

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE MESTRADO EM LOGÍSTICA E PESQUISA OPERACIONAL

**CONTROLE SUPERVISÓRIO DA CADEIA PRODUTIVA DO BIODIESEL DA
MAMONA BASEADO EM REDES DE PETRI**

BRUNO DE ATHAYDE PRATA

ORIENTADOR: Prof. Dr. João Bosco Furtado Arruda
CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Giovanni Cordeiro Barroso

FORTALEZA - CE
SETEMBRO / 2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE MESTRADO EM LOGÍSTICA E PESQUISA OPERACIONAL

BRUNO DE ATHAYDE PRATA

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Logística e Pesquisa Operacional da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências (M.Sc.) em Logística e Pesquisa Operacional.

Orientador: João Bosco Furtado Arruda

Co-orientador: Giovanni Cordeiro Barroso

FORTALEZA - CE

SETEMBRO / 2007

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Umbelina Caldas Neta.

P924c Prata, Bruno de Athayde
Controle supervisorio da cadeia produtiva do biodiesel da mamona
baseado em redes de Petri / Bruno de Athayde Prata.

135 f. il. color., enc.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de
Tecnologia, Fortaleza, 2007.

Área de Concentração: Logística e Pesquisa Operacional.

Orientador: Prof. Dr. João Bosco Furtado Arruda.

1. Logística 2. Pesquisa Operacional 3. Agronegócio. I Arruda,
João Bosco Furtado (orient.) II. Universidade Federal do Ceará –
Mestrado em Logística e Pesquisa Operacional III Título

CDD 658.78

**CONTROLE SUPERVISÓRIO DA CADEIA PRODUTIVA DO BIODIESEL DA
MAMONA BASEADO EM REDES DE PETRI**

Bruno de Athayde Prata

DISSERTAÇÃO SUMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE
MESTRADO EM LOGÍSTICA E PESQUISA OPERACIONAL DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO CEARÁ COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM LOGÍSTICA E PESQUISA
OPERACIONAL.

Aprovada por:

Prof. João Bosco Furtado Arruda, PhD.

Prof. Giovanni Cordeiro Barroso, D. Sc.

Prof. Mário Otávio Batalha, Dr.

Profª. Sílvia Maria de Freitas, D. Sc.

**FORTALEZA, CE - BRASIL
SETEMBRO/2007**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade Federal do Ceará (UFC), instituição que possibilitou minha formação como engenheiro e mestre, e que, acima de tudo, me ensinou a enxergar um pouco mais a realidade. Sinto-me realizado por ter tido a oportunidade de estudar na Universidade supracitada e sempre levarei um pouco dela comigo pelo resto de minha vida.

Agradeço a todos os servidores da UFC que nas coordenações, nos departamentos, nos laboratórios, nas pró-reitorias, nas bibliotecas, nos consultórios e nos restaurantes universitários, deram fundamental suporte às minhas atividades estudantis. Sem o apoio destas pessoas, minha vida acadêmica teria sido completamente inviável.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo que viabilizou o pleno desenvolvimento de meu Mestrado, bem como por financiar minha participação em congressos científicos.

Agradeço a Emanuel Fraga Bernardo pelo apoio, desde meu ingresso no mestrado, até o momento de minha defesa. Sua seriedade, competência e amizade engrandeceram soberbamente minha formação como mestre.

Agradeço ao professor João Bosco Furtado Arruda por todos os ensinamentos concedidos e, sobretudo, pela visão humanista e sistêmica que ele sempre me passou em sala de aula. Agradeço também ao professor Bosco pela concessão da fabulosa infraestrutura do *Grupo de Estudo e Pesquisa em Infra-estruturas de Transporte e Logística da Energia* (GLEN) e pelo acervo bibliográfico cedido, pois foram condições imprescindíveis para a concretização de meu trabalho.

Agradeço ao professor Giovanni Cordeiro Barroso pela consideração, pelo respeito, pela valiosa amizade e pela vasta gama de lições que com ele aprendi. Sua simplicidade e sua competência foram, e continuam a ser, inestimáveis modelos para minha formação, tanto como indivíduo quanto como pesquisador.

Agradeço aos professores Mário Otávio Batalha e Sílvia Maria de Freitas pelos valiosos conselhos que permitiram o aperfeiçoamento, tanto da forma quanto do conteúdo, desta Dissertação.

Agradeço ao professor Ernesto Ferreira Nobre Júnior, pessoa de goza de minha profunda admiração, gratidão e estima, pelo aprendizado, pela convivência, pelo apoio e, principalmente, pela incondicional amizade.

Agradeço à professora Sílvia Maria de Freitas pela orientação em estudos sobre análise de agrupamento, estudos estes que foram extremamente valiosos em minha formação acadêmica.

Agradeço aos professores Américo, Welliandre, Bosco, Marta, Sílvia e Lassance pelas formidáveis disciplinas que, ministradas soberbamente, propiciaram-me valioso conhecimento técnico e científico.

Agradeço ao professor José Renato de Brito Sousa pelos valiosos conselhos e pela concessão da ferramenta SuperSin.

Agradeço ao colega Rômulo pelo apoio no estudo de monitores no *CPNTools*.

Agradeço ao César (GESLOG) pela camaradagem e eficiência em suas atividades.

Agradeço aos colegas de mestrado Auricélio, Cristiano, Elienay, Emílio, Marília, Mauri, Messias, Paulo e Roberto Linard pela salutar convivência e camaradagem.

Agradeço ao amigo Márcio pela convivência e pelo contínuo aprendizado nos estudos, seminários e trabalhos de equipe.

Agradeço ao amigo Glawther pelos momentos de aprendizado e de descontração na sala 9 do GLEN.

Agradeço ao casal gesloguiano, Roberto Júnior e Luciana, pela amizade, pelo conhecimento concedido e pela vasta consideração que sempre tiveram para com a minha pessoa, consideração esta recíproca e duradoura.

Agradeço aos amigos Alexandre, Carlildson, Cris, Ednardo, Eloneide, Érico George, Magno, Nauri, Rosiane e Teresa pela incondicional amizade.

Agradeço ao amigo Ciro, pela incomensurável consideração que ele sempre teve por mim, pelos inestimáveis conhecimentos transmitidos e pelo incondicional apoio. Eu estaria em eterno débito para com ele, se houvesse dívida entre amigos...

Agradeço ao amigo Regis pelo apoio no processo seletivo do mestrado, no desenvolvimento das disciplinas, na elaboração de pesquisas e na conclusão deste trabalho. Sua participação foi vital para meu desempenho acadêmico e sou-lhe eternamente grato por tudo.

Agradeço ao meu tio Archimedes Fortes Avelino pelo inestimável apoio, pelos conselhos e pelos inúmeros conhecimentos de matemática, física e engenharia concedidos nestes últimos anos.

Agradeço aos meus sogros Ivan Linhares Pessoa e Maria Carmosa Paulino Sena pelos incomensuráveis apoio e consideração.

Agradeço aos meus queridos pais, Benedito José Nogueira Prata e Helena Badaró de Athayde Prata, por moldarem o meu caráter de maneira singular e por me apoiarem com tamanho afinco ao longo dos meus anos de vida. Sem dúvida alguma, todos os postos que galguei até hoje foram alcançados pelas condições propiciadas por eles.

Agradeço a Nadja Paulino Pessoa Prata, minha querida esposa, por tudo.

Dedico este trabalho aos nobres e virtuosos que, apesar de todas as adversidades e injustiças da vida terrena, mantêm suas condutas ilibadas.

“É preciso estar sempre do lado da razão com tal firmeza que nem a paixão do povo nem a violência tirânica façam com que se desvie dela. Quem será, porém, essa fênix da equidade? A integridade tem poucos seguidores constantes. Muitos a elogiam, mas poucos a praticam. Outros a seguem até o limite do perigo: então os falsos a renegam e os políticos a simulam. As pessoas íntegras não se importam de opor-se à amizade, ao poder e à própria conveniência. Já os astutos elaboram desculpas sutis, seja por motivos superiores, seja por razões de Estado. O homem constante, no entanto, considera a dissimulação uma traição e valoriza mais a tenacidade que a sagacidade. Está ao lado da verdade e, se acaba se afastando dos demais, não é por inconstância, mas porque em primeiro lugar está a razão”.

Baltasar Gracián

SUMÁRIO

Agradecimentos.....	v
Lista de Figuras.....	xii
Lista de Tabelas.....	xiv
Lista de Quadros.....	xv
Lista de Nomenclaturas e Abreviações.....	xvi
Resumo.....	xviii
Abstract.....	xix
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Modelagem de Sistemas a Eventos Discretos.....	3
1.3 O controle supervisorio de Sistemas a Eventos Discretos.....	7
1.4 Modelagem de cadeias produtivas via redes de Petri.....	10
1.5 O controle supervisorio em sistemas agroindustriais.....	11
1.6 Problema da pesquisa, objetivos e metodologia.....	15
1.6.1 Problema da pesquisa.....	15
1.6.2 Objetivos.....	16
1.6.3 Etapas da pesquisa metodologia.....	16
1.7 Estrutura da dissertação.....	18
2. A CADEIA PRODUTIVA DO BIODIESEL DA MAMONA.....	19
2.1 A biomassa <i>versus</i> combustíveis fósseis.....	19
2.2. O biodiesel.....	21
2.3. A mamona e suas aplicações.....	27
2.4. A cadeia produtiva do biodiesel da mamona.....	33
3. DEFINIÇÕES.....	43
3.1 Linguagens formais, autômatos e geradores.....	43
3.1.1 Linguagens formais.....	43
3.1.2 Autômatos.....	44
3.1.3 Geradores.....	46
3.2 Redes de Petri.....	47
3.2.1 Redes de Petri lugar-transição.....	47
3.2.2 Redes de Petri com funções de habilitação das transições.....	50
3.2.3 Redes de Petri coloridas.....	52

	xi
3.2.4 Redes de Petri com restrições de tempo.....	54
3.2.5 Redes de Petri controladas.....	56
3.3 Teoria do Controle Supervisório.....	57
4. CONTROLE SUPERVISÓRIO DE SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS BASEADO EM REDES DE PETRI.....	60
4.1 Método das redes de Petri controladas.....	60
4.2 Método das Restrições Generalizadas Mutuamente Excludentes.....	62
4.3 Método dos invariantes de lugar.....	66
4.4 Método das redes de Petri com funções de habilitação das transições.....	73
4.5 Outras abordagens.....	80
5. RESTRIÇÕES DE CONTROLE SOBRE CORES DECOMPOSTAS.....	83
5.1 Considerações iniciais.....	83
5.2 Método proposto.....	85
5.3 Experimentos computacionais.....	87
5.4 Demonstração da validade do método.....	91
5.5 Aplicação em redes com arcos com funções de mais de uma variável.....	95
6. MODELAGEM E CONTROLE DA CADEIA PRODUTIVA DO BIODIESEL DA MAMONA.....	100
6.1 Mapeamento das atividades da CP/BDMA.....	100
6.2 Proposição de uma arquitetura de controle supervisório para sistemas logísticos.....	103
6.3 Concepção e análise do modelo.....	105
6.4 Controle do sistema.....	112
6.5 Avaliação de desempenho.....	117
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	124
7.1 Relevância, originalidade e resultados obtidos na pesquisa.....	124
7.2 Limitações da pesquisa.....	125
7.3 Proposições para estudos futuros.....	127
7.4 Considerações finais.....	128
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	129
Anexos	
ANEXO I – Demonstração do método dos invariantes de lugar.....	135

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Ciclo total da resolução de problemas em sistemas	4
Figura 1.2	Sistema Dinâmico de Variáveis Contínuas (a) e Sistema a Eventos Discretos (b).....	6
Figura 1.3	Áreas relacionadas à Teoria de Sistemas a Eventos Discretos.....	7
Figura 1.4	Fases de desenvolvimento do supervisor de um SED.....	9
Figura 1.5	Leiaute básico do sistema.....	12
Figura 1.6	Proposição de agentes de automação e supervisão no agronegócio baseada em sistemas SCADA.....	14
Figura 2.1	Panorama da produção de oleaginosas e de óleo animal no Brasil.....	23
Figura 2.2	Fluxograma do processo de produção de biodiesel.....	26
Figura 2.3	A mamoneira e seus produtos e subprodutos.....	28
Figura 2.4	Sistema agroindustrial da mamona com seus agentes integrantes.....	37
Figura 2.5	Cadeia de Produção Agroindustrial do Biodiesel da Mamona.....	39
Figura 2.6	Ciclos de desempenho logístico.....	40
Figura 2.7	Canais de distribuição do biodiesel da mamona.....	41
Figura 3.1	Trajectoria de um SED.....	43
Figura 3.2	Diagrama de estados de um autômato.....	45
Figura 3.3	Exemplo de disparo de uma transição em uma rede de Petri.....	48
Figura 3.4	Exemplo de regra de disparo de uma transição em uma RPFHT.....	51
Figura 3.5	Exemplo de disparo de uma transição em uma rede de Petri colorida.....	54
Figura 3.6	Laço de retro-alimentação do controle supervísório, em que G representa o sistema não controlado e S o supervisor.....	58
Figura 3.7	Laço de retro-alimentação do controle supervísório no caso de observação parcial.....	59
Figura 4.1	Uma rede de Petri controlada.....	61
Figura 4.2	Rede Petri ordinária: processo seqüencial não controlado.....	64
Figura 4.3	Exemplo de aplicação do método RGME.....	65
Figura 4.4	Exemplo de aplicação do método dos invariantes de lugar.....	68
Figura 4.5	Transformação de uma transição.....	69
Figura 4.6	Modelo não controlável de uma máquina não confiável.....	71
Figura 4.7	A máquina não confiável controlada.....	73

Figura 4.8	Utilização de redes de Petri e Teoria do Controle supervisorio para concepção, análise e controle de um Sistema a Eventos Discretos.....	74
Figura 4.9	Diagrama de blocos do procedimento de síntese do supervisor.....	75
Figura 4.10	Modelo <i>RP</i> – sistema com <i>livelock</i> e <i>deadlock</i>	77
Figura 4.11	Gerador inerente ao grafo de alcançabilidade do modelo da Figura 4.8.....	78
Figura 4.12	<i>RPFHT</i> supervisora – sistema com <i>livelock</i> e <i>deadlock</i>	78
Figura 4.13	Gerador da especificação 1: $\Sigma_c = \{t_4, t_5\}$, $\Sigma_{nc} = \{t_1, t_2, t_3, t_6, t_7\}$ e $Q_m = \{q_2\}$ – sistema com <i>livelock</i> e <i>deadlock</i>	79
Figura 4.14	Rede de Petri supervisora equivalente.....	80
Figura 5.1	Exemplo de rede de Petri colorida com um valor admissível para a variável x	86
Figura 5.2	Exemplo de aplicação do método RCCD.....	86
Figura 5.3	Exemplo de rede de Petri colorida com dois valores admissíveis para a variável x	89
Figura 5.4	Exemplo de aplicação do método RCCD considerando duas especificações.....	90
Figura 5.5	Exemplo de aplicação do método RCCD considerando arcos com funções de mais de uma variável.....	96
Figura 6.1	Diagrama simplificado dos produtos e atividades na CP/BDMA.....	102
Figura 6.2	Proposta de arquitetura de controle supervisorio para sistemas logísticos.....	104
Figura 6.3	Visão espacial das facilidades logísticas da cadeia proposta.....	106
Figura 6.4	Modelagem da CP/BDMA proposta baseada em redes de Petri coloridas.....	107
Figura 6.5	Modelo controlado.....	115
Figura 6.6	Comportamento do tempo de ciclo ao longo dos cenários simulados nas alternativas A e B.....	119
Figura 6.7	Ilustração comparativa dos desempenhos das propostas A e B.....	121
Figura 6.8	Exemplo de convergência dos resultados da simulação (Cenário A4).....	123
Figura 6.9	Exemplo de convergência dos desvios entre as médias acumuladas dos resultados do modelo (Cenário A4).....	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Resumo das matérias-primas para produção de biodiesel.....	22
Tabela 2.2	Composição da produção brasileira de óleos vegetais no ano de 2002....	23
Tabela 2.3	Produção de Biodiesel na União Européia em milhares de toneladas....	24
Tabela 2.4	Comparação das rotas metílica e etílica.....	27
Tabela 2.5	Área colhida, produção, rendimento médio, importação e exportação de mamona em baga do Brasil, 1978 a 2005.....	29
Tabela 2.6	Área colhida, produção e rendimento médio de mamona em baga no Brasil e nos principais Estados produtores, quinquênios 1978/1982 a 1998/2002 e anos 2003, 2004 e 2005.....	30
Tabela 2.7	Espaçamentos aconselháveis para as condições cearenses.....	31
Tabela 2.8	Segmentos e transações do SAIMA.....	36
Tabela 4.1	Descrição dos lugares e das transições da rede de Petri da Figura 4.5.....	72
Tabela 6.1	Dados estimados de produção de mamona, no Estado do Ceará, para o ano de 2007.....	105
Tabela 6.2	Legenda dos lugares da rede apresentada na Figura 6.4.....	108
Tabela 6.3	Legenda das transições da rede apresentada na Figura 6.4.....	108
Tabela 6.4	Legenda dos lugares de controle da rede apresentada na Figura 6.5.....	116
Tabela 6.5	Resumo dos resultados obtidos para o macro cenário.....	119
Tabela 6.6	Resumo dos resultados obtidos para o macro cenário B.....	120
Tabela 6.7	Comparação entre os desempenhos das propostas A e B.....	121

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1	Algoritmo do método RGME.....	63
Quadro 4.2	Algoritmo do método dos invariantes de lugar.....	67
Quadro 4.3	Algoritmo Modificado da Árvore de Alcançabilidade para uma rede com capacidade finita (AMArA).....	76
Quadro 4.4	Algoritmo para a Construção do Gerador da Suprema Linguagem Controlável (ACGS).....	77
Quadro 5.1	Algoritmo do método das Restrições de Controle sobre Cores Decompostas (RCCD).....	85

LISTA DE NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

ACGS	Algoritmo para a Construção do Gerador da Suprema Linguagem Controlável.
ADEF	Autômato Determinístico de Estados Finitos.
AEAC	Álcool Etílico Anidro Combustível.
ADELCAP	Avaliação de Desempenho Logístico de Cadeias Produtivas.
AMArA	Algoritmo Modificado da Árvore de Alcançabilidade.
CD	Centro de Distribuição.
CC	Cooperativa Central.
CL	Cooperativa Local.
CPA	Cadeia Produtiva Agroindustrial.
CP/BDMA	Cadeia Produtiva do Biodiesel da Mamona.
<i>CPNTools</i>	Editor de redes de Petri coloridas, de domínio público, desenvolvido e distribuído pela Universidade de Aarhus (Dinamarca).
CSA	<i>Commodity System Approach.</i>
GCP	Gestor da Cadeia Produtiva.
INVL	Método dos Invariantes de Lugar.
PE	Planta de Esmagamento.
PNPB	Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel.
PP	Planta de Produção
RCCD	Restrições de Controle sobre Cores Decompostas.
RGME	Restrições generalizadas mutuamente excludentes.
<i>RP</i>	Redes de Petri.
<i>RPC</i>	Redes de Petri Coloridas.
<i>RPCO</i>	Redes de Petri Controladas.
<i>RPE</i>	Redes de Petri Estocásticas.
<i>RPFHT</i>	Redes de Petri com funções de habilitação de transições.
<i>RPH</i>	Redes de Petri Híbridas.
<i>RPT</i>	Redes de Petri Temporais.
<i>RPTE</i>	Redes de Petri Temporizadas.
SDVC	Sistemas Dinâmicos de Variáveis Contínuas.
SAD	Sistema de Apoio à Decisão.

SAI	Sistema Agroindustrial.
SAIMA	Sistema Agroindustrial da Mamona.
SED	Sistemas a Eventos Discretos.
TCS	Teoria do Controle Supervisório.
TI	Tecnologia de Informação.
TTRs	Transportadores-Revendedores -Retalhistas

Resumo da Dissertação submetida ao GESLOG/UFC como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências (M.Sc.) em Logística e Pesquisa Operacional.

CONTROLE SUPERVISÓRIO DA CADEIA PRODUTIVA DO BIODIESEL DA MAMONA BASEADO EM REDES DE PETRI

Bruno de Athayde Prata

Setembro/2007.

Orientador: Prof. João Bosco Furtado Arruda, Ph.D.

Co-Orientador: Prof. Giovanni Cordeiro Barroso, D.Sc.

Na conjuntura atual é possível observar o grave problema de escassez energética com o qual a humanidade se depara. Os derivados de petróleo estarão se exaurindo nas próximas décadas e o tempo geológico necessário para a revitalização do estoque desta energia fóssil a inviabiliza no longo prazo. Neste contexto, a busca por fontes renováveis de energia, como, por exemplo, o biodiesel, torna-se de suma importância. Diversas oleaginosas podem ser empregadas para a produção de biodiesel, dentre as quais pode ser destacada a mamona. O agronegócio da mamona constitui-se numa cadeia produtiva complexa, tornando necessários esforços dirigidos para a estruturação desta cadeia ainda incipiente. Sistemas a Eventos Discretos (SED) vêm sendo amplamente utilizados na modelagem de cadeias produtivas, apoiando o processo de planejamento e de gerenciamento de tais sistemas. Dentre as técnicas de modelagem de SED, as redes de Petri destacam-se por propiciarem uma representação compacta de um sistema e por permitirem a sua simulação e análise. O controle supervisório de SED consiste em sintetizar um supervisor que coordene as atividades de subsistemas de modo que o sistema geral satisfaça um conjunto de especificações. O objetivo geral deste trabalho foi elaborar um modelo, baseado em redes de Petri, que permitisse o controle supervisório da Cadeia Produtiva do Biodiesel da Mamona (CP/BDMA), com vistas a garantir sua efetividade. Foi desenvolvido um novo método de controle supervisório baseado em redes de Petri coloridas, denominado Restrições de Controle sobre Cores Decompostas (RCCD), sendo também proposta uma arquitetura para o controle supervisório em sistemas logísticos. Idealizou-se um modelo teórico da CP/BDMA no qual foi possível ressaltar a importância da coordenação de atividades logísticas no âmbito da cadeia. Foram estabelecidas especificações funcionais para o sistema e, em seguida, efetuou-se a avaliação do seu desempenho, com base no tempo de ciclo, através da simulação de diversos cenários operacionais. Como conclusões, pode-se ressaltar que o método RCCD constitui-se em uma eficiente abordagem para o controle de SED, que a modelagem proposta permitiu uma maior compreensão acerca do sistema em estudo e que o controle supervisório é uma técnica que pode subsidiar o processo de tomada de decisão no âmbito CP/BDMA, sendo também aplicável a outras cadeias produtivas agroindustriais.

