omega_{eo}(nd_{eo} + pd_{eo}) + \omega_{ro}(nd_{ro} + pd_{ro}) + \omega_{wo}(nd_{wo} + pd_{wo}) + \omega_{xo}(nd_{xo} + pd_{xo}) \\ & + \omega_{go}(nd_{go} + pd_{go}) + \sum_{i=1}^N \omega_{bo_i}(nd_{bo_i} + pd_{bo_i}) \end{aligned}$$

sujeito a

$$eo + nd_{eo} - pd_{eo} = G_{eo}$$

$$ro + nd_{ro} - pd_{ro} = G_{ro}$$

$$wo + nd_{wo} - pd_{wo} = G_{wo}$$

$$xo + nd_{xo} - pd_{xo} = G_{xo}$$

$$go + nd_{go} - pd_{go} = G_{go}$$

$$bo_i + nd_{bo_i} - pd_{bo_i} = G_{bo_i}$$

$$bo_{i+1} + nd_{bo_{i+1}} - pd_{bo_{i+1}} = G_{bo_{i+1}}$$

...

$$bo_n + nd_{bo_n} - pd_{bo_n} = G_{bo_n}$$

$$lb_j \leq c_j \leq ub_j, \forall j \in \{n | n \in \mathbb{N} \wedge 1 \leq n \leq |C|\}$$

$$\sum_{\forall G_x} nd_x pd_x = 0$$

tal que

$$eo = \sum_{i=0}^{|E|} \sum_{j=0}^{|A|} q_{e_i, a_j}$$

continua...

...continuação

$$ro = \sum_{i=0}^{|RM|} \sum_{j=0}^{|A|} m_{rm_i,a_j}$$

$$wo = \sum_{i=0}^{|W|} \sum_{j=0}^{|A|} m_{w_i,a_j}$$

$$xo = \sum_{i=0}^{|E|} \sum_{j=0}^{|A|} X_{out_{e_i,a_j}} - \sum_{i=0}^{|E|} \sum_{j=0}^{|A|} X_{in_{e_i,a_j}}$$

$$go = \underbrace{\sum_{i=0}^{|E|} \sum_{j=0}^{|A|} g_{e_i} q_{e_i,a_j}}_{\text{GWP das fontes energéticas}} + \underbrace{\sum_{i=0}^{|RM|} \sum_{j=0}^{|A|} g_{rm_i} m_{rm_i,a_j}}_{\text{GWP das materias-primas}} + \underbrace{\sum_{i=0}^{|W|} \sum_{j=0}^{|A|} g_{w_i} m_{w_i,a_j}}_{\text{GWP dos residuos}}$$

onde a notação $x_{y,z}$ é utilizada para representar a variável x relativa ao consumo/geração do ítem classificado y na atividade/lugar z . Por exemplo, q_{e_i,a_j} é a quantidade da fonte energética e_i consumida na atividade a_j em kJ .

O objetivo xo (perdas exergéticas) depende do objetivo eo (fontes energéticas), enquanto o objetivo go (GWP) depende dos objetivos eo (fontes energéticas), ro (matérias-primas) e wo (resíduos). Ambos os termos são diretamente proporcionais aos termos dos quais dependem. Algumas vezes, se faz conveniente omitir um ou mais objetivos do modelo GP apresentado. Isso pode ser feito caso o objetivo seja constante, ou se ele não for relevante para a avaliação. O modelo de GP pode ser utilizado para realizar diferentes experimentos variando-se os pesos das metas. Os resultados das variáveis do modelo de otimização podem então ser atribuídos aos parâmetros do modelo de avaliação de desempenho que utiliza a notação SRN, permitindo assim, uma análise de sensibilidade do sistema considerando as variáveis de tempo e as relações causais entre os componentes do sistema.

Considerações Finais

Este capítulo apresentou o *framework* proposto nesta tese. O termo *framework* é utilizado para se referir ao conjunto de indicadores, modelos e ferramentas propostos. Além de ter sido mostrado o processo de avaliação adotado, também foram detalhados os indicadores de desempenho ambiental. Como visto, esta tese propõe a utilização do GWP e da exergia como indicadores de desempenho ambiental. Também foi mostrado como esses indicadores devem

ser definidos nas SRNs através de *rewards*. O modelo de otimização matemática utilizado para auxiliar a criação de experimentos também foi detalhado neste capítulo. Os experimentos podem ser criados variando-se os parâmetros do modelo de forma empírica ou com o auxílio deste modelo de otimização.

Modelos SRN e Ferramentas

*Divide as dificuldades em tantas partes como seja possível e necessário
para as resolver.*

—RENÉ DESCARTES (Filósofo e Matemático)

Este capítulo, apresenta os modelos propostos para representar as entidades de uma cadeia de suprimentos verde (GSC). Além das entidades das GSC, alguns modelos também são propostos para representar, por exemplo, políticas de estoque. Estes modelos, bem como suas regras de composição, permitem uma conversão direta de uma representação de alto nível para um modelo em *stochastic reward net* (SRN). Desta forma, pode-se modelar cenários complexos, sem que se tenha um profundo conhecimento sobre as SRNs. A composição destes modelos, bem como as suas propriedades também serão tratadas. Também são propostas algumas métricas, as quais podem ser extraídas dos modelos SRN. Em seguida, são apresentadas as ferramentas criadas e utilizadas para o *framework* proposto.

6.1 Modelos Básicos

Os componentes SRN propostos para a modelagem de GSCs são apresentados nesta seção (Alves et al., 2008b; Alves, 2007). Alguns dos modelos foram adaptados de Alves et al. (2007a); Alves (2007). Além desta adaptação, foram incluídos novos modelos visando contemplar aspectos como falhas, manufatura de produtos e cadeias empurradas (Simchi-Levi et al., 2000). Além das alterações citadas, esta tese ainda adiciona os aspectos ambientais relacionados aos elementos dos modelos. Por exemplo, seguindo o modelo matemático detalhado na Seção 5.3, uma transição que represente o transporte de produtos possui como entrada o consumo de diesel e gás (para transporte de produtos refrigerados) e a emissão de CO_2 como saída. Sempre que aplicável, será apresentada uma tabela resumindo as entradas e saídas de cada elemento dos componentes expostos.

Os indicadores apresentados ao longo desta seção servem como referência dos impactos

relacionados a cada elemento dos modelos propostos. Porém, tais indicadores se referem a sistemas genéricos, podendo variar a depender do sistema modelado. Por exemplo, no caso do modelo de falhas não são incluídos indicadores de impacto ambiental. Todavia, se o componente modelado representasse uma plataforma de extração de petróleo, a ocorrência de falhas poderia acarretar o derramamento de petróleo no ambiente. Nesse caso, um indicador referente à saída de petróleo deveria ser associado ao estado de falha do componente.

As SRNs apresentadas a seguir foram modeladas utilizando-se a ferramenta *ModSPN*, desenvolvida como parte desta pesquisa e apresentada na Seção 6.5. Os lugares e transições com a borda tracejada representam interfaces desses componentes que são utilizadas para realizar a composição do modelo.

Os componentes apresentados a seguir podem ser utilizados para modelar a logística de suprimentos (*inbound logistics*), a logística de distribuição (*outbound logistics*) e a logística reversa (Alves et al., 2007c,b, 2008a, 2010). Além disso, a manufatura de produtos também é contemplada por alguns deles (Alves et al., 2011a, 2013). A presente abordagem procura modelar separadamente as logísticas reversa, de suprimentos e de distribuição e os sistemas de manufatura. Essa estratégia é utilizada para evitar uma complexidade exacerbada do modelo final, o que implicaria a dificuldade de se calcularem suas métricas. Logo, modelos diferentes devem ser criados para cada uma dessas atividades, não havendo uma interação direta entre os mesmos. Porém, os resultados obtidos nos modelos de uma atividade podem ser utilizados como entrada para parâmetros dos modelos de atividades subsequentes. Por exemplo, a taxa de recebimento de produtos dos clientes em um modelo para a logística de distribuição pode ser utilizada como taxa de geração de resíduos no modelo da logística reversa. A Tabela 6.1 apresenta um resumo da relação dos modelos com as entidades e os fluxos das cadeias de suprimentos verdes (GSCs) apresentados na Figura 3.4.

As expressões dos vetores de invariantes apresentadas nos modelos a seguir foram calculadas utilizando-se as funções apresentadas no Apêndice B. A notação r_i , com $i = 1, 2, \dots, j$, é utilizada para representar elementos resultantes da resolução de um sistema de equações lineares com infinitas soluções, tal que $r_i \in \mathbb{N}$.

6.1.1 Temporizador

O componente apresentado na Figura 6.1 é uma SRN definida como $TMR_i = (P_{TMR_i}, T_{TMR_i}, I_{TMR_i}, O_{TMR_i}, H_{TMR_i}, \Pi_{TMR_i}, G_{TMR_i}, M_{0TMR_i}, W_{TMR_i}, \mathcal{R}_{TMR_i})$, $i = 0, 1, \dots, j$. Sendo $P_{TMR_i} = \{p_{0TMR_i}, p_{Reset_{TMR_i}}, p_{Time_{TMR_i}}, p_{TimeLeft_{TMR_i}}\}$ e $T_{TMR_i} = \{t_{0TMR_i}, t_{Reset_{TMR_i}}, t_{Time_{TMR_i}}\}$

Tabela 6.1 Entidades representadas pelos modelos por contexto.

Modelo	Contexto	Entidade(s) Representada(s)
BFR	Manufatura	Estoques intermediários
PRC	Manufatura	Máquinas, processos etc.
PRD	Logística de Suprimentos	Fornecedores
PRD	Logística de Distribuição	Fábricas
PRD	Logística Reversa	Consumidores
CSM	Logística de Suprimentos	Fábricas
CSM	Logística de Distribuição	Consumidor Final
CSM	Logística Reversa	Disposição, Fornecedor, Intermediário
INT	Logística de Distribuição	Atacadistas, Varejistas, Distribuidores etc.
INT	Logística Reversa	Coleta, Remanufatura/Reuso, Reciclagem
FLW	Logística de Suprimentos, Distribuição e Reversa	Fluxo de produtos/informação entre as instalações

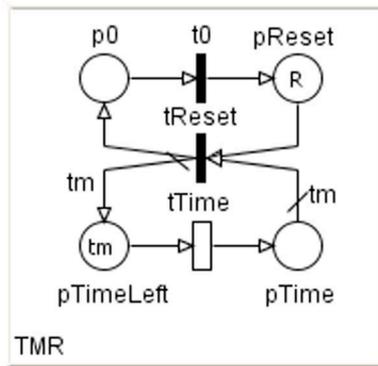


Figura 6.1 Componente SRN para representar um temporizador.

seus respectivos conjuntos ordenados de lugares e transições, sua estrutura pode ser representada matricialmente como

$$H_{TMR_i} = \begin{pmatrix} 0 & \dots \\ \vdots & \ddots \end{pmatrix} \quad C_{TMR_i} = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & -tm & 1 \\ 0 & tm & -1 \end{pmatrix}$$

tendo como invariantes de lugar e transição

$$I_{PTMR_i} = (r_2, r_2, r_1, r_1) \quad I_{tTMR_i} = (r_1, r_1, r_1 tm)$$

O componente para o temporizador pode ser utilizado para auxiliar em análises transientes do modelo. Quando seu parâmetro R é igual a 1, o temporizador será cíclico; caso seja zero, ele

será acíclico. O parâmetro tm indica o tempo de cada ciclo (ou o tempo total) do temporizador. A marcação desse modelo pode ser utilizada na definição das funções de guarda das transições de outros componentes.

6.1.2 Política de Estoque de Revisão Contínua



Figura 6.2 Componente SRN para representar demandas de revisão contínua.

O componente apresentado na Figura 6.2 é uma SRN definida como $DCR_i = (P_{DCR_i}, T_{DCR_i}, I_{DCR_i}, O_{DCR_i}, H_{DCR_i}, \Pi_{DCR_i}, G_{DCR_i}, M_{0DCR_i}, W_{DCR_i}, \mathcal{R}_{DCR_i})$, $i = 0, 1, \dots, j$. Sendo $P_{DCR_i} = \emptyset$ e $T_{DCR_i} = \{td_{DCR_i}\}$ seus respectivos conjuntos ordenados de lugares e transições, sua estrutura pode ser representada matricialmente como

$$H_{DCR_i} = N/A \quad C_{DCR_i} = N/A$$

tendo como invariantes de lugar e transição

$$Ip_{DCR_i} = () \quad It_{DCR_i} = (r_1)$$

O modelo de demanda de revisão contínua pode ser utilizado em conjunto com os componentes que representam intermediários, produtores e processos. Ao utilizá-lo, a função de guarda deve ser associada à transição td . Sendo p um lugar que representasse um estoque e X uma quantidade de estoque mínimo, $\#p < X$ poderia ser associada a essa transição a fim de representar, por exemplo, uma política de estoque do tipo (s, S) .

6.1.3 Política de Estoque de Pedidos Periódicos

O componente apresentado na Figura 6.3 é uma SRN definida como $DPO_i = (P_{DPO_i}, T_{DPO_i}, I_{DPO_i}, O_{DPO_i}, H_{DPO_i}, \Pi_{DPO_i}, G_{DPO_i}, M_{0DPO_i}, W_{DPO_i}, \mathcal{R}_{DPO_i})$, $i = 0, 1, \dots, j$. Sendo $P_{DPO_i} = \emptyset$ e $T_{DPO_i} = \{td_{DPO_i}\}$ seus respectivos conjuntos ordenados de lugares e transições, sua estrutura pode ser representada matricialmente como



Figura 6.3 Componente SRN para representar demandas de pedidos periódicos.

$$H_{DPO_i} = N/A \quad C_{DPO_i} = N/A$$

tendo como invariantes de lugar e transição

$$I_{DPO_i} = () \quad It_{DPO_i} = (r_1)$$

O modelo de demanda de pedidos periódicos pode ser utilizado em conjunto com os componentes de intermediários, produtores e processos de manufatura. Ao utilizá-lo, uma taxa deve ser associada à transição td representando a periodicidade com que a demanda será gerada.

6.1.4 Política de Estoque de Revisão Periódica

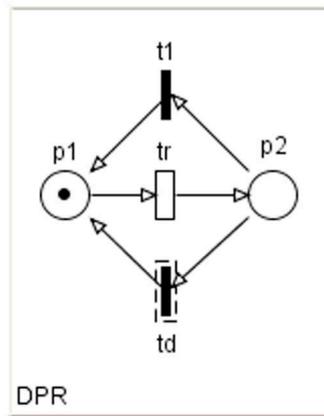


Figura 6.4 Componente SRN para representar demandas de revisão periódica.

O componente apresentado na Figura 6.4 é uma SRN definida como $DPR_i = (P_{DPR_i}, T_{DPR_i}, I_{DPR_i}, O_{DPR_i}, H_{DPR_i}, \Pi_{DPR_i}, G_{DPR_i}, M_{0DPR_i}, W_{DPR_i}, \mathcal{R}_{DPR_i})$, $i = 0, 1, \dots, j$. Sendo $P_{DPR_i} = \{p1_{DPR_i}, p2_{DPR_i}\}$ e $T_{DPR_i} = \{t1_{DPR_i}, td_{DPR_i}, tr_{DPR_i}\}$ seus respectivos conjuntos ordenados de lugares e transições, sua estrutura pode ser representada matricialmente como

$$H_{DPR_i} = \begin{pmatrix} 0 & \cdots \\ \vdots & \ddots \end{pmatrix} \quad C_{DPR_i} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

tendo como invariantes de lugar e transição

$$Ip_{DPR_i} = (r_1, r_1) \quad It_{DPR_i} = (r_1 - r_2, r_2, r_1)$$

O modelo de demanda de revisão periódica pode ser utilizado em conjunto com os componentes de intermediários, produtores e processos de manufatura. Ao utilizá-lo, uma taxa deve ser associada à transição tr representando a periodicidade com que a demanda será gerada. Além disso, sua transição td deve possuir uma função de habilitação, assim como ocorre com o modelo de revisão contínua.

6.1.5 Falhas

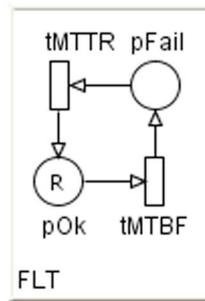


Figura 6.5 Componente SRN para representar falhas em atividades/ações.

O componente apresentado na Figura 6.5 é uma SRN definida como $FLT_i = (P_{FLT_i}, T_{FLT_i}, I_{FLT_i}, O_{FLT_i}, H_{FLT_i}, \Pi_{FLT_i}, G_{FLT_i}, M_{0FLT_i}, W_{FLT_i}, \mathcal{R}_{FLT_i})$, $i = 0, 1, \dots, j$. Sendo $P_{FLT_i} = \{pFail_{FLT_i}, pOk_{FLT_i}\}$ e $T_{FLT_i} = \{tMTBF_{FLT_i}, tMTTR_{FLT_i}\}$ seus respectivos conjuntos ordenados de lugares e transições, sua estrutura pode ser representada matricialmente como

$$H_{FLT_i} = \begin{pmatrix} 0 & \cdots \\ \vdots & \ddots \end{pmatrix} \quad C_{FLT_i} = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$$

tendo como invariantes de lugar e transição

$$Ip_{FLT_i} = (r_1, r_1) \quad It_{FLT_i} = (r_1, r_1)$$

Esse componente deve ser utilizado para modelar falhas em atividades. O arco inibidor desse modelo impede que a transição $tAct$ que representa a atividade seja disparada enquanto houver um *token* em $pFail$. A transição $tMTTR$ representa a resolução de uma falha ocorrida. Logo, o tempo associado a essa transição representa o *tempo médio de reparo* (MTTR).

A transição $tMTBF$ representa a ocorrência de falhas. O tempo associado a ela representa o *tempo médio entre falhas* (MTBF). Este deve ser medido para a atividade, e não para recursos nela utilizados. Logo, se um mesmo recurso $r1$ é compartilhado entre duas atividades $a1$ e $a2$, o tempo associado à transição $tMTBF$ de cada modelo será o tempo entre as falhas de cada atividade, e não o tempo entre as falhas do recurso $r1$.

A Tabela 6.2 apresenta algumas das entradas e saídas relacionadas aos elementos desse componente. Os insumos associados às entradas de $tMTTR_{FLT_i}$ referem-se a qualquer tipo de recurso utilizado no reparo da falha. Geralmente, o reparo de uma falha necessita da intervenção de um técnico e da utilização de materiais (ex.: peças). Uma vez que os modelos apresentados não representam estruturalmente recursos humanos nem os materiais utilizados para o reparo, estes podem ser incorporados como um indicador relacionado à transição. Dessa forma, é possível realizar análises como os gastos com pessoal na manutenção e conserto de equipamentos. O consumo de energia relacionado a $tMTTR_{FLT_i}$, deve-se ao fato de geralmente ser necessário utilizar algum tipo de fonte energética (ex.: eletricidade) ao se resolver uma falha.

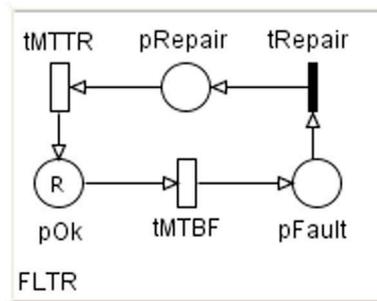
Em geral, a resolução de uma falha também gera refugos (ex.: peças de máquinas, retrazos de papel etc.). Por isso a inclusão dos resíduos como saídas de $tMTTR_{FLT_i}$. Alguns tipos específicos de falha (disparo de $tMTBF_{FLT_i}$) podem resultar em impactos ambientais graves (ex.: vazamento em uma plataforma de petróleo ou falhas no transporte de cargas radioativas). Porém, a maioria das falhas que normalmente ocorrem em sistemas produtivos (ex.: quebra de uma máquina) não está diretamente relacionada a impactos ambientais. Por isso, a tabela apresentada não explicita os impactos decorrentes delas.

6.1.6 Falhas com Reparo Condicional

O componente apresentado na Figura 6.6 é uma SRN definida como $FLTR_i = (P_{FLTR_i}, T_{FLTR_i}, I_{FLTR_i}, O_{FLTR_i}, H_{FLTR_i}, \Pi_{FLTR_i}, G_{FLTR_i}, M_{0FLTR_i}, W_{FLTR_i}, \mathcal{R}_{FLTR_i})$, $i = 0, 1, \dots, j$. Sendo $P_{FLTR_i} = \{pFault_{FLTR_i}, pOk_{FLTR_i}, pRepair_{FLTR_i}\}$ e $T_{FLTR_i} = \{tMTBF_{FLTR_i}, tMTTR_{FLTR_i}, tRepair_{FLTR_i}\}$ seus respectivos conjuntos ordenados de lugares e transições, sua estrutura pode ser representada matricialmente como

Tabela 6.2 Entradas e saídas dos elementos do componente de falhas.

Elemento	Entradas	Saídas
$pFail_{FLT_i}$	-	-
pOk_{FLT_i}	-	-
$tAct_{FLT_i}$	-	-
$tMTBF_{FLT_i}$	-	-
$tMTTR_{FLT_i}$	insumos, energia	resíduos

**Figura 6.6** Componente SRN para representar falhas em atividades/ações com pré-condição de reparo.

$$H_{FLTR_i} = \begin{pmatrix} 0 & \dots \\ \vdots & \ddots \end{pmatrix} \quad C_{FLTR_i} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

tendo como invariantes de lugar e transição

$$I_{PFLTR_i} = (r_1, r_1, r_1) \quad I_{tFLTR_i} = (r_1, r_1, r_1)$$

Esse componente pode ser utilizado em conjunto ou no lugar do componente FLT , com o mesmo intuito de representar falhas. Porém, a transição $tRepair$, adicionada ao componente $FLTR$, permite a inclusão de uma pré-condição antes do início do reparo da falha. Isso é representado através da guarda da referida transição. Em ambos os modelos, as taxas das suas transições $tMTBF$ e $tMTTR$ pode ser dependente das marcações. Essa propriedade permite que se modele, por exemplo, o compartilhamento de equipes de manutenção ou mesmo um tempo de falha variável, dependendo da utilização do recurso suscetível a falhas. Já a guarda da transição $tRepair$ do componente $FLTR$ permite que o reparo de uma falha só ocorra caso haja recursos disponíveis para tal.

6.1.7 Manutenção de Recursos

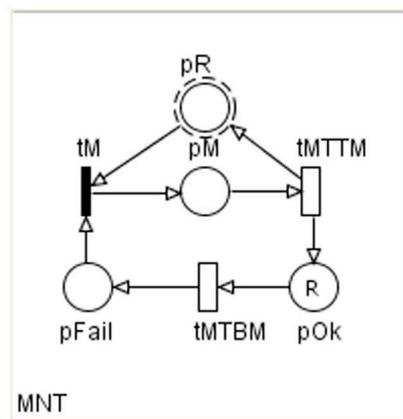


Figura 6.7 Componente SRN para representar manutenção de recursos.

O componente apresentado na Figura 6.7 é uma SRN definida como $MNT_i = (P_{MNT_i}, T_{MNT_i}, I_{MNT_i}, O_{MNT_i}, H_{MNT_i}, \Pi_{MNT_i}, G_{MNT_i}, M_{0MNT_i}, W_{MNT_i}, \mathcal{R}_{MNT_i})$, $i = 0, 1, \dots, j$. Sendo $P_{MNT_i} = \{pFail_{MNT_i}, pM_{MNT_i}, pOk_{MNT_i}, pR_{MNT_i}\}$ e $T_{MNT_i} = \{tM_{MNT_i}, tMTBM_{MNT_i}, tMTTM_{MNT_i}\}$ seus respectivos conjuntos ordenados de lugares e transições, sua estrutura pode ser representada matricialmente como

$$H_{MNT_i} = \begin{pmatrix} 0 & \dots \\ \vdots & \ddots \end{pmatrix} \quad C_{MNT_i} = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

tendo como invariantes de lugar e transição

$$I_{PMNT_i} = (r_2, r_1 + r_2, r_2, r_1) \quad I_{TMNT_i} = (r_1, r_1, r_1)$$

Esse componente está relacionado à manutenção preventiva de um recurso e deve ser utilizado em conjunto com o componente que representa recursos do sistema. A transição $tMTTM$ representa o tempo da manutenção, e a transição $tMTBM$, o tempo entre manutenções dos recursos. O parâmetro R desse componente deve ter um valor igual à marcação inicial do lugar que representa os recursos do sistema (vide Figura 6.8).

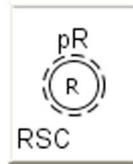
Entre as regras de composição desse módulo, faz-se necessário que a prioridade da transição tM seja maior que a de quaisquer transições de saída de pR , mesmo após a composição dos módulos. Logo, se $\pi[j]$ é a prioridade de tM , $\pi[j](\mu) > \pi[i](\mu), \forall t_i \in pR^\bullet \wedge \forall \mu \in RS$.

Tabela 6.3 Entradas e saídas dos elementos do componente de manutenção.

Elemento	Entradas	Saídas
$pFail_{MNT_i}$	-	-
pM_{MNT_i}	-	-
pOk_{MNT_i}	-	-
pR_{MNT_i}	-	-
tM_{MNT_i}	-	-
$tMTBM_{MNT_i}$	-	-
$tMTTM_{MNT_i}$	insumos, energia	resíduos

A Tabela 6.3 apresenta algumas das entradas e saídas relacionadas aos elementos desse componente. As observações apresentadas para as entradas e saídas do componente de falhas também são válidas para o modelo de manutenção.

6.1.8 Recursos

**Figura 6.8** Componente SRN para representar recursos.

O componente apresentado na Figura 6.8 é uma SRN definida como $RSC_i = (P_{RSC_i}, T_{RSC_i}, I_{RSC_i}, O_{RSC_i}, H_{RSC_i}, \Pi_{RSC_i}, G_{RSC_i}, M_{0RSC_i}, W_{RSC_i}, \mathcal{R}_{RSC_i})$, $i = 0, 1, \dots, j$. Sendo $P_{RSC_i} = \{pR_{RSC_i}\}$ e $T_{RSC_i} = \emptyset$ seus respectivos conjuntos ordenados de lugares e transições, sua estrutura pode ser representada matricialmente como

$$H_{RSC_i} = N/A \quad C_{RSC_i} = N/A$$

tendo como invariantes de lugar e transição

$$Ip_{RSC_i} = (r_1) \quad It_{RSC_i} = ()$$

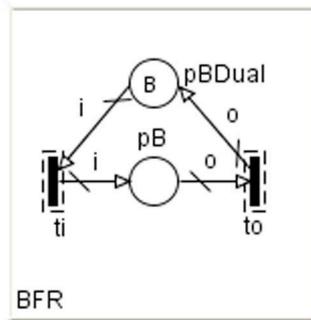
Esse componente representa os recursos do sistema e deve ser utilizado em conjunto com os componentes de fluxo e processos de manufatura. Seu parâmetro R indica a quantidade de recursos disponíveis.

Tabela 6.4 Entradas e saídas dos elementos do componente de recursos.

Elemento	Entradas	Saídas
pR_{RSC_i}	insumos, energia	resíduos

A Tabela 6.4 apresenta algumas das entradas e saídas relacionadas aos elementos desse componente. O consumo de energia e insumos referem-se ao seu estado de repouso do recurso. Por exemplo, uma máquina que está ligada e esperando para produzir um bem ainda possui um consumo de energia elétrica. Além disso, podem ser utilizados outros tipos de insumo apenas para manter a máquina no sistema (ex.: água). A geração de resíduos pode ocorrer exatamente devido à utilização desses insumos.

6.1.9 Buffers

**Figura 6.9** Componente SRN para representar *buffers*.

O componente apresentado na Figura 6.9 é uma SRN definida como $BFR_i = (P_{BFR_i}, T_{BFR_i}, I_{BFR_i}, O_{BFR_i}, H_{BFR_i}, \Pi_{BFR_i}, G_{BFR_i}, M_{0BFR_i}, W_{BFR_i}, \mathcal{R}_{BFR_i})$, $i = 0, 1, \dots, j$. Sendo $P_{BFR_i} = \{pB_{BFR_i}, pBDual_{BFR_i}\}$ e $T_{BFR_i} = \{ti_{BFR_i}, to_{BFR_i}\}$ seus respectivos conjuntos ordenados de lugares e transições, sua estrutura pode ser representada matricialmente como

$$H_{BFR_i} = \begin{pmatrix} 0 & \cdots \\ \vdots & \ddots \end{pmatrix} \quad C_{BFR_i} = \begin{pmatrix} i & -o \\ -i & o \end{pmatrix}$$

tendo como invariantes de lugar e transição

$$Ip_{BFR_i} = (r_1, r_1) \quad It_{BFR_i} = \left(\frac{or_1}{i}, r_1\right)$$

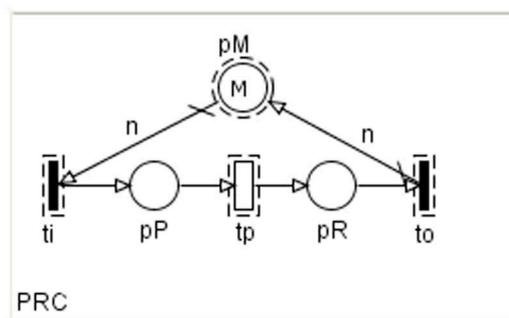
Tabela 6.5 Entradas e saídas dos elementos do componente de *buffers*.

Elemento	Entradas	Saídas
pB_{BFR_i}	insumos, energia	resíduos
$pBDual_{BFR_i}$	-	-
ti_{BFR_i}	-	-
to_{BFR_i}	-	-

Esse componente representa *buffers* de uma manufatura e deve ser utilizado em conjunto com o componente de processos de manufatura. Esses *buffers* podem ser, por exemplo, estoques de produto semiacabado. O parâmetro B representa a capacidade máxima do *buffer*. Seus parâmetros i e j indicam, respectivamente, a quantidade de recursos/produtos que são colocados e retirados.

A Tabela 6.5 apresenta algumas das entradas e saídas relacionadas aos elementos desse componente. O consumo de energia e insumos referem-se à utilização destes para a manutenção de bens no *buffer*. Caso este represente uma câmara frigorífica, por exemplo, além da energia elétrica ainda haverá o consumo de gás para refrigerar a instalação.

6.1.10 Processos de Manufatura

**Figura 6.10** Componente SRN para representar um processo de manufatura.

O componente apresentado na Figura 6.10 é uma SRN definida como $PRC_i = (P_{PRC_i}, T_{PRC_i}, I_{PRC_i}, O_{PRC_i}, H_{PRC_i}, \Pi_{PRC_i}, G_{PRC_i}, M_{0PRC_i}, W_{PRC_i}, \mathcal{R}_{PRC_i})$, $i = 0, 1, \dots, j$. Sendo $P_{PRC_i} = \{pM_{PRC_i}, pP_{PRC_i}, pR_{PRC_i}\}$ e $T_{PRC_i} = \{ti_{PRC_i}, to_{PRC_i}, tp_{PRC_i}\}$ seus respectivos conjuntos ordenados de lugares e transições, sua estrutura pode ser representada matricialmente como

$$H_{PRC_i} = \begin{pmatrix} 0 & \cdots \\ \vdots & \ddots \end{pmatrix} \quad C_{PRC_i} = \begin{pmatrix} -n & n & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

tendo como invariantes de lugar e transição

$$I_{PPRC_i} = (r_1, nr_1, nr_1) \quad It_{PRC_i} = (r_1, r_1, r_1)$$

Esse componente representa um processo de manufatura e deve ser utilizado em conjunto com outros componentes de processos de manufatura ou com componentes de *buffers*. Esses processos podem representar uma atividade, uma etapa ou uma linha de produção completa do sistema, por exemplo. Seu parâmetro n indica a quantidade de recursos necessários para se realizar a atividade.

A transição tp desse modelo deve adotar a semântica *infinite-server*. Com isso, dois processos paralelos podem ser representados através de um único componente PRC , desde que tenham como entrada e saída os mesmos elementos do sistema. Caso seja utilizado o componente de falha apresentado na Figura 6.5, a transição será desabilitada para ambos os processos. Se esse comportamento não for desejado, devem-se utilizar dois componentes PRC separados.

A Tabela 6.6 apresenta algumas das entradas e saídas relacionadas aos elementos desse componente. O consumo de energia e insumos referem-se à utilização destes para a produção de bens (tp_{PRC_i}). Energia elétrica, biomassa, gás natural e diesel, são exemplos de fontes energéticas bastante utilizadas em processos de manufatura. Dentre os insumos, podem ser considerados o trabalho humano e as matérias-primas utilizadas na produção do bem.

Os resíduos sólidos são bastante comuns nos processos de manufatura. Eles podem ser decorrentes de sobras das matérias-primas, embalagens ou perdas naturais de massa/água devido a processos como o cozimento e a secagem. O consumo de água também costuma ser bastante intensivo para alguns tipos de processo. Isso pode ser muito observado na indústria de alimentos e em metalúrgicas. Muitas vezes, a água utilizada não é reaproveitada, por isso ela também é considerada nas saídas desse componente.

6.1.11 Produtores

O componente apresentado na Figura 6.11 é uma SRN definida como $PRD_i = (P_{PRD_i}, T_{PRD_i}, I_{PRD_i}, O_{PRD_i}, H_{PRD_i}, \Pi_{PRD_i}, G_{PRD_i}, M_{OPRD_i}, W_{PRD_i}, \mathcal{R}_{PRD_i})$, $i = 0, 1, \dots, j$. Sendo $P_{PRD_i} = \{pp_{PRD_i}, ppDual_{PRD_i}, pst_{PRD_i}, pstDual_{PRD_i}\}$ e $T_{PRD_i} = \{td_{PRD_i}, tp_{PRD_i}\}$ seus respectivos conjuntos ordenados de lugares e transições, sua estrutura pode ser representada matricialmente como

Tabela 6.6 Entradas e saídas dos elementos do componente de processos.

Elemento	Entradas	Saídas
pM_{PRC_i}	-	-
pP_{PRC_i}	-	-
pR_{PRC_i}	-	-
ti_{PRC_i}	-	-
to_{PRC_i}	-	-
tp_{PRC_i}	insumos, água, energia	água, resíduos

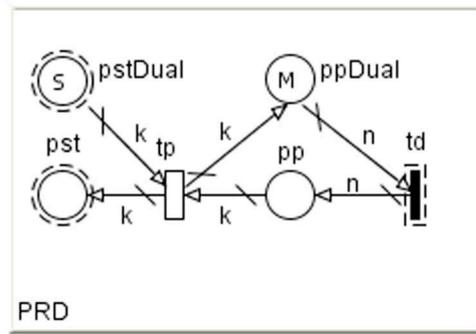


Figura 6.11 Componente SRN para representar produtores.

$$H_{PRD_i} = \begin{pmatrix} 0 & \dots \\ \vdots & \ddots \end{pmatrix} \quad C_{PRD_i} = \begin{pmatrix} n & -k \\ -n & k \\ 0 & k \\ 0 & -k \end{pmatrix}$$

tendo como invariantes de lugar e transição

$$I_{PPRD_i} = (r_2, r_2, r_1, r_1) \quad It_{PRD_i} = (0, 0)$$

Esse componente representa um produtor de uma cadeia de suprimentos. No contexto da logística de suprimentos, esses produtores são os fornecedores de matéria-prima, enquanto na logística de distribuição representam as fábricas. Esse módulo deve ser utilizado em conjunto com o componente de fluxo. O parâmetro S representa a capacidade máxima de estoque do produtor.

Ao parâmetro M deve ser atribuído um valor tal que $P\{\#ppDual = 0\} \cong 0$, ou seja, a marcação de $ppDual$ nunca deve chegar a zero. Isso se deve ao fato de o lugar $ppDual$ ter sido incluído no modelo com o intuito de torná-lo estruturalmente limitado. O parâmetro n indica

a quantidade de produtos solicitados quando é gerado um pedido de reposição de estoque. A esse parâmetro pode ser associada uma expressão dependente da marcação. Se, por exemplo, $n = 100 - \#pst - \#pp$, será incluída uma solicitação de reposição de estoque de forma a fazer com que este retorne ao nível de 100 *Stock Keep Units* (SKUs), considerando-se o *WIP*.

O componente para produtores possui características semelhantes aos componentes de *buffer* (pst_{PRD_i}) e de processos de manufatura (tp_{PRD_i}). Logo, as entradas e saídas listadas para estes componentes também são válidas para aquele.

6.1.12 Consumidores

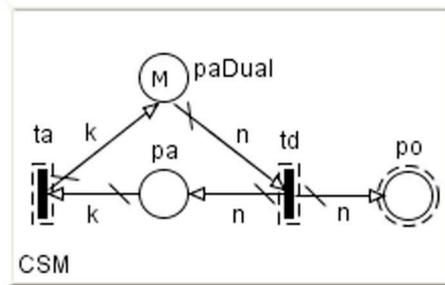


Figura 6.12 Componente SRN para representar consumidores.