Palavras-chaves: Cadeia Produtiva do Biodiesel da mamona, Agronegócio, Redes de Petri, Controle Supervisório.

Abstract of Thesis submitted to GESLOG/UFC as a partial fulfillment of the requirements for the degree Master of Science (M.Sc.) in Logistics and Operational Research.

SUPERVISORY CONTROL OF CASTOR BEAN BIODIESEL SUPPLY CHAIN BASED ON PETRI NETS

Bruno de Athayde Prata

2007 / September

Advisor: Prof. João Bosco Furtado Arruda, Ph.D.

Co-Advisor: Prof. Giovanni Cordeiro Barroso, D.Sc.

Nowadays many countries present critical problems related to energy demand-supply equilibrium. The reserves of petroleum-based products are unable to face future demand for the next decades. So, the search for alternative sources of energy has been strongly directed to biodiesel. Several fruit oils can be used as a source for biodiesel production and the castor bean is an example. The castor bean agribusiness is a complex commodity chain, making necessary researches for the conception of this incipient chain. Discrete Event Systems (DES) are largely used in the modeling of commodity chains, aiding the planning and the manage of these systems. Among the DES modeling techniques, the Petri nets stands out for as making a easier a compact representation of a system and for permitting its simulation and analysis. The supervisory control aims for synthesize a supervisor that coordinate the activities of the subsystems in order to satisfy a set of specifications in a general system. The general purpose of this work was create a model, based on Petri nets, that permit the supervisory control of Castor Bean Biodiesel Supply Chain (CBB/SC) in order to guarantee its efficiency and efficacy. It was developed a new method for the supervisory control based on colored Petri nets, called Constraints of Control on Decomposed Colors (CCDC). Also, it was proposed a new framework for the supervisory control in logistics systems. Functional specifications were established for found the system which had its performance evaluated, based on the lead time, through simulation of several operational scenarios. As conclusion, it seems clear that the CCDC method is a consistent approach for DES control, the proposed model helps in a better comprehension about the system in analysis and the supervisory control is a theory that can aid the decision making process in similar chains as CBB/SC.

Keywords: Castor Bean Biodiesel Supply Chain, Agribusiness, Petri nets, Supervisory Control.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

“Somos bons em algumas coisas, mas não em tudo. A sabedoria está em compreender nossas limitações. É nesse ponto que entra o rigor cético e austero da ciência. O método da ciência, por mais enfadonho e ranzinza que pareça, é muito mais importante do que suas descobertas.”

Carl Sagan.

Neste capítulo, é apresentada a introdução desta Dissertação de Mestrado, cuja estrutura é dividida em sete seções, explicitadas a seguir. Na primeira seção, são expostas considerações gerais acerca do biodiesel da mamona. Na segunda seção são abordados conceitos básicos sobre Sistemas a Eventos Discretos (SED). Na terceira seção, é introduzido o conceito de controle supervisorio de SED. Na quarta seção, apresentam-se relatos sobre a aplicação de redes de Petri na modelagem de cadeias produtivas. Na quinta seção discute-se o controle supervisorio no domínio de sistemas agroindustriais. Na sexta seção, são apresentados os objetivos e a metodologia do presente trabalho. Por fim, na sétima seção, é apresentada a estrutura da Dissertação, descrevendo-se, sucintamente, os conteúdos de seus capítulos.

1.1 Considerações iniciais

Na conjuntura atual, a sociedade se defronta com a possibilidade próxima de um colapso energético fruto da exaustão de fontes de energia fóssil, elemento proeminente na matriz energética mundial. A estratégia de priorizar os combustíveis fósseis pode inviabilizar, em um horizonte de poucas décadas, as jazidas destes insumos.

Outro inconveniente da priorização da energia fóssil é a questão ambiental, pois os combustíveis fósseis são responsáveis por grande parte da emissão de poluentes nocivos ao meio ambiente, incorrendo em malefícios tais como o efeito estufa e o conseqüente aquecimento global. Diante do exposto, percebe-se a relevância da busca de outras fontes de energia, de modo a mitigar tais problemas.

Vidal e Vasconcellos (1999) apontam a biomassa como uma opção para resolução da crise energética mundial. O termo biomassa refere-se a plantas fotossintetizantes e a gorduras animais que absorvem energia solar, podendo armazená-las e sob a forma de óleos, possibilitando seu uso para mover máquinas.

As oleaginosas são vegetais capazes de armazenar energia solar e que, após ter sementes, frutos, amêndoas ou grãos prensados, fornecem óleos vegetais extremamente ricos em valor energético. O uso de tais óleos pode suprir o uso de derivados de petróleo em diversas atividades humanas, tais como a produção e o transporte de mercadorias.

Os óleos vegetais constituem-se insumo de um novo combustível denominado *biodiesel*. De acordo com Parente (2003), o biodiesel é um combustível limpo, biodegradável e renovável que pode substituir o diesel mineral com diversas vantagens técnicas, ambientais e econômicas.

No caso brasileiro, outra vantagem inerente ao biodiesel diz respeito à questão geopolítica. A produção do combustível em foco pode mitigar, em um horizonte de médio prazo, a dependência do país por fontes externas de energia, como, por exemplo, o gás natural.

Segundo Oliveira e Costa (2002), a viabilidade econômica do biodiesel está relacionada à substituição das importações de combustíveis fósseis e às vantagens ambientais inerentes, como a redução da emissão de materiais particulados e de enxofre, que evitará custos com saúde pública, podendo também gerar recursos internacionais do mercado de carbono.

O uso de oleaginosas como insumo para a produção do biodiesel possui um forte apelo social. Tal prática pode gerar emprego e renda nas zonas rurais, minimizando os fluxos migratórios dos habitantes do campo para os grandes centros urbanos e permitindo que tal parcela da população tenha boas condições de vida.

Diversas oleaginosas podem ser empregadas para a produção de biodiesel, dentre as quais podem ser destacadas a soja, o amendoim, o algodão, o dendê, o babaçu e a mamona. A mamoneira é uma cultura bastante disseminada no Brasil e, em especial, no

semi-árido nordestino. Sua produção necessita de poucos insumos, tais como água, fertilizantes, herbicidas e equipamentos, requerendo solo de baixa qualidade e podendo ser cultivada em sistema consorciado.

As bagas de mamona têm elevado valor energético e, quando prensadas, culminam na formação de óleo e torta (ou bagaço). O óleo possui inúmeras aplicações industriais, dentre elas produção de biodiesel, enquanto a torta pode ser empregada na produção de ração animal e adubo. Além da obtenção de óleo e torta, da mamona obtém-se, ainda, celulose, oriunda de seu caule e sistema radicular, e seda, advinda da alimentação de bichos-da-seda com suas folhas.

Dado o incentivo do Governo Federal para a produção de biodiesel, o Estado do Ceará encontra-se na iminência de iniciar a produção de biodiesel da mamona em larga escala. Tal processo não se restringe apenas à produção de óleo combustível, abrangendo uma série de fatores, tais como inclusão social e distribuição de renda.

Nota-se que o agronegócio da mamona constitui-se numa cadeia produtiva complexa, envolvendo diversos insumos, produtos e subprodutos. Deste modo, tornam-se necessários esforços dirigidos para a estruturação desta cadeia ainda incipiente, com vistas a minimizar suas ineficiências e maximizar seus benefícios.

Tendo em vista que cadeias logísticas são sistemas complexos, métodos quantitativos, dentre os quais podem ser destacadas técnicas advindas da Pesquisa Operacional, são de grande valia para o auxílio na concepção, na análise e na gestão de tais sistemas.

1.2 Modelagem de Sistemas a Eventos Discretos

A partir da década de 60, pesquisadores desenvolveram idéias que vieram a compor o campo de conhecimento conhecido com *Análise de Sistemas*. A Análise de Sistemas é adotada para caracterização e solução de problemas complexos, envolvendo processos que interagem entre si, suas interfaces com o seu meio-ambiente e o tipo de controle interno desses processos.

Conforme Athey (1982), sistemas são quaisquer conjuntos de componentes os quais podem ser considerados como trabalhando conjuntamente para a consecução de um ou

mais objetivos em comum. Nota-se a amplitude do conceito de sistema e como ele pode ser relacionado a uma vasta gama de situações práticas.

Athey (1982) apresenta a abordagem sistêmica para resolução de problemas, composta pelas seguintes etapas: formulação do problema, coleta e avaliação de informações, desenvolvimento de soluções potenciais, avaliação das soluções trabalháveis, escolha da melhor solução, comunicação da solução do sistema, implementação da solução e estabelecimento de padrões de desempenho. O ciclo completo da solução de problemas por intermédio da abordagem sistêmica é iterativo e está ilustrado na Figura 1.1.

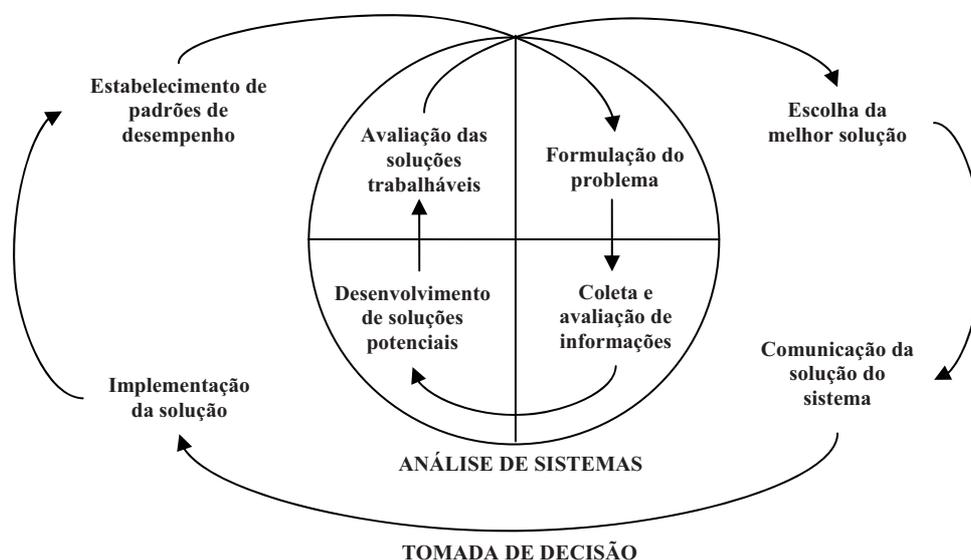


Figura 1.1 – Ciclo total da resolução de problemas em sistemas.
Fonte: Athey (1982).

De acordo com Cassandras e Lafortune (1999), a teoria de sistemas possui cinco objetivos principais, sumarizados a seguir:

- **Modelagem e análise:** consiste na compreensão da operação atual de um dado sistema;
- **Projeto e síntese:** busca a concepção de um sistema que possua um comportamento pré-especificado;
- **Controle:** objetiva selecionar as entradas de um sistema de modo que este se comporte satisfatoriamente sobre diversas condições operacionais, possivelmente adversas;

- **Avaliação de desempenho:** objetiva analisar quão bem o sistema está operando; e
- **Otimização:** busca como controlar um sistema para que ele opere da melhor maneira possível.

Todo sistema, por mais simples que pareça, é composto por diversos componentes, de modo que a análise de todas as variáveis que os influenciam torna-se praticamente inviável. Sendo assim, para a análise de um sistema, torna-se necessária a concepção de um instrumento que o represente resumidamente. Um modelo é uma versão simplificada de um sistema, a qual reflete as variáveis fundamentais do processo em análise.

O estado de um sistema descreve, em um dado instante t de sua operação, o comportamento do sistema naquele instante, de algum modo mensurável. Segundo Cardoso e Valette (1997), os eventos são instantes de observação e de mudança de estado do sistema. A ocorrência de um evento causa, em geral, uma mudança interna no sistema, a qual pode ou não se manifestar a um observador externo (CURY, 2001)¹.

Existem diversas classificações na análise de sistemas, sendo que uma delas diz respeito a sistemas estáticos e dinâmicos.

Para Athey (1982), sistemas estáticos são aqueles que são estritamente fechados aos efeitos do meio ambiente em seu entorno, possuindo objetivos fixos e não tendo princípios de controle associados à consecução de seus objetivos. Já os sistemas dinâmicos são aqueles extremamente suscetíveis à influência do ambiente ao seu redor.

Conforme Cassandras e Lafortune (1999), os sistemas estáticos são aqueles cujos produtos gerados por estes são sempre independentes dos insumos requeridos. Para os sistemas dinâmicos, os *outputs* dependem dos valores passados de *inputs*.

¹ A ação de apertar o botão LIGA/DESLIGA (L/D) do monitor de um computador constitui-se num evento, que implicará em mudança de estado dependendo do estado atual do sistema. Caso o computador esteja ligado, apertar o botão L/D irá ligar ou desligar o monitor do mesmo; entretanto, se o computador estiver desligado, a ocorrência do evento supracitado não incorrerá em mudança de estado (HOPCROFT *et al.*, 2001).

Diversos tipos de sistemas dinâmicos são modelados, controlados e otimizados por intermédio de equações diferenciais, pois, usualmente, é possível representar a mudança de estados por uma taxa de variação entre duas ou mais variáveis. Tais sistemas são conhecidos como Sistemas Dinâmicos de Variáveis Contínuas (SDVC).

Entretanto, na atual conjuntura, o desenvolvimento tecnológico tem propiciado a concepção de sistemas dinâmicos feitos pelo homem (também conhecidos como *man-made dynamic systems*). Nestes casos, usualmente, as equações diferenciais se mostram ineficientes para representar o comportamento do sistema, sendo requeridos outros métodos de análise.

Tal classe de sistemas é conhecida como Sistemas a Eventos Discretos (SED) e tem sido amplamente pesquisada nas últimas décadas. Na Figura 1.2, são ilustrados exemplos de SDVC e SED. A seguir, serão apresentadas algumas definições sobre o conceito em análise.

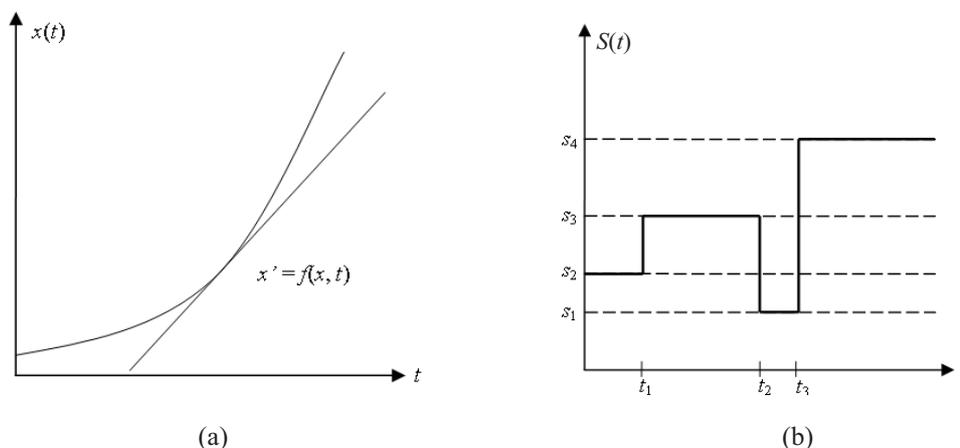


Figura 1.2 – Sistema Dinâmico de Variáveis Contínuas (a) e Sistema a Eventos Discretos (b).

De acordo com Barroso (1996), no que concerne à Teoria do Controle Supervisório, a Pesquisa Operacional pode ser vista como a ciência das operações e eventos dos SED. O desenvolvimento da teoria de SED valeu-se, também, de progressos nas áreas da Ciência da Computação e da Teoria de Controle tradicional. Na Figura 1.3 é ilustrado o caráter multidisciplinar da Teoria de Sistemas a Eventos Discretos.

Segundo Ramadge e Wonham (1989, p. 81), “Um Sistema a Eventos Discretos (SED) é um sistema dinâmico que evolui de acordo com a ocorrência abrupta, possivelmente em intervalos irregulares imprevisíveis, de eventos físicos” ².

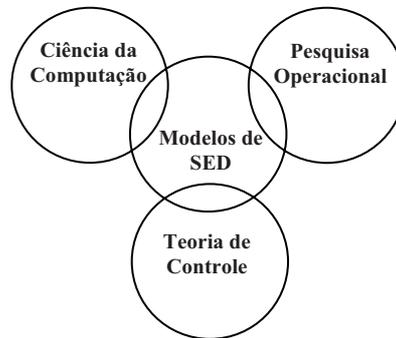


Figura 1.3 – Áreas relacionadas à Teoria de Sistemas a Eventos Discretos.
Fonte: Barroso (1996).

De acordo com Cassandras e Lafortune (1999, p. 36), “Um Sistema a Eventos Discretos (SED) é um sistema de estados discretos e dirigido a eventos, isto é, a evolução dos seus estados depende, na sua totalidade, da ocorrência de eventos discretos assíncronos ao longo do tempo” ³.

Cardoso e Valette (1997, p. 21) definem SED da seguinte forma:

“Sistemas a eventos discretos são sistemas modelados de tal sorte que as variáveis de estado variam bruscamente em instantes determinados e que os valores das variáveis nos estados seguintes podem ser calculados diretamente a partir dos valores precedentes sem ter que considerar o tempo entre estes dois instantes”.

1.3 O controle supervisor de Sistemas a Eventos Discretos

As aplicações de SED são diversas (RAMADGE e WONHAM, 1989; CASSANDRAS e LAFORTUNE, 1999; CURY, 2001), dentre as quais podem ser ressaltadas: manufatura, robótica, controle de tráfego, telecomunicações, transporte, logística e computação. Essas aplicações requerem controle e coordenação de atividades com vistas a assegurar o fluxo disciplinado de eventos.

² Tradução do autor para “A Discrete Event System (DES) is a dynamic system that evolves in accordance with the abrupt occurrence, at possibly unknown irregular intervals, of physical events”.

³ Tradução do autor para “A Discrete Event System (DES) is a discrete-state, event-driven system, that is, its evolution depends entirely on the occurrence of asynchronous discrete events over time”.

Um sistema qualquer possui, em geral, uma extensa gama de eventos com probabilidade de ocorrência. Portanto, um modelo de um sistema desta natureza representaria o seu comportamento não controlado, isto é, tanto eventos desejáveis quanto eventos indesejáveis podem ocorrer.

Partindo-se da premissa de que este tipo de comportamento não é satisfatório, ele pode ser modificado através de controle. A modificação do comportamento do sistema pode ser realizada pela restrição do seu funcionamento a um subconjunto do conjunto de eventos passíveis de ocorrência no sistema não controlado.

A Teoria do Controle Supervisório (TCS) foi idealizada por Ramadge e Wonham no término da década de 80, teoria esta baseada no uso de formalismos matemáticos para limitar a ocorrência de eventos em modelos de SED.

Iordache e Antsaklis (2006) afirmam que o problema do controle supervisório consiste em sintetizar um supervisor que coordene as atividades de subsistemas de modo que o sistema geral satisfaça um conjunto de especificações.

Em linhas gerais, o processo de desenvolvimento de um sistema de controle é ilustrado na Figura 1.4.

A priori, o analista deve definir quais as atividades mais significativas do sistema em foco e elaborar um modelo inicial. Procede-se com a coleta de dados para aprofundar a percepção do analista sobre o sistema em estudo para, em seguida, refinar-se o modelo. Depois de aprimorado, o modelo deve ser implementado e ser validado de acordo com as necessidades do problema (validação lógica, validação estatística, etc.)⁴.

Sendo o modelo válido, o analista pode decidir o que deve ser controlado no sistema, possibilitando o estabelecimento de especificações funcionais. Com base no tipo de restrições a serem impostas, o analista pode optar pelo método de síntese mais adequado. É pertinente destacar que este processo é dinâmico e retro-alimentado.

⁴ O tema da validação de modelos é amplamente discutido pela literatura, sendo, inclusive, revestido de polêmica. Existem diversas correntes de pensamento que divergem em muitos pontos. Para uma discussão mais aprofundada sobre a validação e a verificação de modelos, o leitor pode consultar Shannon (1975) e Moldt e Kordon (2003). Esta última referência é focada às particularidades das redes de Petri.

É usual modelar-se e controlar-se um SED por intermédio de um autômato finito⁵ (RAMADGE e WONHAM, 1989); porém, tal abordagem é extremamente laboriosa e torna-se impraticável para sistemas com grande número de estados e eventos (MOODY e ANTSAKLIS, 1998).

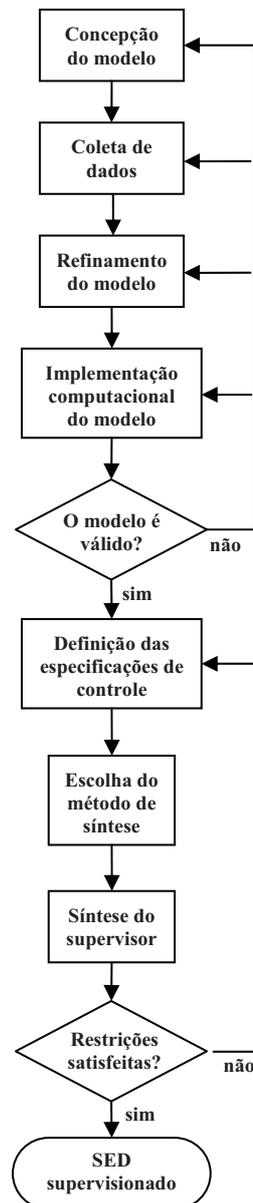


Figura 1.4 – Fases de desenvolvimento do supervisor de um SED.

Um modo de contornar este problema é modelar e controlar um SED por intermédio das redes de Petri. Conforme Murata (1989), as redes de Petri são um tipo de grafo bipartido, dirigido e ponderado, que consegue captar a dinâmica de um Sistema a

⁵ Os autômatos serão definidos formalmente no Capítulo 3 desta Dissertação.

Eventos Discretos. As redes de Petri propiciam uma representação compacta de um sistema por não representarem explicitamente todo o espaço de estados do sistema modelado.

A representação gráfica intuitiva, bem como sua poderosa formulação algébrica, torna as redes de Petri um dos métodos mais indicados para o controle supervisorio de SED (MOODY e ANTSAKLIS, 1998; IORDACHE e ANTSAKLIS, 2006).

1.4 Modelagem de cadeias produtivas via redes de Petri

A operação de uma cadeia produtiva consiste em um sistema dinâmico, no qual os estados do sistema se transformam na medida em que ocorrem as atividades logísticas. Assim, uma cadeia pode ser vista como um SED e, conseqüentemente, modelada pelas redes de Petri.

Raghavan e Viswanadham (1999) apresentaram as redes de Petri como técnica para avaliação de desempenho de cadeias de suprimento. A modelagem empregada pelos autores citados permitiu considerar tanto os processos logísticos quanto as interfaces existentes entre atores na cadeia como um todo. Em um modelo de uma cadeia de abastecimento teórica, foram comparadas diferentes estratégias de planejamento da produção e de políticas de estoque, sendo avaliados seus desempenhos.

O modelo de Avaliação do Desempenho Logístico de Cadeias Produtivas (ADELCAP), proposto por Costa (2002), foi desenvolvido com a finalidade de auxiliar a avaliação do desempenho logístico de cadeias produtivas agroindustriais de maneira genérica. Costa (2002) utilizou as Redes de Petri Temporais (*RPT*) para avaliar o desempenho logístico da cadeia produtiva do melão *in natura* produzido no Baixo Jaguaribe, Ceará.

Yamada *et al.* (2002) utilizaram as redes de Petri para a modelagem e para a análise do processo produtivo da indústria sucroalcooleira, estudando o caso de uma usina situada no município de Jaboticabal, São Paulo.

Desrochers *et al.* (2003) apresentaram, em um exemplo teórico, a modelagem de uma cadeia de suprimentos, em uma perspectiva *Just-In-Time*, em que as atividades eram regidas por um sistema Kanban.

Prata *et al.* (2006) utilizaram as *RPT* para modelagem e avaliação de desempenho da cadeia produtiva do biodiesel da mamona. Tendo em vista que a cadeia em análise ainda não está em operação, foi utilizado um modelo teórico para a concepção de cenários. Foram estabelecidos cenários de operação e quantificados seus tempos de ciclo, permitindo o subsídio à tomada de decisão na alocação de recursos na cadeia.

Machado *et al.* (2006) empregaram as *RPT* para a avaliação do desempenho logístico do transporte rodoviário de madeira. Analisando um caso real de uma empresa florestal de Minas Gerais, os autores obtiveram cenários mais econômicos do que a prática atual da empresa.

Dentre os benefícios da modelagem de cadeias produtivas por intermédio de redes de Petri, observados nas referências acima mencionadas, podem ser salientados:

- A representação gráfica do modelo em redes de Petri facilita tanto a concepção do modelo, por parte do analista, quanto a sua compreensão, por parte do usuário;
- O processo de modelagem é bastante simples;
- O formalismo matemático inerente às redes de Petri permite ao analista uma maior compreensão sobre o comportamento do sistema; e
- As redes de Petri com restrições de tempo propiciam o processo de avaliação de desempenho do sistema modelado.

1.5 O controle supervisorio em sistemas agroindustriais

Apesar do setor agrícola incluir uma das atividades mais antigas da história da humanidade, ele passou por um processo de estagnação tecnológica se comparado a outros setores, como, por exemplo, o de manufatura. Nas indústrias, os investimentos em maquinário e em sistemas de informação foram maciços durante o pós-guerra, propiciando um incremento substancial da eficiência do setor.

No que concerne ao setor agrícola, a estagnação tecnológica supramencionada começou a ser vencida, de modo mais intenso, a partir da década de oitenta, quando ocorreu o desencadeamento de um processo de mecanização e informatização no setor. Ainda

assim, na atual conjuntura, existe um fosso tecnológico entre o setor primário e os setores secundário e terciário.

Conforme Sigrimis *et al.* (2001), o setor agrícola tem se transformado em uma indústria de grande importância e deve contar maciçamente com sistemas avançados de gestão e controle integrados por computadores. Esforços nesta direção culminaram com o surgimento da área tecnológica denotada por *agroinformática* (KOUMBOULIS *et al.*, 2006).

Wolfert *et al.* (1997) propõem um sistema informatizado para o controle de processos em produtores orgânicos de alimentos, conforme evidenciado na Figura 1.5. A premissa para a aplicação de tal arquitetura de controle é o desenvolvimento de um modelo que represente os processos envolvidos a serem monitorados. O modelo interage com dois diferentes domínios: o domínio de controle de negócios e o domínio de controle de processos.

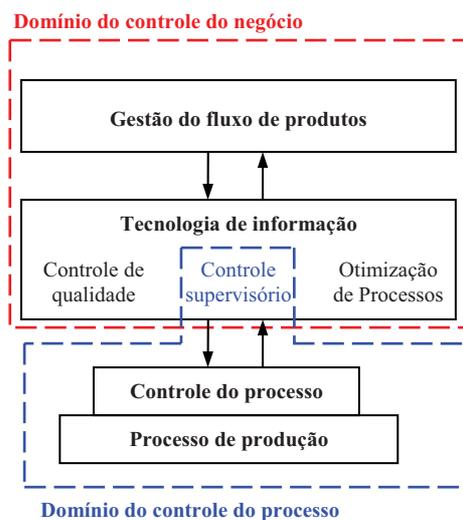


Figura 1.5 – Leiaute básico do sistema.
Fonte: Wolfert *et al.* (1997).

O domínio de controle de negócios refere-se ao planejamento e controle da empresa como um todo, englobando funções gerenciais tais como gestão de investimentos, alocação de recursos, *marketing*, vendas, dentre outras. O domínio de controle de processos refere-se à produção, envolvendo tanto as atividades da produção agrícola como as funções logísticas de armazenagem e transporte.

Com base na Tecnologia de Informação (TI), dados sobre processos gerenciais e processos físicos são processados, resultando em interfaces para o controle supervisorio, o controle de qualidade e a otimização de processos.

Falonis *et al.* (2003) apresenta um sistema informatizado, baseado em internet, para a integração de dados e processos em cadeias de abastecimento no setor do agronegócio. Tal sistema unifica os produtores agrícolas, indústrias de processamento, varejistas, atacadistas, cooperativas de produtores e distribuidores em um sistema via *web*, compartilhando informações em tempo real e coordenando atividades logísticas ao longo da cadeia de suprimentos, com vistas a minimizar o tempo de atendimento de pedidos e os custos envolvidos.

De acordo com Koumboulis *et al.* (2006), os maiores avanços na área de agroinformática dizem respeito ao desenvolvimento de Sistemas de Apoio à Decisão (SAD) que visem monitorar todas as funções de um processo do agronegócio, apoiando a tomada de decisões através da proposição de cenários a avaliação de desempenho do sistema. Tais autores propõem uma arquitetura para um SAD no setor do agronegócio, baseado em sistemas SCADA⁶, conforme ilustrado na Figura 1.6.

Um operador humano entra na interface gráfica com informações inerentes ao sistema a ser gerido. Tais informações alimentam um agente operador, que consiste em um sistema dotado de inteligência artificial, que irá coordenar seis agentes supervisores, descritos a seguir.

- **Agente de aprendizagem eletrônica:** destina-se a prover aos produtores agrícolas toda a informação e conhecimentos requeridos no que tange às práticas de produção e de comercialização de um produto específico;
- **Agente de monitoramento:** objetiva prover o produtor agrícola, bem como os demais agentes do sistema informatizado, das informações acerca do *status*, em tempo real, dos processos agrícolas;
- **Agente de diagnóstico de falhas:** tem como meta diagnosticar, em tempo real, qualquer tipo de falha no sistema agrícola como um todo;

⁶ Sigla para “Supervisory Control and Data Acquisition”, que são uma série de produtos comerciais para o controle de sistemas em tempo real.

- **Agente de comércio eletrônico:** visa subsidiar as decisões acerca de aquisições de insumos e venda de produtos, em uma interface baseada em internet;
- **Agente de informação do clima:** almeja subsidiar o processo decisório, no que concerne aos processos agrícolas, no aspecto das variáveis climáticas que os influenciam; e
- **Agente logístico:** objetiva auxiliar o produtor agrícola no planejamento e no controle dos fluxos físicos, de matérias-primas, de bens intermediários e de bens de consumo, desde suas origens até suas disposições aos clientes finais.

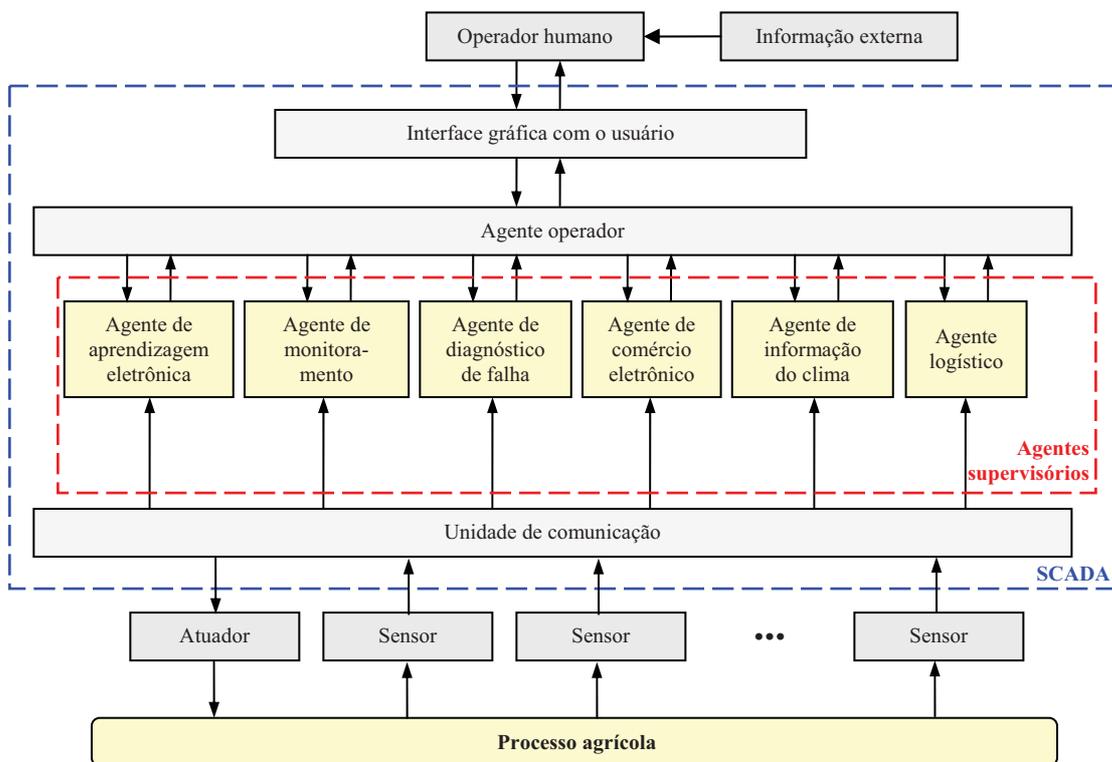


Figura 1.6 – Proposição de agentes de automação e supervisão no agronegócio baseada em sistemas SCADA.

Fonte: Koumboulis *et al.* (2006).

Uma unidade de comunicação interage com os agentes supracitados, recebendo dos sensores e fornecendo instruções aos atuadores. Os sensores são mecanismos que captam e transmitem informações ao longo do processo agrícola, enquanto os atuadores são elementos que operacionalizam os comandos a serem implementados no processo agrícola como um todo.

Diante do exposto, percebe-se a potencialidade do controle supervísório enquanto técnica de apoio à tomada de decisão em cadeias produtivas agroindustriais. Nessa direção, Sigrimis *et al.* (2001, p. 12) tecem o seguinte comentário:

No nível da gestão, muitas operações de produção são baseadas em eventos e a necessidade da gestão de conflitos e do escalonamento eficiente tornam-se aparentes. Tecnologias de manufatura, tais como Sistemas a Eventos Discretos, devem migrar para o campo da produção e operações da gestão da cadeia de suprimentos. Podemos nós desenvolver soluções, usando sistemas híbridos, para a implantação de novos sistemas de controle para o benefício da sociedade? Pode a abordagem hierárquica, baseada em agentes sinérgico-competidores e inteligentes, usando subsistemas em camadas de supervisores inteligentes provendo diretivas em nível de comando para controladores convencionais, produzir soluções para muitos dos problemas do setor? Nós acreditamos que tais sistemas híbridos, os quais podem fazer o melhor uso de todo o conhecimento existente acerca dos processos, abrirão novos horizontes e nos conduzirão até mesmo a desenvolvimentos adicionais. Nosso desafio é encontrar soluções práticas para problemas complexos, deparados pela sociedade, no domínio do controle da agricultura e do ambiente.

1.6 Problema da pesquisa, objetivos e metodologia

1.6.1 Problema da pesquisa

O desempenho de uma cadeia logística influencia significativamente os custos logísticos associados a um produto (bem ou serviço), assim como o nível de serviço ofertado ao cliente. Conforme Ballou (2001), um sistema logístico eficiente permite a uma região geográfica explorar suas vantagens inerentes pela especialização de seus esforços produtivos naqueles produtos que ela tem vantagens competitivas e pela exportação desses produtos para outras regiões.

Segundo Christopher (2001), a finalidade principal de qualquer sistema logístico é a satisfação dos clientes. Assim, a missão do gerenciamento logístico é planejar e coordenar todas as atividades necessárias para alcançar níveis desejáveis dos serviços e qualidade ao custo mais baixo possível.

Através da restrição de ocorrência de eventos indesejáveis, atividades que não agregam valor ao produto e problemas operacionais podem ser minimizados ou até mesmo eliminados. Portanto, nota-se a relevância de controlar as atividades de uma cadeia produtiva.

Assim sendo, pode-se formular o seguinte problema de pesquisa: como modificar o comportamento da Cadeia Produtiva do Biodiesel da Mamona (CP/BDMA) de modo a permitir a ocorrência dos eventos que, essencialmente, contribuem para sua eficiência operacional?

Se a CP/BDMA for analisada como um Sistema a Eventos Discretos (SED), então é possível sintetizar supervisores baseados em redes de Petri que podem controlar a operação de tal sistema, tendo em vista o desejável objetivo da eficácia e da eficiência operacional.

1.6.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é elaborar um modelo, baseado em redes de Petri, que permita o controle supervisorio dos fluxos de safra, óleo e biodiesel na Cadeia Produtiva do Biodiesel da Mamona (CP/BDMA), com vistas a incrementar sua efetividade.

Os objetivos específicos do presente estudo são:

- Obter a estrutura lógica da cadeia produtiva da mamona;
- Compreender a dinâmica operacional da cadeia produtiva da mamona;
- Elaborar especificações funcionais para o controle da cadeia;
- Simular cenários operacionais para apoio à decisão na gestão da cadeia;
- Mensurar o tempo de ciclo (tempo que a mamona leva para se deslocar desde o início do seu processo de produção agrícola até o momento em que se torna insumo para a produção industrial) para efeito de alocação de recursos e como indicador de desempenho logístico da cadeia;
- Propor um método de síntese de supervisores de SED, utilizando redes de Petri coloridas, denominado Restrições de Controle sobre Cores Decompostas (RCCD); e
- Aplicar o método proposto em exemplos de SED, com vistas a avaliar sua abrangência e eficiência.

1.6.3 Etapas da pesquisa e metodologia

A pesquisa foi composta por seis etapas, apresentadas a seguir.

(i) Revisão bibliográfica

A revisão de literatura da presente pesquisa consistiu na busca de trabalhos que abordassem as atividades e a estrutura da CP/BDMA, levantando-se seu estado da arte. Pesquisaram-se, ainda, referências que abordassem modelos baseados em redes de Petri como elementos de controle de SED, e, em especial, referências que tratassem de aplicações industriais.

(ii) Desenvolvimento do método Restrições de Controle sobre Cores Decompostas (RCCD)

Foi desenvolvido o método RCCD para a síntese de supervisores utilizando redes de Petri coloridas. O método foi testado em exemplos teóricos, comprovando-se seu funcionamento computacionalmente e a sua consistência do ponto de vista analítico.

(iii) Estruturação da cadeia

Foram caracterizados os elos da cadeia produtiva do biodiesel da mamona, bem como mapeadas suas principais atividades. Tal estruturação foi realizada através de consultas bibliográficas, de contatos com técnicos da Secretária de Desenvolvimento Agrário (SDA/Ceará) e de contatos com empresas atuantes no setor de produção de biodiesel no Estado.

(iv) Concepção e análise dos modelos

Foram estabelecidos os eventos mais significativos a serem modelados na CP/BDMA, assim como as suas relações de causa e efeito. *A priori*, modelou-se o sistema não controlado e, *a posteriori*, modelou-se o sistema controlado. A concepção e análise dos modelos consistiram nas seguintes atividades:

- a) Definição das atividades a serem modeladas;
- b) Implementação computacional do modelo não controlado;
- c) Análise das propriedades do modelo não controlado;
- d) Definição das atividades a serem controladas;
- e) Implementação computacional do modelo controlado;
- f) Análise das propriedades do modelo controlado;
- g) Simulação de cenários operacionais;
- h) Apresentação e discussão dos resultados.

(v) Conclusões e sugestões para futuros estudos

Nesta etapa, os esforços foram dirigidos para a explicitação das principais conclusões, recomendações e sugestões acerca do método proposto e do modelo idealizado. Por fim, foram concebidas as considerações finais.

(vi) Redação final da Dissertação

Esta etapa consistiu na redação final da Dissertação de Mestrado propriamente dita. A fase de sua elaboração escrita foi realizada ao longo de todo o trabalho, concomitantemente às demais atividades propostas, tendo sido revisada e ampliada na redação final.

1.7 Estrutura da Dissertação

A Dissertação de Mestrado é composta por sete capítulos, descritos a seguir. O primeiro capítulo constitui a introdução do trabalho. No segundo capítulo são apresentados conceitos acerca de biodiesel, mamona e da cadeia produtiva do biodiesel da mamona. No terceiro capítulo, são apresentadas as definições formais referentes a linguagens formais, autômatos e geradores, redes de Petri e Teoria do Controle Supervisório (TCS). No quarto capítulo são apresentados os principais métodos de síntese de supervisores de Sistemas a Eventos Discretos via redes de Petri levantados na literatura. No quinto capítulo, é proposto o método denominado Restrições de Controle sobre Cores Decompostas (RCCD). No sexto capítulo, são apresentadas a modelagem, a simulação e o controle da cadeia produtiva do biodiesel da mamona. Por fim, no sétimo capítulo, são apresentadas as principais conclusões acerca do trabalho, bem como sugestões e recomendações para estudos futuros.

CAPÍTULO 2

A CADEIA PRODUTIVA DO BIODIESEL DA MAMONA

“O todo sem a parte, não é todo; a parte sem o todo não é parte.”

Gregório de Matos.

Neste capítulo, é apresentada e discutida a cadeia produtiva do biodiesel da mamona, sob um enfoque sistêmico e de sustentabilidade. A estrutura do presente capítulo é dividida em quatro seções, explicitadas a seguir. Na primeira seção, é discutido o uso da biomassa em detrimento do uso de combustíveis fósseis. Na segunda seção é apresentado o biodiesel, com suas particularidades técnicas, ambientais e sócio-econômicas. Na terceira seção, aborda-se a mamona e suas aplicações. Por fim, na quarta seção, é apresentada a cadeia produtiva do biodiesel da mamona.

2.1 A biomassa *versus* combustíveis fósseis

O tema da biomassa é muito abrangente, pois ele transcende as fronteiras da problemática técnica energética, situando-se, lado a lado, das questões econômica, social e ambiental de nossa sociedade contemporânea. Dada esta abrangência, é pertinente que se faça uma breve retrospectiva histórica da relação entre energia, recursos naturais e desenvolvimento. Este tópico baseia-se na discussão abordada por Vidal e Vasconcellos (1998).

Os europeus, sobretudo espanhóis e portugueses, lançaram-se ao mar no término do século XIV em busca de especiarias oriundas do oriente, pois precisavam de insumos para sua produção manufatureira. Com a descoberta do continente americano, os países da Europa passaram a drenar recursos naturais do novo continente, em face à supremacia que tinham frente aos povos indígenas nativos.

Com a revolução industrial, idealizada pela Inglaterra no século XIX, a questão energética passou a ser mais crucial do que jamais havia sido até aquele momento da história da humanidade. O maquinário das modernas linhas de produção começava a se desenhar, o transporte eficiente, para levar os bens de consumo aos pontos de demanda,

em tempo hábil, começava a se tornar indispensável e tudo isso exigia energia em quantidades jamais requeridas até então.

Com o passar do tempo, a busca por mais energia, a menores custos, continuava. O século XX se aproximava e clamava por máquinas e veículos cada vez mais potentes; logo, os países hegemônicos (dentre eles, no momento histórico analisado, podemos enquadrar os também setentrionais Estados Unidos e Japão) necessitavam urgentemente de energia.

Mas, onde se encontrava a riqueza: nas gélidas planícies dos países do norte ou nos bilhões e bilhões de joules de energia pura descarregada na superfície dos trópicos pelo astro rei?

O Sol é, indiscutivelmente, a mais significativa fonte de energia a que temos acesso, sendo o fluxo de raios solares o grande responsável pela magnífica biodiversidade existente no nosso planeta. A energia solar é indispensável para o desenvolvimento animal e vegetal, sendo elo na cadeia alimentar de todos os seres vivos. Nesta cadeia, podemos claramente visualizar, por suas conseqüências, que a energia solar é armazenada pelas plantas fotossintetizantes e, assim como a Terra, o Sol é bem mais “caridoso” com os tropicais do que com os setentrionais.

O clima tropical propicia uma constante aparição solar, ou seja, os trópicos tem bem mais energia à sua disposição do que os países hegemônicos podem sequer sonhar em possuir. Energia pura armazenada nos vegetais e animais, combinação magnífica que denotamos por biomassa. Biomassa, a energia da vida, a energia pura, limpa, viável e renovável.

A biomassa é propriedade dos trópicos; entretanto, o volume energético englobado por ela é tamanho, que as regiões que a detém podem compartilhar esta dádiva com todos os outros povos do planeta. Isto interessava aos povos hegemônicos? Estes já dependiam de nossas matérias primas, as quais sugavam com voracidade e frieza e, depender de nossa energia, poderia fragilizá-los econômica e tecnologicamente. Logo, a biomassa foi sobrepujada pelo petróleo, uma fonte energética demasiadamente poluente, de extração complexa e geologicamente finita.

Após cometer inúmeras atrocidades contra o meio onde vive, principalmente nos países ricos, o ser humano acabou chegando, em meados do século XX, à conclusão de que o irrefreável progresso deveria ser mais bem planejado, ou, caso contrário, a vida em nosso planeta correria sérios riscos de extinção.