O componente apresentado na Figura 6.12 é uma SRN definida como $CSM_i = (P_{CSM_i}, T_{CSM_i}, I_{CSM_i}, O_{CSM_i}, H_{CSM_i}, \Pi_{CSM_i}, G_{CSM_i}, M_{0CSM_i}, W_{CSM_i}, \mathcal{R}_{CSM_i})$, $i = 0, 1, \dots, j$. Sendo $P_{CSM_i} = \{pa_{CSM_i}, paDual_{CSM_i}, po_{CSM_i}\}$ e $T_{CSM_i} = \{ta_{CSM_i}, td_{CSM_i}\}$ seus respectivos conjuntos ordenados de lugares e transições, sua estrutura pode ser representada matricialmente como

$$H_{CSM_i} = \begin{pmatrix} 0 & \cdots \\ \vdots & \ddots \end{pmatrix} \quad C_{CSM_i} = \begin{pmatrix} -k & n \\ k & -n \\ 0 & n \end{pmatrix}$$

tendo como invariantes de lugar e transição

$$I_{P_{CSM_i}} = (r_1, r_1, 0) \quad I_{T_{CSM_i}} = (0, 0)$$

Esse componente representa um consumidor de uma cadeia de suprimentos. No contexto da logística de suprimentos, esses consumidores são as fábricas, enquanto na logística de distribuição representam as zonas. As zonas são agrupamentos dos clientes finais/varejistas que

levam em conta a sua localização geográfica e as características de consumo (Alvarenga e Novaes, 2000). Esse módulo deve ser utilizado em conjunto com o componente de fluxo, através da fusão de seus elementos homônimos *ta* e *po*.

Ao parâmetro *M* deve ser atribuído um valor tal que $P\{\#paDual = 0\} \cong 0$, ou seja, a marcação de *paDual* nunca deve chegar a zero. Isso se deve ao fato de o lugar *paDual* ter sido incluído no modelo com o intuito de torná-lo estruturalmente limitado. O parâmetro *k* deve ter o mesmo valor do parâmetro *c* (vide Figura 6.14) do componente de fluxo associado ao consumidor. O parâmetro *n* indica a quantidade de produtos solicitada a cada pedido. Esse componente não possui entradas nem saídas específicas. Estas são tratadas pelo componente de fluxo.

6.1.13 Intermediários

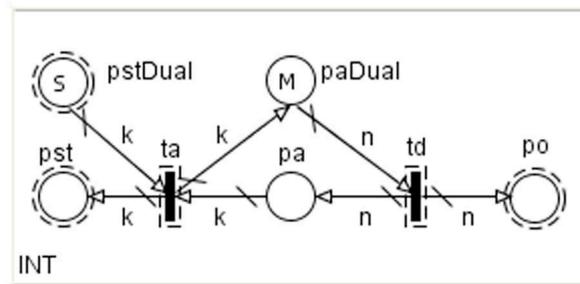


Figura 6.13 Componente SRN para representar intermediários.

O componente apresentado na Figura 6.13 é uma SRN definida como $INT_i = (P_{INT_i}, T_{INT_i}, I_{INT_i}, O_{INT_i}, H_{INT_i}, \Pi_{INT_i}, G_{INT_i}, M_{0INT_i}, W_{INT_i}, \mathcal{R}_{INT_i})$, $i = 0, 1, \dots, j$. Sendo $P_{INT_i} = \{pa_{INT_i}, paDual_{INT_i}, po_{INT_i}, pst_{INT_i}, pstDual_{INT_i}\}$ e $T_{INT_i} = \{ta_{INT_i}, td_{INT_i}\}$ seus respectivos conjuntos ordenados de lugares e transições, sua estrutura pode ser representada matricialmente como

$$H_{INT_i} = \begin{pmatrix} 0 & \cdots \\ \vdots & \ddots \end{pmatrix} \quad C_{INT_i} = \begin{pmatrix} -k & n \\ k & -n \\ 0 & n \\ k & 0 \\ -k & 0 \end{pmatrix}$$

tendo como invariantes de lugar e transição

$$Ip_{INT_i} = (r_3, r_1 - r_2 + r_3, r_1 - r_2, r_2, r_1) \quad It_{INT_i} = (0, 0)$$

Esse componente representa um intermediário de uma cadeia de suprimentos, tanto no contexto da logística de suprimentos quanto da logística de distribuição. Esse módulo deve ser utilizado em conjunto com o componente de fluxo.

Assim como ocorre com o componente dos consumidores, deve ser atribuído um valor de M tal que $P\{\#paDual = 0\} \cong 0$, ou seja, a marcação de $paDual$ nunca deve chegar a zero. De forma semelhante, o parâmetro k deve ter o mesmo valor do parâmetro c (vide Figura 6.14) do componente de fluxo associado ao intermediário. O parâmetro n indica a quantidade de produtos solicitada a cada pedido, de forma similar ao componente dos produtores. Esse parâmetro também pode ser dependente da marcação, visando representar políticas de estoque que se baseiam na quantidade de produtos armazenados (ex.: (s, S)).

O componente dos intermediários possui características semelhantes ao componente dos produtores e consumidores. Portanto, as observações referentes às entradas e saídas destes componentes também são válidas para aquele. O componente de fluxo também apresenta algumas entradas e saídas relativas ao mesmo.

6.1.14 Fluxo de Informação e Produtos

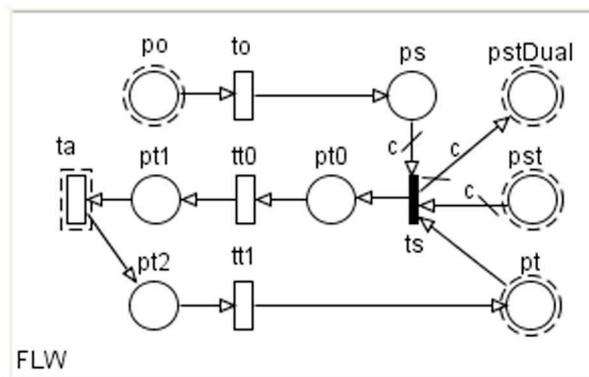


Figura 6.14 Componente SRN para representar fluxos de informação/pedido.

O componente apresentado na Figura 6.14 é uma SRN definida como $FLW_i = (P_{FLW_i}, T_{FLW_i}, I_{FLW_i}, O_{FLW_i}, H_{FLW_i}, \Pi_{FLW_i}, G_{FLW_i}, M_{0FLW_i}, W_{FLW_i}, \mathcal{R}_{FLW_i})$, $i = 0, 1, \dots, j$. Sendo $P_{FLW_i} = \{po_{FLW_i}, ps_{FLW_i}, pst_{FLW_i}, pstDual_{FLW_i}, pt_{FLW_i}, pt0_{FLW_i}, pt1_{FLW_i}, pt2_{FLW_i}\}$ e $T_{FLW_i} =$

$\{ta_{FLW_i}, to_{FLW_i}, ts_{FLW_i}, tt0_{FLW_i}, tt1_{FLW_i}\}$ seus respectivos conjuntos ordenados de lugares e transições, sua estrutura pode ser representada matricialmente como

$$H_{FLW_i} = \begin{pmatrix} 0 & \cdots \\ \vdots & \ddots \end{pmatrix} \quad C_{FLW_i} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

tendo como invariantes de lugar e transição

$$I_{PFLW_i} = (r_2, r_2, r_3, r_2 + r_3, r_1, r_1, r_1, r_1) \quad It_{FLW_i} = (0, 0, 0, 0, 0)$$

Esse componente representa um fluxo de informação/produtos de uma cadeia de suprimentos. O parâmetro c indica a quantidade de produtos por viagem enviados do produtor para o consumidor. Sua transição to representa o tempo médio entre a solicitação do cliente e o seu processamento por parte do produtor. Após esse processamento, o pedido aguardará que haja estoque no produtor ($\#pst > c$) e que o transportador esteja disponível ($\#pt > 0$). Além disso, a quantidade acumulada de produtos solicitados precisa ser maior que c ($\#ps > c$).

Uma vez que pode existir mais de uma carga sendo enviada para um mesmo cliente, as transições $tt0$, ta e $tt1$ utilizam a semântica *infinite-server*.

A Tabela 6.7 apresenta algumas das entradas e saídas relacionadas aos elementos desse componente. As entradas e saídas referentes aos lugares pst_{FLW_i} e pt_{FLW_i} devem ser contabilizadas pelo lugar que representa o estoque do produtor e pelo lugar do componente de recursos, respectivamente.

O consumo de energia e insumos associado à transição to_{FLW_i} referem-se principalmente à utilização de energia elétrica e de recursos humanos para o processamento do pedido do cliente. A geração de resíduos referentes a este processamento, geralmente pode ser desprezada devido à baixa quantidade de resíduos gerados.

O consumo de insumos e energia associado às transições $tt0_{FLW_i}$, ta_{FLW_i} e $tt1_{FLW_i}$ se refere à utilização de recursos humanos e combustível para o transporte de produtos. Os resíduos podem ser gerados com maior ou menor intensidade nessas atividades, a depender do modal de transporte utilizado. O modal aquaviário, por exemplo, costuma descartar parte do combustível

Tabela 6.7 Entradas e saídas dos elementos do componente de fluxos.

Elemento	Entradas	Saídas
po_{FLW_i}	-	-
ps_{FLW_i}	-	-
pst_{FLW_i}	-	-
$pstDual_{FLW_i}$	-	-
pt_{FLW_i}	-	-
$pt0_{FLW_i}$	-	-
$pt1_{FLW_i}$	-	-
$pt2_{FLW_i}$	-	-
ta_{FLW_i}	insumos, energia	resíduos, CO_2
to_{FLW_i}	insumos, energia	-
ts_{FLW_i}	-	-
$tt0_{FLW_i}$	insumos, energia	resíduos, CO_2
$tt1_{FLW_i}$	insumos, energia	resíduos, CO_2

que consome diretamente nos rios e mares. Além disso, também é comum haver resíduos no desembarque de mercadorias no cliente. O uso de combustíveis derivados de petróleo, que atualmente são os mais utilizados no transporte de cargas, também é responsável pela emissão direta de uma quantidade considerável de CO_2 no meio ambiente.

6.1.15 Componentes para Demanda Empurrada

Os componentes apresentados nas seções anteriores se baseiam em sistemas de produção *puxados*, nos quais o fluxo de materiais ocorre de acordo com a demanda dos consumidores. Porém, alguns sistemas de produção baseiam-se na demanda *empurrada*. A logística reversa, por exemplo, geralmente utiliza este tipo de estratégia. Nesses sistemas, uma vez produzidos, os bens são enviados aos consumidores. A Figura 6.15 apresenta os modelos para intermediários e para o fluxo de materiais em sistemas puxados. No caso da demanda empurrada, não se faz necessário modelar explicitamente os consumidores. A chegada dos produtos aos consumidores é representada pela transição ta do modelo de fluxo (FLW).

No caso da logística reversa, os resíduos provenientes da cadeia de suprimentos direta são enviados para um agente responsável pelo seu processamento de forma empurrada. Neste tipo

de logística, o consumidor da cadeia de suprimentos direta é o produtor de resíduos, enquanto os agentes responsáveis pelo processamento dos resíduos (ex.: reciclagem, compostagem e aterro) são os consumidores do sistema. Para maiores detalhes dos componentes que representam cada integrante da cadeia de suprimentos direta ou reversa, pode-se observar a Tabela 6.1.

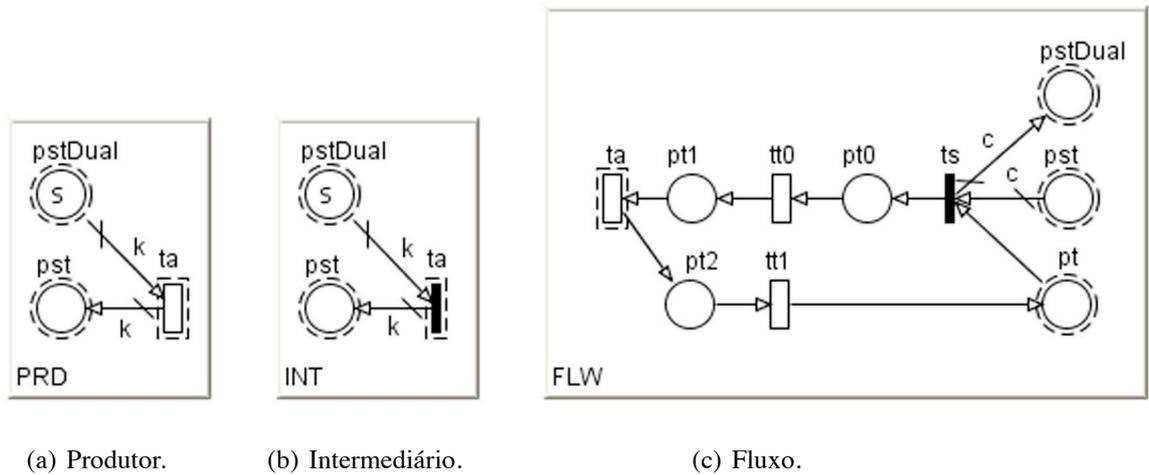


Figura 6.15 Componentes SRN para demanda empurrada.

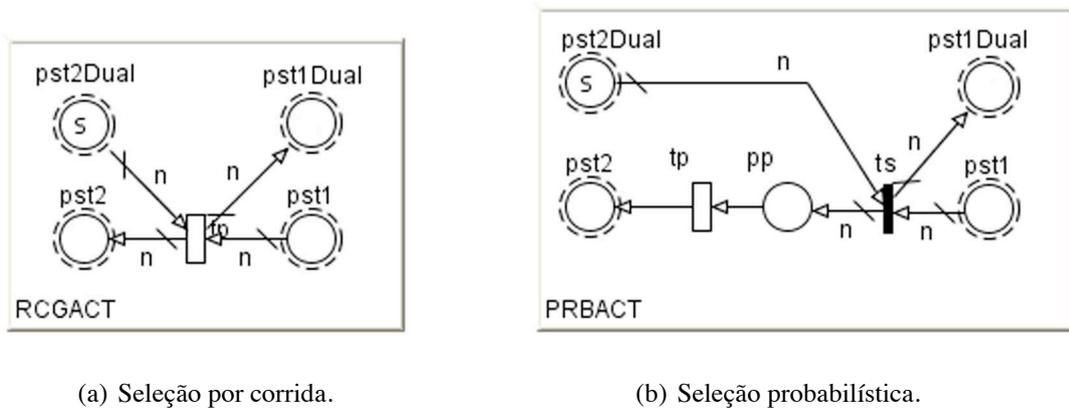


Figura 6.16 Componentes SRN para ações extras nos intermediários da cadeia de suprimentos.

Para os modelos de sistemas empurrados, a transição ts do modelo de fluxo possui um papel ainda mais importante que naqueles para sistemas puxados. Nesse contexto, o peso dessa transição determina a probabilidade com a qual os produtos são enviados para os consumidores de um determinado produtor. Além disso, as quantidades de produtos enviados por fluxo, representadas pelo peso c dos arcos do componente FLW , precisam ser iguais. Caso sejam diferentes, os produtos serão enviados sempre pelo fluxo com o menor c , salvo com a utilização

de funções de guarda. Nesse caso, deve-se definir uma função de guarda $\#pst > c_i$, onde c_i é o maior valor de c para os fluxos que são compartilhados entre um mesmo produtor (ou intermediário).

A Figura 6.16 apresenta os componentes SRN para ações executadas nos intermediários da SC após o recebimento dos produtos. Esses componentes podem ser acoplados de forma sequencial ou paralela. No caso de serem conectados paralelamente, pode-se utilizar o modelo apresentado na Figura 6.16(b) para determinar a probabilidade com que cada atividade será executada após o recebimento do produto no intermediário. Assim, a probabilidade de o produto seguir por cada um desses fluxos será representada pelo atributo $\Pi[i]$ da transição ts . No caso de uma seleção por corrida, na qual o produto segue o fluxo mais rápido, deve-se utilizar o componente da Figura 6.16(a).

Esses componentes podem ser utilizados para representar os fluxos alternativos dos produtos recuperados na cadeia de suprimentos reversa. Por exemplo, caso haja três fluxos possíveis (reciclagem, compostagem e aterro), deve haver três componentes *PRBACT* (ou *RCGACT*) em paralelo, cada um conectado de modo sequencial a um componente de fluxo.

6.2 Métricas

A Tabela 6.8 apresenta algumas das métricas de desempenho operacional, obtidas a partir dos componentes apresentados nesta seção. A coluna *Componente* refere-se ao modelo a partir do qual a métrica pode ser extraída. As expressões apresentadas na coluna *Reward* são baseadas na sintaxe do SPNP (Hirel et al., 2000).

Como as métricas ambientais são derivadas das métricas operacionais, a sua definição não será abordada especificamente nesta seção. Os estudos de caso apresentados no Capítulo 7 mostram como as métricas ambientais podem ser aferidas.

Por exemplo, caso um sistema consuma $2kWh$ de eletricidade para cada unidade de produto armazenado em um local representado pelo componente *BFR_1*, o *reward* que representa este consumo é dado por $2 * \#pB_BFR_1$.

Tabela 6.8 Algumas métricas calculadas a partir dos modelos propostos.

Componente	Indicador	Reward
PRD, INT	Estoque esperado	$\#pst$
PRD, INT	Prob. estoque vazio	$\#pst = 0?1 : 0$
PRD, INT	Prob. estoque cheio	$\#pstDual = 0?1 : 0$
PRD, INT	Qtd. de veículos do tipo pt disponíveis	$\#pt$
PRD, INT	Prob. de haver mais de V veículos do tipo pt disponíveis	$\#pt > V?1 : 0$
PRD, INT	Prob. de todos os veículos do tipo pt estarem em uso	$\#pt = 0?1 : 0$
CSM, INT	Pedidos pendentes	$\#pa$
CSM, INT	Throughput de entrega dos produtos	$\lambda(ta)$
CSM, INT	Tempo de ciclo para um consumidor	$\#pa/\lambda(ta)$
FLW	Quantidade de pedidos não processados	$\#po$
FLW	Quantidade de <i>backorders</i>	$\#ps$
FLW	Prob. de haver mais de n <i>backorders</i>	$\#ps > n?1 : 0$
FLW	Nível de serviço para o cliente	$1 - (\#ps > 0?1 : 0)$
FLW	Nº de veículos em trânsito	$\#pt1$
FLW	Estoque em trânsito	$c \times (\#pt0 + \#pt1)$
BFR	Quantidade de recursos no <i>buffer</i>	$\#pB$
BFR	Prob. <i>buffer</i> cheio (utilização)	$\#pBDual = 0?1 : 0$
PRC	Nº de máquinas em uso	$\#pP$
PRC	Nº de máquinas disponíveis	$\#pM$
PRC	Nº de máquinas sendo liberadas	$\#pR$
PRC	Prob. de haver mais de x máquinas em uso	$\#pP > x?1 : 0$
FLT	Nº de recursos operacionais	$\#pOk$
FLT	Nº de recursos aguardando reparo	$\#pFault$
FLT	Nº de recursos sendo reparados	$\#pRepair$
FLT	Prob. de haver recursos aguardando reparo	$\#pFault > 0?1 : 0$
FLT	Prob. de recursos operacionais menor que x	$\#pOk < x?1 : 0$

6.3 Álgebra Composicional

Esta seção apresenta uma álgebra utilizada para a composição de modelos SRN, proposta inicialmente em Alves (2007). Ela foi adaptada para se adequar à definição de SRNs apresentada no Capítulo 4. Essa adaptação foi realizada visando a um melhor entendimento do modelo formal, bem como à simplificação das provas de suas propriedades.

Ao longo desta seção, busca-se definir formalmente a fusão de lugares e transições para a composição de modelos SRN. As definições aqui apresentadas, utilizadas pela ferramenta criada, servem para a composição dos modelos básicos propostos. A Definição 6.1 apresenta o

conjunto de todas as SRNs. Ele serve de suporte para as definições posteriores. A função que retorna o índice de um lugar (ou transição) no conjunto ordenado de lugares (ou transições) de uma SRN é apresentada na Definição 6.2. Essa função também será utilizada em definições posteriores.

Definição 6.1 (Conjunto das SRNs). Seja $SRNSet = \{N_i | i \in \mathbb{N}^*\}$, onde $N_i = (P_{N_i}, T_{N_i}, I_{N_i}, O_{N_i}, H_{N_i}, \Pi_{N_i}, G_{N_i}, M_{0N_i}, W_{N_i}, \mathcal{R}_{N_i})$, $i = 0, 1, \dots, j$ é uma SRN. $SRNSet$ é o conjunto de todas as SRNs possíveis.

Definição 6.2 (Índice de Elemento). Seja $N' \in SRNSet$ uma SRN, onde $N' = (P_{N'}, T_{N'}, I_{N'}, O_{N'}, H_{N'}, \Pi_{N'}, G_{N'}, M_{0N'}, W_{N'}, \mathcal{R}_{N'})$. A função injetora total idx retorna a posição de um elemento x em $P_{N'}$ ou $T_{N'}$, onde

$$idx: \bigcup_{N \in SRNSet} \{P_N \cup T_N\} \times SRNSet \rightarrow \mathbb{N}$$

tal que $idx(x, N') = -1$, se $x \notin (P_{N'} \cup T_{N'})$; e $idx(x, N') \geq 0$ caso contrário.

A álgebra composicional baseia-se na fusão de lugares e transições de mesmo nome de duas SRNs. Assim, a função de renomeação dos nós de uma SRN é apresentada na Definição 6.3.

Definição 6.3 (Renomeação dos Nós de uma SRN). Seja $N' \in SRNSet$ uma SRN, onde $N' = (P_{N'}, T_{N'}, I_{N'}, O_{N'}, H_{N'}, \Pi_{N'}, G_{N'}, M_{0N'}, W_{N'}, \mathcal{R}_{N'})$. A função injetora total ρ que renomeia os lugares e transições de N' é definida como:

$$\rho: (P_{N'} \cup T_{N'}) \rightarrow \bigcup_{N \in SRNSet} \{P_N \cup T_N\}$$

Após a renomeação dos nós de N' , obtém-se uma nova SRN $N'' \in SRNSet$ isomórfica a N' , definida como $N'' = (P_{N''}, T_{N''}, I_{N''}, O_{N''}, H_{N''}, \Pi_{N''}, G_{N''}, M_{0N''}, W_{N''}, \mathcal{R}_{N''})$. Sejam $m = idx(p', N')$ e $n = idx(t', N')$, então a renomeação dos nós é realizada utilizando-se a notação $N'' = N' / \rho$, sendo

- $P_{N''} = \{\rho(p') | \forall p' \in P_{N'}\}$;
- $T_{N''} = \{\rho(t') | \forall t' \in T_{N'}\}$;
- $I_{N''}[m, n] = I_{N'}[m, n]$, $O_{N''}[m, n] = O_{N'}[m, n]$ e $H_{N''}[m, n] = H_{N'}[m, n]$;
- $\Pi_{N''}[n] = \Pi_{N'}[n]$, $G_{N''}[n] = G_{N'}[n]$ e $W_{N''}[n] = W_{N'}[n]$;

- $M_{0N''}[m] = M_{0N'}[m]$;
- $\mathcal{R}_{N''} = \{\not{t} \mid \forall t \in \mathcal{R}_{N'}\}$.

Sejam N' uma SRN e ρ uma função definida como $\rho(e) = e, \forall e \in (P' \cup T')$. A nova SRN N'' obtida por $N'' = N'/\rho$ será a própria SRN N' , uma vez que não é realizada nenhuma renomeação. A Figura 6.17 denota um exemplo da aplicação dessa função. A transição $t2$ de N_1 (Figura 6.17(a)) é renomeada para $t1$, gerando uma nova SRN N_2 (Figura 6.17(b)). N_2 é obtida a partir da equação $N_2 = N_1/\rho$, sendo $\rho(e) = \begin{cases} t1, & \text{se } e = t2; \\ e, & \text{caso contrário.} \end{cases}$



Figura 6.17 Renomeando a transição $t2$ para $t1$.

O *operador de união* apresentado na Definição 6.4 tem o objetivo de efetuar a composição de duas SRNs através da fusão de seus nós homônimos. A sintaxe da Definição 6.3 e da Definição 6.4 é baseada em van Hee et al. (2005).

Definição 6.4 (União de SRNs). Sejam $N', N'' \in SRNSet$ duas SRNs, tal que $N' = (P_{N'}, T_{N'}, I_{N'}, O_{N'}, H_{N'}, \Pi_{N'}, G_{N'}, M_{0N'}, W_{N'}, \mathcal{R}_{N'})$ e $N'' = (P_{N''}, T_{N''}, I_{N''}, O_{N''}, H_{N''}, \Pi_{N''}, G_{N''}, M_{0N''}, W_{N''}, \mathcal{R}_{N''})$.

$\sqcup : SRNSet \times SRNSet \rightarrow SRNSet$ é um operador interno que retorna um único elemento de $SRNSet$ para cada par pertencente a $SRNSet$. Seja $N''' \in SRNSet$ uma SRN definida como $N''' = (P_{N'''}, T_{N'''}, I_{N'''}, O_{N'''}, H_{N'''}, \Pi_{N'''}, G_{N'''}, M_{0N'''}, W_{N'''}, \mathcal{R}_{N'''})$, onde $N''' = N' \sqcup N''$, $m' = idx(p', N')$, $n' = idx(t', N')$, $m'' = idx(p'', N'')$, $n'' = idx(t'', N'')$, $m''' = idx(p''', N''')$ e $n''' = idx(t''', N''')$, então

- $P_{N'''} = P_{N'} \cup P_{N''}$;
- $T_{N'''} = T_{N'} \cup T_{N''}$;

- $I_{N'''}[m''', n'''] = \begin{cases} I_{N'}[m', n'], & \text{se } m'' = -1 \vee n'' = -1; \\ I_{N''}[m'', n''], & \text{se } m' = -1 \vee n' = -1; \\ I_{N'}[m', n'] + I_{N''}[m'', n''], & \text{caso contrário.} \end{cases}$
- $O_{N'''}[m''', n'''] = \begin{cases} O_{N'}[m', n'], & \text{se } m'' = -1 \vee n'' = -1; \\ O_{N''}[m'', n''], & \text{se } m' = -1 \vee n' = -1; \\ O_{N'}[m', n'] + O_{N''}[m'', n''], & \text{caso contrário.} \end{cases}$
- $H_{N'''}[m''', n'''] = \begin{cases} H_{N'}[m', n'], & \text{se } m'' = -1 \vee n'' = -1; \\ H_{N''}[m'', n''], & \text{se } m' = -1 \vee n' = -1; \\ H_{N'}[m', n'] + H_{N''}[m'', n''], & \text{caso contrário.} \end{cases}$
- $\Pi_{N'''}[n'''] = \begin{cases} \Pi_{N'}[n'], & \text{se } n'' = -1; \\ \Pi_{N''}[n''], & \text{se } n' = -1; \\ \max(\Pi_{N'}[n'], \Pi_{N''}[n'']), & \text{caso contrário.} \end{cases}$
- $G_{N'''}[n'''] = \begin{cases} G_{N'}[n'], & \text{se } n'' = -1; \\ G_{N''}[n''], & \text{se } n' = -1; \\ G_{N'}[n'] \text{ AND } G_{N''}[n''], & \text{caso contrário.} \end{cases}$
- $M_{0N'''}[m'''] = \begin{cases} M_{0N'}[m'], & \text{se } m'' = -1; \\ M_{0N''}[m''], & \text{se } m' = -1; \\ M_{0N'}[m'] + M_{0N''}[m''], & \text{caso contrário.} \end{cases}$
- $W_{N'''}[m'''] = \begin{cases} W_{N'}[n'], & \text{se } n'' = -1; \\ W_{N''}[n''], & \text{se } n' = -1; \\ \max(W_{N'}[n'], W_{N''}[n'']), & \text{caso contrário.} \end{cases}$
- $\mathcal{R}_{N'''} = \mathcal{R}_{N'} \cup \mathcal{R}_{N''}$.

Sejam N_3 e N_4 duas SRNs representadas na Figura 6.18(a) e na Figura 6.18(b), respectivamente. N_4 pode ser obtida pela união de N_2 (Figura 6.17(a)) e N_3 , ou seja, $N_4 = N_2 \sqcup N_3$.

A união de duas SRNs não garante que a SRN resultante possua propriedades importantes como limitação e *liveness* (Marsan et al., 1995; Maciel et al., 1996). Ademais, este modelos

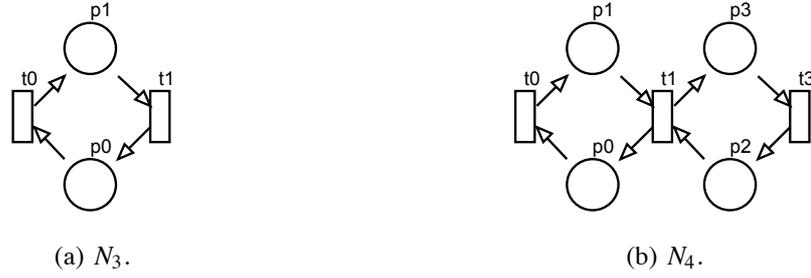


Figura 6.18 União de N_2 (Figura 6.17(b)) e N_3 .

resultantes ainda podem passar a apresentar características indesejadas como *confusão* (Maciel et al., 1996), que não existiam nos componentes separadamente. Os modelos apresentados nesta tese, em conjunto com algumas restrições na composição, visam garantir que a SRN resultante possua propriedades importantes, como as citadas.

Axioma 6.1. *Seja X uma operação definida para um domínio D . $\langle D, X \rangle$ é um monoide comutativo se e somente se esta operação for associativa e comutativa e possuir um elemento neutro $\varepsilon \in D$.*

Teorema 6.1. *Se $N' \sqcup N'' = N'' \sqcup N'$, $\forall N', N'' \in SRNSet$, então o operador \sqcup é comutativo.*

Demonstração. A comutatividade do operador de união de SRNs é garantida, uma vez que todos os operadores (\cup , $max()$, $+$, AND) utilizados para obter os elementos P , T , I , O , H , Π , G , M_0 , W , \mathcal{R} da nova SRN são comutativos. \square

Teorema 6.2. *Se $(N' \sqcup N'') \sqcup N''' = N' \sqcup (N'' \sqcup N''')$, $\forall N', N'', N''' \in SRNSet$, então o operador \sqcup é associativo.*

Demonstração. A associatividade do operador de união de SRNs é garantida, uma vez que todos os operadores (\cup , $max()$, $+$, AND) utilizados para obter os elementos P , T , I , O , H , Π , G , M_0 , W , \mathcal{R} da nova SRN são associativos. \square

Teorema 6.3. *Seja $N_e \in SRNSet$ uma SRN tal que $N_e = (P_{N_e}, T_{N_e}, I_{N_e}, O_{N_e}, H_{N_e}, \Pi_{N_e}, G_{N_e}, M_{0N_e}, W_{N_e}, \mathcal{R}_{N_e})$ e $P_e = T_e = \emptyset$. Se $N' = N' \sqcup N_e$, $\forall N' \in SRNSet$, então N_e é o elemento neutro do operador \sqcup .*

Demonstração. Seja $N' \in SRNSet$ uma SRN tal que $N' = (P_{N'}, T_{N'}, I_{N'}, O_{N'}, H_{N'}, \Pi_{N'}, G_{N'}, M_{0N'}, W_{N'}, \mathcal{R}_{N'})$ e N_e sendo o elemento neutro. Se $N'' \in SRNSet$ é uma SRN $N'' = (P_{N''}, T_{N''}, I_{N''}, O_{N''}, H_{N''}, \Pi_{N''}, G_{N''}, M_{0N''}, W_{N''}, \mathcal{R}_{N''})$ resultante da união de N' com N_e , ou seja, $N'' = N' \sqcup N_e$, então N_e é o elemento neutro do operador \sqcup , uma vez que $N'' = N'$, tendo-se:

- $P_{N''} = P_{N'} \cup \emptyset = P_{N'}$;
- $T_{N''} = T_{N'} \cup \emptyset = T_{N'}$;
- $I_{N''}[m, n] = I_{N'}[m, n]$, $O_{N''}[m, n] = O_{N'}[m, n]$ e $H_{N''}[m, n] = H_{N'}[m, n]$, para todo $0 \leq m < |P_{N''}|$ e $0 \leq n < |T_{N''}|$;
- $\Pi_{N''}[n] = \Pi_{N'}[n]$, $G_{N''}[n] = G_{N'}[n]$ e $W_{N''}[n] = W_{N'}[n]$, para todo $0 \leq n < |T_{N''}|$;
- $M_{0N''}[m] = M_{0N'}[m]$, para todo $0 \leq m < |P_{N''}|$;
- $\mathcal{R}_{N''} = \mathcal{R}_{N'} \cup \emptyset = \mathcal{R}_{N'}$. □

6.4 Composição dos Modelos

Os modelos básicos apresentados na Seção 6.1, são compostos através de suas interfaces. Estas interfaces estão destacadas com linhas tracejadas nas figuras que apresentam os modelos e a composição se dá pela fusão dos lugares e transições homônimos dos componentes. Por exemplo, ao compor o modelo de um intermediário com o modelo de fluxo, dentre os lugares que sofre fusão, estão os lugares homônimos pst_INT e pst_FLW . Para esta tese, os modelos resultantes devem possuir um conjunto de propriedades que permitam que estes sejam analisados via análise estacionária, além da análise transiente. Nesta seção será mostrado que os modelos resultantes têm suas propriedades garantidas.

Os invariantes de lugar de uma rede de Petri (PN) (L-invariantes) denotam os componentes conservativos do modelo (Maciel et al., 1996). Se todos os lugares do modelo são cobertos por um invariante positivo, a rede é dita *conservativa e estruturalmente limitada* (Murata, 1989). Ou seja, a soma ponderada das marcações é constante para qualquer seqüência de disparos das transições. Os invariantes de transição de uma PN (T-invariantes) denotam seus componentes repetitivos. Se todas as transições do modelo são cobertas por um invariante positivo, a PN será *repetitiva e consistente*.

A seguir, serão aplicadas as técnicas de redução apresentadas na Figura 4.7, com o objetivo de reduzir modelos resultantes das composições dos modelos básicos compostos. Sendo o modelo final obtido através da redução e/ou refinamento, não afetando as propriedades do modelo original. Logo, caso o modelo reduzido seja coberto por T- e L-invariantes, o modelo original também será. Para que um modelo criado com os componentes propostos seja válido, o

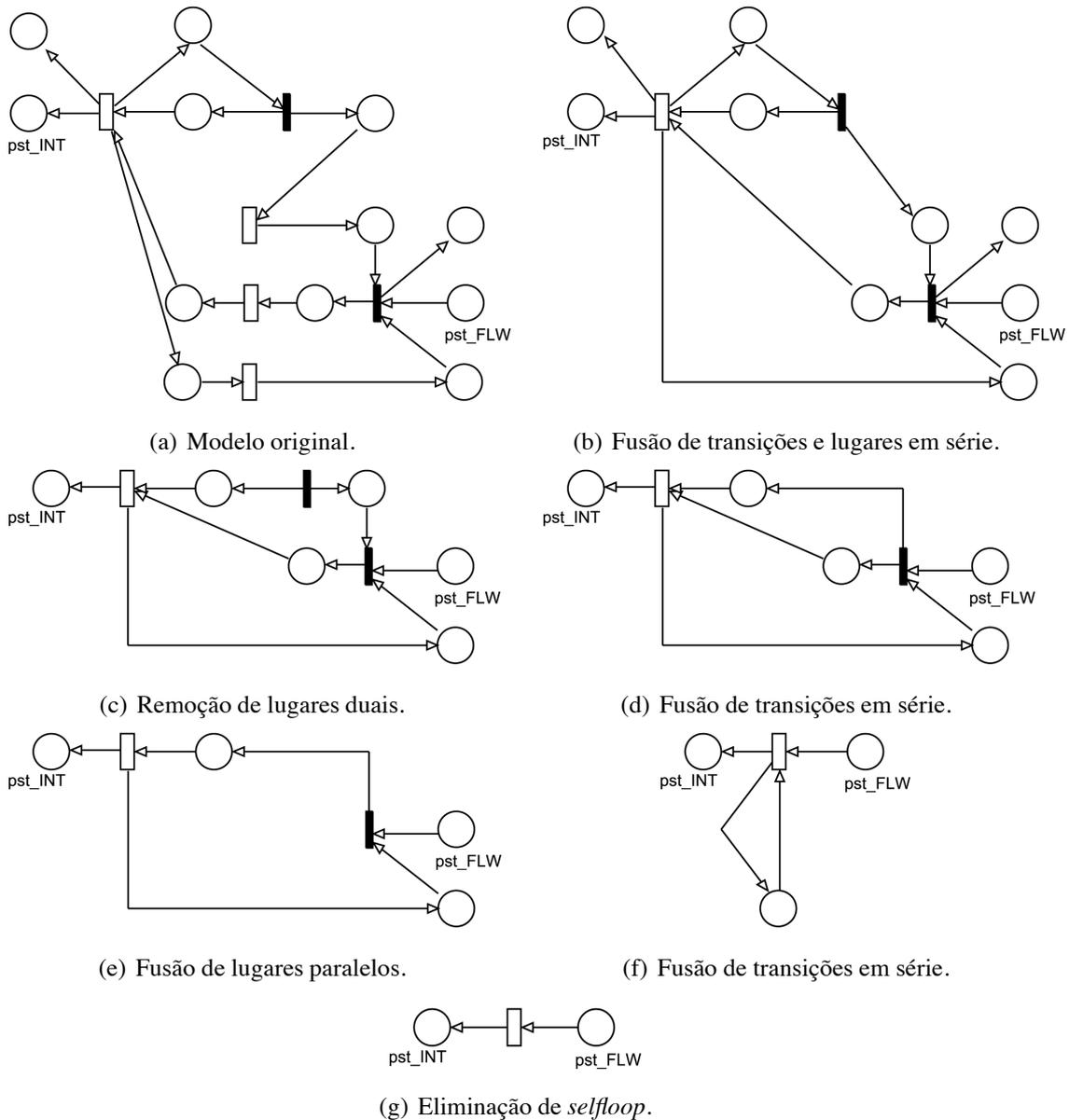


Figura 6.19 Passo a passo da redução do modelo resultante da composição $INT \sqcap FLW / \rho$.

modelo do intermediário (Seção 6.1.13) sempre precisa ser precedido por um modelo de fluxo (Seção 6.1.14). A Figura 6.19 mostra o resultado desta composição, bem como a redução do modelo resultante. A figura mostra passo a passo, como as técnicas de redução foram aplicadas, onde a Figura 6.19(g) mostra o modelo resultante das sucessivas reduções da composição $INT \sqcap FLW / \rho$. Dentre os passos mostrados, requer uma atenção especial a remoção de lugares duais. Este passo pode impactar na propriedade de limitação do sistema. Seja uma rede com dois lugares duais p e $pDual$, se o lugar p é coberto por um invariante de lugar graças ao seu

lugar dual, este invariante deixará de existir com a remoção do lugar dual. Portanto, caso ao fim do processo de refinamento permaneça algum lugar que se enquadre no cenário apresentado, o modelo ainda poderá ser considerado estruturalmente limitado, mesmo que este lugar não seja coberto por invariante de lugar.