Sendo assim, o homem não pôde mais negar a existência da biomassa. A biomassa privilegia a vida, o homem e o meio ambiente, podendo alavancar a economia de regiões excluídas e exploradas durante séculos, propiciar a inclusão social de milhões de indivíduos e minorar o impacto do nosso estilo de vida sobre a natureza; ou seja, a biomassa está intrinsecamente ligada ao conceito da sustentabilidade.

2.2 O biodiesel

No final da década de 70, Expedito José de Sá Parente, professor da Universidade Federal do Ceará, realizou, em Fortaleza, a descoberta de um novo tipo de óleo combustível, obtido através de óleos vegetais, o qual poderia substituir o óleo diesel. No dia 30 de outubro de 1980, foi realizado, diante de diversas autoridades locais e nacionais, o relato da descoberta do então intitulado prodiesel. No início da década de 90, o processo de industrialização do novo combustível, que passou a ser denominado biodiesel, foi iniciado na Europa.

De acordo com Parente (2003), o que tem sido denominado de biodiesel é um combustível renovável, biodegradável e ambientalmente correto, sucedâneo ao óleo diesel mineral, constituído de uma mistura de ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos, obtidos da reação de transesterificação de qualquer triglicerídeo com um álcool de cadeia curta - metanol ou etanol.

Parente (2003) define ecodiesel como o combustível obtido da mistura de biodiesel e óleo diesel mineral, em proporções ajustadas de forma que a mistura resultante, quando empregada na combustão de motores diesel, minimize os efeitos nocivos ambientais.

Assim, o biodiesel puro, denotado por B100, seria um combustível composto em sua totalidade por biodiesel. Um combustível composto, por exemplo, de 80% de diesel mineral e de 20% de biodiesel, denotado por B20, seria um ecodiesel. Contudo, não se

fará tal tipo de distinção ao longo deste texto, será utilizado somente o termo biodiesel, e, quando necessário, seguido de sua composição percentual.

O biodiesel se destaca em relação a outros combustíveis limpos como, por exemplo, o gás natural, devido à sua adaptabilidade aos motores de ciclo do óleo diesel. Enquanto o gás natural requer uma adaptação dos motores para ser utilizado, o biodiesel dispensa esta medida, podendo atender toda frota já existente movida a óleo diesel.

Outra substancial vantagem do biodiesel é a inclusão social que ele pode permitir para a população do campo, tendo em vista que, essencialmente, os óleos vegetais, obtidos a partir de culturas agrícolas, são as principais matérias-primas para a fabricação de biodiesel.

O biodiesel é produzido a partir da biomassa, ou seja, matéria orgânica que possa ser aproveitada como insumo para produção de energia. Três tipos de matérias-primas podem ser utilizados para produção de biodiesel: óleos vegetais, gorduras de animais e óleos e gorduras residuais. Na Tabela 2.1, é apresentado um resumo dos insumos para fabricação de biodiesel.

Tabela 2.1 – Resumo das matérias-primas para produção de biodiesel.

Matérias-primas	Exemplos
Óleos vegetais	Mamona, dendê (palma), babaçu, pião manso, algodão, girassol, amendoim, colza (canola), tungue e cártamo.
Gorduras de animais	Sebo bovino, óleos de peixes, óleo de mocotó e a banha de porco.
Óleos e gorduras residuais	Frituras oriundas da produção de produtos alimentícios, esgotos municipais e águas residuais de certas indústrias, tais como de pescados e couro.

Os óleos vegetais podem ser extraídos de plantas, denominadas oleaginosas, através da prensagem de suas sementes, frutos, amêndoas ou grãos, sendo que, após tal operação, tem-se a formação de óleo e bagaço. Dentre as oleaginosas cultivadas na atual conjuntura, podem ser ressaltadas a soja, o dendê, a mamona e a colza.

No Brasil, a soja é predominantemente cultivada nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, sendo produzida, em menor escala, no Norte e no Nordeste. Nessas duas regiões, destacam-se, essencialmente, as oleaginosas dendê, babaçu e mamona. A seguir, na Tabela 2.2, é apresentada a composição da produção brasileira de óleos vegetais no ano

de 2002. Na Figura 2.1, é ilustrada uma visão geral acerca da produção de oleaginosas, por região, no Brasil.

Tabela 2.2 – Composição da produção brasileira de óleos vegetais no ano de 2002.

Produção de Óleos Vegetais	Produção em 2002 (1.000 t)	Percentual (%)
Soja	4937	90,57%
Algodão (caroço)	193	3,54%
Amendoim	28	0,51%
Girassol	56	1,03%
Colza	17	0,31%
Milho	46	0,84%
Dendê	118	2,16%
Palmiste	13	0,24%
Coco	2	0,04%
Mamona	41	0,75%
Total	5451	100,00%

Fonte: GEEDES (2007).

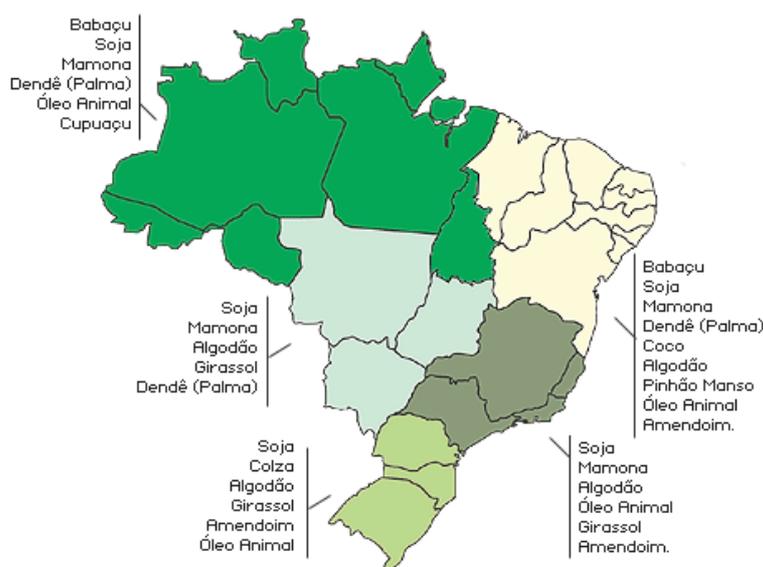


Figura 2.1 – Panorama da produção de oleaginosas e de óleo animal no Brasil.

Fonte: Petrobras (2007).

É pertinente ressaltar que a soja é a oleaginosa empregada para quase a totalidade da produção de óleo vegetal no território brasileiro. Por esta razão, existe uma forte pressão dos produtores de soja para que esta se constitua como principal insumo para produção de biodiesel no Brasil.

Na atual conjuntura, o biodiesel é uma realidade mundial, sendo que sua produção e seu consumo são disseminados em diversos países, como é descrito a seguir:

▪ **Europa:**

Com base na oleaginosa colza (canola), a Alemanha já possui uma rede de distribuição de biodiesel composta por cerca de 2.000 postos de abastecimento de combustível. Outros grandes produtores do biodiesel no continente são a França e a Itália. A seguir, na Tabela 2.3, é ilustrada uma visão geral sobre a produção de biodiesel no continente europeu.

Tabela 2.3 – Produção de Biodiesel na União Européia em milhares de toneladas*

País	2002	2003	2004
Alemanha	450	715	1035
França	366	357	348
Itália	210	273	320
Áustria	25	32	57
Espanha	-	6	13
Dinamarca**	10	41	70
Reino Unido	3	9	9
Suécia	1	1	1,4
República Tcheca	-	-	60
Eslováquia	-	-	15
Lituânia	-	-	5
Total	1065	1434	1933,4

* sujeito a uma margem de erro de +/- 5%.

** sujeito a uma margem de erro de +/- 10%.

Fonte: GEEDES (2007).

▪ **América:**

Na América do Norte, os Estados Unidos têm mostrado enorme interesse, refletido por uma série de projetos de lei e incentivos fiscais, para a massificação da produção de biodiesel. O país conta com uma imensa capacidade de produção do combustível, bem como um promissor mercado; entretanto, estima-se que o biodiesel americano, produzido a partir da soja, poderia chegar a um custo de até 2,5 vezes o custo de produção de petróleo. Assim, diversos estudos vêm sendo dirigidos para minimizar tais custos. No Canadá, o processo de produção e comercialização do biodiesel ainda é bastante incipiente.

Na América do Sul, Brasil e Argentina se destacam quando o assunto é biodiesel. No Brasil, o lançamento do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), no ano de 2004, gerou uma verdadeira revolução no que tange à disseminação do combustível em foco. O tema está permanentemente em voga e os setores público e privado interagem para a consecução do objetivo supramencionado. Na Argentina, o

governo local tem promovido um programa nacional para o biodiesel desde 2001 e tem buscado investimentos externos para impulsionar sua produção.

- **Ásia:**

No Japão, experimentos realizados com o aproveitamento de óleos residuais para a produção de combustíveis remontam à década de 70. Deste modo, ao contrário da maior parte dos países, a produção do biodiesel nipônico não se faz por intermédio de oleaginosas, mas pelo aproveitamento massivo de óleo de cozinha.

Os japoneses conseguiram reduzir substancialmente os impactos ambientais relacionados a tais efluentes e, ainda, obtiveram receitas e economias significativas através do uso do biodiesel nas frotas de caminhões de lixo e de ônibus urbanos.

A Malásia constitui-se no maior produtor mundial de palma (dendê) e visa desenvolver um robusto programa de produção de biodiesel, com o intuito de atingir o mercado da União Européia.

- **África:**

Até o momento, não se tem notícias de movimentos significativos no que concerne à produção e à comercialização de biodiesel no continente africano.

- **Oceania:**

A Austrália já dispõe de robustas usinas de produção de biodiesel operando em seu território e o governo australiano planeja ampliar a capacidade produtiva de biocombustíveis no país até o ano de 2010.

A produção de biodiesel envolve uma série de etapas, conforme é sumarizado na Figura 2.2. Tendo em vista que a matéria-prima, ou seja, o óleo vegetal ou a gordura animal, deve atender especificações de acidez e de umidade, ela deve ser neutralizada e secada ou desumidificada através de processos químicos.

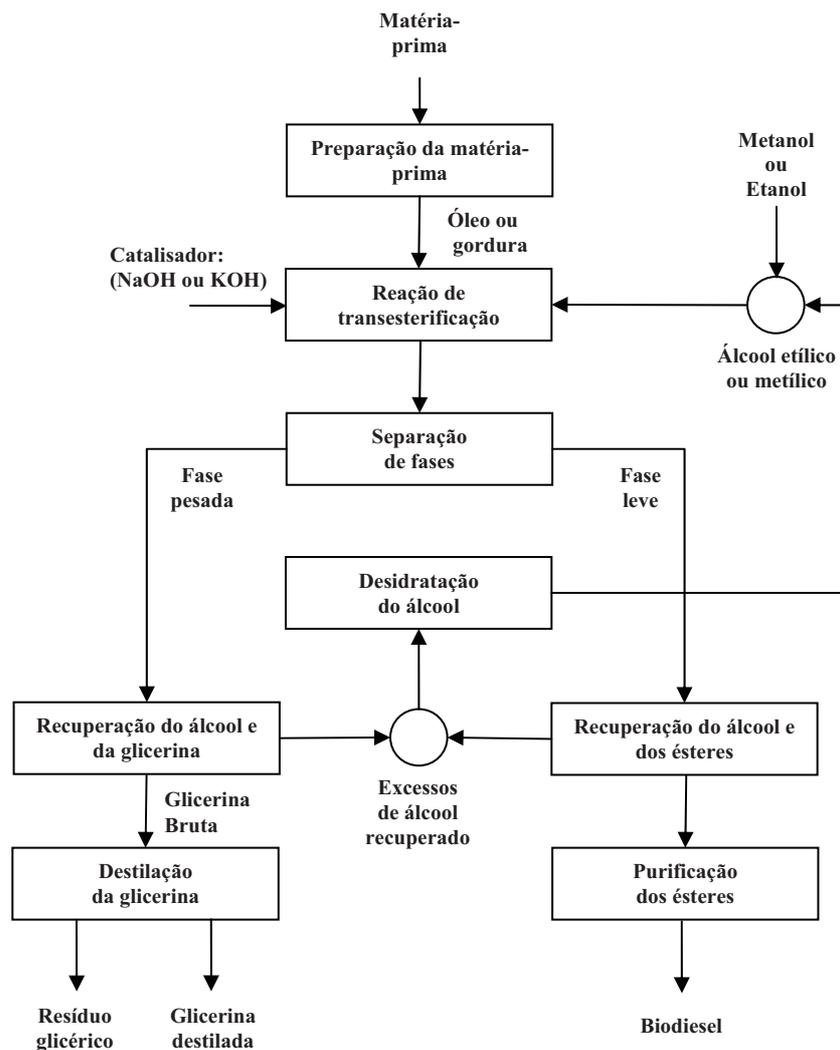


Figura 2.2 – Fluxograma do processo de produção de biodiesel.
Fonte: Parente (2003).

Em seguida, deve ocorrer a reação de transesterificação, que consiste na transformação da matéria-prima em ésteres metílicos, quando o metanol for empregado com agente de transesterificação, ou em ésteres etílicos, quando o etanol for utilizado para o fim supracitado.

É pertinente destacar que ambas as reações químicas produzem um combustível com propriedades químicas equivalentes; entretanto, do ponto de vista técnico e econômico, a opção pela rota metílica é bem mais vantajosa do que a opção pela rota etílica, conforme pode ser elucidado pela Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Comparação das rotas metílica e etílica.

Quantidades e condições usuais médias aproximadas	Rotas do processo	
	Metílica	Etílica
Quantidade consumida de álcool por 1.000 litros de biodiesel	90 kg	130 kg
Preço médio do álcool, US\$ / kg	190	360
Excesso recomendado de álcool, recuperável, por destilação, após reação	100%	650%
Temperatura recomendada de reação	60°C	85°C
Tempo de reação	45 minutos	90 minutos

Fonte: Parente (2003).

Após a transesterificação, a massa bruta de reação deve ser separada em duas fases: uma fase pesada, composta por glicerina bruta, água, álcool e impurezas; e uma fase leve, composta por ésteres metílicos ou etílicos e impurezas reacionais. Em ambas as fases, recupera-se o álcool que, por conter quantidades excessivas de água, necessita ser desidratado.

A etapa seguinte do processo produtivo em descrição é a purificação dos ésteres, que consiste na sua lavagem por centrifugação, seguida por um processo de desumidificação. Tem-se, assim, o biodiesel, cujas características técnicas devem ser ajustadas de acordo com o seu uso.

Paralelamente à obtenção de biodiesel, tem-se a formação de glicerina, produto de alto valor agregado, que pode ser utilizado como insumo para processos produtivos de diversas indústrias, como, por exemplo, do setor cosmético. Nota-se, então, que a produção de biodiesel constitui-se em um processo extremamente rentável, sob o ponto de vista financeiro.

É pertinente salientar que existem outros processos, além da transesterificação, para a produção de biodiesel, como, por exemplo, o procedimento desenvolvido pela PETROBRÁS para a obtenção de biodiesel a partir de certas oleaginosas.

2.3 Aplicações e procedimentos de trato da mamona

A mamoneira⁷ (*Ricinus communis* L.) é uma oleaginosa de relevante importância econômica e social, com inúmeras aplicações na indústria e na agropecuária, sendo encontrada em várias regiões do Brasil.

⁷ No Brasil, também é conhecida pelos nomes de rícino, carrapateira ou palma-criste. Em países de língua inglesa, como Estados Unidos e Inglaterra, são usados os termos *castor beans* ou *castor seeds*.

Suas sementes, depois de industrializadas, dão origem à torta e ao óleo de mamona que, entre outras diversas utilidades, são empregados na produção de plástico, metais, sabões perfumes, couros, tintas e vernizes, além de ser excelente óleo lubrificante para motores de alta rotação e carburante de motores a diesel.

O óleo da mamona é mais denso do que os demais congêneres de origem vegetal. Sua densidade a 15°C varia de 0,945 a 0,965 e entra em ebulição a 265°C. Graças a estas propriedades, aliadas ao ótimo grau de viscosidade, é o lubrificante por excelência para os motores de avião. Lubrifica mais do que os óleos minerais de viscosidade idêntica, pois, graças ao seu forte poder adesivo, tem maior capacidade de penetração do que aqueles óleos, mantendo seu grau de viscosidade mesmo nas altas temperaturas.

Sua torta constitui um bom adubo orgânico e, quando desnitrificada, pode ser aproveitada como ração para animais. Pesquisadores em nutrição animal têm constatado que a torta de mamona atoxicada pode substituir as tortas de algodão, amendoim e soja na alimentação do gado leiteiro, por permitir alto teor lipídico-protéico.

Seu caule pode ser utilizado na indústria do papel e suas folhas, quando adicionadas à ração do gado, aumentam a secreção láctea das vacas, podendo também servir de alimento para o bicho-da-seda. Percebe-se que o desperdício oriundo da exploração da mamona é mínimo, pois dela tudo é aproveitado. A seguir, na Figura 2.3, é ilustrada a mamoneira e seus produtos e subprodutos.

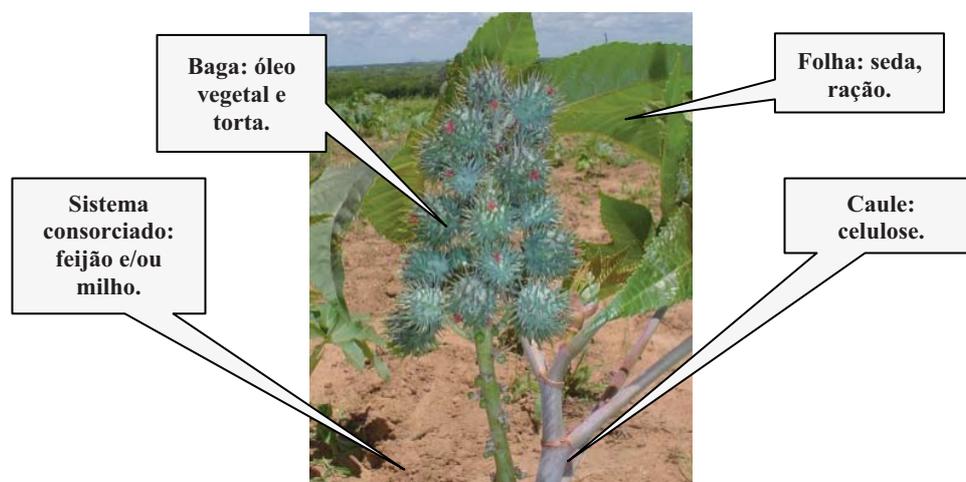


Figura 2.3 – A mamoneira e seus produtos e subprodutos.

Kouri e Santos (2006) abordam os aspectos econômicos do agronegócio da mamona no Brasil e apresentam dados interessantes, como os ilustrados nas Tabelas 2.5 e 2.6.

Tabela 2.5 – Área colhida, produção, rendimento médio, importação e exportação de mamona em baga do Brasil, 1978 a 2005.

Ano agrícola	Área colhida (1.000 ha)	Produção (1.000 t)	Rendimento médio (kg/ha)	Importação (1.000 t)	Exportação (1.000 t)
1977/1978	350,336	317,083	905	6,302	0
1978/1979	374,798	325,149	868	7,247	0
1979/1980	440,511	280,688	637	14,459	0
1980/1981	447,364	291,812	652	7,51	0
1981/1982	461,824	192,148	416	15,912	0
1982/1983	270,13	171,777	636	10,961	0
1983/1984	412,955	222,678	539	10,698	0,001
1984/1985	496,844	417,657	841	28,181	6,272
1985/1986	457,078	263,237	576	68,657	3,985
1986/1987	262,516	103,568	395	46,738	0,003
1987/1988	278,869	147,901	522	26,271	0,003
1988/1989	269,119	128,586	477	8,112	0
1989/1990	286,703	147,971	516	38,197	0
1990/1991	233,555	129,678	555	21,016	0
1991/1992	175,336	102,12	582	21,787	0
1992/1993	141,074	43,188	306	13,387	0,011
1993/1994	106,319	54,039	508	5,13	0
1994/1995	76,427	33,149	434	1,882	0
1995/1996	119,849	41,346	345	1,275	0,003
1996/1997	153,138	97,445	636	1,075	0
1997/1998	63,233	16,683	264	0,25	0,016
1998/1999	103,763	33,357	321	0,254	0
1999/2000	208,538	112,849	541	0,446	0
2000/2001	171,624	99,95	582	0	0
2001/2002	122,248	75,961	621	3,62	0,03
2002/2003	133,879	83,682	625	9,332	0
2003/2004	172,704	138,745	803	9,644	0,029
2004/2005	223,589	161,468	722	-	-

Fonte: Kouri e Santos (2006).

Analisando-se a Tabela 2.5, podem ser tecidos os seguintes comentários. Nos primórdios do agronegócio da mamona, este era focado apenas no mercado interno, restringindo-se a importações. Percebe-se que o apogeu da cultura da mamoneira ocorreu em meados da década de 80, quando a produção chegou à ordem de 417 mil toneladas e foram iniciadas as exportações. Na década de 90 ocorreu uma vertiginosa queda da produção, havendo uma retomada desta no início do século XXI.

Diante do exposto na Tabela 2.6, pode-se ressaltar que a Bahia é o grande produtor de mamona no Brasil, tanto em termos de safra quanto de área colhida. No período em análise, ocorreu um declínio da produção da mamoneira nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, havendo uma polarização na região Nordeste. O Estado do Ceará é o segundo maior produtor do Brasil, seguido de Pernambuco e Piauí.

Tabela 2.6 – Área colhida, produção e rendimento médio de mamona em baga no Brasil e nos principais Estados produtores, quinquênios 1978/1982 a 1998/2002 e anos 2003, 2004 e 2005.

Principais estados e total brasileiro	Médias quinquênias					Anos		
	1978/1982	1983/1987	1988/1992	1993/1997	1998/2002	2003	2004	2005
Área Colhida (1.000 ha)								
Bahia	274,317	265,976	173,248	105,51	117,36	125,128	147,698	182,459
Minas Gerais	7,279	8,222	2,891	0,385	4,145	1,212	1,672	3,605
São Paulo	27,255	21,985	11,693	1,496	1,577	0,67	0,53	1,98
Ceará	22,566	12,682	12,94	2,54	1,693	1,937	9,172	14,05
Piauí	9,547	14,607	11,65	1,331	0,306	0,356	3,127	11,316
Paraná	35,437	23,165	4,674	0,289	0,324	0,225	0,569	-
Pernambuco	29,452	26,115	30,131	6,656	0,998	0,516	2,246	8,744
Paraíba	1,74	1,446	0,892	0,044	0,096	0,092	0,667	-
Mato Grosso	0,439	1,571	0,051	0,436	6,918	3,658	5,185	-
Brasil	414,967	379,905	248,716	119,361	133,881	133,879	172,704	223,589
Produção (1.000 t)								
Bahia	156,838	138,656	80,357	44,487	52,053	73,624	114,125	132,324
Minas Gerais	6,457	6,604	2,013	0,364	3,002	1,281	1,67	5,865
São Paulo	28,781	22,832	14,411	1,992	2,335	1,05	0,86	3,07
Ceará	12,027	8,297	8,166	1,715	1,217	1,638	7,358	9,765
Piauí	3,877	6,456	7,982	0,796	0,155	0,111	2,06	5,175
Paraná	55,018	32,544	6,539	0,34	0,499	0,434	1,049	-
Pernambuco	10,458	13,447	10,785	2,757	0,369	0,234	1,733	4,27
Paraíba	0,941	0,638	0,533	0,034	0,074	0,062	0,617	-
Mato Grosso	1,216	1,75	0,048	0,547	7,547	5,188	7,858	-
Brasil	281,376	235,783	131,251	53,833	67,76	83,682	138,745	161,468
Rendimento médio (kg/ha)								
Bahia	620	493	474	412	411	588	773	725
Minas Gerais	909	787	807	1.044	1.115	1.057	999	1.627
São Paulo	1.060	1.064	1.228	1.290	1.431	1.567	1.623	1.551
Ceará	542	581	588	582	667	846	802	695
Piauí	454	375	678	674	491	312	659	457
Paraná	1.527	1.390	1.390	1.102	1.714	1.929	1.844	-
Pernambuco	336	424	349	377	357	453	772	488
Paraíba	499	477	538	603	554	674	925	-
Mato Grosso	1.276	1.110	1.222	776	1.086	1.418	1.516	-
Brasil	696	597	532	446	466	625	803	722

Fonte: Kouri e Santos (2006).

No cenário mundial, o Brasil se destaca como um dos maiores produtores mundiais. A cultura da mamona é bastante disseminada na Ásia, ressaltando-se a Índia (maior produtor mundial) e a China.

A seguir, serão descritas, sucintamente, as principais etapas do processo de produção agrícola de mamona.

- **Plantio e tratos culturais:**

No que diz respeito ao clima, a cultura da mamona desenvolve-se em clima quente e úmido. Quando sujeita a altas temperaturas, sem a ocorrência de bruscas oscilações das mesmas, a mamoneira produz bagas com alto teor de óleo. Quando submetida a baixas temperaturas, bem como a fortes ventos, a cultura propicia baixa produtividade, inviabilizando economicamente seu cultivo.

No que se refere ao solo, a mamoneira se desenvolve bem em solos férteis, relativamente húmidos e com boa provisão de nitrogênio, fósforo e potássio (PRATA, 1977). A drenagem do solo deve ser eficiente para que o mesmo não fique saturado de água e asfixie o sistema radicular da planta. A alcalinidade do solo é desejável, sendo empregada a adição de calcário (operação esta denominada calagem) para correção do pH do terreno.

O preparo do solo consiste no revolvimento do mesmo por intermédio de arados ou grades de discos. Nesta etapa, deve-se livrar o solo de possíveis ervas daninhas ou insetos nocivos. Quando necessário, a erosão deve ser devidamente controlada.

No que concerne à adubação, a mamoneira adapta-se bem tanto ao uso de adubos orgânicos quanto de fertilizantes industrializados. Técnicos preconizam que a mamona seja plantada sempre após uma outra cultura que recebeu adubação, de forma a aproveitar a fertilidade residual do solo.

Nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, a semeadura da mamona é efetuada no início do inverno, tendo em vista que o solo estará umedecido. No Sul do país, o plantio é realizado no mês de setembro ou no mês de outubro, podendo estender-se, em alguns casos, até dezembro.

A semeadura pode ser efetuada manualmente ou de forma mecanizada. De acordo com a fertilidade do solo e com o tipo da planta, adota-se uma forma de espaçamento entre as linhas. A seguir, na Tabela 2.7, são ilustrados espaçamentos aconselháveis para as particularidades do Estado do Ceará.

Tabela 2.7 – Espaçamentos aconselháveis para as condições cearenses.

Porte	Solos fracos e médios	Solos férteis
Anão	1.00 x 0.70m	1.20 x 1.00m
Médio	1.50 x 1.00m	1.80 x 1.30m
Alto	2.50 x 1.80m	3.00 x 2.00

Fonte: Prata (1977).

Para o plantio de um hectare de mamona, são requeridos de seis a quinze quilos de sementes, sendo que a qualidade destas influencia substancialmente a produtividade da

cultura e o teor de óleo das bagas. De seis a oito dias após o plantio, as sementes efetuam a germinação e ramos já despontam sobre o terreno.

A capinação deve ser realizada para remover camadas de mato da superfície do solo, com vistas a permitir o pleno desenvolvimento da mamoneira. Quando as plantas estiverem com um porte entre vinte e cinco a trinta centímetros, deve-se realizar o desbaste das mesmas, de modo a disciplinar o crescimento das mudas.

▪ **Colheita, secagem, beneficiamento e armazenagem:**

A colheita deve ser realizada em clima seco, na ausência de chuva, quando cerca de dois terços dos cachos estiverem maduros. Identifica-se a maturação da mamona devido à coloração marrom das bagas nesse período. Os cachos devem ser podados, depositados em recipientes tais como cestos ou sacos, para, em seguida, serem transportados para a secagem.

A secagem é realizada ao ar livre, em pátio de cimento ou de terra batida, sob a ação do Sol. As bagas devem ser espalhadas em uma camada de cerca de cinco centímetros de espessura, de modo a permitir uma secagem rápida das mesmas. No período da noite, os frutos devem ser amontoados ou cobertos por lona para evitar a absorção de água. Após um período de dois a cinco dias, ocorrerá a abertura dos frutos e soltura das sementes, concluindo o processo de secagem⁸.

Após a secagem, deve-se fazer o beneficiamento dos grãos, processo este que pode ser manual ou mecanizado. O beneficiamento consiste na separação entre sementes e impurezas, pois grãos contaminados perdem substancialmente seu valor.

No processo manual, os grãos são batidos com uma vara flexível, como a usada para o feijão, para, em seguida, serem abanados em peneiras comuns ou em abanadores mecânicos. No processo mecanizado, utilizam-se máquinas descascadoras, as quais possuem, usualmente, um sistema de ventilação, livrando as sementes de possíveis impurezas.

⁸ O uso de secadores artificiais também é factível, mas é pouco utilizado. Tal prática, apesar de pouco usual, incorre numa secagem mais rápida e mais uniforme.

Depois de secados e beneficiados, os grãos devem ser ensacados. Utiliza-se, geralmente, saco de 30, 40, 50 ou 60 quilos, pois estes são os pesos correntemente empregados nas transações comerciais envolvendo mamona.

A armazenagem deve ser realizada em lugar seco e ventilado e deve-se sempre ter o cuidado com o número máximo de sacos adotado em uma pilha, pois a semente pode começar a perder óleo em um acondicionamento inadequado.

▪ **Rotação de culturas e consorciação:**

Para um melhor aproveitamento do solo, o agricultor deve planejar um sistema de rotação de culturas. Tal medida, além de incorrer em uma baga de maior qualidade, em termos de teor de óleo, também se constitui em uma importante prática de controle fitossanitário.

Outro modo de aproveitar melhor o terreno é a consorciação, prática que consiste no plantio conjunto da mamona com outras culturas. Usualmente, a mamoneira é plantada em regime consorciado com o feijão, o milho, a batata, o gergelim e o amendoim. Tal medida, apesar de implicar em uma pequena redução da produtividade da mamoneira, beneficia a produção do consorciado pela maior nitrogenação do solo e é importante tanto para a complementação de renda do pequeno agricultor quanto para o seu próprio consumo.

Tendo em vista a relevância da consorciação, no semi-árido nordestino, a mamoneira pode muito bem ser produzida em regime consorciado com feijão ou milho ou até mesmo em sistema de triconsórcio (feijão+milho+mamona), apesar da prática atual mostrar que a melhor alternativa, em termos de produtividade do consorciado, é o consórcio somente com o feijão.

2.4 A cadeia produtiva do biodiesel da mamona

No Brasil, o processo de produção de biodiesel já está consolidado sob o ponto de vista técnico e tecnológico, havendo tanto recursos humanos quanto maquinários disponíveis para o devido fim. No entanto, o sistema produtivo como um todo, desde a produção das

matérias-primas até a comercialização do combustível propriamente dito, ainda é muito disperso (FREITAS e NOBRE JÚNIOR, 2004b).

Deste modo, são prementes e justificáveis os esforços de pesquisa dirigidos para a estruturação das atividades da cadeia como um todo, sendo escassos os trabalhos nessa direção. A seguir, são explicitadas definições de suma importância para a compreensão e estruturação da cadeia em análise.

Existem duas grandes correntes de pensamento para a análise da problemática agroindustrial. A primeira, denominada *Commodity System Approach* (CSA), foi desenvolvida no final da década de 50 e advém da escola americana, enquanto a segunda, conhecida como *analyse de filière*, foi concebida na década de 60 pela escola francesa.

Sobre a temática em foco, Batalha (1997, p. 23) acrescenta:

“Apesar de apresentarem origens temporais e espaciais diferentes, a noção de CSA e *filière* apresentam a mesma visão sistêmica e mesoanalítica que considera que a análise do sistema agroalimentar deve, necessariamente, passar pela forma de encadeamento e articulação que gere as diversas atividades econômicas e tecnológicas envolvidas na produção de determinado produto agroindustrial”.

Serão abordadas, sucintamente, as duas vertentes metodológicas supramencionadas. Primeiramente, será apresentada a linha de pensamento americana, e, em seguida, a corrente de pensamento francesa.

Em meados da década de 50, Davis e Goldberg, dois pesquisadores da Universidade de Harvard, atentaram para o fato de que a produção agrícola daquela época já não mais podia ser limitada, de maneira segmentada, de modo a não integrar as funções de todos os atores envolvidos no processo produtivo como um todo, desde a produção propriamente dita até a disposição do bem ao consumidor final.

Assim, Davis e Goldberg enunciaram o conceito de *agribusiness*, ou, em português, agronegócio, como sendo a soma das operações de produção e distribuição de suprimentos agrícolas, das operações de produção nas unidades agrícolas, do armazenamento, processamento e distribuição dos produtos agrícolas e itens produzidos a partir deles (DAVIS e GOLDBERG, 1957 *apud* BATALHA, 1997).

A partir do conceito de agronegócio, Goldberg, no ano de 1968, desenvolveu uma lógica de encadeamento de atividades para analisar os sistemas de produção de laranja, trigo e soja nos Estados Unidos e a tal abordagem deu o nome de *Commodity System Approach* (CSA).

O termo cadeia de produção agroindustrial originou-se, na década de sessenta, na escola industrial francesa, a partir do conceito denominado *analyse de filière*⁹ (BATALHA, 1997). Embora não exista nenhuma dependência do termo *filière* com o setor agrícola, nos primórdios do conceito supracitado, os pesquisadores dirigiam maciçamente suas atenções para o setor agroindustrial.

Morvan (1988) *apud* Batalha (1997) procura sintetizar e sistematizar uma série de três elementos que estariam implicitamente ligados a uma visão em termos de cadeia de produção: cadeia de produção é uma sucessão de operações de transformação dissociáveis, capazes de ser separadas e ligadas entre si por um encadeamento técnico; cadeia de produção é também um conjunto de relações comerciais e financeiras que estabelecem, entre todos os estados de transformação, um fluxo de troca, situado de montante a jusante, entre fornecedores e cliente; e cadeia de produção é um conjunto de ações econômicas que presidem a valoração dos meios de produção e asseguram a articulação das operações.

O presente autor define Cadeia de Produção Agroindustrial (CPA) como um conjunto de operações, sejam elas produtivas, comerciais, econômico-financeiras ou logísticas, que estabelecem relações logicamente planejadas entre seus vários elos, com vistas a atender um cliente final.

⁹ O termo *filière* pode ser traduzido como meios de elaboração sucessiva, ou, em outras palavras, cadeia de produção.

De acordo com Batalha (1997), o Sistema Agroindustrial (SAI) pode ser considerado como o conjunto de atividades que concorrem para a produção de produtos agroindustriais, desde a produção dos insumos até a chegada do produto final ao consumidor. É pertinente destacar que um SAI abrange uma série de CPAs, de modo que cada cadeia pode corresponder a um produto específico do SAI.

Diante do exposto, a problemática de CP/BDMA será analisada segundo a noção de cadeias de produção. Optou-se pela vertente metodológica francesa devido ao seu emprego pelas referências que abordam o tema.

De acordo com Freitas e Nobre Júnior (2004a), o Sistema Agroindustrial da Mamona (SAIMA) pode ser definido como o conjunto de cadeias inter-relacionadas inerentes aos produtos e subprodutos da mamona, cujo foco se estende desde a produção e aquisição dos insumos à disposição dos bens acabados aos clientes finais.

Na Figura 2.4 é ilustrado o SAIMA e seus atores, enquanto que na Tabela 2.8 são descritos os segmentos e as transações do SAIMA. Transações são manifestações de relações sociais ou comerciais que ocorrem entre atores ou segmentos de um SAI.

Tabela 2.8 – Segmentos e transações do SAIMA.

Segmento	Definição	Transações
Indústria de insumos agrícolas	Refere-se aos produtores de sementes, fertilizantes, defensivos, equipamentos, etc.	T1
Produção agrícola	Consiste no setor agrícola, composto pelos grandes e pequenos produtores.	T1, T2, T6 e T7.
Indústria de esmagamento e refino	Consiste na produção de óleo e demais produtos e subprodutos por intermédio da prensagem e posterior refino do óleo vegetal.	T2, T3 e T8.
Indústria de processamento e transformação	Representa todas as indústrias que usam como insumo os produtos e subprodutos da mamoneira.	T3 e T4.
Distribuição	Consiste na ação dos atores atacadista, varejista e mercado institucional.	T4, T5, T9, T10, T11 e T12.
Consumidor final	Concerne aos clientes dos produtos finais, tanto no mercado interno quanto no mercado externo.	-

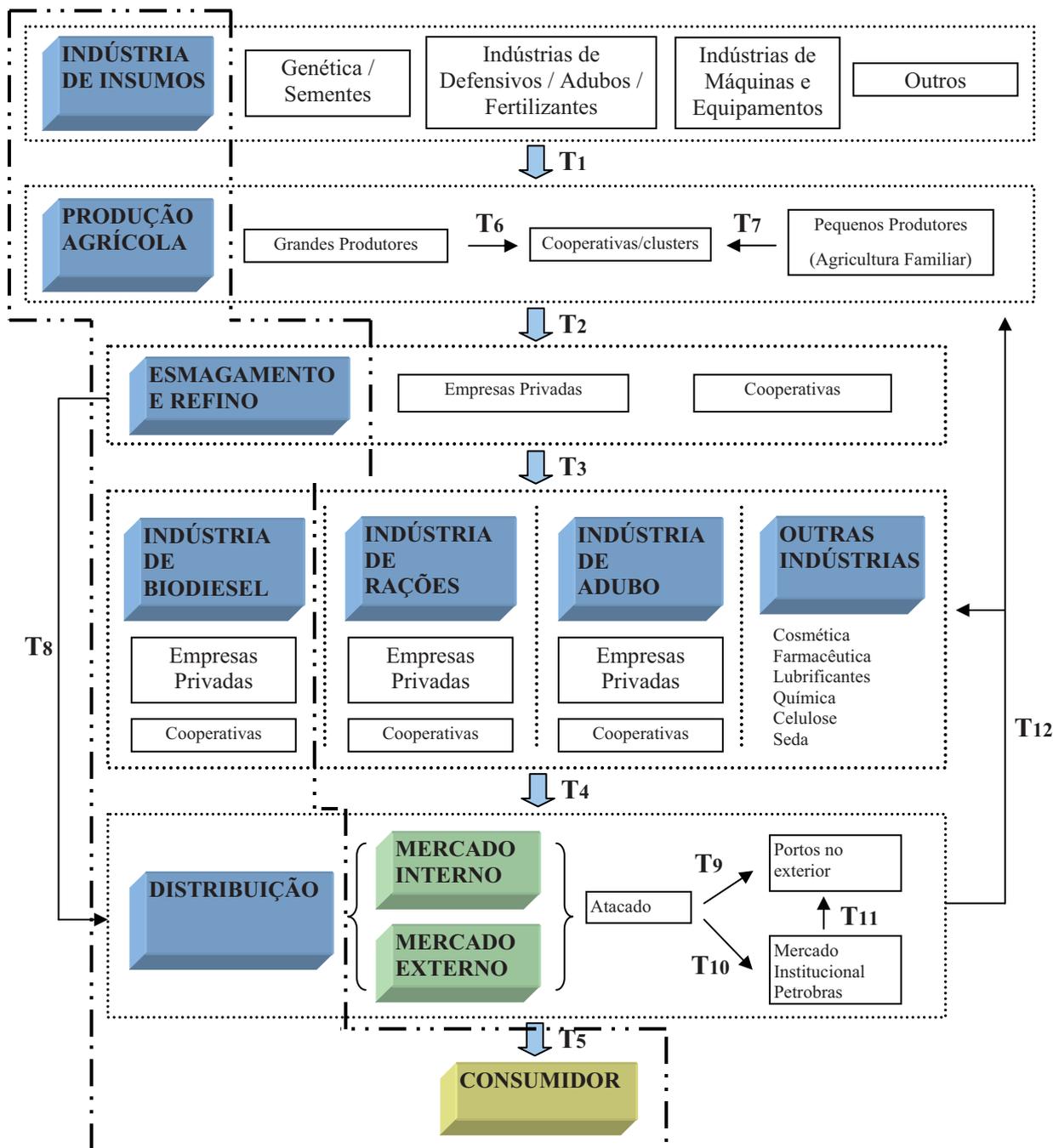


Figura 2.4 – Sistema agroindustrial da mamona com seus agentes integrantes.
Fonte: Adaptado de Freitas e Nobre Júnior, (2004a).

Com base na abordagem sistêmica proposta por Athey (1982), foram caracterizados quatro tipos de forças exógenas ao desenvolvimento das atividades da CP/BDMA: forças políticas, forças sócio-econômicas, forças tecnológicas e forças culturais.

As forças políticas dizem respeito a ações do governo, de outros países ou de blocos econômicos que influenciam estrategicamente o funcionamento da cadeia.

As forças sócio-econômicas, compreendidas pelos recursos naturais e humanos, atuam como fatores restritivos ao funcionamento da cadeia, tendo em vista o grau de organização da sociedade e a escassez dos recursos econômicos.

As forças tecnológicas compreendem o estágio de avanço científico e tecnológico da sociedade, em termos dos recursos tecnológicos empregados nos diversos problemas da cadeia e operações logísticas.

Por fim, as forças culturais abrangem os valores, ideologias e paradigmas da sociedade na qual a cadeia está inserida.

Na Figura 2.5 é mostrado um diagrama ilustrando as operações existentes na CP/BDMA, bem como as forças exógenas que nela atuam.

Arruda *et al.* (2004) propõem um modelo de gestão para a Cadeia Produtiva do Biodiesel da Mamona, como uma forma de integrar os atores intervenientes à cadeia de modo a garantir sua competitividade no mercado globalizado. Tal modelo consiste numa estrutura de gestão composta por três atores (MENDES, 2005):

- **Cooperativa Local (CL):** consiste em um conselho, eleito pelos pequenos proprietários, que tem a função de organizar os setores comercial e contábil do grupo, gerenciar as plantas de esmagamento e controlar a produção da área coberta pela cooperativa;
- **Cooperativa Central (CC):** consiste em um conselho formado, através de eleição, pelos diretores das cooperativas locais, bem como pelo gestor da cadeia produtiva. Tem como objetivo delegar o gerenciamento da cadeia como um todo ao seu gestor e acompanhar seu desempenho.
- **Gestor da Cadeia Produtiva (GCP):** consiste numa organização da sociedade civil de interesse público composta por um corpo técnico altamente qualificado. Deve governar, de forma isenta, a CP/BDMA como um todo, visando a sua eficiência e sempre primando por ações de equidade e justiça.

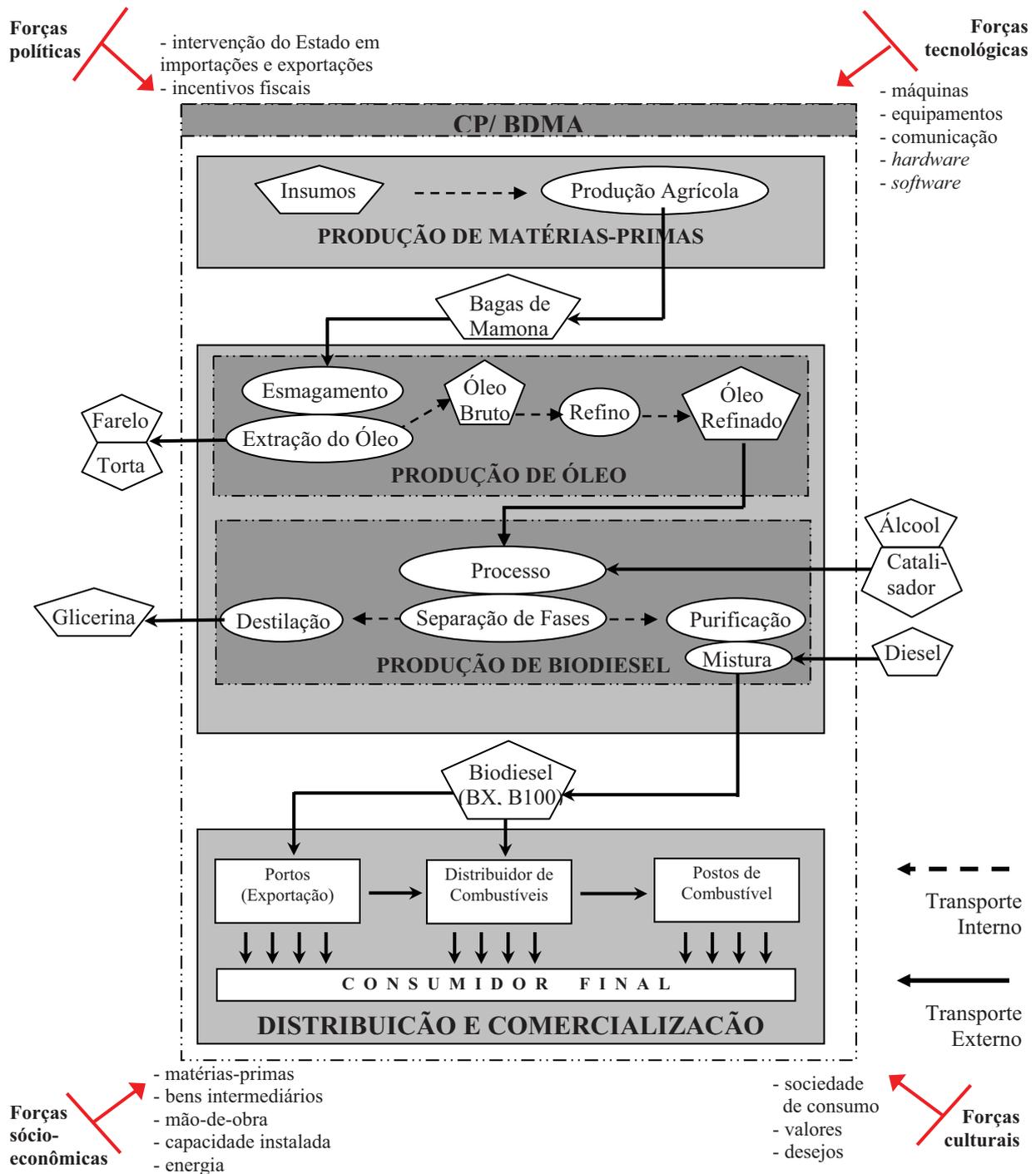


Figura 2.5 – Cadeia de Produção Agroindustrial do Biodiesel da Mamona.
Fonte: Adaptado de Freitas e Nobre Júnior, (2004a).