Para que um modelo criado com os componentes propostos seja válido, o modelo do consumidor (Seção 6.1.12) sempre precisa ser precedido por um modelo de fluxo (Seção 6.1.14), assim como ocorre para o modelo do intermediário. Comparando o modelo proposto para os consumidores (Seção 6.1.12) com o modelo dos intermediários (Seção 6.1.13), nota-se que a única diferença estrutural é que o modelo dos consumidores não possui o lugar pst e seu dual. Logo, por inferência direta, o modelo reduzido resultante das sucessivas reduções da composição $CSM \sqcup FLW \rho$ será semelhante ao modelo reduzido da composição $INT \sqcup FLW / \rho$, removendo-se o lugar pst . Este modelo é apresentado na Figura 6.20.

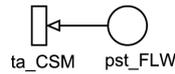


Figura 6.20 Redução do modelo resultante da composição $CSM \sqcup FLW / \rho$.

Seja um intermediário INT_1 que receba seus produtos através de um fluxo FLW_1 e distribua seu estoque para dois consumidores CSM_1 e CSM_2 através dos respectivos fluxos FLW_2 e FLW_3 . Esta composição pode ser representada pela expressão: $(A \sqcup B \sqcup C) / \rho_4$, onde $A = INT_1 \sqcup FLW_1 / \rho_1$, $B = CSM_1 \sqcup FLW_2 / \rho_2$ e $C = CSM_2 \sqcup FLW_3 / \rho_3$. A expressão A representa o modelo da Figura 6.19(g), enquanto B e C representam o modelo da Figura 6.20. A função de renomeação ρ_4 tem o objetivo de realizar a fusão dos lugares homônimos (pst) dos modelos A , B e C . Assim, será obtido o modelo apresentado na Figura 6.21(a), cuja redução resulta no modelo da Figura 6.21(c), que é similar ao modelo da Figura 6.20. Logo, conclui-se que a composição de um ou mais modelos de consumidores com o modelo de intermediários, já composto com o seu fluxo de entrada de produtos, pode ser reduzido a um modelo de um consumidor composto com o modelo de fluxo. Assim, provando que este modelo é *live* e limitado, o outro também o será.

O modelo dos produtores (Seção 6.1.11) também pode ser reduzido conforme mostra a Figura 6.22. Este modelo pode distribuir seus produtos para intermediários ou para consumidores. Como foi mostrado anteriormente que provando as propriedades para o modelo do consumidor, as propriedades do modelo do intermediário também serão garantidas, será tratada a composição entre o produtor e o consumidor.

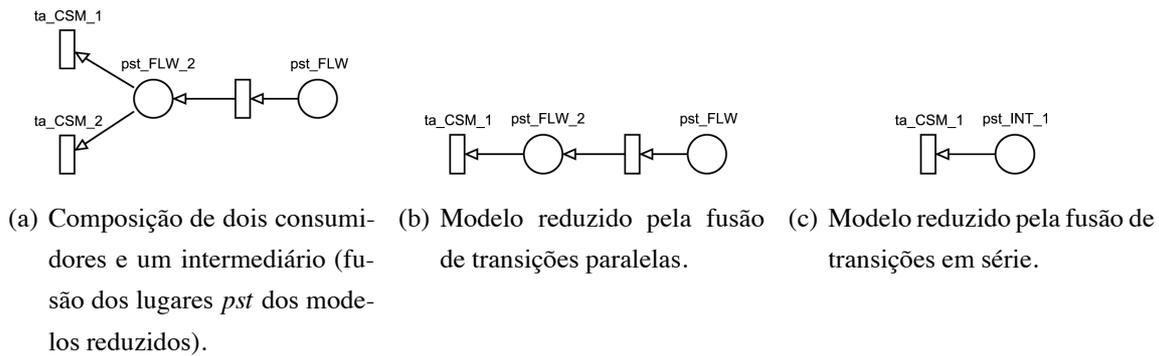


Figura 6.21 Redução do modelo resultante da composição de dois consumidores com um intermediário e sua redução.

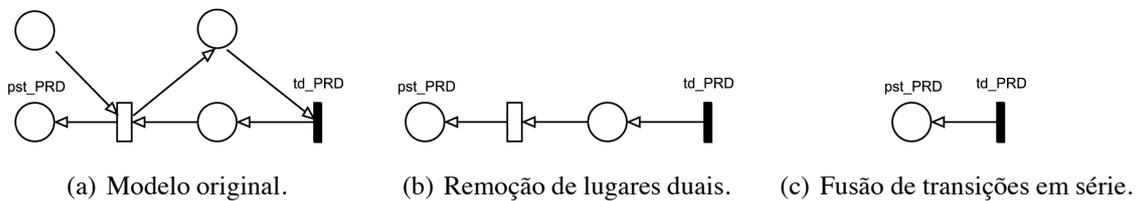


Figura 6.22 Redução do modelo PRD .

Realizando a composição entre os modelos do produto PRD_1 e um consumidor CSM_1 através de um fluxo FLW_1 obtém-se o modelo apresentado na Figura 6.23(a). Este modelo pode ser reduzido a uma única transição conforme a Figura 6.23(b). Uma rede de Petri (PN) com uma única transição é coberta por invariantes de transição. E como não possui lugares, pode ser considerada estruturalmente limitada. Assim, todos os modelos resultantes da composição entre os modelos de consumidores (Seção 6.1.12), intermediários (Seção 6.1.13), produtores (Seção 6.1.11) e de fluxo (Seção 6.1.14) podem ser reduzidos a uma PN com uma única transição, sendo conseqüentemente estruturalmente limitado e *live*. Sendo assim, estes modelos podem ser analisados através de sua cadeia de Markov, utilizando uma análise estacionária.

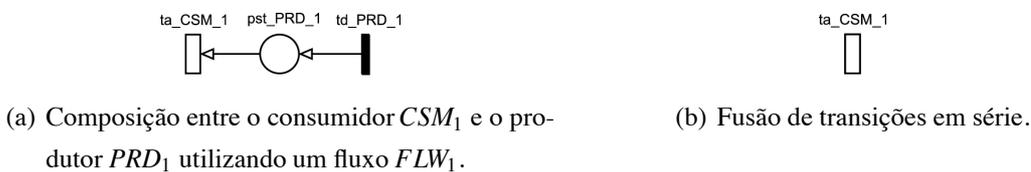


Figura 6.23 Composição entre consumidores e produtores.

Nesta tese, omitimos a prova das propriedades da composição dos modelos de buffers e de processos, uma vez que a estrutura destes modelos foi proposta por Desrochers (Desrochers e Al-Jaar, 1994), e todas as provas das propriedades destes modelos foram apresentadas pelo

autor. Vale salientar que os modelos apresentados neste capítulo podem ser utilizados como base para a modelagem de sistemas, porém caso sua estrutura seja alterada, ou as restrições apresentadas ao longo do texto não sejam respeitadas (ex.: valores das marcações iniciais), pode haver impacto sobre suas propriedades estruturais. Neste caso, faz-se necessário realizar uma verificação do modelo final. Para isto, deve-se obter as suas propriedades estruturais checando se este se manteve estruturalmente limitado e *live* antes de utilizá-lo para uma avaliação de desempenho.

6.5 Ferramental

Esta seção apresenta algumas das ferramentas criadas e/ou utilizadas para suportar a ADA com SPNs nesta tese. Dentre elas, a ferramenta *ModSPN* (*Modular SPN*) visa à definição e à modelagem de SPNs com base em módulos que podem ser definidos pelo usuário e importados para outros modelos, como bibliotecas. Com isso, busca-se proporcionar a reusabilidade dos módulos criados, facilitando o processo de modelagem.

Essa ferramenta foi criada sobre a plataforma Eclipse (Gamma e Beck, 2003), que é completamente baseada em *plugins* que conferem a ela (bem como a outros *plugins*) novas funcionalidades. Dessa forma, novas funções podem ser acopladas às ferramentas utilizando-se da infraestrutura bem consolidada do Eclipse. O *Graphical Modeling Framework* (GMF) é um *framework* que provê funcionalidades para o desenvolvimento de editores gráficos no Eclipse e foi utilizado para a criação da ferramenta *ModSPN*. A Figura 6.24 apresenta um *snapshot* da *ModSPN*. O Apêndice A apresenta um breve manual com as funcionalidades desta ferramenta.

Além das ferramentas implementadas, outra ferramenta bastante utilizada para auxiliar o cálculo das métricas e propriedades foi o Sage (Sage Group, 2009). Ele é similar a outras ferramentas como o MatLAB (Hanselman e Littlefield, 1997) e o Scilab (Gomez et al., 1998). A escolha dele deveu-se principalmente à:

- capacidade de expressão e resolução de problemas matemáticos, de modo semelhante ao MatLAB, permitindo o cálculo de sistemas de equações lineares;
- facilidade de integração, incluindo a sua utilização remota;
- compatibilidade com o Latex, simplificando a edição de documentos acadêmicos;
- natureza *Open Source*, que permite sua utilização sem custos de licenças.

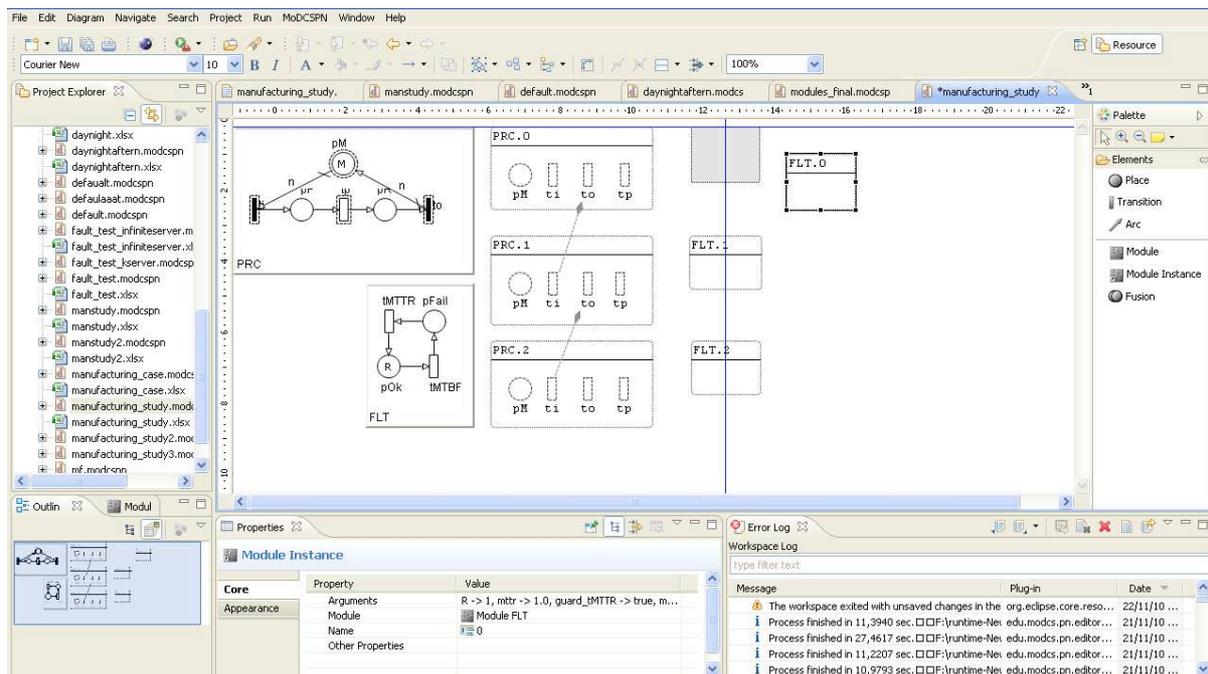


Figura 6.24 Snapshot da ferramenta ModSPN.

No Apêndice B, são apresentadas algumas funções criadas nessa ferramenta para auxiliar os cálculos e a edição deste documento. A ferramenta *ModSPN* permite que a estrutura matricial das redes modeladas seja exportada para um formato compatível com o Sage. Em conjunto com as funções apresentadas no referido apêndice, podem-se obter alguns dados como, por exemplo, os invariantes de lugar e de transição do modelo.

O Sage pode ser utilizado diretamente por outros programas, sem a necessidade de haver interação com o usuário, podendo ainda estar instalado na própria máquina do usuário ou em uma máquina remota. Dessa forma, a integração com o Sage pode ser feita mesmo sem que o usuário o possua em sua máquina, bastando, assim, utilizar uma máquina da rede que possua esse programa. A utilização do Sage a partir do *ModSPN* pode ser realizada tanto a partir do *browser* disponibilizado no próprio Eclipse.

Considerações Finais

Neste capítulo, foram apresentados os modelos propostos para a modelagem de cadeia de suprimentos verde (GSC) e sistemas de manufatura. Os modelos foram adaptados de (Alves, 2007) e (Desrochers e Al-Jaar, 1994), para serem representados com SRNs e foi realizado o

mapeamento dos impactos ambientais relacionados aos elementos dos modelos. Além dos modelos, também foi apresentada a álgebra composicional criada com o intuito de formalizar a composição dos componentes básicos e as propriedades destes modelos. A álgebra proposta foi adaptada de (Alves, 2007), onde a álgebra fora proposta para as *Generalized Stochastic Petri Nets* (GSPN), para realizar a composição de redes SRN. Mostrou-se que os modelos gerados a partir dos componentes propostos serão estruturalmente limitados e *live*, permitindo que as métricas sejam obtidas analiticamente através da cadeia de Markov. Por fim, foram apresentadas as ferramentas utilizadas pelo *framework* proposto. Dentre elas, a *ModSPN* que foi criada, como parte desta pesquisa, com o objetivo de facilitar a definição e reutilização de componentes SRN.

CAPÍTULO 7

Estudos de Caso

Não possuímos virtudes antes de as colocar em prática.

—ARISTÓTELES (Filósofo)

Este capítulo apresenta alguns estudos de caso realizados com o *framework* proposto nesta tese. Dentre os estudos, é apresentado um estudo que valida os modelos utilizando o jogo da cerveja (Simchi-Levi et al., 2000). Os demais estudos foram realizados com os dados da logística e de uma linha de produção de uma indústria de alimentos embutidos.

7.1 Validando o Modelo com o Jogo da Cerveja

Na década de sessenta, a *Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology* (MIT), desenvolveu o **Jogo da Cerveja** para ilustrar o “efeito chicote”¹ ao longo da cadeia de suprimentos. Este jogo simula um sistema de produção e distribuição de produtos e tem sido utilizado em diversos cursos de nível universitário, de pós-graduação e executivo.

Neste jogo, a cadeia de suprimentos é composta por um varejista, um atacadista, um distribuidor e uma fábrica. Cada jogador gerencia uma das entidades da cadeia de suprimentos. Os jogadores realizam suas ações em turnos, onde cada turno representa uma semana. A cada turno as entidades solicitam produtos à entidade imediatamente subjacente na cadeia. Analogamente, as entidades tentam suprir a demanda da entidade imediatamente sobrejacente na cadeia.

Assim, o varejista precisa atender uma demanda externa e realizar pedidos ao atacadista de forma a reabastecer seu estoque. O atacadista, por sua vez, precisa atender os pedidos do varejista e solicitar produtos ao distribuidor. O distribuidor faz seus pedidos à fábrica, de maneira a suprir a demanda do atacadista. Finalmente, a fábrica precisa produzir seus produtos para reabastecer seu estoque, visando atender a demanda do distribuidor.

¹N. de T.: do inglês *bullwhip effect*.

Cada participante possui apenas informações locais, ou seja, a fábrica, por exemplo, conhece apenas a quantidade de pedidos realizadas pelo distribuidor, desconhecendo a quantidade de pedidos que o atacadista realizou para o distribuidor. Assim, apenas o varejista conhece a demanda externa. Com isso, simula-se uma cadeia de suprimentos *descentralizada*.

Os *lead times* de processamento dos pedidos, transporte e produção são simulados atribuindo-se um turno extra para cada uma destas etapas. Assim, quando o varejista realiza um pedido, este só deverá ser recebido pelo atacadista no turno seguinte. Ao receber os pedidos, tão logo possua estoque suficiente para atendê-los, o atacadista os envia para seu cliente. Os itens atendidos levarão mais dois turnos para até chegarem ao varejista (tempo de transporte ou fabricação, este último considerado para as fábricas). Uma variante do jogo pode considerar o *lead time* de apenas um turno neste fluxo dos itens.

A cada semana, registra-se a posição de estoque e os os pedidos não atendidos (*backorders*) de cada entidade. Neste jogo, os itens de pedidos não atendidos precisam ser atendidos assim que possível. A cada turno, atribui-se um custo de \$0,50 para cada item em estoque e \$1,00 para cada item não atendido. O objetivo final do jogo é conseguir menor custo possível. A posição de estoque é obtida pela soma da quantidade de itens efetivamente em estoque mais a quantidade de itens solicitados à entidade subjacente menos a quantidade de itens devidos à entidade sobrejacente.

Neste exemplo, foi utilizado um *software* (Simchi-Levi et al., 2000) que simula este jogo (vide Figura 7.1). Esta versão do jogo é bastante parecida com a versão original, criada pelo MIT.

Nesta versão do jogo também é possível considerar uma cadeia de suprimentos *centralizada*, onde as informações (ex.: estoques e demanda) são compartilhadas entre as entidades da cadeia. Além disso, a única entidade que mantém estoque é o varejista. Os itens produzidos pela fábrica, que passa a possuir a informação da demanda externa, são enviados ao varejista sem que sejam estocados em nenhuma das entidades, nem mesmo na fábrica. Por isso, pode-se ter como meta tanto a redução dos custos locais, quanto a redução do custo global do sistema.

O jogo também pode ser executado de maneira interativa ou automática. No modo automático, é possível configurar a demanda externa e a política de estoque das entidades da cadeia de suprimentos. Para este exemplo, a demanda externa foi ajustada para utilizar uma distribuição determinística de 6 itens por semana (vide Figura 7.2(a)). Adotou-se uma demanda determinística para que fosse possível validar os modelos propostos, comparando os valores obtidos a partir da execução do programa com os valores obtidos a partir da simulação do mo-

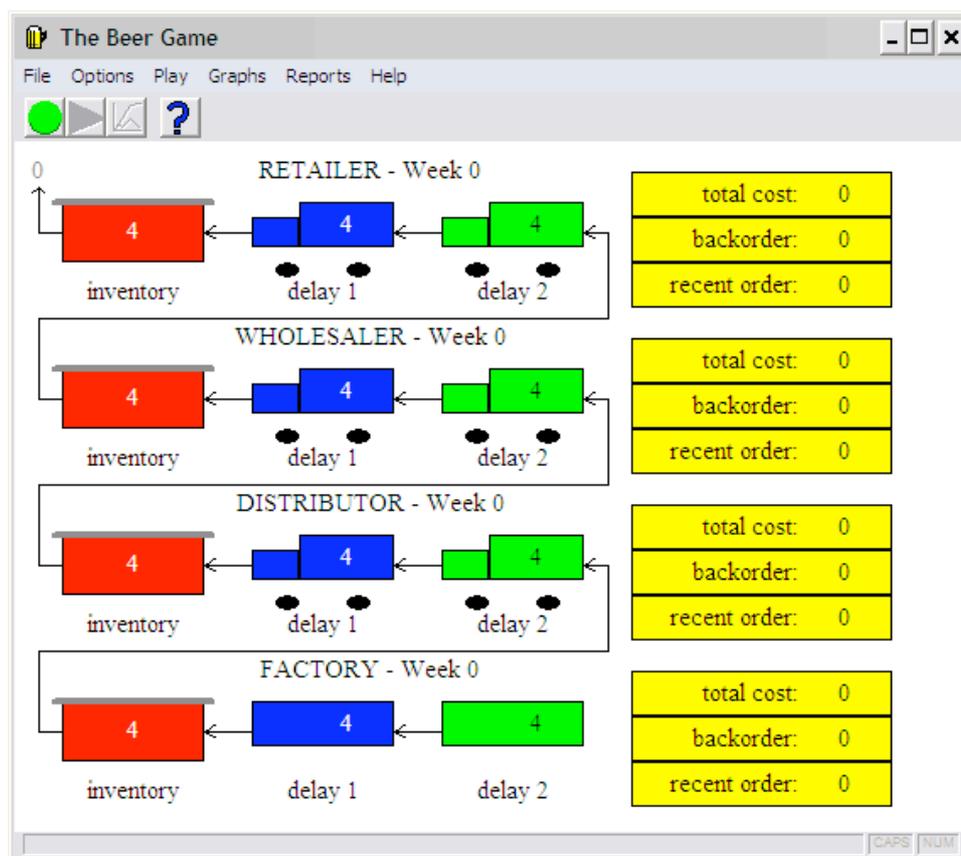


Figura 7.1 Screenshot da versão para computador do jogo da cerveja.

delo SRN. Além disso, foi selecionada a política de estoque (s, Q) , com $s = 16$ e $Q = 18$ (vide Figura 7.2(b)), para todas as entidades da cadeia de suprimentos.

Para este exemplo, adotou-se a simulação automática para um período de 20 semanas. A cada turno (semana) do jogo, os dados de *backorders* e estoque de cada entidade foram coletados. Estes dados podem ser observados nos gráficos da Figura 7.3.

Assim como ocorre com os modelos propostos, este jogo assume que a fábrica sempre dispõe de insumos suficientes para a fabricação dos produtos acabados. Além disso, este programa considera que todas as entidades do modelo dispõem de uma capacidade ilimitada de estocagem. Os itens solicitados são enviados individualmente para a entidade sobrejacente, sem que sejam agrupados em um meio de transporte específico. Ou seja, as entidades não possuem limitação no que tange ao transporte de produtos, nem utilizam meios de transporte diferenciados para esta atividade.

Assim, foi atribuída uma capacidade de estoque suficientemente grande aos modelos dos produtores, de forma que seus estoques nunca cheguem à sua capacidade máxima. Ademais,

Demand: [X]

Select demand type, parameters:

Deterministic

Initial Demand:

For weeks 1 through:

Final demand:

Random Normal

Initial Mean:

Initial Std:

For weeks 1 through:

Final Mean:

Final Std:

(a) Ajuste da demanda externa.

Policy [X]

Retailer	Wholesaler	Distributor	Factory
<input type="radio"/> s-S	<input type="radio"/> s-S	<input type="radio"/> s-S	<input type="radio"/> s-S
<input checked="" type="radio"/> s-Q			
<input type="radio"/> Order to S			
<input type="radio"/> Order Q			
<input type="radio"/> Updated s	<input type="radio"/> Updated s	<input type="radio"/> Updated s	<input type="radio"/> Updates s
<input type="radio"/> Echelon	<input type="radio"/> Echelon	<input type="radio"/> Echelon	<input type="radio"/> Echelon
s: <input type="text" value="16"/>			
S: <input type="text" value="30"/>			
Q: <input type="text" value="18"/>			
M: <input type="text" value="1.960"/>			

(b) Ajuste das políticas de estoque.

Figura 7.2 Screenshots dos ajustes de demanda externa e políticas de estoque no jogo da cerveja.

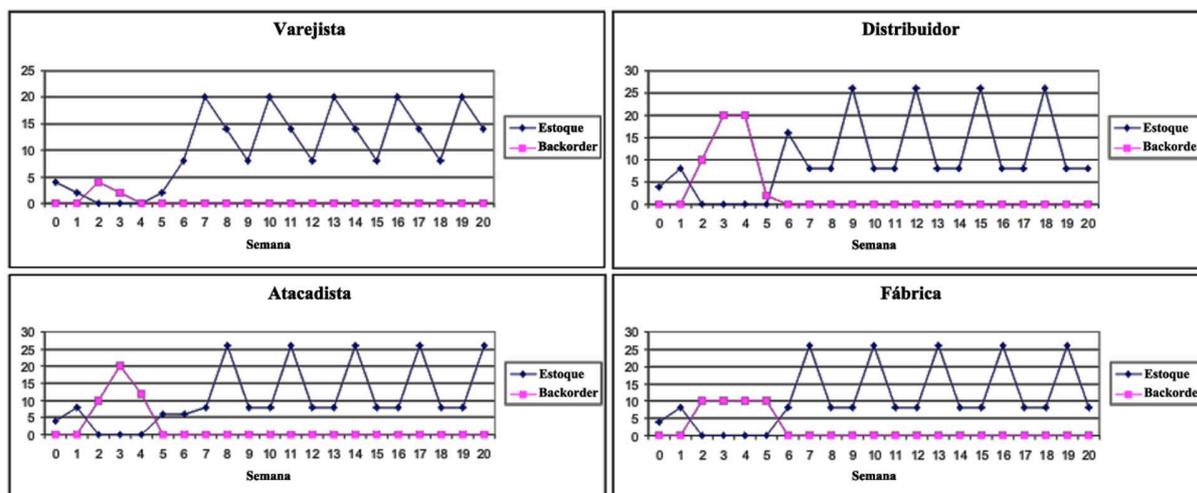


Figura 7.3 Backorders e estoque para uma simulação de 20 semanas a partir do programa.

considerou-se que cada entidade possui uma quantidade suficiente de veículos, de maneira que, sempre haja pelo menos um veículo disponível para o transporte dos itens. Também assume-se que não se faz necessária a diferenciação dos tipos de transporte e que cada veículo transporta um único item para a entidade sobrejacente.

Por conseguinte, no modelo SRN, atribuiu-se 100 à marcação inicial dos lugares que representam a capacidade de estoque e veículos disponíveis das entidades da cadeia de suprimentos. Ao analisar o modelo, é necessário que a probabilidade de não haver marcação nestes lugares seja muito próxima, ou igual, a zero. Com isso evita-se que o modelo possa chegar a uma situação onde o estoque esteja cheio, ou que não haja veículos disponíveis, o que não ocorre no jogo da cerveja.

Neste exemplo, utilizou-se a opção de *lead times* curtos, disponibilizada pelo jogo, removendo uma das etapas de *delay* de cada fluxo de produtos. Com isso, simplificou-se o modelo SRN final, sem ônus para a validação dos modelos propostos. Neste jogo, a fábrica sofre os mesmos *lead times* das outras entidades da cadeia de suprimentos. Ou seja, uma vez que um pedido é realizado, é necessária uma semana para que seja processado e mais uma semana para que os itens produzidos cheguem ao estoque da fábrica². Assim, o modelo da fábrica foi refinado com o intuito de inserir mais um atraso no processo de produção. Por representarem o fluxo interno de produtos na fábrica, as transições estocásticas inseridas no modelo utilizam a semântica ISS.

O modelo SRN da fábrica pode ser visto na Figura 7.4. Observe que uma transição imediata

²Caso fosse considerado o *lead time* longo, seriam necessárias duas semanas para o fluxo de produtos.

foi considerada para modelar a demanda da fábrica. Com isso, confere-se à fábrica a política de estoque (s, Q) , atribuindo a função de guarda $\#pst^{PRD1} \leq 16$ a esta transição.

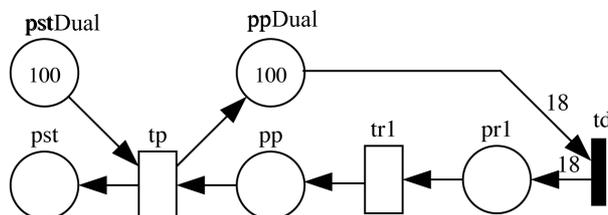


Figura 7.4 Modelo da fábrica com atrasos na produção e processamento dos pedidos.

No início do jogo, cada entidade possui 4 ítems em estoque e mais 4 ítems em cada etapa do fluxo de produtos (como pode ser visto na Figura 7.1). Como a avaliação transiente será considerada para a análise do modelo SRN, sua marcação inicial foi alterada de modo a representar esta situação. Caso fosse utilizada a avaliação estacionária, esta alteração não seria necessária.

No jogo da cerveja, as solicitações de ítems só ocorrem a partir do segundo turno. Para modelar esta característica, utilizou-se um temporizador acíclico TMR_1 , atribuindo-se a função de guarda $\#pTime^{TMR_1} = 1$ às transições $tdWR1$, $tdWR2$, $tdWR3$ e $tdFC1$. Este temporizador possui um único *token* e o tempo de sua transição temporizada é 1, representando uma semana com $\#pTimeLeft^{TMR_1} = 1$ e $\lambda_{Time}^{TMR_1} = 1$. Com isso, a aproximação por fases foi aplicada apenas à transição estocástica do temporizador TMR_1 .

Como dito anteriormente, os *lead times* para ação das entidades, bem como para cada atraso no envio de produtos ou no fluxo de informação, são de exatamente 1 turno (uma semana). Como estes tempos são determinísticos, faz-se necessário aproximar as transições estocásticas para uma distribuição determinística, ao criar o modelo SRN refinado. Na teoria, uma distribuição determinística é igual a uma Erlang de infinitas fases.

Em (Malhotra e Reibman, 1993) é dito que uma Erlang de 10 fases é, geralmente, suficiente para aproximar uma função determinística, mas quanto maior o número de fases, melhor será a aproximação. Considerando que a unidade de tempo do modelo representa uma semana, as transições estocásticas foram aproximadas para uma distribuição Erlang de 20 fases, onde cada fase possui um tempo de $1/20$, ou seja $\lambda = 20$.

Após gerar o modelo SRN refinado, uma avaliação transiente foi conduzida para um intervalo de 20 unidades de tempo. Como a unidade de tempo do modelo é uma semana, a avaliação representará os 20 turnos simulados no programa do jogo da cerveja. Observe que este modelo contempla as aproximações por fase, a alteração da marcação inicial da rede, o refinamento re-

alizado sobre o modelo da fábrica, a inclusão dos modelos de atraso inicial e do temporizador e a alteração nos componentes de demanda das entidades. O modelo final pode ser visto na Figura 7.5. Para facilitar a visualização do modelo, omitiu-se a aproximação por fases realizada nas transições estocásticas.

Obtendo as métricas de estoque e *backorders* para cada entidade da cadeia, foi possível comparar os resultados do modelo SRN com os resultados reais obtidos a partir do programa do jogo da cerveja. A Tabela 7.1 denota o valor esperado destas métricas para cada uma das entidades da cadeia, considerando a execução do programa e a análise do modelo. Comparando os resultados obtidos, nota-se que existe um erro máximo de 5% na quantidade de estoque do distribuidor. Já o erro médio para as métricas de estoque foi de 3,77%, enquanto para os *backorders* obteve-se um erro de 0%. Vale salientar que já era esperado um pequeno erro nestes valores, dado que utilizou-se uma Erlang de 20 fases para representar os tempos determinísticos do programa. Além disso, enquanto o programa utiliza-se de tempos discretos (turnos), o que não aconteceria na prática, as métricas dos modelos são computadas considerando um tempo contínuo.

Tabela 7.1 Comparação dos resultados obtidos a partir da execução do programa e da simulação do modelo SRN (Estoque e *Backorders* em unidades).

	Varejista		Atacadista		Distribuidor		Fábrica	
	Estoq.	Backorder	Estoq.	Backorder	Estoq.	Backorder	Estoq.	Backorder
Programa	14,00	0,00	13,87	0,00	13,33	0,00	14,00	0,00
Modelo	14,49	0,00	14,23	0,00	12,65	0,00	14,54	0,00
Erro	3,50%	0,00%	2,62%	0,00%	-5,13%	0,00%	3,86%	0,00%

Na Figura 7.6 observa-se os resultados das métricas obtidas a partir do modelo SRN, para um intervalo de tempo equivalente aos 20 turnos do programa. É visível a semelhança dos resultados das métricas ao longo do tempo, considerando o modelo SRN e a execução do programa (vide Figura 7.3).

Experimentos mostraram também que, como esperado, quanto maior o número de fases consideradas para a aproximação realizada, o período das ondas dos gráficos de *backorders* tende a ter pouca variação, para regime estacionário (o que ocorre a partir da 7^a/8^a semana). A amplitude destas ondas também tende a aumentar, se aproximando das ondas observadas nos gráficos resultantes da execução do programa. Observe que estas variações não afetam consideravelmente o valor médio esperado das métricas.

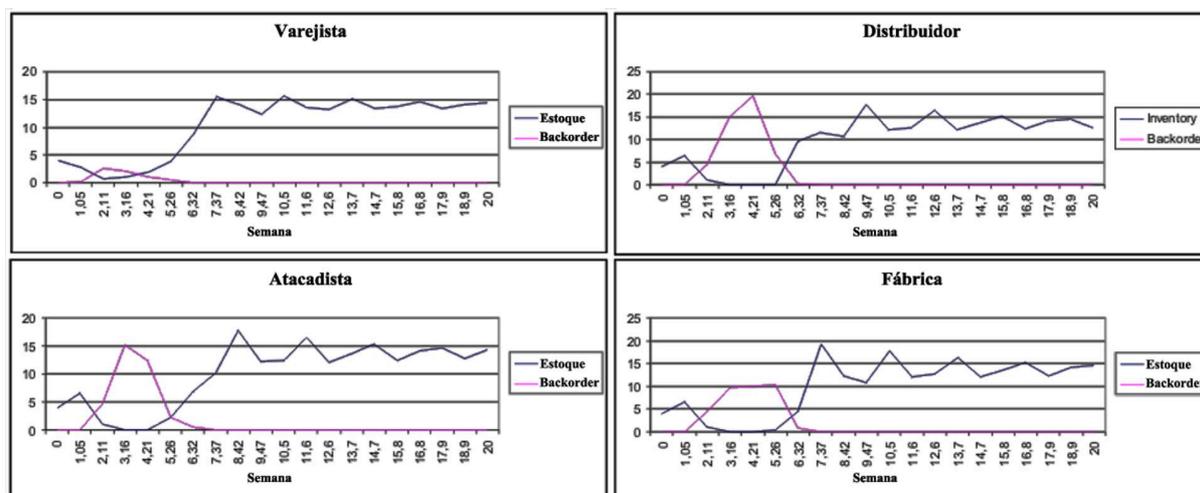


Figura 7.6 Backorders e estoque para uma simulação de 20 semanas a partir do modelo SRN.

Podemos afirmar que os resultados obtidos, tanto pela execução do programa, quanto pelos modelos, não se distanciam de uma distribuição normal, dado que a repetição dos experimentos provê resultados idênticos aos apresentados. Pequenas variações podem ocorrer desde que se aumente significativamente a precisão dos mecanismos de medição. Contudo, os dados se distribuem de forma aproximadamente normal em torno dos valores médios apresentados na Tabela 7.1.

Desta forma, é possível aplicar o *Teste-T emparelhado* e calcular o intervalo de confiança para diferença média entre os valores medidos e obtidos pelos modelos, de forma a se encontrar evidências que refutem a verossimilhança entre o modelo e o *Jogo da Cerveja*. A Tabela 7.2 apresenta este teste, realizado sobre os valores de estoque das instalações da cadeia de suprimentos. Como os resultados de *backorders* foram iguais para ambos os casos, não se fez necessário aplicar este teste sobre estes dados.

Tabela 7.2 *Teste-T emparelhado* dos valores de estoque via simulação e medição.

	Média	Desv. Pad.	SE Médio
Programa	13,8000	0,3193	0,1596
Modelo	13,9775	0,8954	0,4477
Diferença	-0,177500	0,576679	0,288339

Intervalo de confiança de 95% para a diferença média: (-1,095125; 0,740125)

Teste-T para a diferença média = 0 (vs não = 0): T = -0,62; P = 0,582

Dado que o valor 0 (zero) está incluso no intervalo de confiança calculado (-1,095125; 0,740125) e que $P = 0,582$ é maior que $(1 - 0,95) = 0,05$, calculado a partir do intervalo de confiança considerado de 95%, não se tem evidências estatísticas para refutar a hipótese de

que o modelo e o sistema sejam equivalentes. Portanto, pode-se afirmar que os modelos SRN propostos são capazes de representar o jogo da cerveja de maneira fidedigna, atestando, pois, sua validade.

7.2 Utilização de Frota e *Backorders* na Cadeia de Suprimentos

Os estudos de caso, que serão apresentados a seguir, foram realizados em uma empresa real de alimentos embutidos. O principal intuito deste estudo de caso é avaliar a utilização da frota da empresa, adequando-a à demanda. Após algumas entrevistas, foi possível familiarizarmos com as condições com as quais esta empresa opera, permitindo que os cenários criados nas avaliações pudessem ser efetivamente implantados. As entrevistas mostraram que a cadeia de suprimentos da qual esta empresa participa opera de uma maneira descentralizada. Assim, considera-se que esta empresa adota a estratégia de remessa direta para seus clientes, uma vez que esta não utiliza armazéns próprios para realizar suas entregas.

Toda a distribuição é realizada através do modal rodoviário. Para isto, a empresa conta com mais de 50 veículos próprios de diferentes tipos (ex.: tocos, trucks e caminhões articulados). Este trabalho apresenta o estudo de caso realizado considerando um dos tipos de caminhões utilizados por esta empresa. Por isto, apenas as zonas que são atendidas por este tipo de veículo foram consideradas, desprezando-se as demais zonas.

Uma restrição imposta pela empresa é que, a despeito das alterações realizadas na rede de distribuição, o nível de serviço (SL^3) oferecido permaneça em torno de 98%. Ou seja, a probabilidade de haver pedidos pendentes, devido à falta de estoque, ou veículos, deve ser próxima a 2%.

Esta empresa utiliza um *software* de roteirização para planejar as suas entregas. Os dados das viagens realizadas durante um semestre foram obtidos com base em relatórios gerados a partir deste *software*. Estes dados foram utilizados não apenas para se obter os parâmetros do modelo, mas também auxiliaram o levantamento da rede de distribuição.

A partir destes dados, foi realizado o agrupamento dos clientes em zonas. As zonas foram caracterizadas por agrupamentos de clientes da mesma região geográfica, com características de consumo semelhantes e que eram, geralmente, atendidos pelo mesmo tipo de veículo. O termo “geralmente” foi empregado uma vez que, ocasionalmente, é possível que um cliente que deveria ser atendido por um caminhão com capacidade para 10 toneladas, por exemplo, venha a

³N. de T.: sigla proveniente do inglês *Service Level*.

ser atendido por um caminhão com capacidade de 14 toneladas. Isto pode ocorrer quando este cliente realiza um pedido inesperadamente maior que o usual. Apesar de operacionalmente esta ser uma situação plausível, considerar que uma zona seja atendida por um único tipo de veículo é abstração natural em uma análise tático-estratégica, que vem a ser o foco destas análises.

A Tabela 7.3 apresenta um resumo dos dados obtidos. As colunas desta tabela representam, da esquerda para a direita: a rota da viagem, o tipo de veículo utilizado, a zona de destino da viagem, a quantidade transportada em toneladas e o tempo total da viagem em horas. As avaliações apresentadas, a seguir, contemplam as zonas atendidas por tocos.

Tabela 7.3 Resumo dos dados de viagens.

Route	Veículo	Zona	Peso (ton)	Tempo de Viagem (h)
Rota 1	Truck	1	14	190
Rota 1	Truck	1	13	220
Rota 1	Truck	1	14	192
Rota 2	MB 710	2	6	46
Rota 2	MB 710	2	6	71
Rota 2	MB 710	2	6	57
Rota 3	Truck	3	15	174
Rota 3	Truck	3	13	176
Rota 3	Truck	3	13	171
Rota 3	Toco	4	10	132
Rota 3	Toco	4	8	119
Rota 3	Toco	4	7	118

O relatório de viagens desta empresa foi utilizado para selecionar as zonas a serem consideradas no modelo. Aplicando Pareto sobre os dados de viagens, considerando apenas as zonas atendidas por tocos, selecionou-se as zonas com maior participação no consumo total. O gráfico da Figura 7.7 foi gerado considerando uma participação acumulada até 95%. As zonas restantes não foram consideradas na análise, por possuírem uma baixa participação no consumo total enfrentado pela empresa. Com isso, reduz-se o tamanho final do modelo, bem como a complexidade de analisá-lo, sem comprometer a expressividade dos resultados obtidos.

Após obter a configuração da rede de distribuição da empresa, foram escolhidos os indicadores de desempenho a serem aferidos a partir dos modelos. Como o objetivo deste estudo é adequar a frota da empresa à sua demanda, é necessário obter os índices de utilização da frota. Para isto, serão calculadas a quantidade esperada de veículos disponíveis e as probabilidades de não haver nenhum veículo disponível e de todos os veículos estarem ociosos.

Como o foco deste estudo é a adequação da frota, eliminou-se a possibilidade de ocorrer uma falta de estoque, com o intuito de realizar um isolamento dos fatores que interferem na rede de distribuição. Para isto, foi atribuído um alto valor para as taxas de produção e reabas-

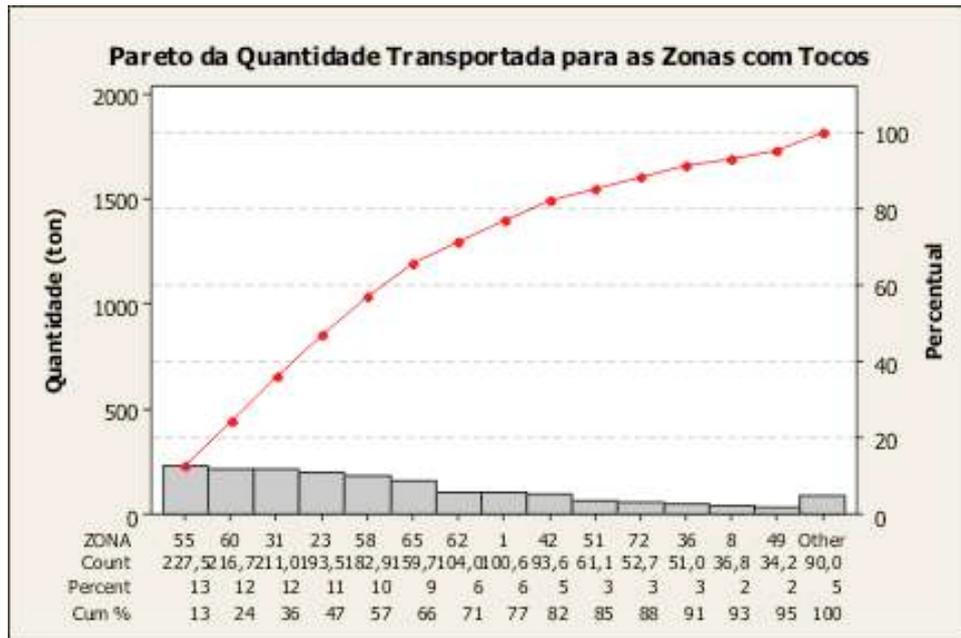


Figura 7.7 Gráfico de Pareto considerando a quantidade transportada para as zonas atendidas por tocoss.

tecimento de estoque da fábrica. Observe que a taxa de produção deve respeitar a capacidade produtiva máxima da fábrica. Para garantir que nenhum pedido deixe de ser atendido devido à falta de estoque, é indispensável cotejar a probabilidade de não haver estoque suficiente para tal.

Também é preciso avaliar os *backorders* resultantes dos diversos cenários. Primeiramente, porque a empresa impõe um SL de 98% e, com isso, é necessário que a probabilidade de *backorders* fique em torno de 2%. Em segundo lugar, as métricas de *backorders* servem como referência para a comparação dos diferentes cenários.

Após a escolha dos índices de desempenho, instituiu-se os parâmetros do sistema a partir dos dados coletados, cujo resumo foi apresentado na Tabela 7.3. Apenas os dados referentes às zonas selecionadas para a avaliação foram considerados.

A quantidade transportada para cada zona, por viagem, foi obtida considerando-se a mediana dos valores históricos. Uma vez que, nos modelos SRN, este valor é atribuído ao peso dos arcos, o qual não pode possuir valores decimais, ele foi arredondado para o menor inteiro que seja maior que a mediana.

Na Tabela 7.3, o tempo de viagem engloba o tempo de viagem para o cliente, o tempo de entrega dos produtos no cliente e o tempo de retorno do veículo para a fábrica. Assim, essas três fases, originalmente representadas separadamente, serão unificadas em uma única

transição estocástica quando o modelo SRN abstrato for gerado. Essa abordagem não interfere sobre as métricas escolhidas para a avaliação. Durante as entrevistas realizadas, foi constatado que o tempo gasto no fluxo de informações pode ser desconsiderado nestas análises. Portanto, ao gerar o modelo SRN refinado, esta fase será desprezada em todos os modelos de fluxo.

Para cada viagem realizada para cada zona, foi calculada a diferença, em dias, para a viagem anterior. Com isso, obteve-se o intervalo entre as viagens, o qual será utilizado para calcular a demanda de cada zona.

Diferentemente da quantidade transportada, os valores para os intervalos entre viagens e o tempo de viagem não foram obtidos a partir da mediana. Ao atribuir estes tempos aos modelos SRN, é necessário aproximá-los para uma função polinômio-exponencial, devido à natureza estocástica deste formalismo. Para tanto, é necessário lograr os valores da média e desvio padrão para estes tempos.

Como estas duas medidas estatísticas possuem uma grande sensibilidade aos *outliers* da amostra, foi realizada uma análise do intervalo inter-quartil (IQR), visando eliminá-los, antes de calcular estas medidas. Ao criar o modelo SRN refinado, estes valores foram utilizados para realizar a aproximação por fases das transições estocásticas correspondentes.

Os parâmetros obtidos podem ser vistos na Tabela 7.4. Nesta tabela, a coluna **Abrev.** denota o nome da zona considerando a nomenclatura descrita no Capítulo 6. A coluna **N** denota o número de dados da referida zona na amostra. As colunas **Intervalo** e **Tempo** denotam o intervalo entre viagens e o tempo gasto por viagem. Para cada uma destas, a média (\bar{X}) e o desvio padrão (σ) são apresentados. Também é apresentada a distribuição para qual foi aproximada o respectivo valor, na coluna **aprox.** Como os dados de intervalo e tempo de viagem estão expressos em unidades de tempo diferentes, ao utilizá-los no modelo é necessário convertê-los para uma mesma unidade. Neste estudo, a hora foi adotada como unidade de tempo. Assim, os intervalos foram convertidos de dias para horas. Finalmente, a coluna **Carga** denota a quantidade de toneladas transportada para a zona, em toneladas.

Com o auxílio das ferramentas criadas, o cenário descrito foi modelado e em seguida convertido para um modelo SRN abstrato. Considerando-se este modelo, os dados de tempo obtidos e as informações referentes às simplificações no fluxo de informações e de produtos, descritas anteriormente, o modelo SRN refinado foi obtido. Neste momento é importante realizar a conversão dos tempos obtidos para uma unidade comum, neste caso horas. O modelo resultante final, sem as aproximações por fase, é apresentado na Figura 7.8.

Com o propósito de validar o modelo gerado, foi conduzida uma avaliação transiente, para

Tabela 7.4 Parâmetros, por zona, utilizados para o modelo SRN.

Zona	Abrev.	N	Intervalo (dias)			Tempo (horas)			Carga (tons)
			\bar{X}	σ	aprox.	\bar{X}	σ	aprox.	
55	CSM_1	26	5,62	6,84	Hiper-exponencial	75,65	14,94	Hipo-exponencial	8
60	CSM_2	24	6,458	3,107	Hipo-exponencial	137,17	18,07	Hipo-exponencial	9
31	CSM_3	24	6,458	3,176	Hipo-exponencial	105,58	25,02	Hipo-exponencial	9
23	CSM_4	26	7,27	7,43	Hiper-exponencial	78,38	18,99	Hipo-exponencial	8
58	CSM_5	22	6,091	3,069	Hipo-exponencial	93,73	21,95	Hipo-exponencial	9
65	CSM_6	22	6,955	3,848	Hipo-exponencial	124	29,55	Hipo-exponencial	7
62	CSM_7	12	11,58	6,82	Hipo-exponencial	82,83	18	Hipo-exponencial	9
1	CSM_8	16	5,38	4,11	Hipo-exponencial	118,44	17,05	Hipo-exponencial	7
42	CSM_9	11	13,27	8,84	Hipo-exponencial	100,45	22,58	Hipo-exponencial	9
51	CSM_{10}	8	13,38	6,59	Hipo-exponencial	90,63	13,33	Hipo-exponencial	8
72	CSM_{11}	11	11,38	13,09	Hiper-exponencial	38,3	29,5	Hipo-exponencial	7
36	CSM_{12}	9	8,89	6,25	Hipo-exponencial	37,44	17,73	Hipo-exponencial	6
8	CSM_{13}	4	25,8	23,3	Hipo-exponencial	58,8	36,4	Hipo-exponencial	9
49	CSM_{14}	4	15,5	14,15	Hipo-exponencial	94	14,02	Hipo-exponencial	8

um período similar ao da amostra. Como a amostra foi obtida para seis meses de operação, ou 149 dias, a avaliação transiente foi realizada até o tempo 3576, que é a quantidade de horas equivalente ao período decorrido em dias.

Na amostra, a demanda enfrentada, pela fábrica, é de 12,51908 ao dia, enquanto a avaliação do modelo SRN aponta para uma demanda diária de 12,51105. Caracterizando-se, assim, um erro de 0,06411%. De maneira análoga, pelos dados históricos, espera-se que haja 6 veículos disponíveis na fábrica, enquanto os modelos apontam para uma quantidade esperada de 5,675 veículos. Incorrendo-se, portanto, em um erro de 5,417%.

Um *token game* (Maciel et al., 1996) foi conduzido com o intuito de se realizar uma validação qualitativa. Todas as alterações realizadas sobre o modelo SRN abstrato foram baseadas na aproximação por fases ou em redução do modelo (Murata, 1989; Desrochers e Al-Jaar, 1994), evitando a necessidade de se realizar uma validação das propriedades do modelo, que são garantidas para os modelos propostos nesta tese. Por conseguinte, o modelo criado é válido.

Finalmente, foram criadas as métricas necessárias para aferir os índices de desempenho escolhidos para este estudo de caso (vide Tabela 7.5). As primeiras três métricas são relacionadas com a utilização da frota. A quarta métrica diz respeito ao estoque da fábrica. Este estoque não deve estar abaixo de 9 toneladas. Note que este valor representa a maior quantidade transportada em uma viagem, como ocorre nas viagens realizadas para a zona 60. Esta métrica deverá possuir um valor muito próximo a 0%. As métricas seguintes denotam a probabilidade de haver pelo menos um pedido pendente para cada zona. Observe que o valor destas métricas deverão ser, no máximo, próximo a 2%, garantindo o SL solicitado pela empresa.

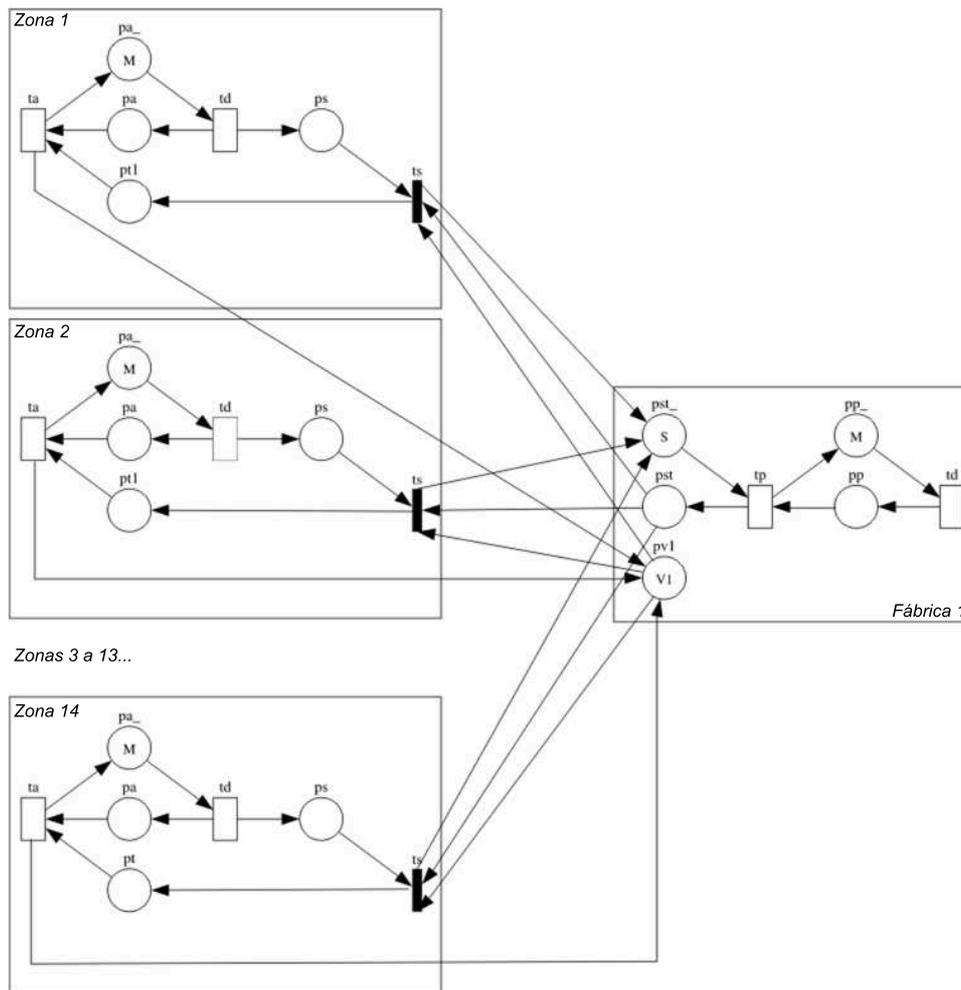


Figura 7.8 Modelo SRN abstrato para a distribuição de produtos.

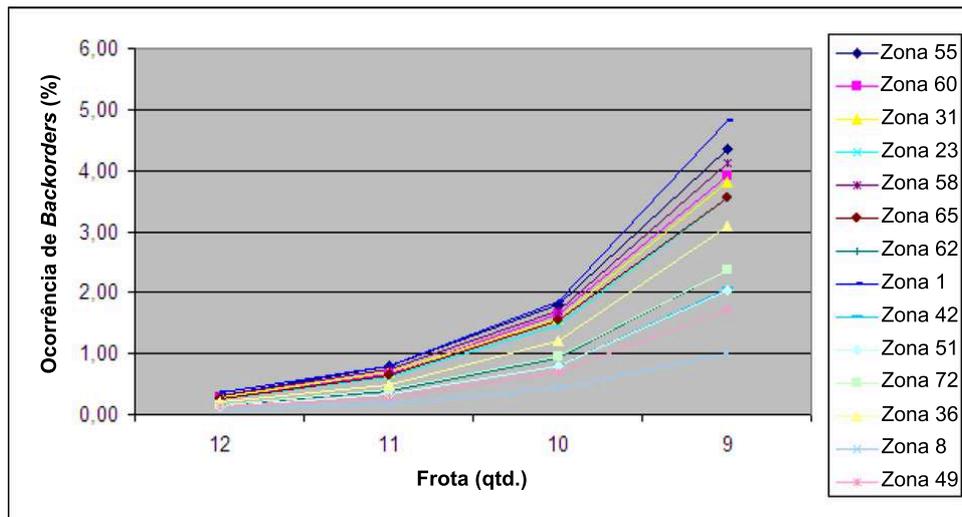
Apesar de ser possível analisar o modelo SRN final analiticamente, o espaço de estados é suficientemente grande, tornando esta opção inviável, considerando os recursos computacionais disponíveis para esta avaliação. Por isso, optou-se por realizar uma simulação estacionária do modelo final.

Originalmente, esta fábrica possui 12 veículos, do tipo toco, disponíveis. Diferentes cenários foram criados decrementando a quantidade de tocos, em um unidade, de 12 a 9. Os resultados obtidos a partir desta avaliação podem ser vistos na Tabela 7.5. Para uma melhor visualização, a Figura 7.9 mostra os resultados da probabilidade de *backorders*.

Inicialmente, com 12 veículos disponíveis, afere-se uma esperança de 5,64 veículos disponíveis na fábrica, o que representa quase 50% da frota parada. Após reduzir 1, 2 e 3 veículos, este valor passa para 4,44, 3,44 e 2,68, respectivamente. Estes valores representam o valor es-

Tabela 7.5 Resultado das métricas variando-se a quantidade de tocos disponíveis.

Métrica	Expressão	Tocos			
		12	11	10	9
Veículos disponíveis (un.)	<code>return mark("pt_PRD_1")</code>	5,64	4,44	3,44	2,68
Prob. para todos os veículos disponíveis	<code>return mark("pt_PRD_1") == μ₀(pt_PRD_1)?1 : 0;</code>	0,16%	0,16%	0,16%	0,14%
Prob. para todos os veículos em uso	<code>return mark("pt_PRD_1") == 0?1 : 0;</code>	3,62%	7,36%	15,87%	24,14%
Prob. de <i>backorders</i> por falta de estoque	<code>return mark("pst_PRD_1") < 0?1 : 0;</code>	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Prob. de <i>backorders</i> para zona 55	<code>return mark("po_CSM_1") > 0?1 : 0;</code>	0,32%	0,80%	1,80%	4,35%
Prob. de <i>backorders</i> para zona 60	<code>return mark("po_CSM_2") > 0?1 : 0;</code>	0,28%	0,68%	1,65%	3,92%
Prob. de <i>backorders</i> para zona 31	<code>return mark("po_CSM_3") > 0?1 : 0;</code>	0,28%	0,70%	1,56%	3,80%
Prob. de <i>backorders</i> para zona 23	<code>return mark("po_CSM_4") > 0?1 : 0;</code>	0,26%	0,63%	1,46%	3,56%
Prob. de <i>backorders</i> para zona 58	<code>return mark("po_CSM_5") > 0?1 : 0;</code>	0,31%	0,75%	1,71%	4,11%
Prob. de <i>backorders</i> para zona 65	<code>return mark("po_CSM_6") > 0?1 : 0;</code>	0,27%	0,64%	1,55%	3,56%
Prob. de <i>backorders</i> para zona 62	<code>return mark("po_CSM_7") > 0?1 : 0;</code>	0,16%	0,39%	0,93%	2,36%
Prob. de <i>backorders</i> para zona 1	<code>return mark("po_CSM_8") > 0?1 : 0;</code>	0,35%	0,80%	1,85%	4,81%
Prob. de <i>backorders</i> para zona 42	<code>return mark("po_CSM_9") > 0?1 : 0;</code>	0,14%	0,34%	0,80%	2,07%
Prob. de <i>backorders</i> para zona 51	<code>return mark("po_CSM_10") > 0?1 : 0;</code>	0,14%	0,34%	0,81%	2,03%
Prob. de <i>backorders</i> para zona 72	<code>return mark("po_CSM_11") > 0?1 : 0;</code>	0,16%	0,41%	0,95%	2,37%
Prob. de <i>backorders</i> para zona 36	<code>return mark("po_CSM_12") > 0?1 : 0;</code>	0,21%	0,50%	1,21%	3,08%
Prob. de <i>backorders</i> para zona 8	<code>return mark("po_CSM_13") > 0?1 : 0;</code>	0,08%	0,18%	0,43%	1,01%
Prob. de <i>backorders</i> para zona 49	<code>return mark("po_CSM_14") > 0?1 : 0;</code>	0,12%	0,29%	0,69%	1,73%

**Figura 7.9** Probabilidade de *backorders* variando-se a quantidade de tocos disponíveis.

perado de veículos ociosos, porém, em momentos de pico de demanda, pode ocorrer de todos os veículos estarem em uso, prejudicando o SL. Observe que, como desejado, a probabilidade de não haver estoque necessário para atender a um pedido é de 0% para todos os cenários gerados.

Ao reduzir 1 ou 2 veículos, a probabilidade de todos os veículos estarem disponíveis per-

maneja inalterada. Mesmo reduzindo 3 veículos esta probabilidade diminui muito pouco. Por outro lado, a probabilidade de todos os veículos estarem em uso, praticamente, dobra a cada veículo removido. Apesar disso, mesmo reduzindo 2 veículos a probabilidade de todos os veículos estarem em uso é de, aproximadamente, 16%.

Nota-se também, que reduzindo 1, 2 e 3 a probabilidade média de *backorders* por zona aumenta 2,5, 5,7, e 14 vezes respectivamente. O gráfico da Figura 7.9 mostra claramente este aumento exponencial da demanda ao se reduzir a quantidade de veículos disponíveis na fábrica. Apesar disso, constata-se que operando com apenas 10 veículos - ou seja, com uma redução de 16% da frota - a empresa ainda mantém um nível de serviço superior ao 98% desejados.

Após analisar a utilização da frota considerando sua demanda atual, avaliou-se a sua resposta a um possível aumento da demanda. Para realizar este segundo estudo de caso, foi reaproveitado o mesmo modelo do caso anterior. Desta vez, porém, foi mantida a quantidade de veículos disponíveis na fábrica originalmente (12 veículos), incrementando-se a demanda das zonas.

A demanda das zonas foi incrementada de 5 em 5 por cento, de maneira uniforme, ou seja, a partir da demanda original, incrementou-se em 5% a demanda de cada zona, até que a probabilidade de *backorders* das zonas ultrapassasse os 2% necessários para manter 98% de SL. Com isso, 6 cenários diferentes foram avaliados, até um aumento de 25% na demanda. Os resultados obtidos a partir desta avaliação podem ser vistos na Tabela 7.6. Para uma melhor visualização, a Figura 7.10 mostra os resultados da probabilidade de *backorders*.

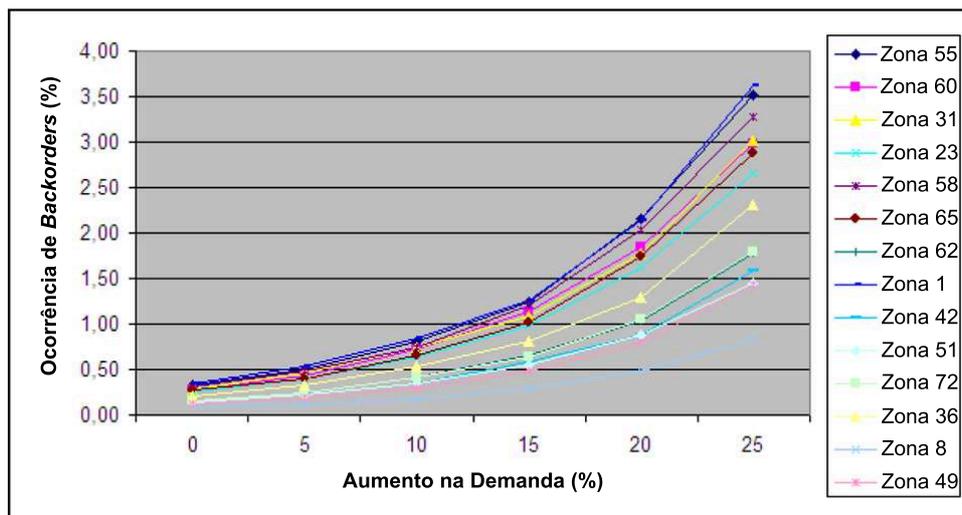


Figura 7.10 Probabilidade de *backorders* variando-se a demanda das zonas.

Tabela 7.6 Resultado das métricas variando-se a demanda das zonas.

Métrica	Expressão	Incremento da Demanda (%)					
		0	5	10	15	20	25
Veículos disponíveis (un.)	<i>return mark("pt_PRD_1")</i>	5,64	5,02	4,74	4,25	3,94	3,52
Prob. para todos os veíc. disp.	<i>return mark("pt_PRD_1") = 12?1 : 0;</i>	0,16%	0,12%	0,07%	0,05%	0,03%	0,02
Prob. para todos os veíc. em uso	<i>return mark("pt_PRD_1") = 0?1 : 0;</i>	3,62%	4,74%	8,23%	12,54%	13,86%	18,99
Prob. <i>backorders</i> por falta estoq.	<i>return mark("pst_PRD_1") < 9?1 : 0;</i>	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00
Prob. de <i>backorders</i> para zona 55	<i>return mark("po_CSM_1") > 0?1 : 0;</i>	0,32%	0,50%	0,81%	1,25%	2,16%	3,52%
Prob. de <i>backorders</i> para zona 60	<i>return mark("po_CSM_2") > 0?1 : 0;</i>	0,28%	0,43%	0,72%	1,14%	1,85%	2,99%
Prob. de <i>backorders</i> para zona 31	<i>return mark("po_CSM_3") > 0?1 : 0;</i>	0,28%	0,46%	0,75%	1,09%	1,78%	3,01%
Prob. de <i>backorders</i> para zona 23	<i>return mark("po_CSM_4") > 0?1 : 0;</i>	0,26%	0,40%	0,63%	0,99%	1,62%	2,65%
Prob. de <i>backorders</i> para zona 58	<i>return mark("po_CSM_5") > 0?1 : 0;</i>	0,31%	0,48%	0,75%	1,20%	2,03%	3,28%
Prob. de <i>backorders</i> para zona 65	<i>return mark("po_CSM_6") > 0?1 : 0;</i>	0,27%	0,40%	0,65%	1,01%	1,75%	2,88%
Prob. de <i>backorders</i> para zona 62	<i>return mark("po_CSM_7") > 0?1 : 0;</i>	0,16%	0,25%	0,41%	0,65%	1,04%	1,77%
Prob. de <i>backorders</i> para zona 1	<i>return mark("po_CSM_8") > 0?1 : 0;</i>	0,35%	0,53%	0,85%	1,26%	2,14%	3,62%
Prob. de <i>backorders</i> para zona 42	<i>return mark("po_CSM_9") > 0?1 : 0;</i>	0,14%	0,22%	0,35%	0,59%	0,88%	1,58%
Prob. de <i>backorders</i> para zona 51	<i>return mark("po_CSM_10") > 0?1 : 0;</i>	0,14%	0,22%	0,34%	0,55%	0,88%	1,45%
Prob. de <i>backorders</i> para zona 72	<i>return mark("po_CSM_11") > 0?1 : 0;</i>	0,16%	0,25%	0,41%	0,64%	1,05%	1,79%
Prob. de <i>backorders</i> para zona 36	<i>return mark("po_CSM_12") > 0?1 : 0;</i>	0,21%	0,33%	0,53%	0,81%	1,29%	2,31%
Prob. de <i>backorders</i> para zona 8	<i>return mark("po_CSM_13") > 0?1 : 0;</i>	0,08%	0,12%	0,18%	0,29%	0,48%	0,83%
Prob. de <i>backorders</i> para zona 49	<i>return mark("po_CSM_14") > 0?1 : 0;</i>	0,12%	0,19%	0,30%	0,48%	0,79%	1,43%

A partir dos dados apresentados, constata-se que com 12 veículos e um aumento de 20% na demanda, a rede de distribuição as métricas aferidas possuem valores semelhantes aos obtidos quando remove-se 2 veículos, considerando-se a demanda original. Apesar de se observar um aumento de 3,62% para 13,86% quando a demanda é incrementada em 20%, a probabilidade de haver *backorders* ainda é próxima a 2%, mesmo no pior caso (veja os resultados da zona 55). Conseqüentemente, constata-se que, mantendo a mesma quantidade de veículos atual, a fábrica consegue responder de maneira satisfatória, mantendo um SL próximo a 98%, a um aumento de 20% na demanda.

7.3 Políticas de Estoque na Cadeia de Suprimentos

O objetivo principal deste estudo de caso é cotejar a utilização de diferentes políticas de estoque, bem como sua sensibilidade a variações de demanda. Este estudo utiliza o mesmo modelo apresentado na Seção 7.2, por isso, não é necessário validá-lo novamente. Nesta seção, o modelo que representa a fábrica é composto com os modelos de políticas de estoque para simular a utilização de diferentes políticas, como visto a seguir.

Os cenários criados para esta avaliação consideram tanto a política **MTO**, quanto as polí-

ticas **MTS** (r,s,S) e (r,s,Q). Também foi avaliada a utilização das políticas híbridas de estoque (r,s,S) + MTO e (r,s,Q) + MTO. Para o cálculo da posição de estoque, os *backorders* não foram considerados, contabilizando-se apenas o estoque efetivamente armazenado e o *WIP*.

Cada uma destas políticas foi avaliada considerando-se uma taxa de produção da fábrica de 1/1,5 e 1/0,5 toneladas/h. Também se procurou investigar o impacto da inserção de picos de demanda sobre as diferentes políticas de estoque. Para isso, duas zonas, cujo consumo representa 25% do consumo total, foram selecionadas e tiveram seus intervalos entre pedidos e quantidade solicitada a cada intervalo duplicados. Observe que esta alteração não afeta a média de toneladas solicitadas à fábrica, porém aumenta o desvio padrão dos pedidos.

Com isso, foram criados 4 cenários diferentes e para cada um destes cenários 5 políticas de estoque diferentes foram avaliadas.

- **Cenário 1:** Taxa de Produção = 1/1,5 e demanda atual;
- **Cenário 2:** Taxa de Produção = 1/1,5 e picos de demanda;
- **Cenário 3:** Taxa de Produção = 1/0,5 e demanda atual;
- **Cenário 4:** Taxa de Produção = 1/0,5 e picos de demanda.

A fábrica enfrenta uma demanda diária de 12,5 toneladas por dia. Por conseguinte, as políticas de estoque foram ajustadas de maneira a tentar deixar o estoque médio da fábrica em torno deste valor, atribuindo-se a r , s , S e Q , 1, 13, 13 e 1, respectivamente. Como s e S são aferidos com base na marcação do lugar que representa o estoque da fábrica, a qual é definida no domínio dos naturais, atribuiu-se a eles o valor 13, que é o primeiro valor natural maior que 12,5.

Em vista do exposto, ao utilizar a política de estoque (r,s,S), a cada 1 hora a posição de estoque será aferida e caso esteja abaixo de 13 toneladas, a fábrica irá realizar uma solicitação interna para que se produza o suficiente para fazer com que a posição de estoque volte às 13 toneladas. Assim, a posição de estoque da fábrica será sempre próxima a 13, quando esta política for adotada.

Neste estudo de caso, os seguintes índices de desempenho foram considerados: a quantidade de veículos disponíveis; o estoque efetivamente armazenado na fábrica; o *WIP* interno da fábrica; e a quantidade (em toneladas) de *backorders*.

Os resultados obtidos a partir desta avaliação podem ser vistos nas Tabelas 7.7 e 7.8. Na primeira, são apresentados os resultados considerando uma taxa de produção de 1/1,5, en-

quanto na última, os resultados consideram uma taxa de produção de 1/0,5. Para uma melhor visualização dos resultados obtidos, apresentamo-los de maneira gráfica na Figura 7.11.

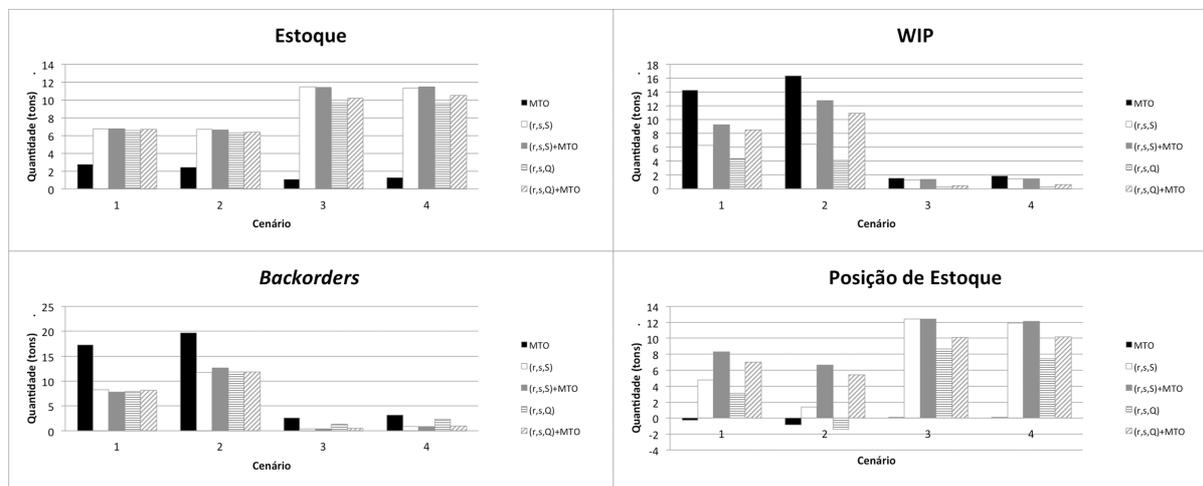


Figura 7.11 Resultados obtidos por cenário.

Tabela 7.7 Resultados obtidos considerando uma taxa de produção de 1/1,5.

Índice de Desempenho	Demanda Atual				
	MTO	(r,s,S)	(r,s,S)+MTO	(r,s,Q)	(r,s,Q)+MTO
Veículos disponíveis (un.)	5,48835	5,72033	5,82911	5,52542	5,61652
Estoque real (ton.)	2,77717	6,74600	6,74759	6,58162	6,66740
WIP (ton.)	14,23752	6,27966	9,28839	4,38204	8,54248
Backorders (A) (ton.)	17,28564	8,28316	7,73798	7,86101	8,18209
Posição de Estoque (B) (ton.)	17,01469	13,02565	16,03597	10,96366	15,20988
B - A (ton.)	-0,27095	4,74249	8,29800	3,10264	7,02779
Índice de Desempenho	Picos de Demanda				
	MTO	(r,s,S)	(r,s,S)+MTO	(r,s,Q)	(r,s,Q)+MTO
Veículos disponíveis (un.)	5,17482	5,60670	5,61808	5,48454	5,53410
Estoque real (ton.)	2,45078	6,70825	6,62009	6,32521	6,35715
WIP (ton.)	16,34035	6,44412	12,74377	4,10453	10,88381
Backorders (A) (ton.)	19,65215	11,76020	12,68852	11,87028	11,85109
Posição de Estoque (B) (ton.)	18,79113	13,15237	19,36386	10,42974	17,24096
B - A (ton.)	-0,86102	1,39217	6,67534	-1,44055	5,38986

Para uma taxa de produção de 1/1,5 (cenários 1 e 2) constata-se que, ao inserir picos de demanda, o estoque tende a cair, enquanto a quantidade de *backorders* tende a aumentar. Além disso, o WIP tende a aumentar quando se utiliza uma política puramente MTO, ou mesmo as políticas híbridas. Esta configuração mostra que a produção é um gargalo no processo, indicando que a fábrica está realizando as solicitações internas para produzir os produtos, aumentando o WIP, porém devido a uma baixa capacidade produtiva, os produtos não são produzidos

Tabela 7.8 Resultados obtidos considerando uma taxa de produção de 1/0,5.