Arruda e Mendes (2006) tecem um diagnóstico logístico sobre a CP/BDMA no Estado do Ceará. Os autores identificaram as causas do declínio da cultura da mamoneira e afirmaram que a cadeia supracitada, ainda em estado embrionário, pode obter êxito em seus objetivos se um efetivo planejamento da cadeia de suprimentos for implementado, de modo a coordenar as ações dos atores envolvidos nos processos da cadeia.

Para a avaliação de desempenho logístico de uma cadeia produtiva, três grandes áreas devem ser contempladas: suprimento, produção e distribuição física. A seguir, na Figura 2.6, são ilustrados, de forma sintética, os ciclos de desempenho logístico de uma cadeia agroindustrial genérica. É pertinente salientar que no arquétipo proposto por Alves (1997), os fluxos financeiros não são contemplados.

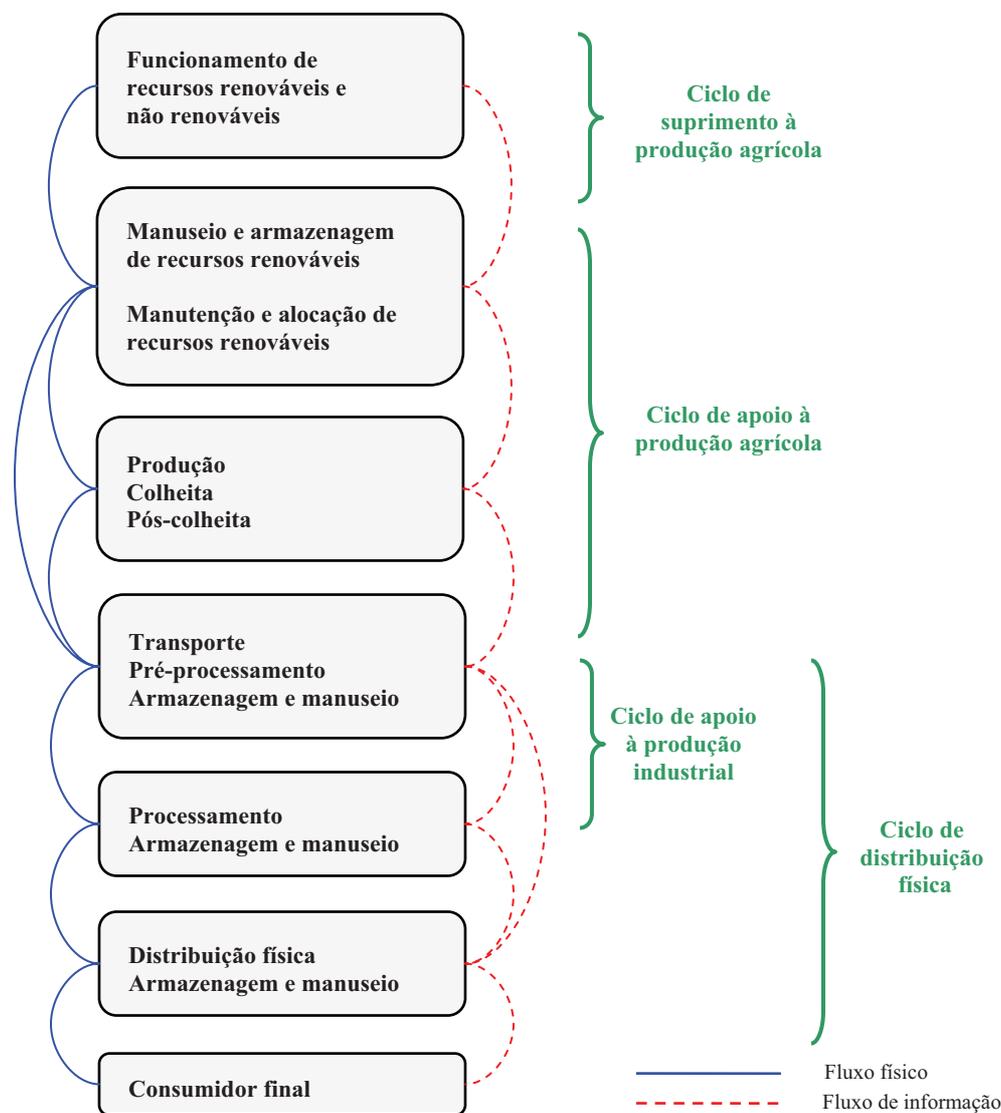


Figura 2.6 – Ciclos de desempenho logístico.
Fonte: Alves, (1997).

No que diz respeito a cadeias produtivas agroindustriais, um dos fatores mais relevantes para o seu êxito é a logística de distribuição, pois é a distribuição física que permite a disponibilidade do produto ao cliente, atribuindo-lhe as utilidades de tempo e de lugar, que são importantes atributos para sua valoração econômica (ALVES, 1997).

Conforme previsto por Freitas e Nobre Júnior (2004b), a logística de distribuição do biodiesel segue hoje os canais de distribuição do óleo diesel, da gasolina e do Álcool Etílico Anidro Combustível (AEAC), canais estes já bem estruturados em nosso país. Na Figura 2.7, são ilustrados os atuais e potenciais canais de distribuição do biodiesel da mamona.

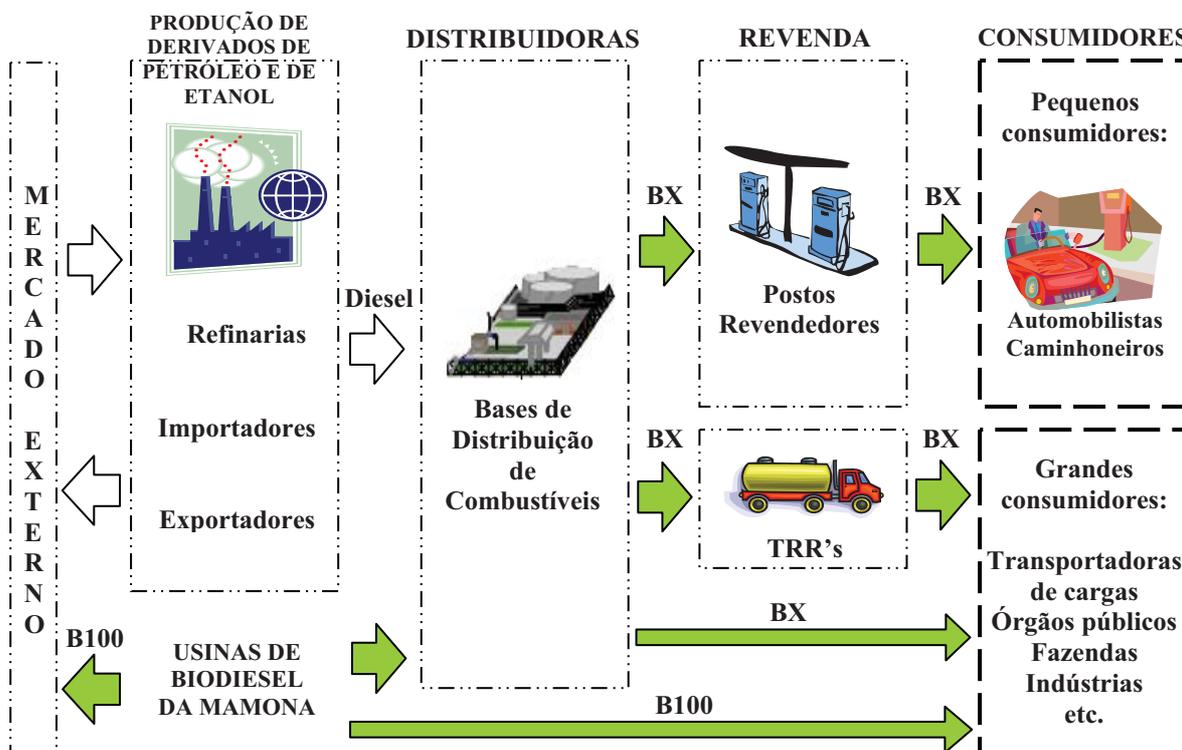


Figura 2.7 – Canais de distribuição do biodiesel da mamona.

Fonte: Adaptado de Freitas e Nobre Júnior (2004b).

As bases de distribuição de combustíveis dizem respeito às grandes distribuidoras, tais como BR-Distribuidora, Ipiranga, Shell e Esso. Os pequenos consumidores compreendem automobilistas e caminhoneiros, enquanto os grandes consumidores correspondem a empresas públicas ou privadas que demandem o biodiesel em elevadas quantidades. Os Transportadores-Revendedores-Retalhistas (TRRs) são atores que desempenham funções de aquisição, armazenagem, comercialização e controle de qualidade de combustíveis.

Tendo em vista a dispersão geográfica dos produtores de mamona no semi-árido nordestino, os seguintes requisitos podem ser atendidos, se se objetiva a redução dos custos de distribuição:

- Os locais de esmagamento devem ter sua localização espacial otimizada (PRAÇA *et al.*, 2004);
- O roteamento dos veículos e o dimensionamento de frotas também devem ser otimizados;
- Tendo em vista as condições precárias de grande parte da malha viária, especialmente no do Estado do Ceará, um plano de gerência de pavimentos deve ser implementado com vistas a caracterizar o atual nível de serviço da rede viária de escoamento da produção no sentido de embasar proposições de intervenção.

Diante do panorama sobre a Cadeia Produtiva do Biodiesel da Mamona ilustrado neste Capítulo, percebe-se a ampla gama de variáveis que repercutem para a efetividade da cadeia em foco. Deste modo, o controle dos processos logísticos ao longo da CP/BDMA mostra-se relevante para a gestão da cadeia supracitada.

A importância das informações apresentadas neste Capítulo reside no aprofundamento na compreensão no objeto de estudo da presente pesquisa que subsidiou a modelagem a ser proposta.

A seguir, no Capítulo 3, serão apresentadas definições formais que embasarão os métodos de controle supervisorio apresentados nos Capítulos 4 e 5, bem como a modelagem proposta no Capítulo 6.

CAPÍTULO 3

DEFINIÇÕES

“Como é vã a oposição entre a teoria e a prática! O que é a teoria senão o conhecimento das leis que ligam os efeitos às causas, isto é, fatos a fatos? Quem melhor conhece os fatos do que o teórico, que os conhece sob todos os seus aspectos e que sabe quais as relações que eles mantêm entre si? E o que é a prática sem a teoria, isto é, o emprego dos meios sem saber como nem por que eles atuam? Não passa de um empirismo perigoso, por meio do qual se aplicam os mesmos métodos a casos opostos considerados semelhantes e por onde se chega aonde não se queria ir.”

Jean-Baptiste Say.

Neste capítulo são apresentadas as definições gerais necessárias para a compreensão dos métodos de controle supervisorio baseados em redes de Petri que serão apresentados nos capítulos 4 e 5, assim como para os modelos a serem apresentados no capítulo 6. A estrutura deste capítulo é dividida em três seções, explicitadas a seguir. Na primeira seção, são apresentadas as definições de linguagens formais, autômatos e geradores. Na segunda seção, são apresentadas as definições dos diversos tipos de redes de Petri utilizados nesse trabalho. Por fim, na terceira seção, apresentam-se os conceitos básicos da Teoria do Controle Supervisorio (TCS).

3.1 Linguagens formais, autômatos e geradores

3.1.1 Linguagens formais

Analisando a trajetória do SED ilustrada na Figura 3.1, pode-se escrever a seguinte seqüência de eventos ao longo do tempo: (e_1, t_1) , (e_2, t_2) , (e_3, t_3) .

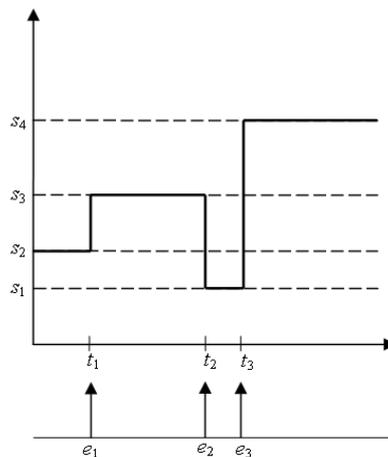


Figura 3.1 – Trajetória de um SED.

O primeiro evento, e_1 , ocorre no tempo t_1 ; o segundo evento, e_2 , ocorre no tempo t_2 e o terceiro evento, e_3 , ocorre no tempo t_3 . Quando esta notação é utilizada, sabe-se que o sistema é determinístico, no sentido de que o estado seguinte após a ocorrência de cada evento é único, para cada evento.

Caso se associe uma duração de tempo a cada evento ocorrido na operação do sistema, tem-se uma linguagem temporizada modelando o comportamento do sistema.

Assumindo que a duração de cada evento pode ser descrita por uma função de densidade de probabilidade, isto é, o tempo decorrido entre a ocorrência de eventos é não-determinístico, tem-se que uma linguagem estocástica modela o comportamento do sistema.

Se forem omitidas as informações estatísticas e de duração de tempo acerca da ocorrência dos eventos, tem-se uma linguagem não-temporizada, ou, simplesmente, uma linguagem, a qual compreende o conjunto de todas as possíveis seqüências de eventos que podem ocorrer em um dado sistema.

Portanto, linguagens temporizadas, linguagens estocásticas e linguagens são os três níveis de abstração existentes no estudo de SED. Para maiores detalhes acerca da teoria das linguagens formais, consultar Hopcroft *et al.* (2001), Cassandras e Lafortune (1999), Barroso (1996) e Cury (2001).

3.1.2 Autômatos

Uma linguagem é um modo formal de descrever o comportamento de um SED, sendo de grande valia para a especificação de seqüências de eventos admissíveis na operação de um sistema. No entanto, existem limitações, no que tange ao pragmatismo, ao se trabalhar com linguagens: nem sempre é simples trabalhar com elas, tampouco usá-las para especificar um sistema robusto.

Portanto, tornam-se necessárias estruturas que definam linguagens e que, ao mesmo tempo, facilitem o processo de especificação, análise e simulação de SED. Os autômatos são dispositivos capazes de representar uma linguagem de acordo com regras bem definidas.

Um autômato pode ser representado graficamente por um grafo orientado, em que os nós representam os estados do sistema e os arcos etiquetados por símbolos representam as transições de estado. O estado inicial é indicado por uma seta e os estados marcados, isto é, tarefas a serem concluídas pelo sistema, são simbolizados por nós com círculos duplos. A representação gráfica de um autômato é ilustrada na Figura 3.2.

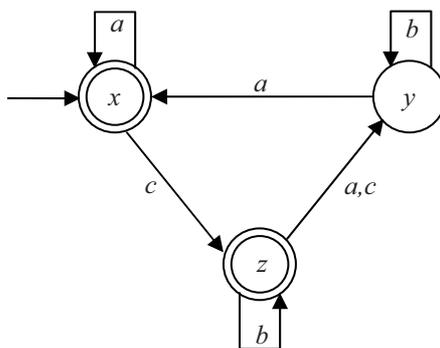


Figura 3.2 – Diagrama de estados de um autômato.
Fonte – Cassandras e Lafortune (1999).

Formalmente, conforme Cury (2001), um autômato determinístico de estados finitos (ADEF) é uma quintupla:

$$G = (X, \Sigma, f, x_0, X_m)^{10} \quad 3.1$$

em que:

- X é o conjunto de estados do autômato;
- Σ é o conjunto de símbolos (eventos) que definem o alfabeto;
- $f: X \times \Sigma \rightarrow X$ é a função de transição de estados;
- x_0 é o estado inicial do autômato; e
- X_m é o conjunto de estados marcados do sistema tal que $X_m \subseteq X$.

As funções de transição do autômato ilustrado na Figura 3.2 são: $f(x,a) = x$, $f(x,c) = z$, $f(z,a) = y$, $f(z,b) = z$, $f(z,c) = y$, $f(y,a) = x$ e $f(y,b) = y$. A notação $f(x,c) = z$ significa que, se um autômato encontra-se no estado x , com a ocorrência do evento c , o autômato instantaneamente mudará para o estado z .

¹⁰ O símbolo Σ é uma notação universal na área de Controle Supervisório. Tal símbolo não deve ser confundido com a notação de somatório, que possui índices.

Três comentários podem ser realizados acerca do autômato constante na Figura 3.2. Em primeiro lugar, é possível perceber que a ocorrência de um evento não implica necessariamente em mudança de estado, pois $f(x,a) = x$, $f(z,b) = z$ e $f(y,b) = y$. Em segundo lugar, pode ocorrer a transição entre dois estados através de eventos distintos, pois $f(z,a) = f(z,c) = y$. Por fim, a função de transição de estados é parcial, isto é, não existe transição de cada estado X via cada evento Σ , pois não existem $f(x,b)$ e $f(y,c)$.

É importante destacar que a seqüência de eventos em um autômato corresponde a uma palavra. No autômato da Figura 3.2, a palavra *cac* corresponde a um ciclo no grafo, com início no vértice x .

Um autômato está associado a uma linguagem gerada, $L(G)$, e a uma linguagem marcada, $L_m(G)$. A linguagem gerada representa todas as palavras que podem ser formadas a partir do estado inicial do autômato e a linguagem marcada representa todas as palavras que, a partir do estado inicial, chegam a um estado marcado.

3.1.3 Geradores

O comportamento de um SED pode ser representado por uma linguagem, porém nem todas as seqüências de eventos contidas em uma dada linguagem podem ser representativas da operação de um sistema real. Na prática, pode ser desejável que alguns eventos sejam suprimidos, de modo a simplificar o modelo.

Em um autômato, a função de transição de estados é total, sendo definida para todo par $(\sigma, q) \in \Sigma \times Q$. Em um gerador, a função de transição pode ser parcial, sendo definida apenas para um subconjunto de eventos para cada estado do gerador.

Formalmente, um gerador é um quártupla:

$$G = (X, \Sigma, f, x_0, X_m) \tag{3.2}$$

em que:

- X é o conjunto de estados do autômato;
- Σ é o conjunto de símbolos (eventos) que definem o alfabeto;
- $f: X \times \Sigma \rightarrow X$ é a função, geralmente parcial, de transição de estados;

- x_0 é o estado inicial do autômato; e
- X_m é o conjunto de estados marcados do sistema tal que $X_m \subseteq X$.

3.2 Redes de Petri

3.2.1 Redes de Petri lugar-transição

Os autômatos possuem a inconveniência de demandar a enumeração explícita de todos os estados do sistema. Para sistemas de grande porte, torna-se custosa a modelagem via autômatos, acrescentando-se o custo computacional associado à análise de um modelo dessa natureza.

Uma alternativa para a modelagem de SED são as redes de Petri (CASSANDRAS e LAFORTUNE, 1999). Desenvolvidas por Carl Adam Petri no limiar da década de sessenta, as redes de Petri (*RP*) são um tipo de grafo, bipartido e orientado, capaz de captar a dinâmica de Sistemas a Eventos Discretos (MURATA, 1989). Possuem uma representação gráfica compacta que dispensa a enumeração explícita de todos os estados do sistema, assim como suas equações de estado podem ser representadas sob forma matricial. Essas características das *RP* facilitam sua implementação computacional, bem como o seu uso.

Uma estrutura de rede de Petri é uma quádrupla (CARDOSO e VALETTE, 1997):

$$N = (P, T, Pre, Post) \quad 3.3$$

em que:

- P é um conjunto finito de lugares de dimensão n ;
- T é um conjunto finito de transições de dimensão m ;
- $Pre: P \times T \rightarrow \mathbf{N}$ é a aplicação de entrada (lugares precedentes ou incidência anterior);
- $Post: P \times T \rightarrow \mathbf{N}$ é a aplicação de saída (lugares seguintes ou incidência posterior); e
- $P \cap T = \emptyset$, isto é, trata-se de um grafo bipartido.

Uma rede de Petri é representada por (BARROSO, 1996):

$$RP = (N, K, M_0) \quad 3.4$$

em que:

- N é a estrutura de uma rede de Petri;
- $K : P \rightarrow \mathbf{N} \cup \{\infty\}$ é a função de capacidade; e
- M_0 é uma marcação, chamada marcação inicial, dada pela aplicação $M : P \rightarrow \mathbf{N}$.

Se a capacidade da rede é ilimitada, então $RP = (N, M_0)$.

A marcação é um número inteiro não-negativo associado a cada lugar, sendo representada por um vetor n -dimensional:

$$M = \{m_1, m_2, \dots, m_j\}^T \quad 3.5$$

em que:

$m_j =$ é o número de fichas do lugar p_j .

A rigor, a marcação é um vetor coluna, sendo o vetor transposto ao vetor linha apresentado na equação (3.5). Na prática, é usual ser omitida a notação de vetor transposto.

A seguir, na Figura 3.3, são ilustradas as representações gráfica e matricial de uma rede de Petri, bem como o disparo de uma transição.