Índice de Desempenho	Demanda Atual				
	MTO	(r,s,S)	(r,s,S)+MTO	(r,s,Q)	(r,s,Q)+MTO
Veículos disponíveis (un.)	5,68529	5,71856	5,49765	5,67784	5,51394
Estoque real (ton.)	1,09057	11,46275	11,42071	9,67951	10,18812
WIP (ton.)	1,50439	1,31066	1,36758	0,25582	0,43183
Backorders (A) (ton.)	2,58583	0,38503	0,38141	1,30259	0,49996
Posição de Estoque (B) (ton.)	2,59495	12,77341	12,78829	9,93533	10,61995
B - A (ton.)	0,00912	12,38838	12,40688	8,63274	10,11999
Índice de Desempenho	Picos de Demanda				
	MTO	(r,s,S)	(r,s,S)+MTO	(r,s,Q)	(r,s,Q)+MTO
Veículos disponíveis (un.)	5,65724	5,51906	5,62115	5,53648	5,71470
Estoque real (ton.)	1,28519	11,31687	11,47079	9,57852	10,49690
WIP (ton.)	1,88915	1,42254	1,45776	0,25411	0,60085
Backorders (A) (ton.)	3,15943	0,86525	0,81540	2,37417	0,93412
Posição de Estoque (B) (ton.)	3,17434	12,73941	12,92855	9,83263	11,09775
B - A (ton.)	0,01491	11,87417	12,11314	7,45846	10,16362

a tempo de atender as solicitações dos clientes, elevando a quantidade de *backorders*. O estoque diminui porque quando os produtos são produzidos, eles já são enviados aos clientes, devido à existência de *backorders*.

Ainda com relação aos cenários 1 e 2, as maiores variações negativas para a diferença entre a posição de estoque e os *backorders* da fábrica são observadas quando se considera as políticas de estoque (r,s,S) e (r,s,Q) . Também é constatada uma pequena diminuição no estoque armazenado e, apesar da quantidade de *backorders* aumentar, o WIP permanece praticamente o mesmo. Isto ocorre porque estas políticas não consideram os *backorders* ao realizar os pedidos internos de produção. Assim, mesmo que o estoque esteja vazio, enquanto o WIP estiver acima do nível de estoque mínimo s , a fábrica não solicitará a produção de mais produtos. Percebe-se assim, que estas demandas não se adequam de maneira ideal a cenários com uma grande variação de demanda.

Constatado que a produção era um gargalo do sistema foi realizado um teste aumentando-se a capacidade produtiva para uma taxa de 1/0,5 (cenários 3 e 4). Na prática, isto poderia ser obtido, por exemplo, através de investimentos direcionados ao chão de fábrica, como a compra de novas máquinas, para a melhorar a eficiência da produção.

Como esperado, esta alteração faz com que o WIP diminua para todas as políticas de estoque. Por isso, as políticas (r,s,S) e (r,s,Q) que, nos cenários 1 e 2, não se adequavam de maneira satisfatória, apresentam uma melhora nos cenários 3 e 4. Apesar disso, nota-se que políticas que solicitam quantidades fixas (ex.: (r,s,Q)) possuem uma resposta pior a variações na demanda, quando comparadas com políticas do tipo mínimo-máximo (ex.: (r,s,S)).

Vale salientar que, nos cenários 3 e 4, as políticas de estoque (r,s,Q) e $(r,s,Q)+MTO$ tendem a apresentar resultados muito próximos. Isto ocorre porque o WIP tende a ser muito baixo e o período de revisão adotado é muito curto (uma hora). Para períodos de revisão, ou WIP, maiores, a diferença entre estas políticas também tende a aumentar. Já as políticas (r,s,S) e $(r,s,S)+MTO$ tendem a ter resultados muito próximos, uma vez que o período de revisão é muito curto e o WIP é muito baixo.

Constata-se que períodos de revisão maiores possuem uma resposta pior às variações na demanda, assim, ou mantém-se um estoque de segurança alto, o que aumenta os custos da empresa, ou corre-se o risco do estoque ficar vazio, acarretando na ocorrência de *backorders*. Enquanto isso, com a política MTO, quando o produtor recebe um pedido que não possa ser atendido pelo estoque armazenado, produz-se a quantidade necessária. Por isso, nessas situações, políticas híbridas de revisão periódica associadas à MTO, tendem a possuir uma resposta melhor. Como observado nos cenários 1 e 2, fato semelhante ocorre para um WIP elevado.

Na prática, as indústrias costumam evitar ao máximo a parada de produção devido aos custos de manutenção e sobrecarga nas máquinas. Em um cenário ideal, a produção deveria ser constante conseguindo suprir a demanda, o que seria expresso por uma política (r,Q) . Porém, as variações de demanda muitas vezes obrigam a utilização de políticas que consideram o estoque mínimo (ex.: (s,S)), que também tende a ser mais elevado para variações de demanda maiores.

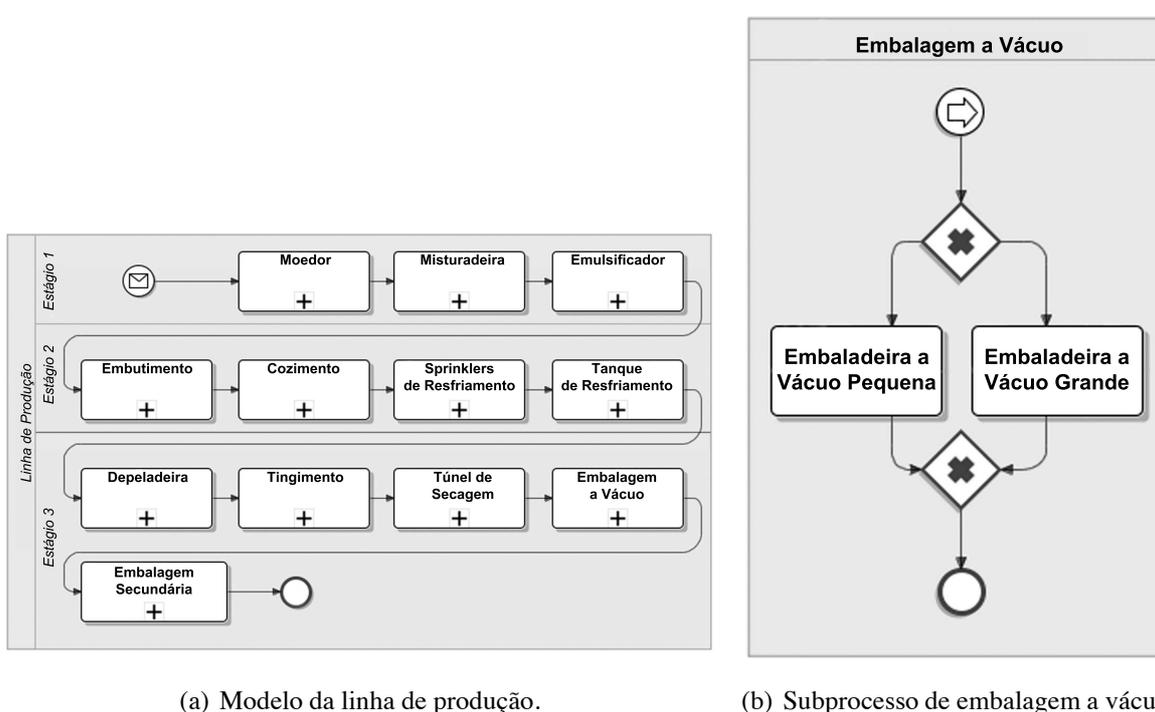
A utilização de políticas híbridas, considerando a política MTO, podem auxiliar a redução dos estoques, mantendo um nível de serviço desejável e, conseqüentemente, reduzindo os custos. Este estudo de caso, mesmo não utilizando valores reais para a taxa de produção, ou para os parâmetros das políticas de estoque, mostram que os modelos propostos permitem que se realize diversas avaliações, as quais podem auxiliar decisões com relação à(s) política(s) de estoque que a empresa deseje adotar.

7.4 Falhas e Impacto Ambiental em uma Linha de Produção

Esta seção apresenta um estudo de caso realizado em uma linha de produção de alimentos embutidos. O sistema funciona como um *pipeline*, no qual as atividades são executadas em serie e a saída de uma atividade funciona como entrada para a atividade subsequente. A notação de modelagem de processos de negócio (BPMN) foi utilizada para criar o modelo apresentado na Figura 7.12(a), que representa a linha de produção analisada. As raiais do modelo, agrupam as atividades em três estágios principais: preparação de massa (estágio 1), cozimento (estágio

2) e embalagem (estágio 3).

Cada atividade também foi refinada como mostrado na Figura 7.12(b), que detalha a atividade de embalagem a vácuo. As atividades ainda podem ser realizadas por uma ou mais máquinas que podem possuir características, como consumo de eletricidade e taxa de produção, semelhantes ou diferentes. As máquinas com características similares que executam uma mesma atividade foram agrupadas em *pools*. Sendo assim, cada *pool* é um conjunto com uma ou mais máquinas semelhantes. Esta linha de produção será utilizada para os estudos de caso subsequentes.



(a) Modelo da linha de produção.

(b) Subprocesso de embalagem a vácuo.

Figura 7.12 Modelo BPM para a situação atual da linha de produção.

Neste estudo de caso, serão analisados os seguintes aspectos relacionados ao impacto ambiental: consumo de energia e geração de resíduos sólidos. Além destes, também são consideradas a alocação de recursos humanos e as falhas em cada estágio. A inclusão das falhas no modelo permite que se analise o impacto das mesmas sobre as métricas de desempenho do sistema.

Algumas das matérias-primas utilizadas para a produção dos bens de consumo são embaladas com plástico, metal etc. Uma vez que não são reaproveitadas pela indústria, essas embalagens são vendidas e/ou doadas para terceiros que se encarregam do processo de disposição dos resíduos. Uma vez que a quantidade de matérias-primas cresce linearmente com a produção de

bens, pode-se assumir que a geração desse tipo de resíduo também o faz. Neste estudo foram considerados apenas os resíduos sólidos por conveniência, devido à pré-disposição dos dados por parte da indústria. Logo, não se fez necessário realizar uma medição *in loco*.

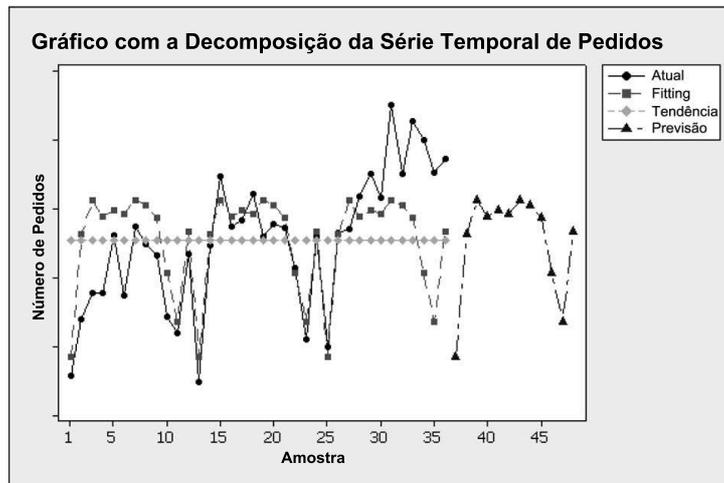
Além das embalagens das matérias-primas, o próprio processo produtivo também pode gerar resíduos. Na indústria alimentícia, alguns insumos são descartados completa ou parcialmente após serem utilizados. Esse tipo foi estimado com base na formulação dos produtos e na amostragem dos resíduos decorrentes do processo, que foram classificados de acordo com a proposta apresentada na Seção 5.2. Os valores referentes a geração de resíduos, consumo de energia, entre outros, são apresentados na Tabela 7.9. A coluna *I/O* indica se o recurso foi uma entrada (*I*) ou saída (*O*) do processo. As colunas η_{II} e $x_{ch,f}$ denotam respectivamente a eficiência exergetica e a exergia química da fonte energética (Kotas, 1985; Oliveira Filho, 1995; Dincer et al., 2004).

Tabela 7.9 Parâmetros do sistema por estágio da linha de produção.

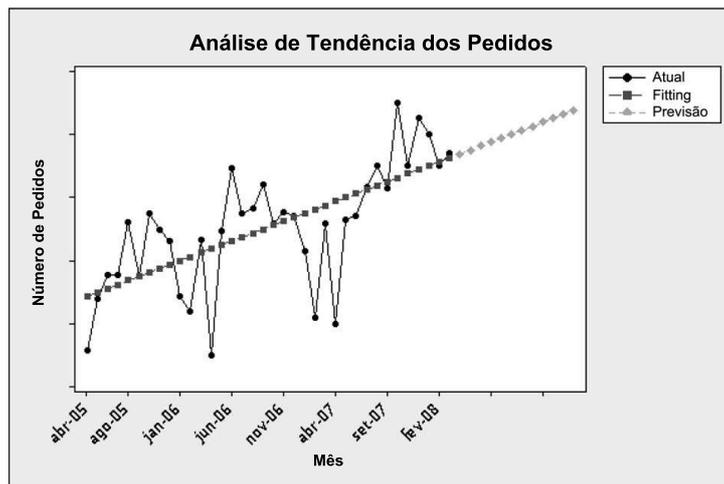
Material	Un./ton.	Alias	I/O	Utilização	η_{II}	$x_{ch,f}$ (kJ/kg)	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3
Eletricidade	<i>kW</i>	el	I	Máquinas	0,920	3600	63,68	102,94	22,96
Gás Natural	<i>m</i> ³	gas	I	Cozimento	0,233	51702	-	26,76	-
Recursos Humanos	<i>qty.</i>	hr	I	-	-	-	-	-	6,52
Papel/Papelão	<i>kg</i>	card	O	-	-	-	3,742	-	-
Matéria Orgânica	<i>kg</i>	org	O	-	-	-	-	6,287	-
Madeira	<i>kg</i>	wood	O	-	-	-	0,152	-	-
Plástico (denso)	<i>kg</i>	dense_plst	O	-	-	-	0,917	-	-
Plástico (filme)	<i>kg</i>	film_plst	O	-	-	-	-	6,688	-
Metal Ferroso	<i>kg</i>	ferrous	O	-	-	-	0,344	-	-
Metal Não Ferroso	<i>kg</i>	nferrous	O	-	-	-	0,036	-	-

A linha de produção possui um comportamento semelhante a um *pipeline*, no qual cada componente se conecta sequencialmente ao componente seguinte. Os dados históricos da produção foram obtidos e analisados estatisticamente para este trabalho. A análise dos dados mostrou que havia *outliers* positivos e negativos na produção, os quais foram removidos através da análise do IQR. Uma vez que foram encontrados poucos *outliers* nos dados, pode-se inferir que esses dados eram confiáveis.

Livres de *outliers*, os dados históricos foram decompostos com o objetivo de remover tendências positivas ou negativas (vide Figura 7.13(a)). Essas tendências de aumento ou queda da produção interfeririam no desvio padrão e na média dos dados, afetando os resultados do modelo. Caso essa tendência não fosse removida, a média seria deslocada positivamente (tendência de aumento) ou negativamente (tendência de queda). A sazonalidade também afeta a produção e a demanda do sistema, porém ela precisa ser preservada e será representada ma-



(a) Amostra livre de tendência.



(b) Análise de tendência.

Figura 7.13 Análise da amostra.

tematicamente pelo desvio padrão da amostra. No caso do modelo SRN, esse desvio será utilizado na aproximação por fases das transições.

A análise da tendência foi utilizada a fim de se realizar uma previsão do aumento da produção para os doze meses posteriores ao período analisado (vide Figura 7.13(b)). Essa previsão pode ser utilizada para estimar, por exemplo, o GWP relacionado à linha de produção no ano seguinte. Os valores do eixo y das figuras representam os pedidos de produção para a linha e foram omitidos intencionalmente por questão de confidencialidade com a empresa.

A Figura 7.14 apresenta o modelo SRN para a linha de produção analisada. Pode-se observar que as falhas foram modeladas diretamente no modelo de desempenho, embora algumas

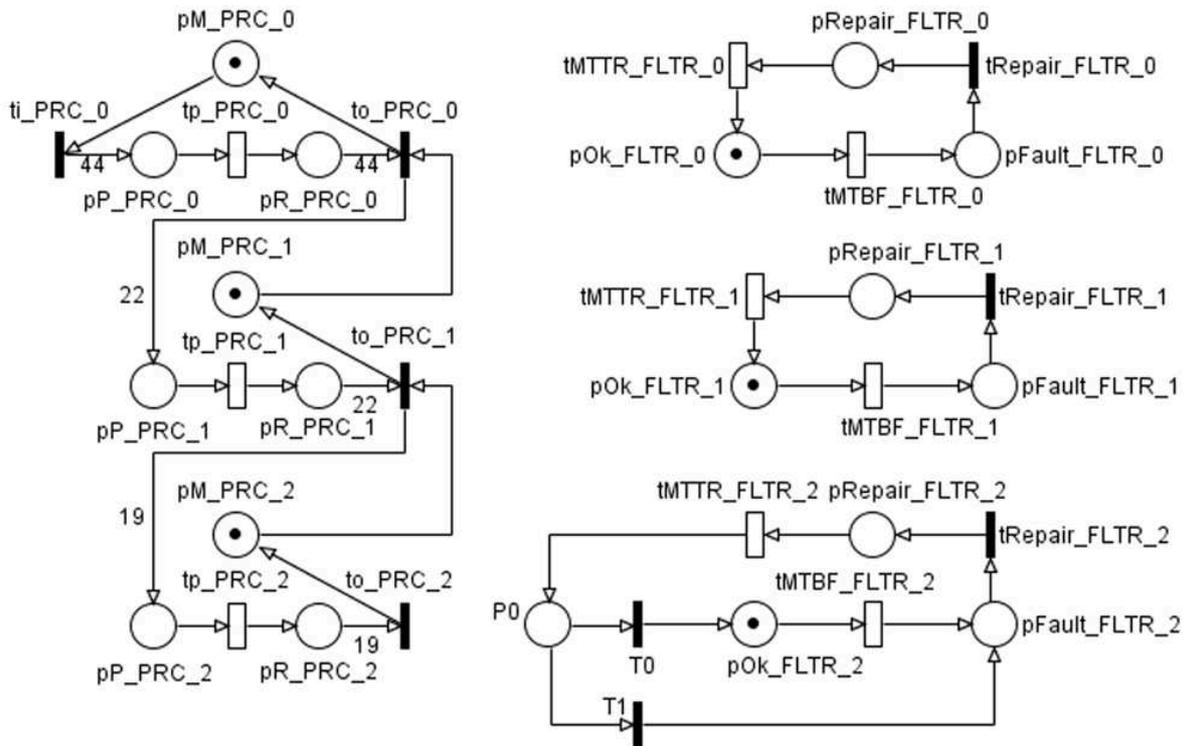


Figura 7.14 Modelo SRN para a linha de produção c/ aproximação por fases.

abordagens busquem modelá-las separadamente. Porém, como ocorre neste estudo de caso, o alto índice de falhas obriga que estas sejam incluídas no modelo de desempenho, uma vez que elas impactam diretamente as métricas de desempenho do sistema.

A Tabela 7.10 apresenta as funções de *reward* analisadas neste estudo de caso e os resultados para os três experimentos realizados. O primeiro experimento despreza a ocorrência de falhas na linha de produção. No segundo experimento, consideram-se as falhas, que são resolvidas por uma equipe de manutenção sem limitação de recursos. No terceiro cenário, considera-se que a equipe de manutenção possui apenas um recurso disponível. Os resultados apresentados foram obtidos utilizando-se o SPNP (Hirel et al., 2000). Essas métricas foram aferidas para o regime estacionário utilizando a simulação estacionária com um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 7.10: Funções de *reward* e experimentos.

Métrica	Descrição	Expressão	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
rate1 (un./h)	Throughput estágio 1	return rate("tp_PRC_0")/44,0;	3,9782	3,818	3,8224
rate2 (un./h)	Throughput estágio 2	return rate("tp_PRC_1")/22,0;	3,9784	3,8174	3,8211
rate3 (un./h)	Throughput estágio 3	return rate("tp_PRC_2")/19,0;	3,9775	3,8155	3,8188
utilization1 (%)	Utilização estágio 1	return mark("pP_PRC_0")>0? 1,0:0,0;	0,9053	0,8747	0,8757
utilization2 (%)	Utilização estágio 2	return mark("pP_PRC_1")>0? 1,0:0,0;	0,7674	0,7693	0,7715
utilization3 (%)	Utilização estágio 2	return mark("pP_PRC_2")>0? 1,0:0,0;	0,8407	0,8089	0,8072
operating1 (%)	Estágio 1 em operação	return enabled("tp_PRC_0")>0? 1,0:0,0;	0,9053	0,8688	0,8699
operating2 (%)	Estágio 2 em operação	return enabled("tp_PRC_1")>0? 1,0:0,0;	0,7674	0,7364	0,7371
operating3 (%)	Estágio 3 em operação	return enabled("tp_PRC_2")>0? 1,0:0,0;	0,8011	0,7685	0,7692
el1 (kWh/h)	Consumo eletricidade estágio 1	return (63,6812*rate1());	253,3373	243,133	243,4168
el2 (kWh/h)	Consumo eletricidade estágio 2	return (102,9402*rate2());	409,5412	392,9625	393,3459
el3 (kWh/h)	Consumo eletricidade estágio 3	return (22,9600*rate3());	91,3231	87,6042	87,6793
gas2 (m ³ /h)	Consumo gás estágio 2	return (26,7559*rate2());	106,4467	102,1376	102,2372

continua na próxima página...

Tabela 7.10 – continuação da página anterior

Métrica	Descrição	Expressão	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
hr3 (un./h)	Recursos humanos estágio 3	return (6,52*rate3());	25,9332	24,8772	24,8985
card1 (kg/h)	Descarte papelão estágio 1	return (3,7423*rate1());	14,8877	14,288	14,3047
org3 (kg/h)	Descarte lixo orgânico estágio 3	return (6,2870*rate3());	25,0065	23,9881	24,0087
wood1 (kg/h)	Descarte madeira estágio 1	return (0,1516*rate1());	0,6031	0,5788	0,5795
dense_plst1 (kg/h)	Descarte plástico denso estágio 1	return (0,9167*rate1());	3,6468	3,4999	3,5040
film_plst3 (kg/h)	Descarte plástico filme estágio 3	return (6,6881*rate3());	26,6018	25,5185	25,5404
ferrous1 (kg/h)	Descarte ferro estágio 1	return (0,3441*rate1());	1,3689	1,3138	1,3153
nferrous1 (kg/h)	Descarte metal não ferroso estágio 1	return (0,0355*rate1());	0,1412	0,1355	0,1357
X_in_el1 (MJ/h)	Exergia entrada eletricidade estágio 1	return (3,6*e1());	912,0141	875,2788	876,3003
X_in_el2 (MJ/h)	Exergia entrada eletricidade estágio 2	return (3,6*e2());	1474,3483	1414,665	1416,0451
X_in_el3 (MJ/h)	Exergia entrada eletricidade estágio 3	return (3,6*e3());	328,7632	315,3751	315,6456
X_in_gas2 (MJ/h)	Exergia entrada gás estágio 2	return (51,702*0,714*gas2());	3929,5038	3770,433	3774,1112
X_out_power (MJ/h)	Exergia saída para máquinas	return 0,92*(X_in_el1()+X_in_el2()+X_in_el3());	2497,9156	2396,8935	2399,3518

continua na próxima página...

Tabela 7.10 – continuação da página anterior

Métrica	Descrição	Expressão	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
X_out_cooking (MJ/h)	Exergia saída para cozimento	return (0,233*X_in_gas2());	915,5744	878,5109	879,3679
qrepairing1 (un./h)	Estágio 1 em reparo	return mark("pRepair_FLTR_0");	0,006	0,0058	0,0057
qrepairing2 (un./h)	Estágio 2 em reparo	return mark("pRepair_FLTR_1");	0,0332	0,0329	0,0344
qrepairing3 (un./h)	Estágio 3 em reparo	return mark("pRepair_FLTR_2");	0,0395	0,0404	0,0379
qwaiting_repair1 (un./h)	Estágio 1 aguardando reparo	return mark("pFault_FLTR_0");	0	0	0,0001
qwaiting_repair2 (un./h)	Estágio 2 aguardando reparo	return mark("pFault_FLTR_1");	0	0	0,0001
qwaiting_repair3 (un./h)	Estágio 3 aguardando reparo	return mark("pFault_FLTR_2");	0	0	0,0001
gwp_el (kgCO2eq/h)	GWP eletricidade	return 0,54418*(el1()+el2()+ el3());	410,4214	393,8229	394,2268
gwp_gas (kgCO2eq/h)	GWP gás	return 2,0133*gas2();	214,3091	205,6336	205,8342
gwp_card (kgCO2eq/h)	GWP papelão	return 0,55*card1();	8,1882	7,8584	7,8676

continua na próxima página...

Tabela 7.10 – continuação da página anterior

Métrica	Descrição	Expressão	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
gwp_org (kgCO ₂ eq/h)	GWP material orgânico	return 0,23*org3();	5,7515	5,5173	5,5220
gwp_wood (kgCO ₂ eq/h)	GWP madeira	return 0,93*wood1();	0,5609	0,5383	0,5389
gwp_dense_plst (kgCO ₂ eq/h)	GWP plástico denso	return 0,04*dense_plst1();	0,1459	0,14	0,1402
gwp_film_plst (kgCO ₂ eq/h)	GWP plástico denso	return 0,035*film_plst3();	0,9311	0,8931	0,8939
gwp_ferrous (kgCO ₂ eq/h)	GWP ferro	return 0,01*ferrous1();	0,0137	0,0131	0,0132
gwp_nferrous (kgCO ₂ eq/h)	GWP metal não ferroso	return 0,01*nferrous1();	0,0014	0,0014	0,0014
gwp_total (kgCO ₂ eq/h)	GWP total	return gwp_el()+gwp_gas()+ gwp_card()+gwp_org()+ gwp_wood()+gwp_dense_plst()+ gwp_film_plst()+gwp_ferrous()+ gwp_nferrous();	640,3231	614,4182	615,0381
gwp_per_tonne (kgCO ₂ eq/h)	GWP por tonelada	return gwp_total()/rate3();	160,9869	161,0315	161,0559

continua na próxima página...

Tabela 7.10 – continuação da página anterior

Métrica	Descrição	Expressão	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
prob_gwp_per_tonne_gt_200 (kgCO2eq/h)	Prob. GWP por tonelada maior 200	return gwp_per_tonne()>200? 1,0:0,0;	0,163	0,1593	0,1594
prob_gwp_per_tonne_le_200 (kgCO2eq/h)	Prob. GWP por tonelada menor igual 200	return gwp_per_tonne()<=200? 1,0:0,0;	0,8011	0,7685	0,7692
prob_gwp_per_tonne_gt_100 (kgCO2eq/h)	Prob. GWP por tonelada maior 100	return gwp_per_tonne()>100? 1,0:0,0;	0,7688	0,7389	0,7396
prob_gwp_per_tonne_le_100 (kgCO2eq/h)	Prob. GWP por tonelada menor igual 200	return gwp_per_tonne()<=100? 1,0:0,0;	0,1954	0,1889	0,1890

Considerando a premissa de que todas as métricas do modelo (ex.: consumo de eletricidade e geração de detritos) derivam das taxas de produção, a validação precisa ser feita apenas sobre as métricas de *throughput*. No modelo, a taxa máxima permitida será a taxa de chegada de pedidos, que nesse caso é taxa do moedor (4 ton/h). Logo, para o cenário 1, que não possui a interferência de falhas, espera-se que o sistema produza em sua capacidade máxima. Neste cenário, as métricas de *throughput* de cada estágio são de aproximadamente 3,978, resultando em um erro de 0,55%.

O cenário 2 representa a situação atual do sistema, logo, espera-se que o valor da métrica de produção seja próximo ao valor medido no sistema. A medição mostrou que a linha de produção produz 3,7 ton/h em média. Comparando esta produção com o *throughput* do terceiro estágio do cenário 2 (3,8155 ton/h), observa-se um erro de 3,12%, que está dentro de um limite aceitável para o modelo. Logo, o modelo é válido.

Os resultados dos experimentos mostram que as falhas reduzem em aproximadamente 4% a taxa de produção (de 3,9775 para 3,8155). O cenário que considera uma equipe de manutenção limitada apresenta resultados semelhantes aos apresentados pelo cenário que não considera essa limitação. Essa diferença é decorrente dos erros inerentes à simulação do modelo. Assim, considerando-se as taxas de falha e manutenção analisadas, uma única equipe consegue suprir a necessidade de realização de manutenções corretivas no sistema. Porém, caso a ocorrência de falhas venha a aumentar, novos cenários precisarão ser analisados a fim de observar se essa equipe única continuará sendo suficiente.

As métricas de utilização (*utilizationx*) indicam a probabilidade de o estágio estar em uso ou falhar. Já as métricas de operação (*operatingx*) indicam a probabilidade de o estágio estar efetivamente em operação (ou seja, desconsideram os estados em que o estágio está falho). A diferença entre essas métricas provê informação sobre o impacto das falhas sobre a produção. Observa-se que os estágios mais impactados são o 2 e o 3. Logo, ações de manutenção preventiva deveriam ser priorizadas nos mesmos. Além disso, a baixa utilização no segundo estágio indica que este é um provável gargalo do sistema.

Com base na operação atual da indústria (cenário 2), a linha de produção analisada é responsável por um GWP de $\sim 161 \text{ kgCO}_2\text{eq/ton}$ de bem produzido. Esse valor foi calculado utilizando-se os fatores de conversão disponibilizados pela DEFRA (DEFRA - Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2009). As métricas *prob_gwp_per_tonne_le_100*, *prob_gwp_per_tonne_gt_100*, *prob_gwp_per_tonne_le_200* e *prob_gwp_per_tonne_gt_200* indicam a probabilidade de o GWP total do sistema ser menor

que ou igual a 100, maior que 100, menor que ou igual a 200 e maior que 200, respectivamente. Esses valores foram escolhidos por englobar a média do GWP da linha de produção. Os resultados dessas métricas mostram que, mesmo que a média do GWP seja de 161 $kgCO_2eq/ton$, existe uma probabilidade de aproximadamente 16% de esse valor estar acima de 200 $kgCO_2eq/ton$, assim como a probabilidade de estar abaixo de 100 $kgCO_2eq/ton$ é de quase 20%. Consequentemente, há uma probabilidade de aproximadamente 80% do GWP estar entre 100 e 200 $kgCO_2eq/ton$. Essas métricas foram obtidas graças à utilização das SRNs. Utilizando outro tipo de SPN, seria necessário realizar-se uma análise diretamente sobre a CM utilizando a mesma estratégia das SRNs, ou seja, convertendo-se a CM em um MRM.

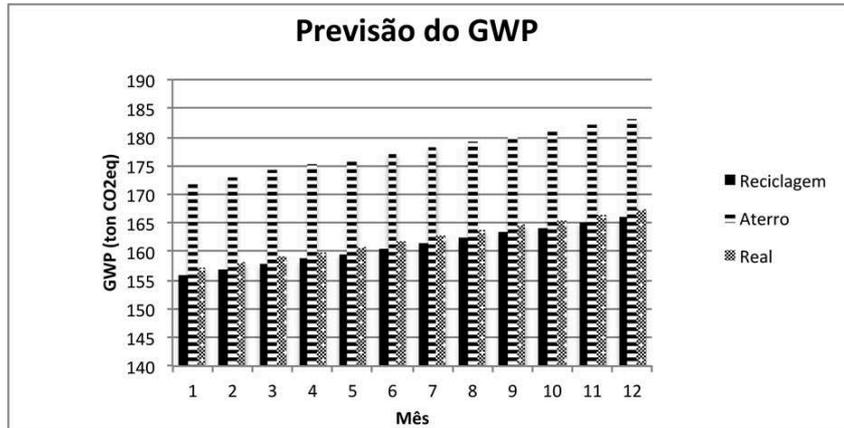
Com base na previsão de demanda apresentada na Figura 7.13(b), a quantidade total de GWP para o ano seguinte pode ser estimada. A Figura 7.15(a) mostra essa previsão para os doze meses seguintes, considerando três cenários diferentes: todo resíduo é enviado para reciclagem/compostagem; todo resíduo é enviado para aterros; e é considerada a destinação real dos resíduos.

A Figura 7.15(b) mostra a participação de cada recurso utilizado sobre o GWP do sistema, apresentada separadamente para as fontes energéticas e para os materiais utilizados na produção do bem. Como esperado, o consumo de energia possui uma grande participação, sendo responsável por mais de 95% do GWP da linha. Somente a eletricidade é responsável por mais de 50% do GWP.

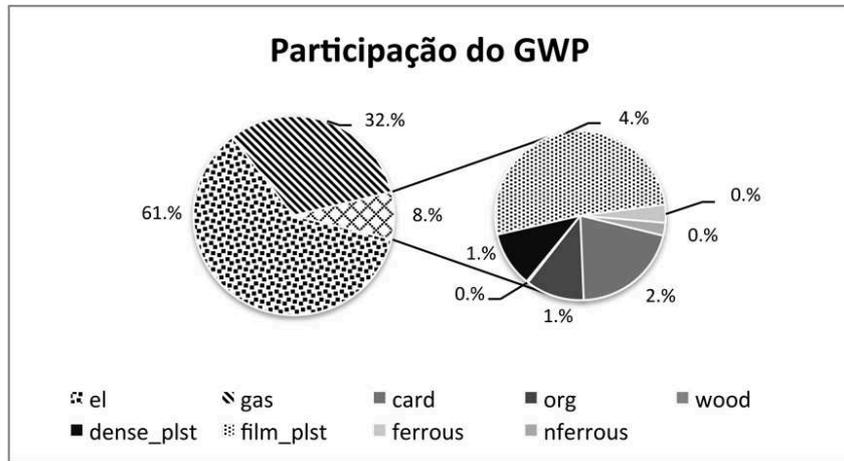
Este estudo considera apenas as atividades e os insumos relacionados diretamente com a linha de produção. Assim, o armazenamento de produtos, o transporte e outras atividades auxiliares não foram considerados propositadamente. Isto porque a metodologia utilizada considera o LCA *gate-to-gate*. É importante ressaltar que o fator de conversão para a eletricidade varia consideravelmente de um país para outro. Neste estudo, foi adotado o fator do Reino Unido. Caso fosse considerado o fator de conversão do Brasil, a participação da eletricidade sobre o GWP e o valor total do GWP do sistema teriam uma queda substancial.

A Tabela 7.11 apresenta a eficiência exergética utilizada para realizar uma comparação entre a exergia e o GWP do sistema. No caso da utilização de gás natural e óleo combustível para o funcionamento do maquinário, foi utilizada a eficiência para converter esses combustíveis em energia elétrica. Com base na exergia de saída de cada atividade (Tabela 7.10), a quantidade de combustível necessária para gerar a mesma exergia é estimada considerando-se a Equação (5.1).

Por exemplo, considerando-se o gás natural como única fonte de energia e a sua eficiência



(a) Previsão.



(b) Participação.

Figura 7.15 Global Warming Potential da linha de produção.

Tabela 7.11 Eficiência exergética por fonte e utilização.

Fonte	Utilização	Eficiência (η_{II})	$x_{ch,f}$ (kJ/kg)
Eletricidade	Cozimento	0,1150	3600
Gás Natural	Maquinário	0,2931	51702
Óleo Combustível	Maquinário	0,3207	47101
Óleo Combustível	Cozimento	0,2330	47101

para cozimento (Tabela 7.9) e geração de eletricidade (Tabela 7.11):

$$X_{in,gas} = \frac{2396893,5}{0,2931} + \frac{878510,9}{0,233} \quad \therefore$$

$$m_{gas} = 11948165,9029/51702 \quad X_{in,gas}/x_{ch,gas} \cong 231 \text{ kg}$$

Considerando a densidade de $0,714 \text{ kg/m}^3$ do gás natural, 231 kg deste gás é equivalente a $323,53 \text{ m}^3$. Sabendo-se que o fator GWP do gás natural é de $2,0133 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^3$, o GWP nesse cenário seria de aproximadamente $651,36 \text{ kgCO}_2\text{eq}$.

Com base na exergia de entrada, o GWP foi calculado e comparado com a situação atual da linha de produção. Com isso, tem-se o GWP resultante dos recursos consumidos para fins energéticos. A Figura 7.16 apresenta essa comparação. Nos gráficos apresentados nessa figura, as séries que indicam *Mesma Eficiência* consideram uma situação hipotética em que a eficiência exergética $\eta_{II,act,f}$ permanece inalterada. As séries que indicam *Eficiência Estimada* consideram as mudanças na eficiência exergética de acordo com a fonte e a atividade analisada.

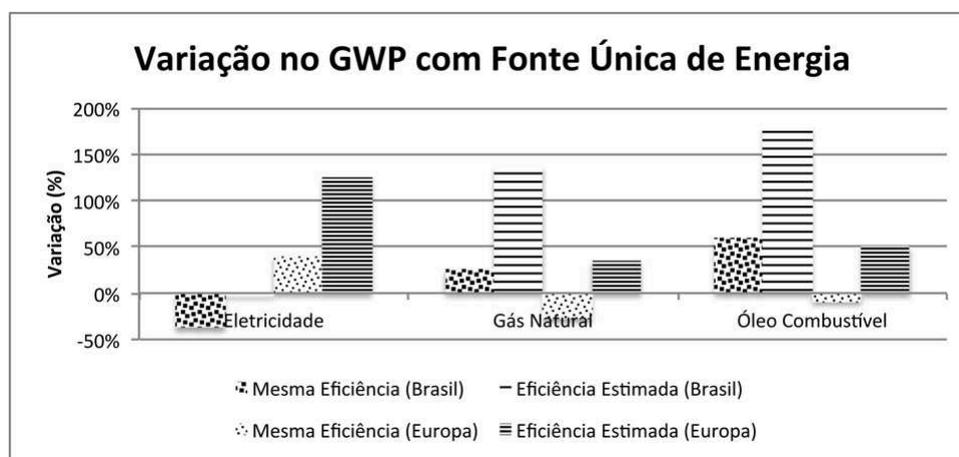


Figura 7.16 Variação no GWP alterando-se a fonte energética utilizada.

É possível observar que, na situação hipotética na qual a eficiência permanece inalterada, a utilização do gás natural como fonte única de energia acarretaria uma queda do GWP nos países europeus, enquanto no Brasil essa opção resultaria em uma elevação do GWP. Isso ocorre porque, no Brasil, o fator GWP da eletricidade é bem menor que o do gás natural, devido à grande utilização de usinas hidrelétricas para geração de eletricidade.

Considerando-se as eficiências reais, apesar de a eficiência exergética da eletricidade para o cozimento ser menor que a do gás natural, a variação do GWP permanece praticamente constante, quando a eletricidade é utilizada como única fonte de energia, no Brasil. Além disso, apesar de o óleo combustível ter uma exergia química elevada, a sua alta concentração de GWP torna essa fonte a pior alternativa, do ponto de vista ambiental.

7.5 Otimizando o Maquinário de uma Linha de Produção

Este estudo teve o intuito de otimizar o maquinário da linha de produção da indústria analisada, focando-se no consumo de água, eletricidade, gás natural, geração de resíduos e na utilização das máquinas disponíveis. O objetivo é balancear o *throughput* do sistema com os requisitos ambientais, selecionando a quantidade ideal de máquinas para cada uma das atividades da linha de produção. Uma vez que era esperado um aumento na demanda do produto fabricado nesta linha de produção, também foi realizada uma análise de sensibilidade do sistema ao aumento da demanda. O modelo apresentado na Figura 7.12, foi utilizado como base para criar o modelo SRN apresentado na Figura 7.17. Este estudo de caso foi publicado em (Alves et al., 2013).

A Tabela 7.12 fornece um resumo dos fatores GWP (DEFRA - Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2011) para cada um dos itens classificados para a avaliação. A unidade para cada um dos itens classificados é apresentada na coluna *Unidade*. Outrossim, a coluna *Fator GWP* se refere à quantidade de CO_2eq para cada unidade do item, de acordo com a sua utilização. Os valores negativos indicam um impacto ambiental positivo e vice-versa. As matérias-primas utilizadas não foram consideradas neste estudo. Foi utilizado o Fator GWP da eletricidade do Reino Unido fornecido em (DEFRA - Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2011). No Brasil, este fator é consideravelmente menor devido à grande participação da energia proveniente de hidrelétricas, que é mais limpa. Utilizando-se o fator do Reino Unido, tem-se resultados mais próximos dos obtidos em análise realizadas nas empresas no restante do mundo, principalmente nas localizadas na Europa e Estados Unidos. A Tabela 7.13 mostra os dados que serão incluídos no modelo, e que foram obtidos a partir da documentação das máquinas da linha de produção e dos relatórios de produção. A primeira coluna apresenta o parâmetro, enquanto as colunas seguintes mostram o valor deste parâmetro para a respectiva máquina apresentada na coluna. Os dados desta tabela mostram que apenas os *sprinklers* não consomem eletricidade e que apenas as estufas consomem gás natural. O consumo de eletricidade das máquinas foi aproximado considerando que uma vez estando ligadas, elas consomem a mesma quantidade de eletricidade, estejam processando alimentos ou não. Analogamente, também foi considerado que o consumo de gás natural das estufas não varia com a medida que o equipamento é depreciado, ou com variações na temperatura do ambiente. Assim, os consumos de gás natural e de eletricidade são representados através de expressões de *taxas de reward*, associadas aos lugares do modelo.

O consumo de água pelos *sprinklers* e pelo tanque de resfriamento é contabilizado na cate-

Tabela 7.12 Classificação dos itens avaliados.

Material	Unidade	Classe	Destinação	Fator GWP
Materia Orgânica	kg	Resíduo	Compostagem	-0,039
Papelão	kg	Resíduo	Reciclagem	-0,240
Madeira	kg	Resíduo	Reciclagem	-0,250
Plástico Denso	kg	Resíduo	Aterro	0,040
Plástico Filme	kg	Resíduo	Aterro	0,040
Metal Ferroso	kg	Resíduo	Aterro	0,010
Metal Não-Ferroso	kg	Resíduo	Aterro	0,010
Água	liter	Resíduo	Aterro	0,000276
Eletricidade*	kWh	Energia	-	0,5542
Gás Natural	m ³	Energia	-	2,0133

*Fator GWP considerando o consumo da eletricidade no Reino Unido.

goria de resíduos. Esta abordagem foi adotada uma vez que a água não é considerada matéria prima, sendo completamente descartada após seu consumo. O *sprinklers* são responsáveis pelo choque térmico no produto após o seu cozimento, efetuando um “banho” durante vinte minutos. Após esse “banho”, os produtos são deixados descansando no tanque, que é completamente cheio de água, durante uma hora. Após sete horas, a água do tanque precisa ser completamente trocada, a fim de que não haja contaminação dos produtos. Desta forma, o consumo de água nos *sprinklers* é representado por *impulsos de reward* (em litros por tonelada). Já no tanque de resfriamento, este consumo é representado por *taxas de reward* (em litros por hora).

Algumas das matérias-primas, utilizadas na linha de produção, têm embalagens de plástico, ferro, entre outros. Uma vez que a matéria-prima é utilizada, suas embalagens não possuem utilidade para a indústria em questão. Estas embalagens são então destinadas a empresas que fazem a sua reciclagem. A fim de avaliar os resíduos provenientes da linha de produção, foi aferida a quantidade de embalagens descartadas. Uma vez que a quantidade de matérias-primas é diretamente proporcional à quantidade de produtos fabricados, a quantidade de resíduos provenientes das suas embalagens também cresce linearmente com a quantidade de produtos fabricados. Por conseguinte, foi possível estimar a quantidade resíduos provenientes das matérias-primas, por tonelada de produto acabado, a partir dos dados históricos da produção.

Algumas matérias-primas também são completa ou parcialmente descartadas após a sua utilização. Por exemplo, no caso da produção de salsichas, uma “embalagem” de celulose é uti-

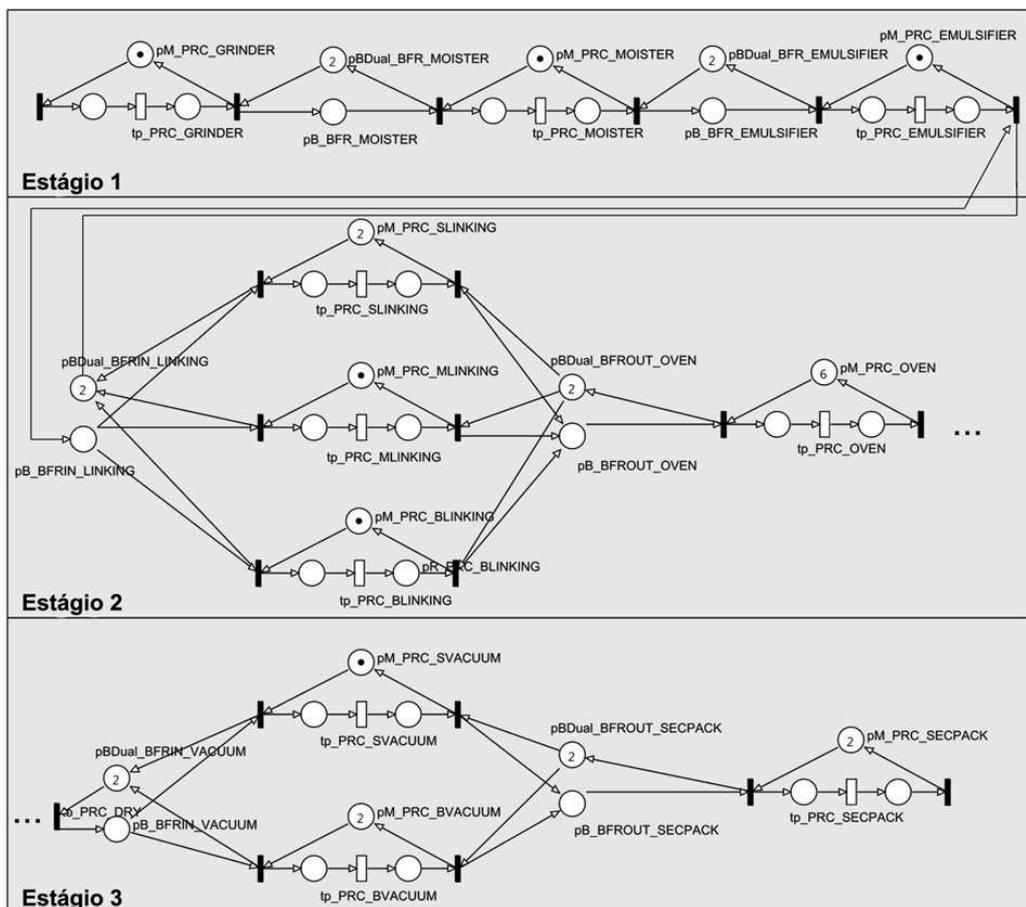


Figura 7.17 Parte da SRN para a otimização do maquinário da linha de produção.

lizada para dar forma ao produto. Após o cozimento, este insumo é completamente descartado. Este tipo de lixo orgânico geralmente precisa de um tratamento especial (ex.: compostagem) antes de ser completamente descartado. Para este tipo de resíduo, a quantidade consumida por tonelada de produto acabado foi estimada com base na formulação dos produtos analisados.

Os *pools* de máquinas da linha de produção são modelados utilizando o modelo SRN apresentado na Figura 6.10. A marcação inicial M do lugar pM representa a quantidade de máquinas disponíveis no *pool*. A Tabela 7.13 apresenta as quantidades de máquinas que estão disponíveis em cada *pool*, atualmente no sistema. Observa-se que existem três tipos de embutadeiras e dois tipos de embaladeiras a vácuo.

A Figura 7.17 apresenta uma parte do modelo SRN que representa a linha de produção. As atividades entre o cozimento e a embalagem a vácuo e o nome de alguns elementos foram omitidos intencionalmente com o intuito de melhorar a visualização do modelo. Este modelo

Tabela 7.13 Parâmetros da linha de produção.

Estágio 1						
Parâmetro	Moedor	Misturadeira	Emulsificador			
Tempo (h)	0,250	0,167	0,167			
Taxa (ton/h)	4,000	6,000	6,000			
Fontes Energéticas						
Eletricidade (kWh/h)	36,000	11,000	110,000			
Resíduos						
Papelão (kg/ton)	3,742	-	-			
Madeira (kg/ton)	0,152	-	-			
Plástico Denso (kg/ton)	0,917	-	-			
Metal Ferroso (kg/ton)	0,344	-	-			
Metal Não-Ferroso (kg/ton)	0,036	-	-			
Estágio 2						
Parâmetro	Embutideira Pequena	Embutideira Média	Embutideira Grande	Estufa	Sprinkler	Tanque
Tempo	1,250	0,769	0,556	1,175	0,392	1,000
Taxa	0,800	1,300	1,800	0,851	2,554	1,000
Fontes Energéticas						
Eletricidade (kWh/h)	12,000	13,000	15,000	30,000	-	2,200
Gás Natural (m3/h)	-	-	-	26,800	-	-
Resíduos						
Água (liters/ton)	-	-	-	-	353,749	-
Água (liters/h)	-	-	-	-	-	342,857
Plástico Filme (kg/ton)	1,370	2,227	3,084	-	-	-
Stage 3						
Parâmetro	Depeladeira	Chiller	Túnel de Secagem	Embaladeira a Vácuo Pequena	Embaladeira a Vácuo Grande	Empacotadores
Tempo	0,625	0,200	0,200	0,455	0,400	0,370
Taxa	1,600	5,000	5,000	2,200	2,500	2,700
Fontes Energéticas						
Eletricidade (kWh/h)	5,000	2,200	87,000	15,300	17,400	2,200
Resíduos						
Matéria Orgânica (kg/ton)	6,287	-	-	-	-	-

foi construído utilizando-se o modelo de *buffer* (Figura 6.9) e de *processos* (Figura 6.10). Esta SRN modela a quantidade atual de máquinas e de *pools* apresentadas na primeira coluna da Tabela 7.14. Por exemplo, a atividade de embutimento é executada pelas embutideiras pequenas, médias e grandes (Tabela 7.13). O modelo SRN mostra três *pools* de embutideiras (*SLINKING*, *MLINKING* e *BLINKING*) no *estágio 2* da linha de produção. A quantidade de máquinas nestes *pools* é representada pela marcação inicial dos lugares $pM_PRC_SLINKING$, $pM_PRC_MLINKING$, and $pM_PRC_BLINKING$, respectivamente.

Todas as transições estocásticas da SRN apresentada adotam a semântica *infinite-server*. Esta semântica é modelada dividindo-se a taxa da transição pelo seu grau de habilitação (Ciardo

et al., 1993). Outrossim, quando uma atividade pode ser realizada por mais de um *pool* de máquinas, as transições imediatas ti dos componentes dos *pools* entram em conflito. Este conflito é resolvido atribuindo uma prioridade mais alta para as transições dos componentes dos *pools* de maior capacidade. Por exemplo, as transições $ti_PRC_SLINKING$, $ti_PRC_MLINKING$ e $ti_PRC_BLINKING$ possuem prioridades 1, 2 e 3, respectivamente.

Os *buffers* do modelo possuem uma capacidade limitada a duas toneladas, representando a quantidade de produtos sem-acabados transitando entre duas atividades subjacentes. O *nível de utilização da capacidade instalada* (U) de um *pool* é a *relação entre a quantidade de máquinas que estão de fato processando produtos e a capacidade instalada*. Já a *capacidade ociosa* (UG) é o complemento do nível de utilização, ou seja, $UG = 1 - U$.

A seguir serão apresentados os modelos de otimização que têm o objetivo de determinar a quantidade de máquinas por *pool*. Nestes modelos, \mathbb{T} é o conjunto de atividades (ou seja, $\mathbb{T} = \{Misturadeira, \dots, Empacotamento Secundario\}$) e \mathbb{P}_t é o conjunto de *pools* de uma atividade $t \in \mathbb{T}$ (ex.: $\mathbb{P}_{Embutimento} = \{Embutideira Pequena, Embutideira Mdia, Embutideira Grande\}$). Para cada *pool* $p \in \mathbb{P}_t$ de cada atividade $t \in \mathbb{T}$ a variável Q_p representa a quantidade de máquinas no *pool* e para cada máquina, os parâmetros λ_p , EL_p , NG_p , W_p , GWP_p , X_{loss_p} são, respectivamente, sua taxa, a quantidade de eletricidade consumida, a quantidade de gás natural consumido, a quantidade de resíduos gerados, o GWP resultante e as perdas da exergia. Uma vez que a variável Q_p é inteira, o modelo de otimização foi definido como uma *programação inteira mista* (MIP)⁴ (Hillier et al., 1990). No modelo, a taxa do moedor representa a demanda da linha de produção, assim, o conjunto \mathbb{T} não considera o moedor. O objetivo dos modelos a seguir é encontrar a quantidade ótima de máquinas Q_p para cada *pool* p , considerando uma situação hipotética onde as máquinas do *pool* possam operar em sua capacidade máxima. Espera-se, assim, que a *capacidade ociosa* aferida pelo modelo SRN seja maior que a calculada pelo modelo de otimização, uma vez que a SRN é capaz de capturar as relações causais do sistema e possíveis gargalos.

Sejam ω_E , ω_W , ω_{GWP} , $\omega_{X_{loss}}$ e ω_R os respectivos pesos para a redução no consumo de fontes energéticas, geração de resíduos, GWP da linha de produção, perdas exergéticas e a diferença entre a taxa desejada (G_R) e a capacidade instalada máxima do *pool*. Estes pesos foram atribuídos de acordo com os objetivos do gestores da indústria. Por solicitação dos referidos gestores, os valores dos pesos não serão expostos nesta tese. As constantes G_{EL} , G_{NG} , G_W , G_{GWP} , $G_{X_{loss}}$ e G_R representam o valor desejado para o consumo de eletricidade,

⁴N. de T.: do inglês *Mixed Integer Programming*.

consumo de gás natural, geração de resíduos, GWP resultante, perdas exergéticas e taxa da atividade. A taxa desejada G_R será igual para todas as atividades do sistema, com o objetivo de se ter uma operação sincronizada na linha de produção, reduzindo a capacidade ociosa. As variáveis de folga para o consumo de recursos energéticos são definidas separadamente para a eletricidade (nd_{EL} e pd_{EL}) e para o gás natural (nd_{NG} e pd_{NG}), apesar do peso para o consumo de recursos energéticos ser único para ambos os recursos. Para os experimentos a seguir, foi incluída uma restrição que determina que a capacidade instalada para uma atividade não pode ser inferior a 10% da taxa que se deseja obter (G_R).

O primeiro experimento realizado tem o objetivo de obter uma taxa de 4 ton/h para cada atividade ($G_R = 4$), que é a capacidade instalada atual do moedor da linha de produção. O modelo de otimização formulado como uma programação por metas (GP) é definido abaixo. O valor de cada meta do modelo, exceto da meta da taxa, foi definido através de um programa linear que tinha objetivo de encontrar o valor ótimo para a meta, sem considerar as demais. Ou seja, a função objetivo era composta apenas pela meta desejada. Neste programa linear, todas as variáveis de folga e as restrições de metas foram removidas, uma vez que são específicas da programação por metas.

$$\begin{aligned} \text{minimizar } & \omega_E(nd_{EL} + pd_{EL}) + \omega_E(nd_{NG} + pd_{NG}) + \omega_W(nd_W + pd_W) \\ & + \omega_{GWP}(nd_{GWP} + pd_{GWP}) + \omega_{X_{loss}}(nd_{X_{loss}} + pd_{X_{loss}}) + \omega_R \sum_{t \in \mathbb{T}} (nd_{R_t} + pd_{R_t}) \end{aligned}$$

sujeito a

$$\left(\sum_{p \in \mathbb{P}_t} Q_p EL_p \right) + nd_{EL} - pd_{EL} = G_{EL}, \forall t \in \mathbb{T}$$

$$\left(\sum_{p \in \mathbb{P}_t} Q_p NG_p \right) + nd_{NG} - pd_{NG} = G_{NG}, \forall t \in \mathbb{T}$$

$$\left(\sum_{p \in \mathbb{P}_t} Q_p W_p \right) + nd_W - pd_W = G_W, \forall t \in \mathbb{T}$$

$$\left(\sum_{p \in \mathbb{P}_t} Q_p GWP_p \right) + nd_{GWP} - pd_{GWP} = G_{GWP}, \forall t \in \mathbb{T}$$

continua...

...continuação

$$\left(\sum_{p \in \mathbb{P}_t} Q_p X_{loss_p} \right) + nd_{X_{loss}} - pd_{X_{loss}} = G_{X_{loss}}, \forall t \in \mathbb{T}$$

$$\left(\sum_{p \in \mathbb{P}_t} Q_p \lambda_p \right) + nd_{R_t} - pd_{R_t} = G_R, \forall t \in \mathbb{T}$$

$$Q_p \in \mathbb{N}$$

$$nd_{R_t} \leq 0, 1G_R, \forall t \in \mathbb{T}$$

$$nd_{EL}pd_{EL} = nd_{NG}pd_{NG} = nd_Wpd_W = nd_{GWP}pd_{GWP} =$$

$$nd_{X_{loss}}pd_{X_{loss}} = \sum_{t \in \mathbb{T}} nd_{R_t}pd_{R_t} = 0$$

Durante a avaliação, os gestores informaram que esperavam um incremento considerável da demanda para o ano seguinte. Por isso, os segundo e terceiro experimentos consideram um incremento de 45% na demanda, representado por um aumento equivalente na meta da taxa de produção ($G_R = 5,8$). O segundo experimento foi feito sem considerar as metas ambientais, simplificando o modelo do primeiro experimento, que passa a ser:

$$\text{minimizar } \sum_{t \in \mathbb{T}} (nd_{R_t} + pd_{R_t})$$

sujeito a

$$\left(\sum_{p \in \mathbb{P}_t} Q_p \lambda_p \right) + nd_{R_t} - pd_{R_t} = 5,8, \forall t \in \mathbb{T}$$

$$nd_{R_t} \leq 0,58, \forall t \in \mathbb{T}$$

$$\sum_{p \in \mathbb{P}_t} nd_{R_t}pd_{R_t} = 0, \forall t \in \mathbb{T}$$

O terceiro experimento utiliza o mesmo modelo de otimização do primeiro, incrementando a meta da taxa de produção de 4 ton/h para 5,8 ton/h, tal qual o segundo experimento. A quantidade de máquinas em cada *pool* Q_p calculada a para os três experimentos é apresentada na Tabela 7.14. Estes valores foram utilizados para alterar o modelo SRN apresentado na Figura 7.17. Conforme salientado anteriormente, espera-se que as taxas das atividades encontradas a partir do modelo SRN sejam menores que as respectivas taxas de 4 ton/h e 5,8 ton/h definidas como metas nos modelos de otimização. Isto ocorre devido à limitação dos buffers

Tabela 7.14 Quantidade de máquinas por *pool* para cada cenário.

Pool	Componente SRN	Atual	EXP 1	EXP 2	EXP 3
Misturadeira	MOISTER	1	1	1	1
Emulsificador	EMULSIFIER	1	1	1	1
Embutideira Pequena	SLINKING	2	2	0	0
Embutideira Média	MLINKING	1	0	3	0
Embutideira Grande	BLINKING	1	2	1	3
Estufas	OVEN	6	5	7	7
Sprinklers	SPRINKLER	3	2	3	3
Tanque de Resfriamento	CHILLINGTANK	5	5	6	6
Depeladeira	PEELER	3	3	4	4
Chilers	CHILER	1	1	2	2
Túnel de Secagem	DRY	1	1	2	2
Embaladeira a Vácuo Pequena	SVACUUM	1	2	3	3
Embaladeira a Vácuo Grande	BVACUUM	2	0	0	0
Empacotadores	SECPACK	2	2	2	2
Total		31	28	36	35

EXP 1: Taxa de pedidos de 4 ton/h considerando metas ambientais.

EXP 2: Taxa de pedidos de 5,8 ton/h desconsiderando metas ambientais.

EXP 3: Taxa de pedidos de 5,8 ton/h considerando metas ambientais.

entre as tarefas, ao tempo gasto na alocação e liberação de recursos e à ocorrência de gargalos, que são representados pelo modelo SRN, mas não o são pelo modelo de otimização. Portanto, os resultados obtidos pelo modelo SRN são mais próximos aos que se espera obter no sistema real.

A listagem abaixo mostra os *rewards* definidos na SRN. Os valores utilizados nas expressões podem ser vistos na Tabela 7.13. O *rewards* denominados como “absolutos” se referem aos indicadores totais considerando um horizonte de tempo de uma hora. Os seus indicadores “relativos” são derivados da divisão do valor absoluto pelo *throughput* do sistema.

- *Throughput* de um *pool* de máquinas do tipo *X* (ton/h):

$$z_{TP_X} = rate(tp_PRC_X)$$

- Capacidade ociosa de um *pool* de máquinas do tipo *X* (%):

$$z_{UG_X} = \frac{\mu_0(pM_PRC_X) - \#pP_PRC_X}{\mu_0(pM_PRC_X)}$$

- Consumo absoluto de eletricidade (kWh/h)⁵:

$$\begin{aligned} z_{EL} = & 36\mu_0(pM_PRC_GRINDER) + 11\mu_0(pM_PRC_MOISTER) \\ & + 110\mu_0(pM_PRC_EMULSIFIER) + \dots \\ & + 17\mu_0(pM_PRC_BVACUUM) + 2,2\mu_0(pM_PRC_SECPACK) \end{aligned}$$

- Consumo absoluto de gás natural (m^3/h):

$$z_{NG} = 26,8\mu_0(pM_PRC_OVEN)$$

- Consumo absoluto de água ($litros/h$):

$$\begin{aligned} z_{water} = & 353,749rate(tp_PRC_SPRINKLER) \\ & + 342,857\mu_0(pM_PRC_CHILLINGTANK) \end{aligned}$$

- Quantidade absoluta de resíduos sólidos (kg/h)⁶:

$$\begin{aligned} z_{SW} = & 6,287 z_{TPPEELER} + 3,742 z_{TPGRINDER} + 0,152 z_{TPGRINDER} \\ & + 0,917 z_{TPGRINDER} + \dots \end{aligned}$$

- Quantidade de GWP absoluta (CO_2eq/h)⁷:

$$\begin{aligned} z_{GWP} = & 0,485 z_{EL} + 2,0133 z_{NG} + 0,000276 z_{water} \\ & - 0,245193 z_{TPPEELER} - 0,89808 z_{TPGRINDER} \\ & - 0,079496 z_{TPGRINDER} + 0,031178 z_{TPGRINDER} + \dots \end{aligned}$$

- Exergia de entrada absoluta para a eletricidade (kJ/h):

$$z_{X_{inEL}} = 3600 z_{EL}$$

- Exergia de entrada absoluta para o gás natural (kJ/h):

$$z_{X_{inNG}} = 38564,52 z_{NG}$$

⁵Foram omitidos os termos que se referem aos componentes entre o EMULSIFIER e o BVACUUM.

⁶Foram omitidos os termos que denotam os resíduos referentes aos itens listados após a linha que denota o plástico denso na Tabela 7.12.

⁷Foram omitidos os termos que denotam os resíduos referentes aos itens listados após a linha que denota o plástico denso na Tabela 7.12.

- Exergia de saída absoluta para o funcionamento das máquinas (kJ/h):

$$\dot{x}_{outPower} = 0,92 \dot{x}_{inEL}$$

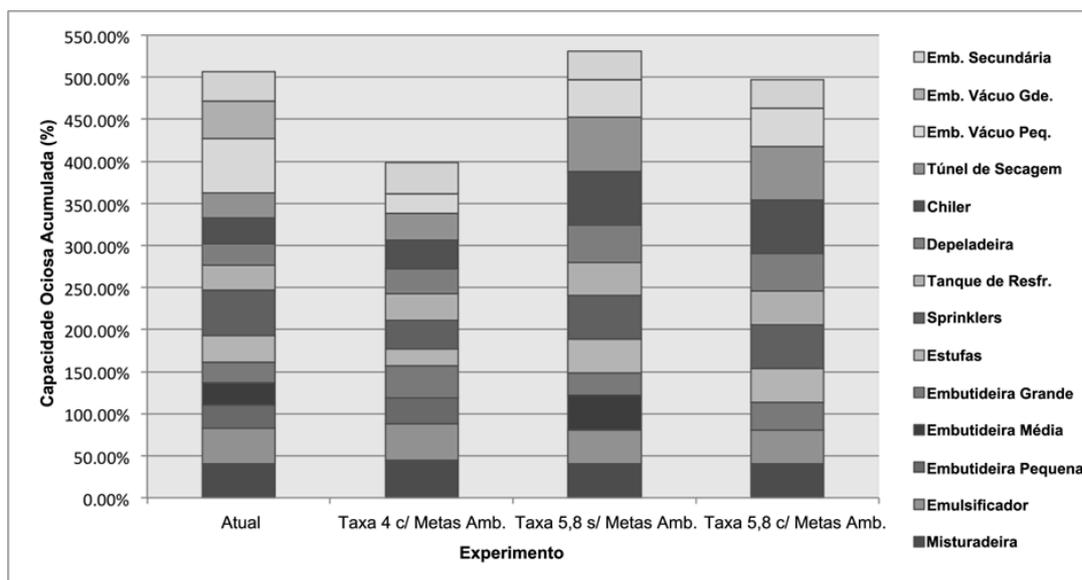
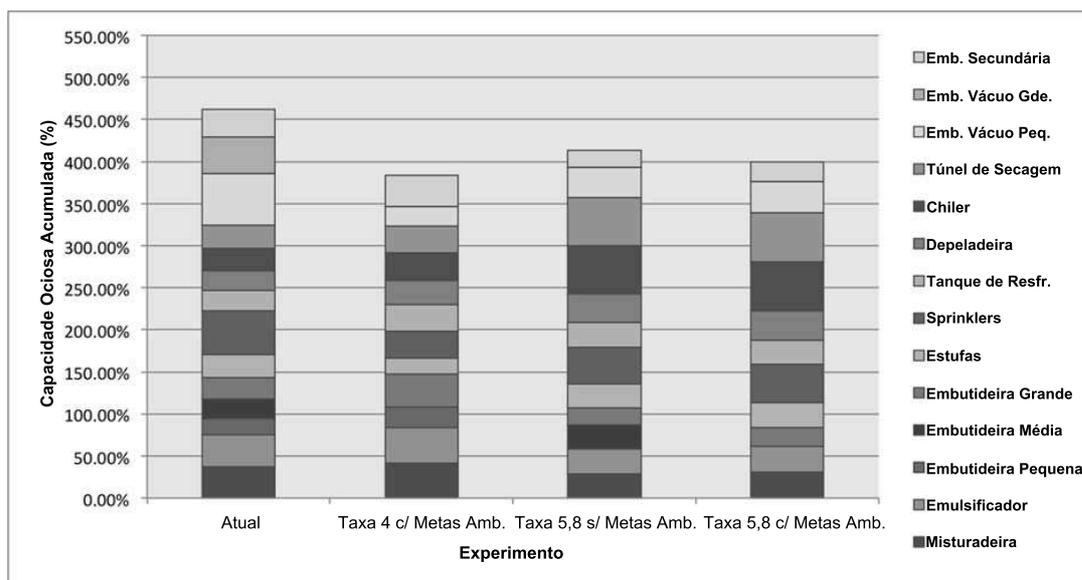
- Exergia de saída absoluta para o funcionamento o cozimento (kJ/h):

$$\dot{x}_{outCook} = 0,233 \dot{x}_{inNG}$$

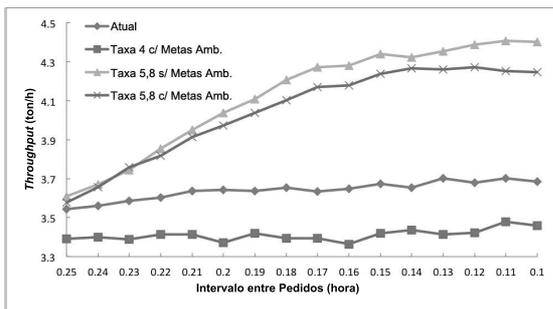
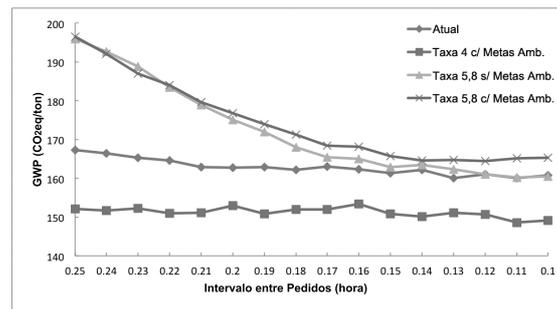
A Figura 7.18 mostra dois gráficos de colunas empilhadas que apresentam a capacidade ociosa para cada *pool* de máquinas do sistema. Estes gráficos mostram os resultados para os quatro cenários avaliados, o cenário atual e os três experimentos criados a partir do modelo de otimização. Um dos gráficos apresenta os resultados para a demanda atual de 4 ton/h e o outro para a demanda esperada em um ano de $5,8 \text{ ton/h}$. Nestes gráficos, cada seção destacada das colunas mostra a capacidade ociosa de um *pool* específico. Uma vez que os dois últimos experimentos (“Taxa 5,8 s/ Metas Amb.” e “Taxa 5,8 c/ Metas Amb.”) foram otimizados para uma demanda de $5,8 \text{ ton/h}$, seus *pools* operam com uma folga considerável quando o sistema é submetido a uma demanda de 4 ton/h (Figura 7.18(a)). Quando comparados com os resultados do primeiro experimento (“Taxa 4 c/ Metas Amb.”), os *pools* destes experimentos operam com aproximadamente 100% a mais de capacidade ociosa acumulada. Porém, quando confrontados com uma demanda de “ $5,8 \text{ ton/h}$ ”, a capacidade ociosa acumulada dos três experimentos é equivalente ($\cong 400\%$). Também é possível observar que todos os experimentos reduzem a capacidade ociosa atual do sistema, que, por sua vez, é maior que 500%.

Cada seção das colunas, mostra a capacidade ociosa de um *pool*. As seções referentes aos *pools* dos “Sprinklers”, “Chillers” e do “Túnel de Secagem” são as maiores. Consequentemente, são estes *pools* que possuem as maiores capacidades ociosas, o que pode indicar que eles foram sobredimensionados. Por exemplo, os dois túneis de secagem possuem uma taxa máxima de 10 ton/h , que é muito maior que a demanda objetivo de $5,8 \text{ ton/h}$. Esta folga é observada nas variáveis de folga dos modelos da programação por metas e nas capacidades ociosas dos gráficos da Figura 7.18. O tamanho limitado dos *buffers* intermediários, pode estar causando a ocorrência de gargalos. Estes gargalos aumentam a capacidade ociosa dos *pools* posteriores à ocorrência do gargalo. Dada a natureza alimentícia do produto analisado, não é possível criar estoques de produto semi-acabado ao longo da linha de produção. Se este fosse o caso, também seria possível aumentar o tamanho dos *buffers* intermediários, criando estoques de produtos semi-acabados, o que reduziria a capacidade ociosa dos *pools* subjacentes.

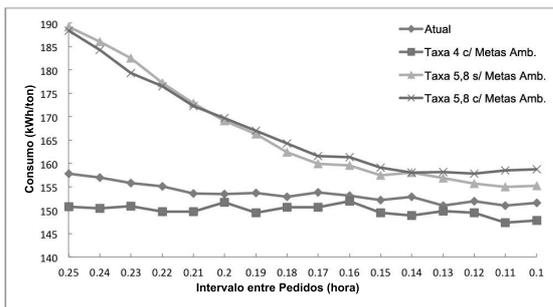
Também foi realizada uma análise de sensibilidade com os modelos SRN, variando a demanda de um intervalo entre pedidos de $0,25 \text{ h}$ (4 ton/h) até $0,1 \text{ h}$ (10 ton/h). Considera-se

(a) Intervalo entre pedidos de 0,25 h (taxa $\cong 4 \text{ ton/h}$).(b) Intervalo entre pedidos de 0,17 h (taxa $\cong 5,8 \text{ ton/h}$).**Figura 7.18** Capacidade ociosa dos *pools*.

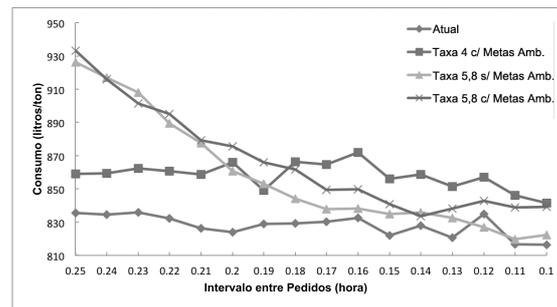
que cada pedido tem um tamanho fixo de uma tonelada. Uma vez que espera-se que a demanda do sistema aumente de 4 *ton/h* para 5,8 *ton/h* em um ano, a análise mostra a sensibilidade do sistema ao longo do ano enquanto a demanda aumenta paulatinamente. Ademais, a análise foi feita para uma demanda que extrapola a demanda prevista de 5,8 *ton/h*, com o intuito de se observar a demanda máxima à qual o sistema é capaz de suportar. Os resultados são apresentados

(a) *Throughput* do sistema.

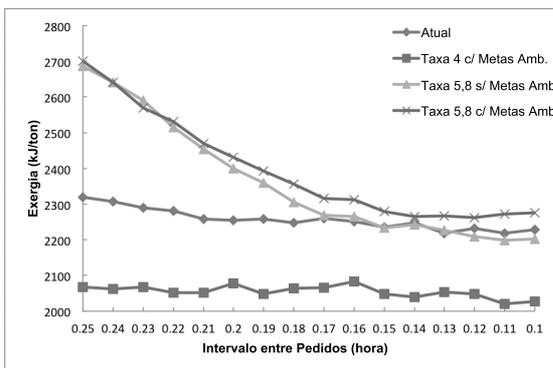
(b) GWP relativo.



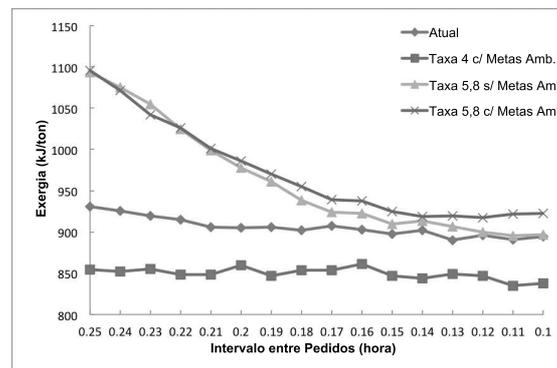
(c) Consumo de eletricidade relativo.



(d) Consumo de água relativo.



(e) Exergia de entrada relativa.



(f) Exergia de saída relativa.

Figura 7.19 Indicadores relativos para os experimentos.