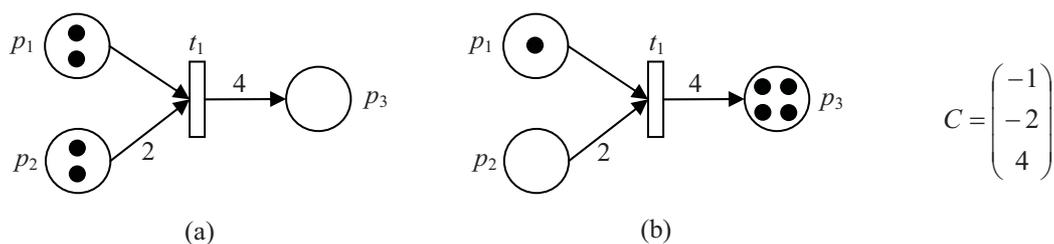


Figura 3.3 – Exemplo de disparo de uma transição em uma rede de Petri.

Para as redes da Figura 3.3, os círculos representam os lugares, o retângulo representa a transição, as setas que saem dos lugares e chegam nas transições representam *Pre*, as setas que saem das transições e chegam aos lugares representam *Post* e os discos negros, denominados fichas, representam as marcações.

Um lugar pode ser utilizado como indicação de um estado do sistema (conjunto dos valores atuais dos parâmetros que definem um dado sistema, num dado instante) a ser modelado. Um lugar possui os seguintes atributos: identificação, marcação e capacidade. A identificação diferencia um lugar dos demais, a marcação equivale ao número de fichas contidas em um lugar e a capacidade é o número máximo de fichas que um lugar pode armazenar por um determinado tempo, não sendo denotada para lugares de capacidade infinita. As fichas simplesmente indicam que as condições associadas aos lugares são verdadeiras.

As transições podem representar operações ou ações realizadas pelo sistema, possuindo os seguintes atributos: identificação e, para as redes de Petri com restrições de tempo, o tempo, que indica o tempo associado ao seu disparo. Um arco que sai de um lugar e chega a uma transição indica, juntamente com as fichas, as condições para que uma ação seja realizada.

Um arco originado em uma transição que se destina a um lugar, representa as funções que geram os estados após a execução da ação. Um arco com peso k , em que k é um número inteiro positivo, pode ser interpretado como um conjunto k de arcos paralelos. Os arcos com peso um usualmente têm seu peso omitido na representação gráfica.

Uma transição é considerada apta a disparar quando o número de fichas contidas em cada um de seus lugares de entrada é maior ou igual ao peso dos seus arcos de precedência. Quando isto ocorre, a transição t_1 é dita habilitada, estando pronta para o disparo. Como podemos verificar pela *RP* apresentada na Figura 3.3, ao disparar t_1 , uma ficha é retirada do lugar p_1 , duas fichas são retiradas do lugar p_2 e quatro fichas são adicionadas ao lugar p_3 .

A matriz C , denominada matriz de incidência, é determinada através das relações entre os arcos de entrada e de saída das transições. Para a rede ilustrada na Figura 3.3, um arco de peso 1 liga p_1 a t_1 , um arco de peso 2 liga p_2 a t_1 e um arco de peso 4 liga t_1 a p_3 .

As marcações de uma rede de Petri variam conforme a seguinte regra de disparo das transições:

(a) Uma transição t_i está habilitada numa marcação M se e somente se:

$$\forall p_i \in P \text{ que é entrada de } t_j, Pre(p_i, t_j) \leq M(p_i)$$

$$\forall p_i \in P \text{ que é saída de } t_j, M(p_i) \leq K(p_i) - Post(p_i, t_j)$$

(b) Uma transição t_j , estando habilitada, pode ou não disparar.

(c) O disparo de uma transição $t_j \in T$, habilitada na marcação M , é instantâneo e resulta em uma nova marcação M' dada pela equação:

$$M'(p_i) = M(p_i) - Pre(p_i, t_j) + Post(p_i, t_j), \forall p_i \in P$$

(d) A ocorrência do disparo de uma transição $t_j \in T$, que modifica a marcação M da rede para uma nova marcação M' , é denotada por $M[t]M'$ ou $M' = \delta(M, t)$.

Apesar do poder de modelagem das redes de Petri ordinárias, outras extensões das *RP*'s foram propostas para incrementar a robustez da técnica em determinadas aplicações. A seguir, serão apresentados outros quatro tipos de redes de Petri.

3.2.2 Redes de Petri com funções de habilitação das transições

Uma Rede de Petri com funções de habilitação de transições (*RPFHT*) é definida por Barroso (1996) como uma quintupla:

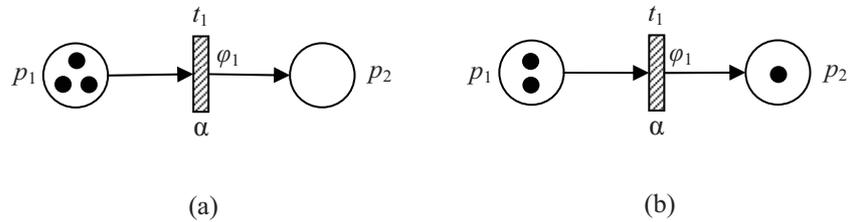
$$RPFHT = (N, K, l, M_0, \Phi) \quad 3.6$$

em que:

- N é a estrutura de uma rede de Petri;
- $K : P \rightarrow \mathbf{N} \cup \{\infty\}$ é a função de capacidade;
- $l : T \rightarrow \Sigma$ é a função que etiqueta as transições;
- M_0 é uma marcação, chamada marcação inicial, dada pela aplicação $M : P \rightarrow \mathbf{N}$.
- $\Phi = \{\varphi_1, \dots, \varphi_m\} : R(N, M_0) \rightarrow \{0, 1\}$ é a função de habilitação das transições que mapeia o conjunto de marcações alcançáveis em 0 ou 1.

Numa *RPFHT*, uma transição t_j está habilitada numa marcação M_i pertencente ao conjunto de marcações alcançáveis caso $\varphi_j = 1$, estando desabilitada caso $\varphi_j = 0$. Na rede ilustrada na Figura 3.4, a função de habilitação de transições φ_1 será igual a um se e

somente se a marcação do lugar p_1 for maior do que dois e se a marcação do lugar p_2 for igual à zero. Nota-se que, na Figura 3.4(a), a transição t_1 está habilitada e que, na Figura 3.4(b), a transição t_1 está desabilitada.



$$\varphi_1 = [M(p_1) \geq 2 \wedge M(p_2) = 0]$$

Figura 3.4 – Exemplo de regra de disparo de uma transição em uma RPFHT.
Fonte – Barroso (1996).

A etiquetagem α tem o seguinte significado: caso $\varphi_1 = 1$, a transição t_1 está habilitada e o evento α estará apto a ocorrer. Nota-se que α é um caractere que representa um evento em uma dada linguagem.

As marcações de uma RPFHT variam conforme a seguinte regra de disparo das transições (BARROSO, 1996):

(a) Uma transição t_i está habilitada numa marcação M se e somente se:

$$\forall p_i \in P \text{ que é entrada de } t_j, Pre(p_i, t_j) \leq M(p_i)$$

$$\forall p_i \in P \text{ que é saída de } t_j, M(p_i) \leq K(p_i) - Post(p_i, t_j)$$

$$\varphi_j(M_i) = 1$$

(b) Uma transição t_j , estando habilitada, pode ou não disparar.

(c) O disparo de uma transição $t_j \in T$, habilitada na marcação M , é instantâneo e resulta em uma nova marcação M' dada pela equação:

$$M'(p_i) = M(p_i) - Pre(p_i, t_j) + Post(p_i, t_j), \forall p_i \in P$$

(d) A ocorrência do disparo de uma transição $t_j \in T$, que modifica a marcação M da rede para uma nova marcação M' , é denotada por $M[t_j]M'$ ou $M' = \delta(M, t)$.

3.2.3 Redes de Petri coloridas

Uma grande limitação das redes de Petri ordinárias é o fato de que esta demanda uma grande quantidade de lugares e de transições para representar sistemas complexos. Na medida em que a rede se expande, a visão geral do sistema modelado, por parte do analista, começa a ser comprometida e a análise do sistema modelado, por parte do computador, começa a ser dificultada.

Segundo Jensen (1992), uma representação mais compacta de uma rede de Petri é obtida através da associação, a cada ficha, de um conjunto de dados, denominados cores da ficha. O conceito de cor é análogo ao conceito de tipo, comum nas linguagens de programação.

Conforme Jensen (1992), uma rede de Petri colorida é uma 9-tupla:

$$RPC = (\Gamma, P, T, A, N, C, G, E, I) \quad 3.7$$

em que:

- Γ é um conjunto finito, não vazio de tipos, denominados conjunto de cores;
- P é um conjunto finito de lugares de dimensão n ;
- T é um conjunto finito de transições de dimensão m ;
- A é um conjunto finito de arcos tais que $P \cap T = P \cap A = T \cap A = \emptyset$;
- N é uma função de nó, definida a partir de A por $P \times T \cup T \times P$;
- C é uma função de cor, definida a partir de P em Σ ;
- G é uma função de guarda, definida a partir de T ;
- E é uma função de expressão de arcos, definida a partir de A ; e
- I é uma função de inicialização, definida a partir de P .

O conjunto de cores determina os tipos, operações e funções que podem ser associados às expressões utilizadas na rede (funções dos arcos, guardas, cores, etc.). Os conjuntos P , T , A e N possuem significado análogo aos conjuntos de vértices e de funções de precedência descrito para as redes de Petri ordinárias. As funções de cor mapeiam todos os lugares da rede, incluindo-os em um conjunto de cores. As funções de guarda mapeiam todas as transições da rede, moderando o fluxo de fichas conforme expressões booleanas. As funções de arcos mapeiam cada arco da rede, associando a eles uma

expressão compatível com os conjuntos de cores possíveis. Por fim, as funções de inicialização mapeiam os lugares da rede associando-os aos multi-conjuntos existentes¹¹.

A associação de dados às fichas torna o modelo mais compacto, mas, em contrapartida, se paga um preço: a complexidade das funções de precedência. Nas *RP*, são associados aos arcos *Pre* e *Post* valores inteiros, enquanto que, nas *RPC*, são associadas aos arcos funções complexas.

Numa rede de Petri ordinária, a adição ou remoção de fichas de um determinado lugar implica na operação de soma ou subtração, pois as fichas não portam estruturas de dados. Nas redes de Petri coloridas, o jogo de fichas não é uma operação tão trivial.

A marcação de cada lugar de uma *RPC* é um multi-conjunto do conjunto de cores associado ao lugar. A utilização de multi-conjuntos é necessária para que um lugar possa armazenar duas ou mais fichas da mesma cor.

Os multi-conjuntos, também denominados bolsas, são um tipo de conjunto no qual podem ocorrer múltiplas ocorrências de um mesmo elemento. Admitindo um conjunto X com três elementos, tal que $X = \{x_1, x_2, x_3\}$, ao adicionarmos ao conjunto X o elemento x_2 , o conjunto continua sendo $X = \{x_1, x_2, x_3\}$. Em um multi-conjunto, a adição do elemento x_2 implica no multi-conjunto $X' = \{x_1, x_2, x_2, x_3\}$. A repetição do elemento x_2 diferencia o conjunto X do multi-conjunto X' .

A ligação de uma transição t é uma substituição ($v_1 = c_1, \dots, v_n = c_n$) que designa uma cor c_i para cada variável $v_i \in Var(t)$ ($1 \leq i \leq n$). Um passo, ou disparo, Y é uma função que mapeia cada transição $t \in T$ para um multi-conjunto $B(t)$ tal que $Y(t)$ é finito para todo $t \in T$.

As marcações de uma rede de Petri colorida variam conforme a seguinte regra de disparo das transições:

¹¹ O conceito de multi-conjunto será definido a seguir.

(a) De acordo com Makungu *et al.* (1999), um disparo Y está habilitado numa marcação M se e somente se:

$$\sum_{t \in T} \sum_{b \in Y(t)} E(p, t) \langle b \rangle \leq M(p), \forall p \in P$$

A expressão $E(p, t) \langle b \rangle$ representa o multi-conjunto de fichas removidos de um lugar p quando uma transição t ocorre com a ligação b .

(b) A mudança de uma marcação M para uma marcação M' é dada por:

$$M'(p) = (M(p) - \sum_{t \in T} \sum_{b \in Y(t)} E(p, t) \langle b \rangle) + \sum_{t \in T} \sum_{b \in Y(t)} E(t, p) \langle b \rangle, \forall p \in P$$

Na Figura 3.5 é ilustrado um exemplo de disparo de uma transição de uma rede de Petri colorida. A declaração das variáveis da *RPC* constante na Figura 3.5 é realizada em pseudocódigo, estando presente no quadro tracejado. Aos arcos são associadas variáveis, denominadas x , do tipo X .

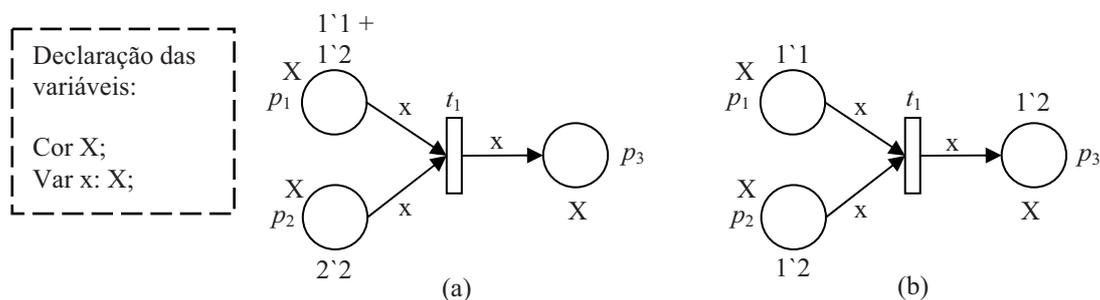


Figura 3.5 – Exemplo de disparo de uma transição em uma rede de Petri colorida.

O lugar p_1 possui uma ficha da cor 1 e uma ficha da cor 2; já o lugar p_2 possui duas fichas da cor 2. Assim, o disparo de t_1 removerá uma ficha da cor 2 de cada lugar, depositando um ficha de cor 2 em p_3 .

3.2.4 Redes de Petri com restrições de tempo

Segundo Berthomieu e Diaz (1991), existem sistemas que se comportam baseados em parâmetros temporais explícitos. Utilizar e ampliar o conceito das redes de Petri clássicas, ou seja, adicionar características de tempo às transições, possibilita a aplicação desta técnica na modelagem de sistemas inerentes a diversos campos do conhecimento.

Segundo Cardoso e Valette (1997), uma Rede de Petri Temporal (*RPT*) é obtida associando-se a cada transição um intervalo $(\theta_{min}, \theta_{max})$, ou seja, a duração de sensibilização da transição deve ser maior ou igual a θ_{min} e menor ou igual a θ_{max} .

Formalmente, uma Rede de Petri Temporal é uma tripla:

$$RPT = (N, I, M_0) \quad 3.8$$

em que:

- N é a estrutura de uma rede de Petri;
- $I = \theta(t) = [\theta_{min}(t), \theta_{max}(t)]$ é uma função que, a cada transição t , associa um intervalo racional que descreve uma duração de sensibilização.
- M_0 é uma marcação, chamada marcação inicial, dada pela aplicação $M: P \rightarrow \mathbb{N}$.

Conforme Cardoso e Valette (1997), a Rede de Petri Temporizada (*RPTE*) é obtida através da definição de um retardo ao disparo da ficha. Enquanto nas *RPT* o disparo ocorre numa janela de tempo, nas *RPTE* o disparo ocorrerá após uma determinada duração de tempo. Pode-se associar um intervalo $[a, a]$ a uma transição para representar uma duração a . Se a transição estiver sensibilizada no tempo τ , ela irá disparar no tempo $\tau + a$, caso continue, nesta data, sensibilizada pela marcação.

Em diversas aplicações práticas das redes de Petri com restrições de tempo, o determinismo é uma simplificação. Mesmo o carácter aleatório das *RPT* não é suficiente para representar, com verossimilhança, sistemas cujos tempos de disparo são regidos por funções de densidade de probabilidade.

Uma Rede de Petri Estocástica (*RPE*) é uma tripla (CARDOSO e VALETTE, 1997):

$$RPE = (N, \lambda, M_0) \quad 3.9$$

em que:

- N é a estrutura de uma rede de Petri;
- λ é uma função que associa, a cada transição $t \in T$, uma taxa de transição $\lambda(t)$.
- M_0 é uma marcação, chamada marcação inicial, dada pela aplicação $M: P \rightarrow \mathbb{N}$.

Enquanto em uma rede de Petri temporal a duração de sensibilização da transição assume um valor dentro do intervalo $(\theta_{\min}, \theta_{\max})$, ou seja, é uma variável aleatória uniformemente distribuída, nas redes de Petri estocásticas a duração de sensibilização pertence a um intervalo contínuo $[0, \infty)$ regido por uma distribuição exponencial.

Conforme Bause e Kritzinger (2002), o grafo de alcançabilidade de estados de uma rede de Petri estocástica é isomórfico ao grafo de uma cadeia de Markov associado ao SED modelado. Quando o número de transições é elevado, a análise da cadeia de Markov torna-se complexa, sendo cabível a utilização de Redes de Petri Estocásticas Generalizadas (RPEG). Para mais detalhes, consultar Marsan *et al.* (1995) e Haas (2002).

3.2.5 Redes de Petri controladas

Diversos sistemas reais, como, por exemplo, sistemas flexíveis de manufatura, sofrem alterações nas suas configurações devido a contingências. A modificação da seqüência de operações implicaria na construção de um novo modelo e, conseqüentemente, a realização de nova análise e simulação. Para alguns sistemas, esse processo de remodelagem e re-análise pode ser inadmissível (HOLLOWAY e HOSSAIN, 1992).

As redes de Petri controladas permitem a concepção de um modelo geral, que pode ser facilmente manuseado através de especificações impostas pela adição de lugares de controle.

Uma Rede de Petri Controlada (RPCO), apresentada em Holloway e Krogh (1994), pode ser definida como uma sextupla:

$$RPCO = (P, T, CO, Pre, Post, B) \quad 3.10$$

em que:

- P é um conjunto finito de lugares de dimensão n ;
- T é um conjunto finito de transições de dimensão m ;
- CO é um conjunto finito de lugares de controle;
- $Pre: P \times T \rightarrow \mathbf{N}$ é a aplicação de entrada (lugares precedentes ou incidência anterior);

- $Post: P \times T \rightarrow \mathbf{N}$ é a aplicação de saída (lugares seguintes ou incidência posterior);
- B é um conjunto de arcos ligando lugares de controle a transições de modo que $B \subseteq (CO \times T)$;
- $P \cap T \cap CO = \emptyset$, ou seja, são conjuntos mutuamente excludentes.

A regra de disparo das transições de uma rede de Petri controlada é análoga à regra de disparo de uma rede de Petri ordinária, conforme exposto no item 3.2.1 deste texto. A marcação dos lugares de controle destina-se a controlar o sistema modelado, com vistas a restringir o grafo de alcançabilidade da rede às especificações do analista. A aplicação das redes de Petri controladas no controle de SEDs será apresentada no Capítulo 4.

3.3 Teoria do Controle Supervisório

Os modelos de SED, usualmente, representam um sistema na sua forma não controlada, isto é, não existem restrições no sistema com vistas a regular o seu funcionamento, Contudo, na prática, pode-se constatar que o comportamento do sistema modelado seja insatisfatório devido à possibilidade de ocorrência de estados indesejáveis.

Eventos tais como bloqueios, acidentes, congestionamentos e falhas devem ser evitados para que a eficiência do sistema não seja comprometida. Tais eventos são caracteres a serem removidos da linguagem falada pelo sistema em operação. Essa é a filosofia da Teoria do Controle Supervisório (TCS): sintetizar controladores de modo a restringir a linguagem falada pelo sistema aos eventos definidos como satisfatórios.

Duas considerações podem ser realizadas: (i) a restrição deve ser maximamente permissível, isto é, ao bloquear um evento indesejável, a ocorrência dos eventos desejáveis não deve ser prejudicada; e (ii) uma seqüência de disparo de transições de uma rede de Petri pode ser vista como uma linguagem; assim, restrições de controle podem ser especificadas em modelos concebidos com auxílio da técnica supracitada.

A seguir, serão definidos conceitos básicos da TCS, válidos para modelos de SED. Para mais detalhes, o leitor deve consultar Cassandras e Lafortune (1999), Barroso (1996) e Cury (2001).

Seja G um SED modelado por duas linguagens, denotadas L e L_m , em que L é o conjunto de todas as palavras (*strings*) que podem ser geradas por G e L_m é a linguagem marcada do sistema. Admitir-se-á que o sistema seja modelado por um autômato (vide Equação 3.1) com conjunto finito de estados. Com base na premissa de que o comportamento do sistema é insatisfatório, serão impostas restrições que limitarão o comportamento do sistema a um subconjunto de $\mathcal{L}(G)$ tal que $\mathcal{L}(G) = L$ e $\mathcal{L}_m(G) = L_m$.

O conjunto E de eventos de G pode ser particionado em dois conjuntos mutuamente excludentes (CASSANDRAS e LAFORTUNE, 1999):

$$E = E_c \cup E_{nc} \quad 3.11$$

em que:

- E_c é um conjunto de eventos controláveis, isto é, os eventos que podem ser desabilitados pelo supervisor S ;
- E_{nc} é um conjunto de eventos não controláveis, isto é, os eventos que não podem ter sua ocorrência prevenida pelo supervisor S ¹²;

Deseja-se sintetizar um supervisor, denotado por S , que interaja com G conforme o ilustrado na Figura 3.6. O supervisor S atua sobre o evento s , regulando o comportamento de G .

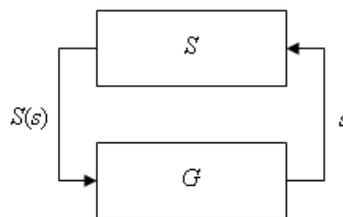


Figura 3.6 – Laço de retro-alimentação do controle supervisorio, em que G representa o sistema não controlado e S o supervisor.

Fonte – Cassandras e Lafortune (1999).

O controle, em alguns casos, pode se dar através de uma observação parcial do desempenho do sistema. Novamente, o conjunto E de eventos de G pode ser dividido em dois conjuntos mutuamente excludentes (CASSANDRAS e LAFORTUNE, 1999):

¹² Esse conceito pode ser estendido às transições de uma rede de Petri. A transição de uma rede é dita não controlável se o seu disparo não puder ser inibido por uma ação externa (MOODY e ANTSAKLIS, 1998).

$$E = E_o \cup E_{no} \quad 3.12$$

em que:

- E_o é um conjunto de eventos observáveis, isto é, os eventos que podem ser percebidos pelo supervisor S ;
- E_{no} é um conjunto de eventos não observáveis, isto é, os eventos que não podem ter sua ocorrência percebida pelo supervisor S ¹³;

O laço de retro alimentação para o controle sob observação parcial é ilustrado na Figura 3.7. A projeção P representa os supervisores de observação parcial atuando sobre S_P .