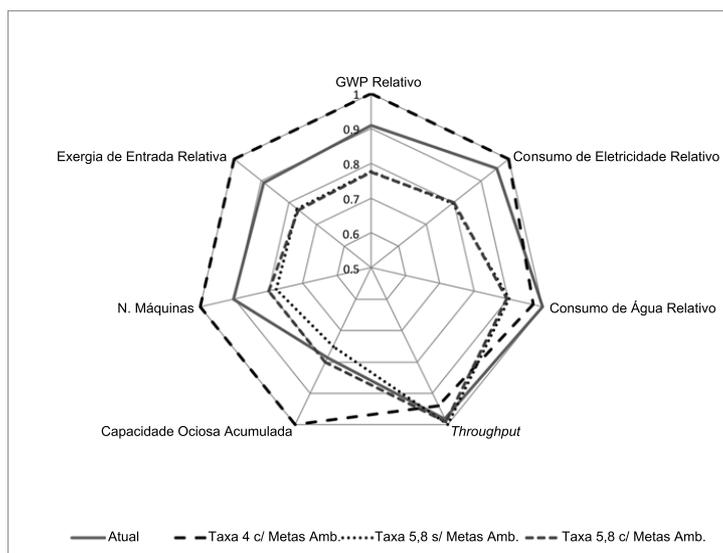
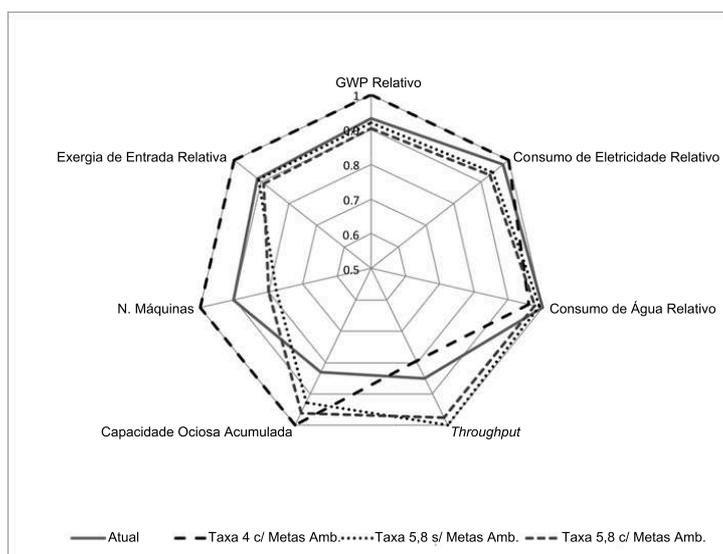
nos gráficos da Figura 7.19. As oscilações dos resultados nos gráficos ocorrem devido ao erro inerente à simulação do modelo. Estas oscilações não ocorreriam caso os resultados tivessem sido obtidos via análise. Os gráficos da Figura 7.19(a) à Figura 7.19(f) mostram que as métricas para os últimos dois experimentos estabilizam para um intervalo entre pedidos entre 0,17 h (5,88 ton/h) e 0,14 h (7,14 ton/h). Uma vez que estes experimentos foram otimizados para uma demanda de 5,8ton/h, esta estabilização do sistema está dentro de um intervalo esperado.

O *throughput* do sistema é equivalente para os dois últimos experimentos, com uma dife-

rença menor que 2,5% para uma demanda de 5,8 ton/h. Ainda para esta demanda, os segundo e terceiro experimentos aumentam o *throughput* atual do sistema em 14,79% e 17,59%, respectivamente. Por outro lado, o primeiro experimento (“Taxa 4 c/ Metas Amb.”) reduziu o *throughput* do sistema em 6,6%. Apesar disso, esta redução ainda está dentro da limite inferior imposto para as variáveis de folga dos modelos de otimização, que era de 10%. Em contrapartida, a redução na exergia de entrada foi de 8,63% e o GWP do sistema (Figura 7.19(b)) diminuiu quase 7%. Assim, apesar de não ser adequada para uma demanda de 5,8 ton/h, este cenário pode se mostrar eficaz para a demanda atual. Considerando o GWP, os dois últimos experimentos são um pouco piores que o cenário atual, aumentando este indicador em 1,41% e 3,25%, respectivamente.

Os gráficos apresentados na Figura 7.19(c) e na Figura 7.19(d) mostram que para um intervalo menor que 0,18, o consumo relativo de eletricidade e de água são consideravelmente maiores para os dois últimos experimentos (quase 20% e 12%, respectivamente). Isto ocorre porque as máquinas continuam operando independentemente da demanda que o sistema enfrenta. Logo, elas consomem a mesma quantidade de energia para produzir menos produtos. Além disso, a existência de gargalos não permite que as máquinas operem em sua capacidade máxima. Estas situações reduzem as métricas relativas, incluindo a métrica do GWP, que, como dito, apresentou uma leve piora.

A existência de gargalos também fez com que o segundo experimento (sem as metas ambientais) apresentasse um desempenho ambiental um pouco melhor que o apresentado para o terceiro experimento (com metas ambientais) em alguns casos. Isto foi observado nos gráficos com do GWP, do consumo de eletricidade e de água e da exergia de entrada e de saída (Figura 7.19(b) à Figura 7.19(f)). Apesar disso, a diferença desses valores fica entre 1% e 2,1%. Esta diferença é maior que 3% apenas para um intervalo entre pedidos de 0,12 h. Assim, tanto a configuração do segundo quanto a do terceiro experimento podem ser utilizadas sem uma diferença considerável. Os resultados para cada experimento considerando um intervalo entre pedidos de 0,25 h e 0,17 h foram normalizados e comparados. Esta comparação é apresentada nos gráficos da Figura 7.20(a) e da Figura 7.20(a), respectivamente. Estes gráficos mostram que o primeiro experimento (“Taxa 4 c/ Metas Amb.”) apresentou resultados mais adequados em quase todas as categorias para ambas as demandas. Não obstante, para um intervalo de 0,17 h, o *throughput* é consideravelmente pior que para os outros experimentos. Estes gráficos enfatizam os resultados apresentados na Figura 7.19. Fica claro que, considerando os dois últimos experimentos, enquanto as métricas são consideravelmente piores para um intervalo de

(a) Intervalo entre pedidos de 0,25 h (taxa \cong 4 ton/h).(b) Intervalo entre pedidos de 0,17 h (taxa \cong 5,8 ton/h).**Figura 7.20** Comparação entre os experimentos.

0,25 h, para um intervalo de 0,17 h, estas métricas são bem próximas, ou ainda melhores que as apresentadas para a configuração atual e para o segundo experimento. Com base na análise de sensibilidade e nos resumos apresentados nestes gráficos, a indústria pode adotar a estratégia de manter a configuração atual e migrar para a configuração proposta por um dos dois últimos experimentos à medida que a demanda aumente efetivamente. Outros estudos semelhantes poderiam ainda ser conduzidos avaliando diferentes tipos de máquinas que permitissem

ainda reduzir a capacidade ociosa acumulada do sistema.

Considerações Finais

Este capítulo apresentou os estudos de caso realizados com os modelos propostos neste trabalho. Os estudos, aqui apresentados, foram suportados pelo *framework* apresentado ao longo desta tese. Nos dois primeiros estudos de caso, mostrou-se a aplicação dos modelos no contexto das cadeias de suprimentos. Os dois primeiros estudos mostraram como aferir métricas relacionadas à utilização da frota e como representar diferentes políticas de estoque. Por fim, foram apresentados dois estudos que tinham o objetivo de detalhar a modelagem das métricas de exergia e GWP em uma linha de produção. Um dos estudos mostrou ainda como é possível utilizar modelos de otimização matemática em conjunto com os modelos SRN propostos.

Considerações Finais

No fim tudo dá certo, e se não deu certo é porque ainda não chegou ao fim.

—FERNANDO SABINO (Escritor e Jornalista)

Nesta tese, foi apresentado um *framework* baseado na utilização de modelos *stochastic reward net* (SRN) componentizados, para a modelagem, avaliação de desempenho operacional e avaliação de desempenho ambiental (ADA) de cadeias de suprimentos verdes (GSCs). Como contribuição, foram selecionadas e definidas os indicadores de desempenho operacional e ambiental a serem avaliados nas SC, foi criada uma biblioteca de modelos utilizando as SRNs como técnica de modelagem e foi desenvolvido um protótipo de ferramenta para a modelagem de SCs. Neste documento, o termo *framework* foi utilizado para se referir a este conjunto de métricas, modelos e ferramentas propostos.

Este *framework* visa prover valores que mensurem o desempenho operacional e ambiental com um modelo único. Esse tipo de informação pode ser extremamente importante em um processo de tomada de decisão. A utilização de um método formal, como é o caso das SRNs, na modelagem do sistema procura garantir que os resultados obtidos na avaliação representem o sistema avaliado de maneira fidedigna.

Com a escolha das SRNs como técnica de modelagem, surge o problema de tornar os modelos utilizáveis por avaliadores que não possuam um conhecimento aprofundado dessa técnica. Para isso, propõe-se a utilização de componentes que representam elementos do sistema. Os componentes foram definidos pensando na visão destes avaliadores, com o objetivo de facilitar a sua utilização, porém sem perder as propriedades do modelo que permitem a sua avaliação no regime estacionário.

Outrossim, respeitando as regras apresentadas ao longo desta tese, a composição destes modelos básicos gera modelos que são estruturalmente limitados e *live*. Com isso, é possível obter a cadeia de Markov a partir da SRN. Por consequência, a SRN pode ser resolvida utilizando a análise estacionária. Todavia, em alguns modelos a cadeia de Markov gerada pode

ser muito grande. Nestes casos, resolvê-las utilizando os recursos computacionais atuais pode ser inviável, sendo necessário recorrer à simulação estacionária do modelo. Vale salientar que também é possível avaliar a SRN resultante utilizando análise e simulação transiente, ou seja, para um intervalo de tempo.

Devido à parametrização desses modelos, é possível criar diferentes cenários alterando-se a política de estoque adotada, a quantidade de recursos disponíveis, a quantidade de insumos consumidos/dispostos no meio ambiente, a energia necessária para realizar uma tarefa etc. Estes cenários podem ser criados alterando estes parâmetros com o objetivo de fazer experimentos fatoriais. Nesta tese, também foi proposto um modelo de otimização matemática utilizando programação por metas com o intuito de auxiliar na criação de cenários. Com isso, pode-se utilizar os resultados do modelo de otimização para atribuir valores para os parâmetros do modelo SRN.

Os trabalhos já realizados no âmbito da ADA e da análise do ciclo de vida (LCA) normalmente quantificam indicadores com base na entrada e saída de recursos ao longo do ciclo de vida do produto. Contudo, aspectos de desempenho e falha não são contemplados por esses modelos. O *framework* proposto nesta tese unifica as avaliações do LCA e do desempenho do sistema, tornando possível determinar o impacto da adoção de diferentes políticas de estoque, falhas ou mesmo alterações no projeto da cadeia de suprimentos (SC) sobre o desempenho operacional e ambiental do sistema. Considerando-se as técnicas atuais para o LCA, essa análise de sensibilidade é realizada alterando-se a quantidade dos materiais consumidos ou descartados, que impactam diretamente as métricas ambientais. Em contrapartida, nesta tese, o impacto positivo ou negativo nos indicadores ambientais é quantificado a partir das otimizações no processo de negócio das GSCs, alterando-se, por exemplo, o tempo de viagem entre duas instalações da SC.

A análise da exergia também foi incluída nesta tese. Algumas abordagens já buscam mesclar o LCA com a exergia, o que não torna a sua utilização para o LCA uma inovação desta tese. Porém, tanto as técnicas de LCA quanto as que utilizam a exergia não permitem a análise da relação entre as ações de melhoria para o desempenho operacional e as métricas de ADA. Além disso, o modelo estocástico permite que sejam realizadas análises probabilísticas que não são feitas com as técnicas de LCA atuais.

Com o intuito de validar e aplicar os modelos propostos, foram criados alguns exemplos, incluindo um estudo de caso com o *Jogo da Cerveja*. Este jogo é bastante utilizado para ensinar o *efeito chicote* nas cadeias de suprimento. Este estudo mostrou o processo de modelagem e

de validação utilizando o *framework* proposto. Outros exemplos também foram criados para mostrar a utilização dos componentes propostos para a modelagem de diferentes sistemas.

Além dos exemplos criados, alguns estudos de caso reais foram apresentados nesta tese. Estes estudos de caso mostraram a análise de uma cadeia de suprimentos, otimizando a sua política de estoques e a utilização de sua frota disponível. O estudo de caso realizado com um dos tipos de veículos desta empresa mostrou que seria possível realizar uma redução de 16% destes veículos, ou ainda, aumentar as vendas em até 20%. Em ambos cenários, o nível de serviço prestado pela indústria permaneceria próximo aos 98%.

Também foram conduzidos estudos sobre uma linha de produção da indústria avaliada. Um dos estudos de caso mostrou como analisar o impacto da utilização de diferentes fontes de energia na linha de produção. Foi mostrado que se fosse possível utilizar uma única fonte energética para todas as atividades da linha de produção a eletricidade seria a fonte que causaria menos impacto ambiental considerando que a fábrica é instalada no Brasil. Porém, se essa fábrica fosse instalada na Europa, a fonte energética que menos causaria impacto seria o gás natural. Outro estudo de caso mostrou como utilizar o modelo de otimização matemática proposto para melhorar a utilização do maquinário da linha de produção e de outros indicadores ambientais como o GWP resultante, o consumo de eletricidade e o consumo de água.

O processo de validação dos modelos precisa ser realizado a cada estudo de caso, como ocorre com qualquer processo de modelagem para avaliação de desempenho. Para tal, pode-se empregar técnicas de análise estatística como o teste de hipóteses. Apesar disto, o processo de verificação não se faz necessário, uma vez que a biblioteca de componentes juntamente com as regras de composição definidas, garantem que os modelos gerados possuem as propriedades desejadas nas SRNs. Vale salientar que é possível estender a biblioteca proposta com novos componentes, desde que seja definido como será feita a composição dos novos modelos com os existentes. Porém, neste caso não é possível garantir o modelo resultante terá as referidas propriedades. Neste caso, se faz necessária uma verificação do modelo.

Além da necessidade de realizar uma validação a cada estudo de caso e uma verificação no caso de se estender a biblioteca de componentes, o *framework* proposto também possui outras limitações. Os conceitos de tempo e estado são intrínsecos à técnica de modelagem utilizada. Logo, as métricas precisam sempre ser criadas em função destes dois elementos. Por exemplo, a distância percorrida por um caminhão precisa ser definida em função da taxa de uma transição. Ademais, os modelos SRNs resultantes costumam gerar cadeias de Markov (CMs) muito grandes em exemplos práticos. Logo, considerando os recursos computacionais

atuais, se faz necessário recorrer à simulação do modelo. Esta limitação está diretamente ligada à capacidade de processamento atual dos hardwares e softwares atuais. Porém, isto não invalida o fato do modelo gerado ser passível de uma avaliação analítica.

Os modelos propostos podem ser utilizados para criar modelos hierárquicos com redes de Petri (Fehling, 1993; Muppala e Trivedi). Porém, esta abordagem não é o foco do *framework*. Isto porque, para criar modelos hierárquicos com SRNs é necessário um bom conhecimento nesta técnica de modelagem. Como uma das metas deste *framework* é que ele possa ser utilizado por pessoas com pouco conhecimento em SRNs, optou-se por não contemplar a modelagem hierárquica, em detrimento da simplificação dos modelos finais e sua consequente solução analítica. O *framework* também está limitado pela natureza estocástica dos modelos utilizados. Assim, ele não é apropriado para aferir métricas de eventos cuja ocorrência depende de eventos ocorridos anteriormente.

Os modelos propostos pelo *framework* foram definidos com o objetivo de aferir métricas nos níveis de decisão tático e estratégico. Logo, não é possível aplicar os modelos propostos para avaliar métricas no nível de decisão operacional. Problemas como roteirização de viagens e localização de fábricas também não são tratados pelo *framework*. É importante salientar que problemas que ocorrem em SCs específicas, como a perecibilidade de alimentos e o decaimento de materiais radioativos, também não são tratados.

Neste trabalho também se evitou tratar diretamente das métricas de custo e lucro. Estas métricas estão diretamente ligadas a uma área do marketing denominada *pricing* que consiste em definir preços para os produtos. Esta área envolve fatores como localização das instalações e campanhas de marketing, chegando a abordar aspectos de microeconomia como oscilações do mercado, demanda e oferta (Kotler e Keller, 2005). Como muitos destes fatores estão além das fronteiras delimitadas para este trabalho, optou-se por não abordar estas métricas diretamente. Apesar disso, os modelos SRN propostos podem ser utilizados para aferi-las definindo elas em função de métricas que já são aferidas como níveis de estoque, tempo de entrega e pedidos pendentes. O modelo de programação matemática proposto também é aplicável, uma vez que estas métricas podem ser definidas nos objetivos de negócio do modelo.

Como planejamento futuro, almeja-se a realização de estudos que comparem o LCA de produtos que possuam distribuição e/ou utilização física e virtual. Com isso, espera-se mensurar a redução do impacto ambiental de atividades das GSCs, caso o ambiente virtual seja melhor aproveitado. Além disso, planeja-se aplicar técnicas de análise de decisão com múltiplos critérios, tendo como entrada as métricas obtidas a partir dos modelos propostos.

Dentre as possíveis extensões desta pesquisa, cita-se a análise da logística interna, de tipos específicos de cadeias de suprimentos reversas (ex.: de materiais perigosos ou nucleares), de cadeias de suprimentos globalizadas, nas quais as instalações são localizadas em países diferentes, e a distribuição intermodal, na qual mais de um meio de transporte é utilizado na movimentação de produtos entre as instalações. Estas análises podem requerer que novas métricas sejam aferidas e novos parâmetros sejam informados. Com isso, podem ser necessárias extensões na biblioteca de componentes, através da definição de novos componentes e regras de composição. O estudo de SCs que geram e-lixo, lixo proveniente de equipamentos eletrônicos, também é um tópico bastante abordado nos dias atuais e que pode ser aprofundado em trabalhos futuros.

A ferramenta bem como a álgebra composicional propostas também podem ser evoluídas em trabalhos futuros. A ferramenta pode ser estendida incluindo-se novas funcionalidades, dando suporte à modelagem com outros tipos de redes de Petri e realizando a integração com outras ferramentas existentes como o CPNTools (Jensen et al., 2007). Outra forma de estender a ferramenta, seria utilizando a notação BPMN para os modelos de alto nível, convertendo-os diretamente para o modelo SRN. Neste caso, seria necessário definir se todos os elementos BPMN seriam contemplados, ou apenas um subconjunto destes. Também é possível estender a álgebra com novos operadores. Porém neste caso, seria importante definir que propriedades seriam preservadas ou surgiriam nas redes de Petri resultantes da composição dos modelos.

Finalmente, uma integração automática de métodos de *análise de decisão com múltiplos critérios* (MCDA) com as SRNs poderia prover um bom avanço para avaliação de *trade-offs* nas cadeias de suprimentos verdes (GSCs). Esta integração poderia se dar, por exemplo, utilizando os valores obtidos a partir da análise das SRNs como parâmetros do modelo MCDA, ou vice-versa.

Referências Bibliográficas

- A. ALLEN. *Probability, Statistics, and Queueing Theory with Computer Science Applications*. Academic Press, New York, 2nd edição, 1990. ISBN 0120510510.
- T. ALTIOK e B. MELAMED. *Simulation Modeling and Analysis with ARENA*. Academic Press, 2007.
- A. C. ALVARENGA e A. G. N. NOVAES. *Logística Aplicada - Suprimento e Distribuição Física*. Editora Edgard Blücher Ltda., 3 edição, 2000.
- G. ALVES. Avaliação de desempenho de cadeias de suprimentos utilizando componentes GSPN. Master's thesis, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brazil. http://cin.ufpe.br/~gaaj/dissertacao_gaaj.pdf, 2007.
- G. ALVES, P. MACIEL e R. LIMA. A GSPN Based Approach to Evaluate Outbound Logistics. Em: *2007 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, páginas 708–713, 2007a.
- G. ALVES, P. MACIEL e R. LIMA. Evaluating Supply Chains with Stochastic Models. Em: *2007 IEEE/INFORMS International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics*, páginas 1–6, 2007b.
- G. ALVES, P. MACIEL e R. LIMA. Modeling and Evaluation of Supply Chains with GSPN Components. Em: *Proc. 2nd international conference on Performance evaluation methodologies and tools*, páginas 1–10, 2007c.
- G. ALVES, P. MACIEL e R. LIMA. Stochastic Evaluation of Supply Chains and Replenishment Policies with Petri net Components. *International Journal of Services Operations and Informatics*, 3-4, 2008a.
- G. ALVES, P. MACIEL e R. LIMA. Performance Evaluation of Logistics with Componentized Stochastic Models. Em: *2008 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, páginas 2087–2092, 2008b.

- G. ALVES, P. MACIEL, R. LIMA e A. ZIMMERMANN. Automatic Modeling for Performance Evaluation of Inventory and Outbound Distribution. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 40(5):1025–1044, 2010. ISSN 1083-4427.
- G. ALVES, P. MACIEL, R. LIM, F. MAGNANI e A. ARCOVERDE. Towards the evaluation of environment and business trade-offs in supply chains. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 275:5–21, 2011a.
- G. ALVES, P. MACIEL, R. LIMA e F. MAGNANI. *Supply Chains*, capítulo Business and Environment Performance Evaluation in Supply Chains: a Formal Model-Driven Approach, páginas 157–182. Número ISBN 978-953-307-250-0. InTech, 2011b.
- G. ALVES, P. MACIEL, R. LIMA e F. MAGNANI. Strategic and Tactical Evaluation of Conflicting Environment and Business Goals in Green Supply Chains. *Systems Man and Cybernetics: Systems, IEEE Transactions on*, 2013.
- R. K. APAIAH, A. R. LINNEMANN e H. J. VAN DER KOOI. Exergy analysis: A tool to study the sustainability of food supply chains. *Food Research International*, 39(1):1–11, 2006.
- F. S. ARBACHE, A. G. SANTOS, C. MONTENEGRO e W. F. SALLES. *Gestão de logística, distribuição e trade marketing*. Marketing. FGV, 2004.
- R. U. AYRES, L. W. AYRES e K. MARTINÁS. Exergy, Waste Accounting, and Life-Cycle Analysis. *Energy*, 23(5):355–363, 1998.
- S. BAARIR, M. BECCUTI, D. CEROTTI, M. De Pierro, S. DONATELLI e G. FRANCESCHINIS. The GreatSPN tool: recent enhancements. *SIGMETRICS Perform. Eval. Rev.*, 36(4):4–9, 2009. ISSN 0163-5999. doi: <http://doi.acm.org/10.1145/1530873.1530876>.
- G. BALBO. Introduction to Stochastic Petri Nets. *LNCS 2090*, páginas 84–155, 2001.
- R. H. BALLOU. *Business Logistics/Supply Chain Management*. Pearson Education, 5 edição, 2004.
- R. BAŤA, I. OBRŠÁLOVÁ, J. VOLEK e T. C. JORDÃO. Petri Nets Application for Management of Biodegradable Components of Municipal Waste. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 4(12):1057–1066, dec 2008.

- B. M. BEAMON. Measuring supply chain performance. *International Journal of Operations & Production Management*, 19(3):275–292, mar 1999a.
- B. M. BEAMON. Designing the green supply chain. *Logistics Information Management*, 12(4):332–342, 1999b.
- B. M. BEAMON e C. FERNANDES. Supply-chain network configuration for product recovery. *Production Planning and Control*, 15(3):270–281, 2004.
- B. BLANCHARD, W. FABRYCKY e W. FABRYCKY. *Systems engineering and analysis*. Prentice Hall, 1990. ISBN 0138807582.
- G. BOLCH, S. GREINER, H. de Meer e K. TRIVEDI. *Queueing Networks and Markov Chains: Modeling and Performance Evaluation with Computer Science Applications*. John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 2 edição, 2006.
- B. BRAGA, I. HESPANHOL, J. CONEJO, J. MIERZWA, M. BARROS, M. SPENCER, M. PORTO, N. NUCCI, N. JULIANO e S. EIGER. *Introdução à Engenharia Ambiental*. Pearson Prentice Hall, 2 edição, 2005.
- J. CASCIO. *The Iso 14000 Handbook*. ASQ Quality Press, 1999.
- R. CASH e T. WILKERSON. GreenSCOR: Developing a Green Supply Chain Analytical Tool, 2003. LMI - Logistics Management Institute.
- Y. A. ÇENGEL e M. A. BOLES. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill, 5 edição, 2005.
- A. CHARNES e W. W. COOPER. *Management Models and Industrial Applications of Linear Programming*. John Wiley & Sons, 1961.
- A. CHARNES, W. COOPER e R. FERGUSON. Optimal estimation of executive compensation by linear programming. *Management Science*, 1(2):138–151, 1955.
- H. CHEN, L. AMODEO e F. CHU. Batch Deterministic and Stochastic Petri Nets: A Tool for Modeling and Performance Evaluation of Supply Chain. Em: *Proc. 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 2002.

- G. CIARDO. Petri nets with marking-dependent arc cardinality: Properties and analysis. Em: *LNCS; Application and Theory of Petri Nets 1994, Proceedings 15th International Conference*, volume 815, páginas 179–198. Springer-Verlag, 1994.
- G. CIARDO e A. S. MINER. Structural approaches for SPN analysis. Em: *Proc. High Performance Computing (HPC'2000); 2000 Advanced Simulation Technologies Conference, 16-20 April 2000, Washington, DC*, páginas 345–356, 2000.
- G. CIARDO e K. TRIVEDI. A decomposition approach for stochastic reward net models. *Performance Evaluation*, 18:37–59, 1993.
- G. CIARDO, A. BLAKEMORE, P. CHIMENTO, J. MUPPALA e K. TRIVEDI. Automated generation and analysis of markov reward models using stochastic reward nets. *IMA Volumes in Mathematics and its Applications*, 48:145–145, 1993.
- R. L. CORNELISSEN e G. G. HIRS. The value of the exergetic life cycle assessment besides the lca. *Energy Conversion and Management*, 43:1417–1424, 2002.
- CSCMP - Council of Supply Chain Management Professionals. Website, jul 2009. URL <http://cscmp.org>.
- DEFRA - Department for Environment, Food and Rural Affairs. 2009 Guidelines to Defra / DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting, 2009.
- DEFRA - Department for Environment, Food and Rural Affairs. 2011 Guidelines to Defra / DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting, 2011.
- W. DEMING. *Out of the Crisis*. The MIT Press, 2000.
- A. A. DESROCHERS e R. Y. AL-JAAR. *Applications of Petri Nets in Manufacturing Systems: Modeling, Control, and Performance Analysis*. Institute of Electrical & Electronics Enginee, 1994.
- J. DEWULF, H. VAN LANGENHOVE, B. MUYS, S. BRUERS, B. BAKSHI, G. GRUBB, D. PAULUS e E. SCIUBBA. Exergy: its potential and limitations in environmental science and technology. *Environ. Sci. Technol*, 42(7):2221–2232, 2008.
- I. DINCER, M. M. HUSSAINB e I. Al-Zaharnah. Energy and exergy use in the utility sector of Saudi Arabia. *DESALINATION*, 169:245–255, 2004.

- M. DOTOLI e M. P. FANTI. A generalized stochastic petri net model for management of distributed manufacturing systems. Em: *CDC-ECC05, 44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, páginas 2125–2130, 2005.
- P. DRUCKER. Website, dec 2009. URL <http://www.druckerinstitute.com>.
- J. W. EATON, D. BATEMAN e S. HAUBERG. *GNU Octave Manual Version 3*. Network Theory Ltd., 2008. ISBN 095461206X, 9780954612061.
- EEC. Council-regulation (eec) no. 1836/93 – allowing voluntary participation by companies in the industrial sector in a community eco-management and audit scheme, jun 1993.
- Environmental Protection Agency – EPA. POLLUTION PREVENTION ACT OF 1990, 1990.
- EPA – Environmental Protection Agency. Website, jul 2009. URL <http://www.epa.gov>.
- R. FEHLING. A concept of hierarchical petri nets with building blocks. *Lecture Notes in Computer Science 674. Advances in Petri Nets*, Springer-Verlag:148–168, mar 1993.
- M. FLEISCHMANN, J. M. Bloemhof-Ruwaard, R. DEKKER, E. VAN DER LAAN, J. A. E. E. VAN NUNEN e L. N. VAN WASSENHOVE. Quantitative models for reverse logistics: A review. *European Journal of Operational Research*, 103:1–17, 1997.
- M. FLEISCHMANN, R. KUIK e R. DEKKER. Controlling inventories with stochastic item returns: A basic model. *European Journal of Operational Research*, 138(1):63–75, 2002.
- G. FLORIN e S. NATKIN. Evaluation Based upon Stochastic Petri Nets of the Maximum Throughput of a Full Duplex Protocol. Em: *Selected Papers from the First and the Second European Workshop on Application and Theory of Petri Nets*, páginas 280–288, London, UK, 1982. Springer-Verlag. ISBN 3-540-11189-1.
- R. FRISCHKNECHT, N. JUNGBLUTH, H. ALTHAUS, G. DOKA, R. DONES, T. HECK, S. HELLWEG, R. HISCHIER, T. NEMECEK, G. REBITZER e M. SPIELMANN. Theecoinvent Database: Overview and Methodological Framework. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 10(1):3–9, 2005.
- E. GAMMA e K. BECK. *Contributing to Eclipse: Principles, Patterns, and Plug-Ins*. Addison-Wesley Professional, 2003.

- R. GERMAN. *Analysis of stochastic Petri nets with non-exponentially distributed firing times*. PhD thesis, Technische Universität Berlin, 1994.
- R. GERMAN. *Performance analysis of communication systems with non-Markovian stochastic Petri nets*. John Wiley & Sons, 2001.
- C. GHEZZI, D. MANDRIOLI, S. MORASCA e M. PEZZÈ. A Unified High-Level Petri Net Formalism for Time-Critical Systems. *IEEE Trans. Softw. Eng.*, 17(2):160–172, 1991. ISSN 0098-5589.
- J. W. GIBBS. A method of geometrical representation of thermodynamic properties of substances by means of surfaces. *Transactions of the Connecticut Academy*, 1873.
- GMF Constraints. Website, jul 2009. URL http://wiki.eclipse.org/index.php/GMF_Constraints.
- M. GOEDKOOP. *The Eco-indicator 95*. PRé Consultants, 1995.
- M. GOEDKOOP, R. SPRIENSMA e OTHERS. *The Eco-indicator 99*. PRé Consultants, 2000.
- C. GOMEZ, F. DELEBECQUE, C. BUNKS, J. P. CHANCELIER, S. STEER e R. NIKOUKHAH. *Engineering and Scientific Computing with Scilab with Cdrom*. Birkhauser Boston, 1998. ISBN 0817640096.
- M. GONG e G. WALL. On Exergetics, Economics and Optimization of Technical Processes to Meet Environmental Conditions. Em: *TAIES'97*, páginas 453–460, 1997.
- M. GONG e G. WALL. On exergy and sustainable development—part 2: Indicators and methods. *Exergy, An International Journal*, 1(4):217–233, 2001.
- D. GROSS e D. M. HARRIS. *Fundamentals of queueing theory*. John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 2 edição, 1985.
- M. GRUBB, C. VROLIJK, D. BRACK e T. FORSYTH. *The Kyoto Protocol: a guide and assessment*. Royal Institute of International Affairs London, 1999.
- V. D. R. GUIDE, JR., G. C. SOUZA e E. VAN DER LAAN. Performance of static priority rules for shared facilities in a remanufacturing shop with disassembly and reassembly. *European Journal of Operational Research*, 164(2):341–353, 2005.

- A. GUNGOR e S. GUPTA. Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: a survey. *Computers & Industrial Engineering*, 36(4):811–853, 1999.
- G. HAMMOND e C. JONES. Inventory of carbon & energy (ice) – version 1.6a, 2008.
- D. HANSELMAN e B. C. LITTLEFIELD. *Mastering MATLAB 5: A Comprehensive Tutorial and Reference*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA, 1997. ISBN 0138583668.
- J. L. HAU e B. R. BAKSHI. Expanding exergy analysis to account for ecosystem products and services. *Environ. Sci. Technol.*, 38(13):3768–3777, 2004.
- R. HENKOFF. Delivering goods. *Fortune*, nov 1994. pág. 64-78.
- F. HILLIER, G. LIEBERMAN e M. HILLIER. *Introduction to operations research*. McGraw-Hill New York, 1990.
- C. HIREL, B. TUFFIN e K. TRIVEDI. SPNP: Stochastic Petri Nets. Version 6.0. Em: *Computer Performance Evaluation. Modelling Techniques and Tools*, volume 1786, páginas 354–pp. Springer Verlag, 2000.
- IPCC. *IPCC Second Assessment Report: Climate Change 1995 – Working Group I: The Science of Climate Change*. Cambridge University Press, 1995.
- IPCC. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press, 2001.
- ISO. ISO 14031:1999 – Environmental management – Environmental performance evaluation – Guidelines. Technical report, ISO – International Organization for Standards, 1999.
- ISO. ISO 14001:2004 – Environmental management systems – Requirements with guidance for use. Technical report, ISO – International Organization for Standards, 2004.
- ISO. ISO 14040:2006 – Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. Technical report, ISO – International Organization for Standards, 2006.
- ISO – International Organization for Standards. Website, nov 2009. URL <http://www.iso.org>.
- C. JASCH. Environmental performance evaluation and indicators. *Journal of Cleaner Production*, 8(1):79–88, 2000.

- K. JENSEN. Coloured Petri Nets: A High Level Language for System Design and Analysis. *LNCS; Advances in Petri Nets 1990*, 483:342–416, 1991. NewsletterInfo: 39.
- K. JENSEN. *Coloured Petri Nets: Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use*, volume 1. Springer-Verlag, 1997.
- K. JENSEN, L. M. KRISTENSEN e L. WELLS. Coloured petri nets and cpn tools for modelling and validation of concurrent systems. *International Journal on Software Tools for Technology Transfer (STTT)*, 9(3):213–254, 2007.
- D. JONES e M. TAMIZ. *Practical Goal Programming*. Springer Verlag, 2010.
- S. KARA, F. RUGRUNGRUANG e H. KAEBERNICK. Simulation modelling of reverse logistics networks. *International Journal of Production Economics*, 106(1):61–69, 2007.
- E. E. KERRE e J. N. MORDESON. A historical overview of fuzzy mathematics. *New Mathematics and Natural Computation (NMNC)*, 1(1):1–26, 2005.
- J. P. C. KLEIJNEN e M. T. SMITS. Performance metrics in supply chain management. *Journal of the Operational Research Society*, 55(5):507–514, 2003.
- D. KOENIG, A. GLOVER, P. KING, G. LAFORGE e J. SKEET. *Groovy in action*. Manning Publications Co. Greenwich, CT, USA, 2007. ISBN 1932394842.
- I. KOH e F. DICESARE. Modular transformation methods for generalized Petri nets and their application to automated manufacturing systems. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, 21(6):1512–1522, 1991.
- T. J. KOTAS. *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*. Butterworths, 1985.
- P. KOTLER e K. L. KELLER. *Marketing Management*. Prentice Hall, 12 edição, 2005.
- H. L. LEE, V. PADMANABHAN e S. WHANG. The Bullwhip Effect in Supply Chains. *Sloan Management Review*, 38(3):93–102, 1997.
- D. J. LETTIERI, C. R. HANNEMANN, V. P. CAREY e A. J. SHAH. Lifetime exergy consumption as a sustainability metric for information technologies. Em: *Sustainable Systems and Technology, 2009. ISSST '09. IEEE International Symposium on*, páginas 1–6, May 2009. doi: 10.1109/ISSST.2009.5156698.

- D. LOUWERS, B. J. KIP, E. PETERS, F. SOUREN e S. D. P. FLAPPER. A facility location allocation model for reusing carpet materials. *Comput. Ind. Eng.*, 36(4):855–869, 1999. ISSN 0360-8352. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-8352\(99\)00168-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-8352(99)00168-0).
- P. MACIEL, R. LINS e P. CUNHA. *Introdução às Redes de Petri e Aplicações*. Campinas - SP: Sociedade Brasileira de Computação, 1996.
- D. MAKAJIC-NIKOLIC, B. PANIC e M. VUJOSEVIC. Bullwhip Effect and Supply Chain Modelling and Analysis using CPN Tools. Em: *5th Workshop and Tutorial on Practical Use of Coloured Petri Nets and the CPN Tools*, 2004.
- M. MALHOTRA e A. REIBMAN. Selecting and Implementing Phase Approximations for Semi-Markov Models. Em: *Communications in Statistics: Stochastic Models*, volume 9 de 4, páginas 473–506, 1993.
- M. A. MARSAN e G. CHIOLA. On Petri nets with deterministic and exponentially distributed firing times. Em: *Advances in Petri Nets 1987, covers the 7th European Workshop on Applications and Theory of Petri Nets*, páginas 132–145, London, UK, 1987. Springer-Verlag. ISBN 3-540-18086-9.
- M. A. MARSAN, G. CONTE e G. BALBO. A Class of Generalized Stochastic Petri Nets for the Performance Evaluation of Multiprocessor Systems. *ACM Trans. Comput. Syst.*, 2(2): 93–122, 1984. ISSN 0734-2071. doi: <http://doi.acm.org/10.1145/190.191>.
- M. A. MARSAN, G. BALBO, G. CONTE, S. DONATELLI e G. FRANCESCHINIS. *Modeling with Generalized Stochastic Petri Nets*. John Wiley & Sons, 1995.
- M. MARWAH, P. MACIEL, A. SHAH, R. SHARMA, T. CHRISTIAN, V. ALMEIDA, C. ARAÚJO, E. SOUZA, G. CALLOU, B. SILVA e OTHERS. Quantifying the sustainability impact of data center availability. Em: *Proceedings of the 2009 GreenMetrics workshop*, 2009.
- D. H. MATTHEWS. Environmental management systems for internal corporate environmental benchmarking. *Benchmarking: An International Journal*, 10(2):95–106, 2003.
- R. MILNER, M. TOFTE e R. HARPER. *The Definition of Standard ML*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1990.

- MME – Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional – Exercício de 2007, 2008.
- MME – Ministério de Minas e Energia. Resenha Energética Brasileira – Exercício de 2008, 2009.
- M. K. MOLLOY. *On the Integration of Delay and Throughput Measures in Distributed Processing Models*. PhD thesis, UCLA, 1981.
- K. E. MOORE, A. GUNGOR e S. M. GUPTA. A Petri net approach to disassembly process planning. *Computers & Industrial Engineering*, 35(1-2):165–168, 1998.
- K. E. MOORE, A. GÜNGÖR e S. M. GUPTA. Petri net approach to disassembly process planning for products with complex AND/OR precedence relationships. *European Journal of Operational Research*, 135(2):428–449, 2001.
- A. S. MORRIS. *ISO 14000 Environmental Management Standards – Engineering and Financial Aspects*. John Wiley & Sons, 2000.
- J. MUPPALA e K. TRIVEDI. Composite performance and availability analysis using a hierarchy of stochastic reward nets. *Computer Performance Evaluation: Modelling Techniques and Tools*, páginas 335–349.
- J. MUPPALA, G. CIARDO e K. TRIVEDI. Stochastic reward nets for reliability prediction. *Communications in reliability, maintainability and serviceability*, 1(2):9–20, 1994.
- T. MURATA. Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, 77(4): 541–580, apr 1989.
- H. T. NGUYEN e E. A. WALKER. *A First Course in Fuzzy Logic*. Chapman & Hall, 3 edição, 2005.
- P. H. NIELSEN e H. WENZEL. Integration of environmental aspects in product development: a stepwise procedure based on quantitative life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 10(3):247 – 257, 2002. ISSN 0959-6526. doi: DOI:10.1016/S0959-6526(01)00038-5.
- J. NORRIS. *Markov Chains*. Cambridge University Press, 1998. ISBN 0521633966.
- H. T. ODUM. *Environment, power and society*. John Wiley & Sons, 1971.

- D. Oliveira Filho. *Electric Energy System Planning and the Second Principle of Thermodynamics*. PhD thesis, McGill University, Montreal, Canada, 1995.
- OMG – Object Management Group. *Object Constraint Language*, v2.0, may 2006.
- OMG – Object Management Group. *Business Process Model and Notation (BPMN)*, v2.0 beta 1, aug 2009.
- A. PAPOULIS, S. PILLAI e S. UNNIKRISHNA. *Probability, random variables, and stochastic processes*, volume 73660116. McGraw-Hill New York, 2002.
- Performance Evaluation group. *GreatSPN 2.02 User's Manual*. Dipartimento di Informatica, Università di Torino (Italy), 2001.
- C. A. PETRI. *Kommunikation mit Automaten*. PhD thesis, Bonn: Institut für Instrumentelle Mathematik, Schriften des IIM Nr. 2, 1962.
- N. R. S. RAGHAVAN e D. ROY. A Stochastic Petri Net Approach for Inventory Rationing in Multi-Echelon Supply Chains. *Journal of Heuristics*, 11(5-6):421–446, 2005.
- C. RAMCHANDANI. *Analysis of Asynchronous Concurrent Systems by Timed Petri Nets*. PhD thesis, MIT, Cambridge, MA, 1994.
- M. ROSEN e I. DINCER. Exergy-cost-energy-mass analysis of thermal systems and processes. *Energy Conversion and Management*, 44(10):1633–1651, 2003.
- M. A. ROSEN e I. DINCER. Exergy as the confluence of energy, environment and sustainable development. *Exergy, an international journal*, 1(1):3–13, 2001.
- M. A. ROSEN, I. DINCER e M. KANOGLU. Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact. *Energy Policy*, 36(1):128–137, 2008.
- J. SAATY. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill, 1980.
- T. SAATY e L. VARGAS. *Decision Making with the Analytic Network Process: Economic, Political, Social and Technological Applications with Benefits, Opportunities, Costs and Risks*. Springer, 1 edição, 2006.

- Sage Group. *Sage tutorial: version 3.4*. CreateSpace, Paramount, CA, 2009. ISBN 1442141948, 9781442141940.
- J. SARKIS. A strategic decision framework for green supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 11(4):397 – 409, 2003. ISSN 0959-6526. doi: DOI:10.1016/S0959-6526(02)00062-8.
- A. SCHRIJVER. *Theory of Linear and Integer Programming*. John Wiley & Sons, 1998.
- E. SCIUBBA. Extended exergy accounting applied to energy recovery from waste: The concept of total recycling. *Energy*, 28(13):1315–1334, 2003.
- W. SHUWANG, Z. LEI, L. ZHIFENG, L. GUANGFU e H. C. ZHANG. Study on the performance assessment of green supply chain. Em: *Systems, Man and Cybernetics, 2005 IEEE International Conference on*, volume 1, páginas 942–947, Oct. 2005. doi: 10.1109/ICSMC.2005.1571267.
- J. SIFAKIS. Use of Petri Nets for Performance Evaluation. Em: *Proc. 3rd Intl. Symposium on Modeling and Evaluation*, páginas 75–93. IFIP, 1977.
- D. SIMCHI-LEVI, P. KAMINSKY e E. SIMCHI-LEVI. *Designing and managing the supply chain: concepts, strategies and case studies*. McGraw-Hill, 2000.
- S. K. SRIVASTAVA. Green Supply-Chain Management: A State-of-the-Art Literature Review. *International Journal of Management Reviews*, 9(1):53 – 80, 2007.
- T. STAPENHURST. *The Benchmarking Book: A How-To-Guide to Best Practice for Managers and Practitioners*. Butterworth-Heinemann, 2009.
- J. SZARGUT. International progress in second law analysis. *Energy*, 5:709–718, 1980.
- J. SZARGUT. Analysis of cumulative exergy consumption. *International journal of energy research*, 11(4):541–547, 1987.
- J. SZARGUT e D. R. MORRIS. Cumulative exergy consumption and cumulative degree of perfection of chemical processes. *Int. Journal of Energy Research*, 11(2):245–261, 1985.
- J. SZARGUT, D. R. MORRIS e F. R. STEWARD. *Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes*. Hemisphere Publishing Corporation, 1988.

- J. SZARGUT, A. VALERO, W. STANEK e A. VALERO. Towards an international reference environment of chemical exergy. Em: *18th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS)*, páginas 409–417, 2005.
- The European Parliament and the Council of the European Union. Regulation (ec) no 761/2001 of the european parliament and of the council – allowing voluntary participation by organisations in a community eco-management and audit scheme (emas), mar 2001.
- The Lexington Group. Best Practices Guide: Application of ISO 14000 Environmental Management Systems (EMS) for Municipalities. Technical report, The Lexington Group, 2000.
- H. TIJMS. *A first course in stochastic models*. John Wiley & Sons Inc, 2003.
- K. TRIVEDI. *Probability and Statistics with Reliability, Queueing, and Computer Science Applications*. John Wiley & Sons, 2 edição, 2001.
- C. TRUST. Carbon footprints in the supply chain: the next step for business. Technical report, Carbon Trust, 2006.
- Umberto – know the flow. Website, dec 2009. URL <http://www.umberto.de>.
- A. VALMARI. The state explosion problem. *LNCS: Lectures on Petri Nets I: Basic Models*, 1491:429–528, jun 1998.
- H. M. VAN BELLEN. *Indicadores de Sustentabilidade - Uma Análise Comparativa*. FGV, 2 edição, 2006.
- W. VAN DER AALST. *Timed coloured Petri nets and their application to logistics*. PhD thesis, Eindhoven University of Technology, 1992.
- W. VAN DER AALST e A. TER HOFSTEDE. YAWL: yet another workflow language. *Inf. Syst.*, 30(4):245–275, 2005.
- W. VAN DER AALST e A. WALTMANS. Modelling logistic systems with ExSpect. Em: H. G. Sol e K. Hee, editores, *Dynamic Modelling of Information Systems*, páginas 269–288. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1991.

- W. VAN DER AALST, K. VAN HEE e G. HOUBEN. Modelling and analysing workflow using a Petri-net based approach. Em: G. Michelis, C. Ellis, e G. Memmi, editores, *Proc. second Workshop on Computer-Supported Cooperative Work, Petri nets and related formalisms*, páginas 31–50, 1994.
- E. VAN DER LAAN e M. SALOMON. Production planning and inventory control with re-manufacturing and disposal. *European Journal of Operational Research*, 102(2):264–278, 1997.
- E. VAN DER LAAN, R. DEKKER, M. SALOMON e A. RIDDER. An (s, Q) inventory model with remanufacturing and disposal. *International Journal of Production Economics*, 46-47: 339–350, 1996.
- K. VAN HEE, N. SIDOROVA, M. VOORHOEVE e J. VAN DER WOUDE. Information Systems Architecture a practical and mathematical approach. Technical report, Technical University in Eindhoven, 2005.
- V. VELEVA e M. ELLENBECKER. Indicators of sustainable production: framework and methodology. *Journal of Cleaner Production*, 9(6):519–549, 2001. doi: DOI:10.1016/S0959-6526(01)00010-5.
- V. VELEVA, M. HART, T. GREINER e C. CRUMBLY. Indicators of sustainable production. *Journal of Cleaner Production*, 9(5):447–452, 2001. ISSN 0959-6526. doi: DOI:10.1016/S0959-6526(01)00004-X.
- N. VISWANADHAM e N. R. S. RAGHAVAN. Performance analysis and design of supply chains: a Petri net approach. *Journal of Operations Research Society*, 51(10):1158–1169, 2000.
- G. WALL e M. GONG. On exergy and sustainable development—part 1: Conditions and concepts. *Exergy, An International Journal*, 1(3):128–145, 2001.
- C. L. WEBER, C. T. HENDRICKSON, H. S. MATTHEWS, A. NAGENGAST, R. NEALER e P. JARAMILLO. Life cycle comparison of traditional retail and e-commerce logistics for electronic products: A case study of buy.com. Em: *Sustainable Systems and Technology, 2009. ISSST '09. IEEE International Symposium on*, páginas 1–6, May 2009. doi: 10.1109/ISSST.2009.5156681.

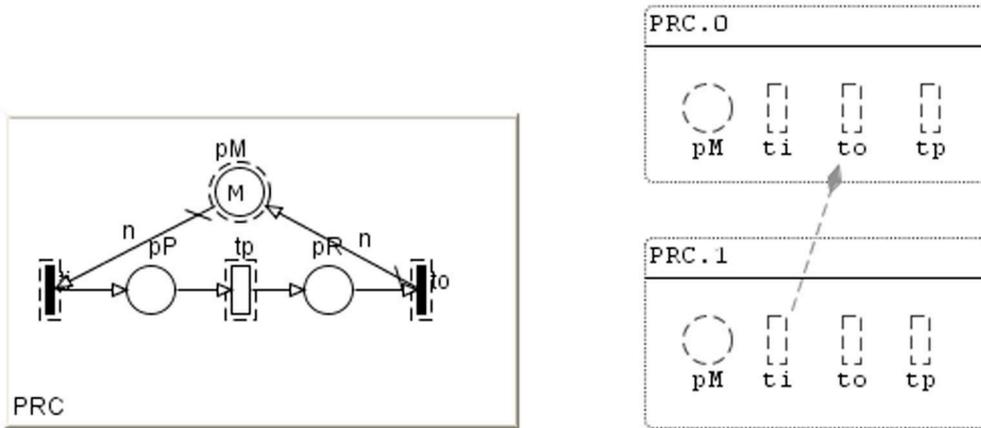
- C. Y. WONG, T. S. DILLON e K. E. FORWARD. Timed Places Petri Nets with Stochastic Representation of Place Time. Em: *International Workshop on Timed Petri Nets*, páginas 96–103, Washington, DC, USA, 1985. IEEE Computer Society. ISBN 0-8186-0674-6.
- Q. Z. YANG, C. Y. MIAO, Y. ZHANG e R. GAY. Lca and lcc data semantics sharing across product lifecycle processes. Em: *Proceeding of the 2006 conference on Leading the Web in Concurrent Engineering*, páginas 190–197, Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands, 2006. IOS Press. ISBN 1-58603-651-3.
- Z. ZHOU, S. CHENG e B. HUA. Supply chain optimization of continuous process industries with sustainability considerations. *Computers & Chemical Engineering*, 24(2-7):1151 – 1158, 2000. ISSN 0098-1354. doi: DOI:10.1016/S0098-1354(00)00496-8.
- A. ZIMMERMANN. *Stochastic Discrete Event Systems*. Springer, Berlin Heidelberg New York, 2007.
- A. ZIMMERMANN, M. KNOKE, A. HUCK e G. HOMMEL. Towards version 4.0 of Time-NET. Em: *13th GI/ITG Conference on Measurement, Modeling, and Evaluation of Computer and Communication Systems (MMB 2006)*, páginas 477–480, mar 2006.
- A. ZIMMERMANN, M. KNOKE, S.-T. YEE e J. D.TEW. Model-based performance engineering of General Motors' vehicle supply chain. Em: *IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics (SMC 2007)*, páginas 1415–1420, Montreal, Canada, 2007.
- W. M. ZUBEREK. Timed Petri nets and preliminary performance evaluation. Em: *ISCA '80: Proceedings of the 7th annual symposium on Computer Architecture*, páginas 88–96, New York, NY, USA, 1980. ACM Press.

objeto selecionado no modelo. Algumas dessas propriedades, como a marcação dos lugares, podem ser alteradas a partir dessa *view*. No canto inferior esquerdo da figura, a *outline view* provê uma *overview* da área de edição, que simplifica a visualização de modelos muito grandes, que não têm todos os seus elementos apresentados na área visível. Além dessa *overview*, uma visualização em árvore dos elementos da rede também pode ser apreciada. No canto inferior direito, outra *view* apresenta os *logs* da aplicação, que podem conter informações de erro ou mesmo outras tais como o tempo decorrido para analisar um modelo.

Na área de edição da Figura A.1, é possível observar linhas azuis que traspassam um objeto que está sendo movido. Essas linhas são apresentadas dinamicamente ao se mover qualquer objeto, a fim de facilitar o seu alinhamento com os outros elementos da SPN. Outra funcionalidade importante é a possibilidade de ocultar elementos gráficos. Com isso, podem-se ocultar ou exibir os módulos definidos no modelo, fazendo com que apenas os elementos que representam a SPN fiquem visíveis. Isso é bastante útil quando se trabalha com modelos complexos ou com muitos módulos.

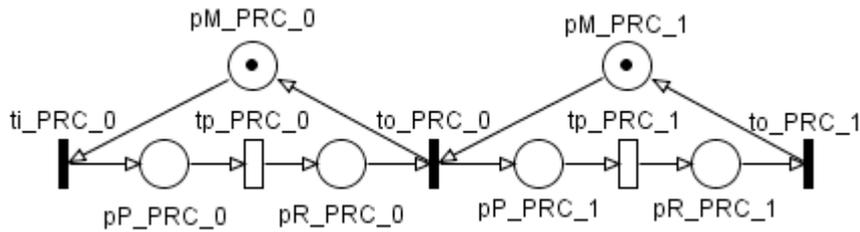
Na *ModSPN*, o usuário deve primeiramente criar os módulos que serão utilizados na SPN, e cada um deles pode ser instanciado quantas vezes se faça necessário. A construção da SPN se dá através da interconexão das instâncias dos módulos e/ou elementos básicos (lugares e transições) da própria SPN. Ao definir um componente, o projetista precisa especificar as suas interfaces. Apenas elementos marcados como interface poderão ser fundidos com outros. A Figura A.2 apresenta o esquema de modelagem com a *ModSPN*. As linhas tracejadas ressaltam os elementos definidos como interface. A Figura A.2(a) apresenta um módulo, enquanto a Figura A.2(b) apresenta uma SPN que utiliza duas instâncias do módulo. A SPN equivalente do modelo apresentado na Figura A.2(b) é apresentada na Figura A.2(c).

A composição dos modelos utiliza as definições apresentadas na álgebra composicional (Seção 6.3). Uma vez que o operador de união da álgebra proposta é um monoide comutativo, não importa a ordem em que ocorre a fusão dos elementos. Na *ModSPN*, a fusão é representada por um arco tracejado com um losango na origem. Apesar de o operador de união ser um monoide comutativo, a fusão dos elementos se dá através da renomeação dos mesmos. Na ferramenta, é preservado o nome do elemento de origem. Apesar de ser possível, como este é um protótipo de uma ferramenta, referências a lugares e transições do modelo em métricas e funções dependentes da marcação não são atualizadas ao “descomponentizar” o modelo. Logo, é importante que estas referências sejam feitas apenas a elementos que sejam a origem do arco de fusão. A “descomponentização” do modelo pode ser realizada a partir da opção *Flatten* do



(a) Representação gráfica de um módulo.

(b) SPN modular com duas instâncias do módulo.



(c) SPN resultante do modelo da Figura A.2(b).

Figura A.2 Modelagem com a ModSPN.

menu de *pop-up* do editor. Assim, apesar de a estratégia proposta simplificar a modelagem de SPNs, esta não interfere na análise das métricas do modelo resultante.

Os componentes criados ainda permitem que sejam definidos parâmetros que podem ser informados na sua instanciação. No exemplo da Figura A.3, o componente *PRC.0* representa uma instância do módulo *PRC*, atribuindo o valor 1 ao parâmetro *n*, que por sua vez é utilizado em pesos dos arcos. Além disso, atribui-se 1 ao parâmetro *M* associado à marcação inicial do lugar *pM*. Ao instanciar um componente, apenas os parâmetros informados serão substituídos no modelo. Logo, propriedades como taxas de transições, marcações de lugares, pesos dos arcos e funções de habilitação, que possam ser diferentes para instâncias específicas do componente, precisam ser declaradas como parâmetros do módulo. Na Figura A.3, observa-se na parte inferior direita uma janela utilizada para definir os argumentos da instância *PRC.0* do módulo *PRC*. Essa janela é acessada a partir da propriedade *arguments* na *properties view*, quando uma instância de módulo está selecionada.

A *ModSPN* também permite a definição de *wildcards*. Estes são variáveis globais cujo

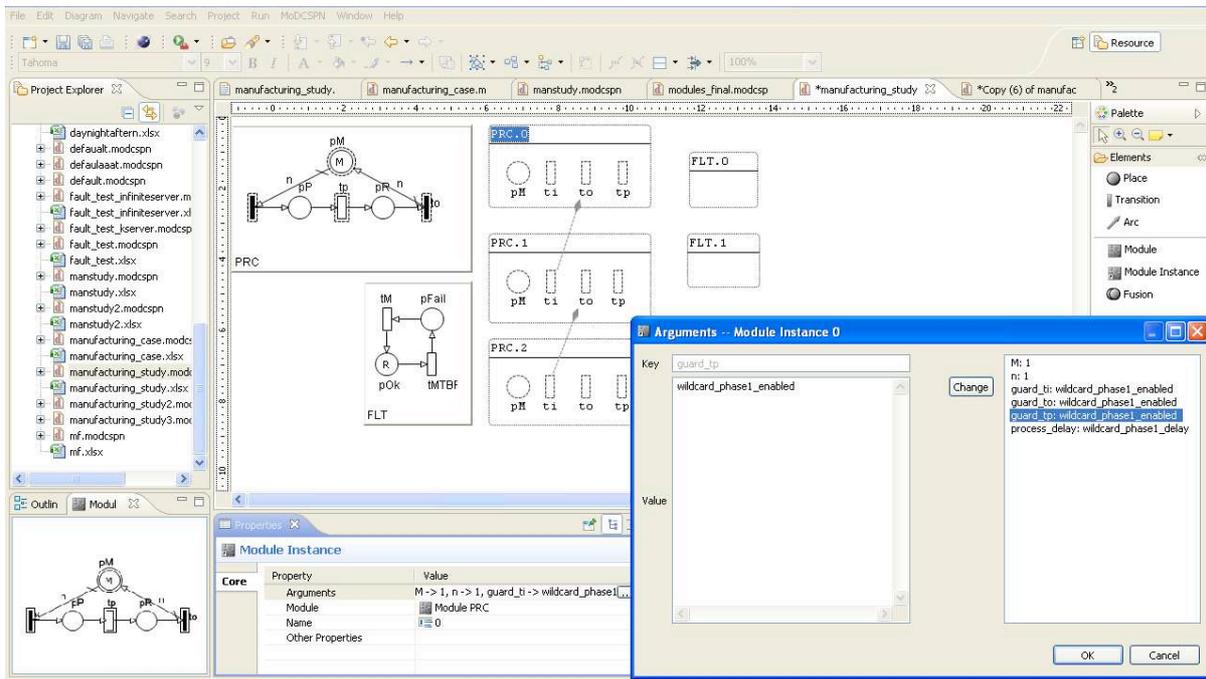


Figura A.3 Atribuindo valores para os argumentos de uma instância de um módulo.

valor é substituído em funções de guarda, argumentos, taxas e outros atributos dos elementos da SPN. Os valores desses *wildcards* podem ser tanto valores numéricos quanto expressões mais complexas. Caso duas ou mais transições do modelo, por exemplo, utilizem a mesma função de guarda, esta poderia ser definida como um *wildcard*. Este, por sua vez, poderia ser associado à guarda das transições, evitando-se a reescrita das funções em cada transição. No exemplo da Figura A.2, a guarda das transições *ti*, *tp* e *to* da instância *PRC.0* está associada a um *wildcard* denominado *wildcard_phase1_enabled*. Essa guarda pode ser uma função complexa, e a utilização de um *wildcard*, além de simplificar a definição do modelo, pode evitar erros devido ao reaproveitamento de código. Na parte inferior esquerda da Figura A.3, é apresentada uma *view* criada com o intuito de exibir o módulo referente à instância selecionada. Essa *view* permite a visualização da estrutura do módulo, mesmo que este esteja oculto.

Funcionalidades como exportar e/ou analisar o modelo com outras ferramentas, como o TimeNET (Zimmermann et al., 2006) e o SPNP (Hirel et al., 2000), também foram criadas. Vale salientar que, uma vez que as sintaxes do SPNP e do TimeNET são diferentes, o modelo precisa ser definido utilizando a sintaxe da ferramenta com a qual se deseja trabalhar. Além disso, o TimeNET não suporta a definição de guardas em transições temporizadas. Essa integração permite que se utilizem as funções de análise dessas ferramentas a partir da *ModSPN*. Para

isso, é necessário que estas estejam instaladas na máquina do usuário. A Figura A.4 apresenta a janela usada para realizar a análise utilizando o SPNP.

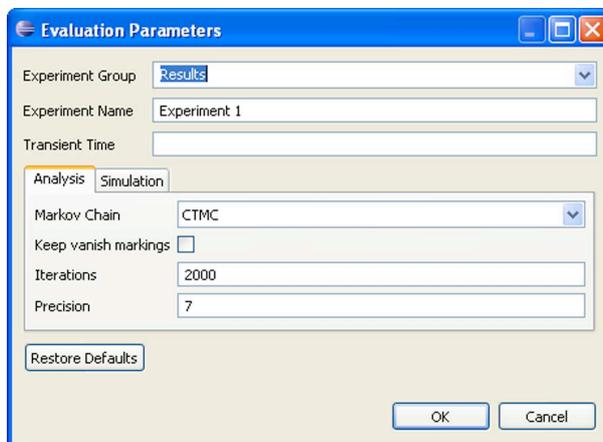


Figura A.4 Janela com as opções de análise com o SPNP.

As abas da referida figura determinam a técnica utilizada para analisar o modelo. No caso do SPNP, estão disponíveis a análise da cadeia de Markov (CM) ou a simulação do modelo. Uma vez analisado o modelo, os resultados das métricas são exportados para um arquivo do Excel, conforme apresentado na Figura A.5. As primeiras colunas denotam, respectivamente, o nome, a descrição e a expressão da métrica analisada. A partir da quarta coluna, são apresentados os resultados dos experimentos. No título da coluna, associa-se o nome do experimento, informado no campo *Experiment Name* da janela, com as opções de análise. Logo, cada experimento irá adicionar uma coluna extra à planilha. Um comentário com os parâmetros utilizados na análise do modelo também é adicionado à célula com o nome do experimento. Os experimentos são agrupados em pastas cujo nome é definido no campo *Experiment Group* da janela com as opções de análise. Com essa abordagem, diversos experimentos podem ser realizados em um modelo, facilitando a visualização e a análise dos resultados.

As métricas do modelo são definidas a partir da propriedade *metrics* presente na *properties view* quando a SPN está selecionada. A Figura A.6 apresenta a janela de edição das métricas. Cada uma destas possui os seguintes atributos: um nome identificador único, um tipo, uma *flag* indicando se ela deverá ser avaliada, uma descrição e a sua expressão.

O tipo da métrica pode ser *basic*, *reward* ou *totaliser*. As métricas do tipo *basic* podem ser definidas utilizando-se a notação do TimeNET ou do SPNP. Caso seja utilizada a notação do SPNP, o modelo não poderá ser analisado pelo TimeNET. No caso de se utilizar a notação do TimeNET, elas serão convertidas para a notação do SPNP automaticamente, quando este

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Metric	Description	Expression	Experiment 1	Experiment Group: Results			
2	rate_fase1	rate da fase 1	return rate("tp_MI0_ PRC");	0,06704921	Experiment Name: Experiment 1			
3	rate_fase2	rate da fase 2	return rate("tp_MI1_ PRC");	0,06704921	Solver: SPNP			
4	rate_fase3	rate da fase 3	return rate("tp_MI2_ PRC");	0,06704921	Evaluation Method: Analysis			
5	consumo_el_fa na fase 1	consumo de eletricidade	return (63.6800*rate_ fase1());	4,269693668	Transient Time:			
6	consumo_el_fa na fase 2	consumo de eletricidade	return (102.9400*rate_ fase2());	6,902045636	Markov Chain: CTMC			
7	consumo_el_fa na fase 3	consumo de eletricidade	return (22.9600*rate_ fase3());	1,539449852	Keep vanish markings: false			
8	custo_el_fase1 na fase 1	custo de eletricidade	return cost(0,0.19141, consumo_el_f ase1());	0,817262065	Iterations: 2000			
9	custo_el_fase2 na fase 2	custo de eletricidade	return cost(0,0.19141, consumo_el_f ase2());	1,321120555	Iterations: 2000			
					Precision: 7			

Figura A.5 Resultados da análise com o SPNP exportados para o Excel.

for utilizado para analisar o modelo. No caso do tipo *reward*, apenas a notação do SPNP (que suporta as SRNs) deverá ser utilizada. Métricas desse tipo são desconsideradas ao se analisar o modelo com o TimeNET. Finalmente, métricas do tipo *totaliser* realizam um pós-processamento dos resultados obtidos a partir da análise, efetuando operações sobre eles. As métricas desse tipo devem utilizar a notação do Groovy (Koenig et al., 2007). Suponha-se que duas métricas denominadas *m1* e *m2* foram definidas e analisadas, seja com o TimeNET ou com o SPNP, resultando nos valores 5 e 7, respectivamente. Uma métrica do tipo *totaliser* *m3* definida com a expressão $2 * m1 + m2 / 2.0$ daria como resultado 13.5. Como o SPNP provê suporte à definição de métricas complexas, as métricas do tipo *totaliser* fazem-se necessárias apenas para o caso de se utilizar o TimeNET como ferramenta de análise.

A *flag* que indica se a métrica está ativa pode ser utilizada para desabilitar uma ou mais métricas antes de se realizar um experimento. Na Figura A.6, é possível observar que o campo com a expressão da métrica possui a funcionalidade de *code completion*, comum em ferramentas de programação como o próprio Eclipse. A janela com as opções do *code completion* apresenta algumas funções que podem ser utilizadas na definição de métricas, guardas, pesos

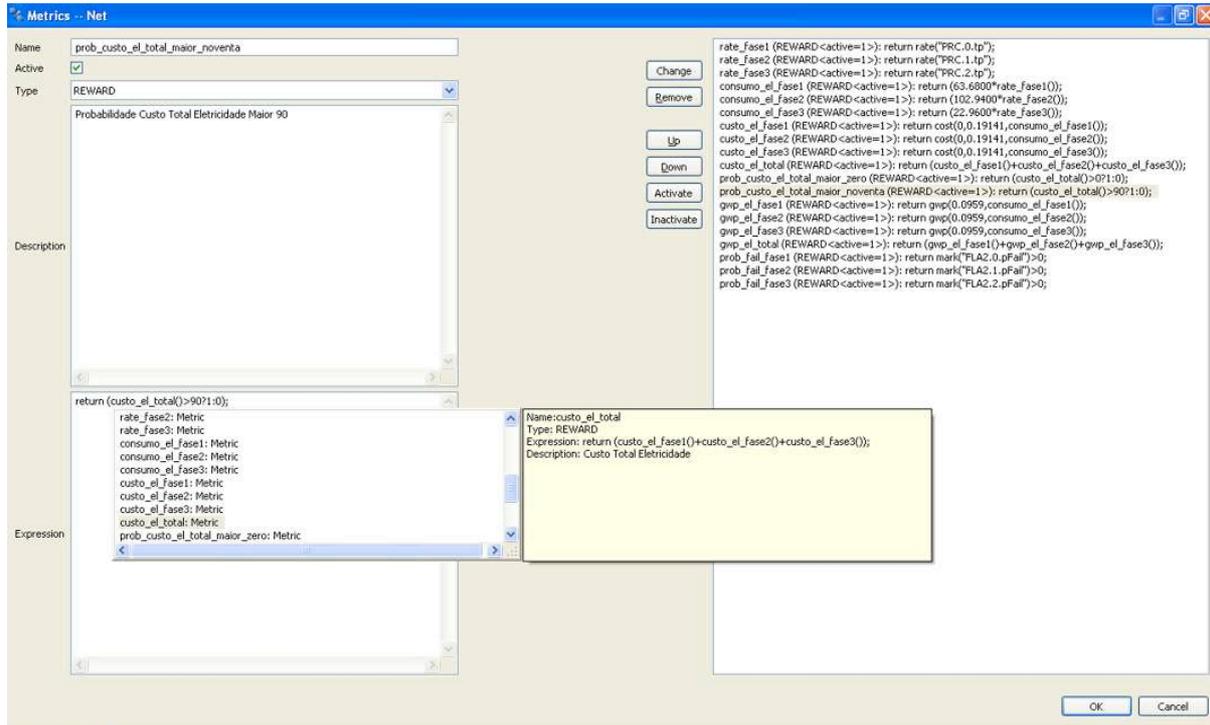


Figura A.6 Definição de métricas na ModSPN.

de arcos e outras propriedades de objetos que podem ser definidas a depender da marcação. A notação $\langle \text{MODULO} \rangle . \langle \text{INSTANCIA} \rangle . \langle \text{ELEMENTO} \rangle$ é utilizada para se referir a um elemento (lugar ou transição) de uma instância de um módulo. Ao se analisar o modelo ou utilizar a opção *Flatten*, esses elementos e as expressões serão automaticamente alterados para a notação $\langle \text{ELEMENTO} \rangle _ \langle \text{MODULO} \rangle _ \langle \text{INSTANCIA} \rangle$.

A validação dos modelos é realizada através de expressões que utilizam a *Object Constraint Language* (OCL) (OMG – Object Management Group, 2006; GMF Constraints, 2009). Essa validação pode ser utilizada para apresentar mensagens de erro ou advertência ou apenas informações para o usuário. A obrigatoriedade de campos, a informação de valores inválidos ou mesmo a conexão indevida de elementos, podem ser validadas utilizando-se essa linguagem. Além das validações básicas, a OCL poderia ser utilizada para incluir regras de composição entre os módulos definidos. Assim, o projetista poderia especificar, por exemplo, que a fusão de um lugar p_0 das instâncias de um módulo M_1 só poderá ser realizada com um lugar p_0 das instâncias de um módulo M_2 .

Listagem de funções criadas no Sage

O Sage é uma ferramenta *Open Source* utilizada para efetuar cálculos matemáticos (Sage Group, 2009). Sua utilização é semelhante à de outras ferramentas conhecidas para esta finalidade como o MatLAB (Hanselman e Littlefield, 1997), Scilab (Gomez et al., 1998) ou Octave (Eaton et al., 2008).

Esta ferramenta foi utilizada em conjunto com o pacote do SageTEX do Latex, para efetuar diversos cálculos entre eles: invariantes e probabilidades dos estados das cadeias de Markov (CMs). Para esta finalidade, foram criadas diversas funções para auxiliar estes cálculos. Abaixo segue a listagem das funções criadas.

```
def solve_linear_system(equations,variables):
    reset_sle_variables();
    e=equations;
    v=variables;
    lenV=len(variables);
    if lenV==0:
        return vector(SR,[]);
    v=variables;
    if lenV==1:
        v=variables.get(0);
    for i in range(lenV):
        e.append(variables.get(i)==variables.get(i));
    if len(e)==1:
        return vector(SR,solve(equations,v));
    return vector(SR,solve(equations,v)[0]);

def linear_system(expressions,results):
    return [i==j for i,j in zip(expressions.list(),
        results.list())]
```

```
def markov_states(Q):
    p=[];
    for i in range(Q.ncols()):
        v=var('pi%s'%(i));
        p.append(v);
    return vector(SR,p);

def markov_linear_system_res(Q):
    results=[];
    for i in range(Q.ncols()):
        results.append(0);
    results.append(1);
    return Matrix([results]);

def markov_linear_system_exp(Q):
    pSum=[];
    for i in range(Q.ncols()):
        pSum.append(1);
    pi=markov_states(Q);
    pSum=Matrix(pi*Matrix(pSum).transpose());
    piQ=Matrix(pi*Q);
    A=piQ.augment(pSum)
    return A;

def markov_linear_system(Q):
    return linear_system(
        markov_linear_system_exp(Q),
        markov_linear_system_res(Q));

def solve_markov_linear_system(Q):
    return solve_linear_system(
        markov_linear_system(Q),
```

```
markov_states(Q));

def invariants(C,type):
    result=[];
    r=C.nrows();
    if type=="T" or type=="t":
        r=C.ncols();
    for i in range(r):
        v=var('w%s'%(i+1));
        result.append(v);
    return vector(SR,result);

def invariants_linear_system_res(C,type):
    result=[];
    r=C.ncols();
    if type=="T" or type=="t":
        r=C.nrows();
    for i in range(r):
        result.append(0);
    return Matrix([result]);

def invariants_linear_system_exp(C,type):
    I=invariants(C,type);
    if type=="t" or type=="T":
        result=Matrix(C*I);
    if type!="t" and type!="T":
        result=Matrix(C.transpose()*I);
    return result;

def invariants_linear_system(C,type):
    return linear_system(
        invariants_linear_system_exp(C,type),
        invariants_linear_system_res(C,type));
```

```
def solve_invariants_linear_system(C,type):
    return solve_linear_system(
invariants_linear_system(C,type),
invariants(C,type));

def subs_equations_vars(eqs,**kwds):
    result=[];
    for eq in eqs:
        result.append(eq.subs(**kwds));
    return vector(SR,result);

def lhs_equations(eqs):
    result=[];
    for eq in eqs:
        result.append(eq.lhs());
    return vector(SR,result);

def rhs_equations(eqs):
    result=[];
    for eq in eqs:
        result.append(eq.rhs());
    return vector(SR,result);

def reset_sle_variables():
    for P in sage.interfaces.quit.expect_objects:
        R=P();
        if R.name()=="maxima":
            R.execute("%rnum:0");

#####
#Funções utilizadas para a aproximação por fases
#####
```

```

def coef_variacao(media,desvio):
    return desvio/media;

def approx(media,desvio):
    coef = coef_variacao(media,desvio);
    if coef == 1:
        return "Exponencial\n delay=%s"%media;
    if coef < 1:
        fases = hipo_fases(media,desvio)[0];
        delays = hipo_delay(media,desvio,fases);
        if delays[0][0]==delays[0][1]:
            return "ERLANG\n fases=%s, delay=%s"
                %(fases+1,delays[0][0]);
        return "HIPO-EXPONENCIAL\n fases=1+%s, \n
OPÇÃO 1:\n delay 1=%s, delay 2=%s\n
OPÇÃO 2:\n delay 1=%s, delay 2=%s"%
(fases,delays[0][0],delays[0][1],delays[1][0],
delays[1][1]);
    if coef > 1:
        probs = hyper_prob(media,desvio);
        delay = hyper_delay(media,desvio);
        return "HIPER-EXPONENCIAL\n prob 1=%s,
prob 2=%s, delay=%s"%(probs[0],probs[1],
delay);
    return 0;

def hipo_fases(media,desvio):
    v=[]
    aux=coef_variacao(media,desvio)^-2;
    a=ceil(aux-1);
    b=floor(aux)+1;
    for n in range(a,b):
        v.append(n);

```

```
    return v;
def hipo_delay(media,desvio,fases):
    v = sqrt(fases*(fases+1)*desvio^2-fases*media^2);
    return [(media-v)/(fases+1),
            (fases*media+v)/(fases*(fases+1))],
            [(media+v)/(fases+1),
            (fases*media-v)/(fases*(fases+1))]];

def hyper_prob(media,desvio):
    w1=(2*media^2)/(media^2+desvio^2);
    w2=1-w1;
    return [w1,w2];
def hyper_delay(media,desvio):
    return (media^2+desvio^2)/(2*media);
```