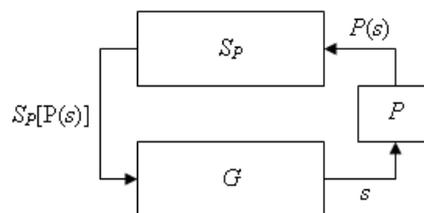


Figura 3.7 – Laço de retro-alimentação do controle supervisorio no caso de observação parcial.
Fonte – Cassandras e Lafortune (1999).

As definições gerais apresentadas ao longo deste capítulo, permitirão ao leitor um maior entendimento acerca dos métodos de controle supervisorio descritos no subsequente capítulo, assim como do método RCCD, apresentado no capítulo 5.

¹³ Esse conceito pode ser estendido às transições de uma rede de Petri. A transição de uma rede é dita não observável se os seus disparos não puderem ser diretamente detectados ou mensurados (MOODY e ANTSAKLIS, 1998). O conceito de observabilidade também pode ser relacionado à viabilidade financeira. Eventos cujo custo de observação seja demasiadamente elevado podem ser considerados não observáveis.

CAPÍTULO 4

CONTROLE SUPERVISÓRIO DE SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS BASEADOS EM REDES DE PETRI

“A modelagem e análise de sistemas é somente o primeiro passo no estudo de SED. O objetivo final é modificar (através de uma ação de controle) o conjunto de trajetórias admissíveis tal que cada trajetória de eventos tenha as propriedades desejadas. Um modelo terá, então, encontrado aplicação no campo da teoria de controle.”

Alessandro Giua.

Neste capítulo são apresentadas várias metodologias de síntese de controle supervisório de Sistemas a Eventos Discretos baseadas em redes de Petri. Este capítulo é fruto de um levantamento do estado da arte sobre controle supervisório baseado em redes de Petri, sendo aqui reportados os métodos mais destacados pela literatura. A estrutura deste capítulo é dividida em cinco seções, explicitadas a seguir.

Na primeira seção, é apresentado o método das redes de Petri controladas. Na segunda seção, é apresentado o método das restrições generalizadas mutuamente excludentes. Na terceira seção, é apresentado o método dos invariantes de lugar. Na quarta seção é apresentado o método das redes de Petri com funções de habilitação de transições. Por fim, na quinta seção são mencionadas outras abordagens, para modelos tais como redes de Petri coloridas, redes de Petri com restrições de tempo, redes de Petri híbridas, dentre outros.

4.1 Método das redes de Petri controladas

As Redes de Petri Controladas (*RPCO*) constituem a primeira abordagem formal de controle de SED baseada em redes de Petri. Conforme definido na seção 3.2.5, as *RPCO* possuem dois tipos de lugares distintos: os lugares de estado e os lugares de controle. O método consiste em designar lugares de controle de modo a regular o processo de disparo das transições de acordo com especificações funcionais.

Os lugares de estado, usualmente, possuem um significado físico (máquina em operação, peça sendo processada, localidade geográfica, etc.). A existência de uma ficha

em um lugar de estado significa que a condição associada àquele lugar, naquele instante, é satisfeita.

Já os lugares de controle representam regras de monitoramento do sistema, podendo, ou não, ter um significado bem definido. Os lugares de controle são um conjunto de condições externas que influenciam a progressão das marcações em uma rede (HOLLOWAY *et al.* 1997).

Segundo Holloway *et al.* (1997), o controle, para uma *RPCO*, é uma função do tipo $u: CO \rightarrow \{0,1\}$. Dada uma função de controle u , uma transição t_j está habilitada para controle quando, para todos os lugares de controle co , $(co, t_j) \in B \rightarrow u(co) = 1$.

Conforme Iordache e Antsaklis (2006), no caso de concorrência, todas as transições habilitadas para controle serão disparadas simultaneamente. Na *RPCO* apresentada na Figura 4.1, os círculos representam os lugares de estado, as barras simbolizam as transições e os retângulos azuis denotam os lugares de controle.

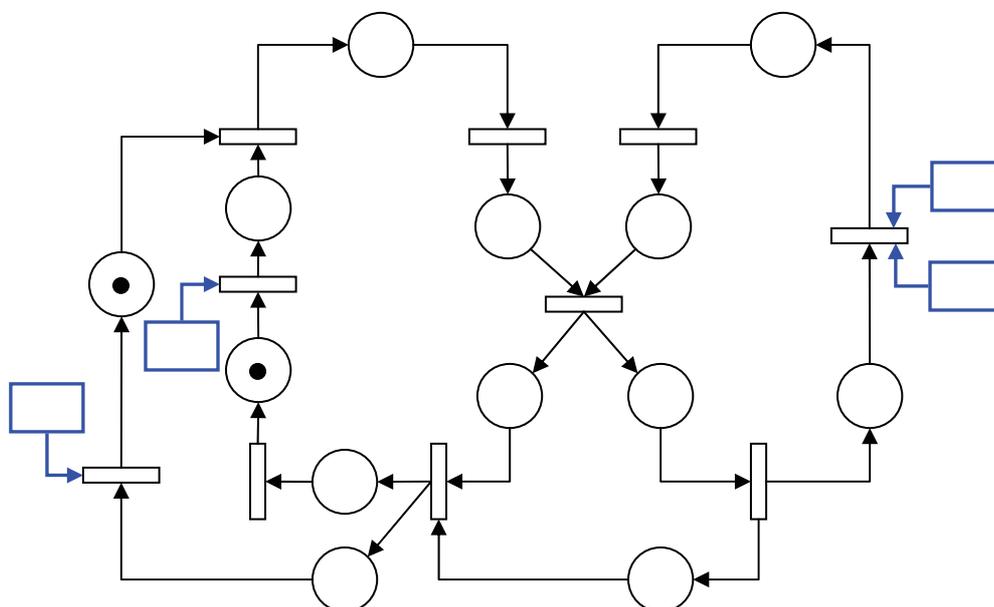


Figura 4.1 – Uma rede de Petri controlada.
Fonte Holloway *et al.* (1997).

As especificações de controle consistem no conjunto de marcações desejáveis ao desempenho do sistema modelado. O controle agirá, portanto, no sentido de impedir que o conjunto de marcações indesejáveis seja atingido pela rede. Para aprofundamento

sobre as definições formais das *RPCO*, consultar Holloway e Krogh (1994) e Holloway *et al.* (1997).

4.2 Método das restrições generalizadas mutuamente excludentes

Em SED, em diversas circunstâncias, processos distintos compartilham, concorrentemente, recursos. Restrições de exclusão mútua permitem que tais recursos sejam compartilhados pelos processos do sistema em análise. Giua (1992) propôs um método, denominado Restrições Generalizadas Mutuamente Excludentes (RGME)¹⁴, que impõe restrições de controle em redes de Petri lugar-transição através da síntese de monitores.

Seja (N, M_0) uma rede de Petri com marcação inicial M_0 , uma restrição generalizada mutuamente excludente (\mathbf{w}, k) define um conjunto de marcações legais (GIUA *et al.*, 1992):

$$M(\mathbf{w}, k) = \{M \in \mathbf{N}^{|P|} \mid \mathbf{w}^T \cdot M \leq k\} \quad (4.1)$$

em que:

- $\mathbf{w} : P \rightarrow \mathbf{N}$ é um vetor de pesos;
- $\mathbf{N}^{|P|}$ é o conjunto de marcações proibidas;
- $k \in \mathbf{N}$ é uma constante.

A base do vetor \mathbf{w} é o conjunto Q_m tal que $Q_m = \{p \in P \mid w(p) > 0\}$. No caso particular em que $w(p) = 1$ ($\forall p \in Q_m$), a RGME é reduzida ao conjunto de restrições consideradas em Holloway e Krogh (1994).

O uso de pesos na definição (\mathbf{w}, k) é uma maneira de representar, de um modo mais compacto, um conjunto de restrições com peso unitário. Um conjunto de restrições com pesos não unitários pode ser decomposto em restrições de peso unitário através da transformação de um vetor de pesos em uma matriz de pesos unitários.

Um conjunto de RGME, dado por m vetores de pesos e m constantes, compõem um conjunto de restrições da seguinte forma:

¹⁴ Tradução do autor para “Generalized Mutual Exclusion Constraints”(GMEC).

$$M(W, k) = \bigcap_{i=1}^m M(\mathbf{w}_i, k_i) = \{M \in \mathbf{N}^{|P|} \mid W^T \cdot M \leq \mathbf{k}\} \quad (4.2)$$

em que:

- $W = (\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_m)$ é uma matriz formada pelos m vetores de pesos;
- $\mathbf{N}^{|P|}$ é o conjunto de marcações proibidas;
- $\mathbf{k} = (k_1, \dots, k_m)$ é um vetor composto pelas m constantes.

Monitores são lugares de controle cujas marcações irão impor as especificações de uma RGME a uma rede de Petri. Seja S um novo lugar a ser adicionado a N ; assim, a nova rede será formada pela dupla (N^S, M_0^S) , com $N^S = (P \cup S, T, Pre, Post)$. É imprescindível destacar que os monitores são lugares de estado idênticos aos lugares de uma rede de Petri ordinária, e não os lugares de controle das redes de Petri controladas.

Admitindo que na rede modelada não ocorram autolaços contendo S em N^S , Pre^S e $Post^S$ podem ser singularmente determinadas. Seja C a matriz de incidência de N , N^S terá a matriz de incidência C^S assim definida:

$$C^S = \left| \begin{array}{c} C \\ \mathbf{w}^T \cdot C \end{array} \right| \quad (4.3)$$

C^S é a matriz de incidência controlada, que difere da matriz de incidência inicial pela adição de linhas referentes aos monitores. Usualmente, na representação de C^S , omitem-se as linhas da matriz de incidência original. A marcação inicial do monitor S é obtida pela seguinte expressão:

$$M_0^S = \left| \begin{array}{c} M_0 \\ k - \mathbf{w}^T \cdot M_0 \end{array} \right| \quad (4.4)$$

Uma síntese do método RGME é apresentada no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Algoritmo do método RGME.

Algoritmo RGME

Início

Dados de entrada: C, M_0, W, \mathbf{k} .

$C^S \leftarrow \mathbf{w}^T * C$;

$M_0^S \leftarrow k - \mathbf{w}^T * M_0$;

Dados de saída: C^S, M_0^S .

Fim.

Seja (N, M_0) uma rede de Petri, (w, k) uma RGME e (N^S, M_0^S) a rede de Petri com a adição do monitor, tem-se que (GIUA *et al.*, 1992):

- S impõe que a projeção sobre P do conjunto de marcações alcançáveis de (N^S, M_0^S) está contida no conjunto de marcações legais alcançáveis de (N, M_0) ;
- S impõe que a projeção sobre P do conjunto de marcações potencialmente alcançáveis de (N^S, M_0^S) é idêntica ao conjunto de marcações potencialmente alcançáveis de (N, M_0) ;
- S restringe minimamente o comportamento de (N^S, M_0^S) , no sentido que ele previne apenas o disparo de transições que levem a marcações proibidas.

A adição de um monitor à estrutura da rede modifica o comportamento do sistema de modo a evitar o alcance de marcações que não satisfaçam a uma dada RGME. Assim, três questões podem ser destacadas (GIUA *et al.*, 1992):

- A adição de um monitor nem sempre preserva a vivacidade¹⁵ da rede;
- Nem todas as marcações que satisfazem a uma dada RGME podem ser alcançadas, numa rede de Petri, com a adição de um monitor;
- Ainda que a vivacidade seja preservada com a adição de um monitor, a rede pode perder a propriedade da reversibilidade¹⁶.

Para exemplificar o método em análise, considere a rede ilustrada na Figura 4.2. Sejam w_1 e w_2 duas RGME tais que $w_1 = (1 \ 3 \ 3 \ 0)^T$ com $k_1 = 5$ e $w_2 = (0 \ 1 \ 1 \ 0)^T$ com $k_2 = 1$. Aplicando-se, para cada caso, as equações (4.3) e (4.4), obtêm-se $C^{S1} = (1 \ 2 \ 0 \ -3)$, $M_0^{S1} = 2$, $C^{S2} = (0 \ 1 \ 0 \ -1)$ e $M_0^{S2} = 1$. Os monitores, com suas respectivas marcações, estão ilustrados na Figura 4.3.

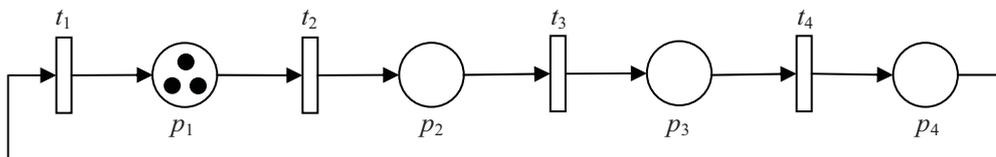


Figura 4.2 – Rede Petri ordinária: processo seqüencial não controlado.

Fonte – Giua *et al.* (1992).

¹⁵ Uma rede de Petri é dita *viva* se, independente da marcação que for alcançada a partir de M_0 , for possível disparar qualquer transição da rede através de alguma seqüência de disparo (MURATA, 1989).

¹⁶ Uma rede de Petri é dita reversível se existir uma seqüência de disparo s que leve a rede de volta à marcação inicial M_0 (MURATA, 1989).

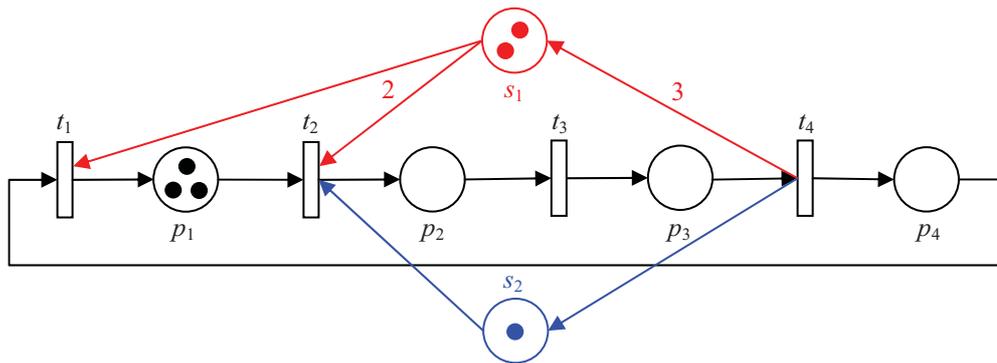


Figura 4.3 – Exemplo de aplicação do método RGME.
Fonte – Giuia *et al.* (1992).

Para avaliação do funcionamento do método RGME, os modelos não controlado e controlado, do sistema ilustrado nas Figuras 4.2 e 4.3, foram implementados no *software* TINA¹⁷ versão 2.7.4. Analisou-se o grafo de alcançabilidade de estados dos modelos supracitados, conforme descrito a seguir.

As marcações da rede não controlada (Figura 4.2) são: $M_0 = (3\ 0\ 0\ 0)$, $M_1 = (2\ 1\ 0\ 0)$, $M_2 = (1\ 2\ 0\ 0)$, $M_3 = (0\ 3\ 0\ 0)$, $M_4 = (0\ 2\ 1\ 0)$, $M_5 = (0\ 1\ 2\ 0)$, $M_6 = (0\ 0\ 3\ 0)$, $M_7 = (0\ 0\ 2\ 1)$, $M_8 = (0\ 0\ 1\ 2)$, $M_9 = (0\ 0\ 0\ 3)$, $M_{10} = (1\ 0\ 0\ 2)$, $M_{11} = (0\ 1\ 0\ 2)$, $M_{12} = (1\ 1\ 0\ 1)$, $M_{13} = (0\ 2\ 0\ 1)$, $M_{14} = (0\ 1\ 1\ 1)$, $M_{15} = (1\ 1\ 1\ 0)$, $M_{16} = (1\ 0\ 2\ 0)$, $M_{17} = (1\ 0\ 1\ 1)$, $M_{18} = (2\ 0\ 1\ 0)$ e $M_{19} = (2\ 0\ 0\ 1)$.

As marcações da rede submetidas à primeira restrição de controle são: $M_0 = (3\ 0\ 0\ 0\ 2)$, $M_1 = (2\ 1\ 0\ 0\ 0)$ e $M_2 = (1\ 2\ 0\ 0\ 0)$. Nota-se que esta restrição implica em bloqueio do sistema. As marcações da rede com a segunda restrição de controle são: $M_0 = (3\ 0\ 0\ 0\ 1)$, $M_1 = (2\ 1\ 0\ 0\ 0)$, $M_2 = (2\ 0\ 1\ 0\ 0)$, $M_3 = (2\ 0\ 1\ 0\ 1)$, $M_4 = (1\ 1\ 0\ 1\ 0)$, $M_5 = (1\ 0\ 1\ 1\ 0)$, $M_6 = (1\ 0\ 0\ 2\ 1)$, $M_7 = (0\ 1\ 0\ 2\ 0)$, $M_8 = (0\ 0\ 1\ 2\ 0)$ e $M_9 = (0\ 0\ 0\ 3\ 0)$.

A presença de transições não controláveis na rede de Petri que modela um dado sistema, por implicar que o controle nem sempre pode ser imposto pelas técnicas usuais, restringe a aplicação de RGME. Em redes com transições não controláveis, o controle torna-se um problema mais geral de restrição de marcações proibidas.

¹⁷ O TINA é um aplicativo de domínio público para modelagem, análise e simulação de redes de Petri ordinárias com restrições de tempo.

Contudo, para redes vivas e conservativas¹⁸, ainda que haja transições não controláveis na rede que modela um SED a ser controlado, monitores podem ser impostos pelo método RGME¹⁹.

4.3 Método dos invariantes de lugar

Os invariantes de lugar, que são uma das propriedades estruturais das redes Petri que dependem apenas da topologia da rede e independem de sua marcação, são importantes para a análise dinâmica de um processo modelado. A análise dos invariantes pode colaborar para a validação lógica de um modelo desenvolvido em redes de Petri.

Os invariantes de lugar correspondem aos conjuntos de lugares aos quais a soma de fichas permanece constante para todas as marcações alcançáveis pela rede. Um invariante de lugar é definido como qualquer vetor inteiro $x \in \mathbf{Z}^n$ que satisfaça:

$$x^T M = x^T M_0 \quad (4.5)$$

A equação (4.5) nos diz que a soma das fichas nos lugares do invariante permanece constante para qualquer marcação alcançável pela rede. Os invariantes de lugar podem ser obtidos através da obtenção de soluções inteiras para:

$$x^T C = 0 \quad (4.6)$$

em que C é a matriz de incidência da rede. Dada uma rede de Petri com n lugares e m transições, o objetivo do controle é forçar os processos a obedecerem a restrições da seguinte forma:

$$l_1 M(p_i) + l_2 M(p_j) \leq b_1 \quad (4.7)$$

Em que l_1 , l_2 e b_1 são constantes pertencentes ao conjunto dos inteiros. De acordo com Moody e Antsaklis (1998), restrições do tipo (4.7) são equivalentes a um conjunto de

¹⁸ Os componentes conservativos de uma rede de Petri são os invariantes de lugar e os invariantes de transição. Para mais detalhes, consultar Cardoso e Valette (1997) e Murata (1989).

¹⁹ Este resultado foi provado pelo Teorema 2 exposto em Giua *et al.* (1992).

RGME, conforme equação (4.2). A inequação (4.7) pode ser transformada numa igualdade através da adição de uma variável de folga:

$$l_1 M(p_i) + l_2 M(p_j) + M_s = b_1 \quad (4.8)$$

A variável de folga representará a adição de um lugar de controle p_s cuja marcação irá satisfazer a condição de igualdade. É imprescindível destacar que os lugares de controle impostos pelo método dos invariantes de lugar são lugares de estado idênticos aos lugares de uma rede de Petri ordinária, e não lugares de controle como os das redes de Petri controladas.

Com a adição do lugar de controle, a matriz de incidência original, de ordem $n \times m$, será acrescida de uma linha, devido à adição da variável de folga, que corresponde à matriz do controlador, denominada C_c . Esta matriz contém os arcos que conectam o lugar de controle às transições dos processos controlados da rede. Usualmente, na representação de C_c , omitem-se as linhas da matriz de incidência original.

Moody e Antsaklis (1998) demonstram que, sendo L uma matriz inteira $n_c \times n$ e \mathbf{b} um vetor inteiro $n_c \times 1$, a síntese de controladores pode ser realizada através da solução das seguintes equações (vide demonstração no Anexo 1):

$$C_c = -L C \quad (4.9)$$

$$M_{c0} = \mathbf{b} - L M_0 \quad (4.10)$$

O elemento (i, j) de L é igual a um, se o lugar for submetido a uma restrição de controle, sendo igual a zero, caso contrário. O i -ésimo elemento de \mathbf{b} é igual ao número de fichas a ser limitado pelo controlador. A seguir, no Quadro 4.2, é ilustrado o algoritmo do Método dos Invariantes de Lugar (INVL).

Quadro 4.2 – Algoritmo do método dos invariantes de lugar.

Algoritmo INVL

Início

Dados de entrada: C, M_0, L, \mathbf{b} .

$C_c \leftarrow -L * C$;

$M_{c0} \leftarrow \mathbf{b} - L * M_0$;

Dados de saída: C_c, M_{c0} .

Fim.

Para exemplificar o método em foco, considere a rede ilustrada na Figura 4.4. O sistema é constituído por três lugares e quatro transições. Deseja-se impor ao sistema que as marcações M_2 e M_3 sejam mutuamente excludentes, ou seja, os dois lugares não podem conter fichas simultaneamente. Assim, pode-se estabelecer a seguinte especificação de controle: $M(p_2) + M(p_3) \leq 1$.

Dada a especificação acima, $L = (0 \ 1 \ 1)$ e $\mathbf{b} = (1)$. Aplicando-se as equações (4.9) e (4.10), obtém-se $C_c = (-1 \ 0 \ 0 \ 1)$ e $M_{c0} = 1$. Isso significa que um lugar de controle será acrescentado à rede não controlada e o mesmo será lugar de entrada da transição t_4 e lugar de saída da transição t_1 . A marcação inicial desse lugar conterá uma ficha. O lugar de controle p_s , bem como sua marcação, são ilustrados na Figura 4.4.

Para avaliação do funcionamento do método dos invariantes de lugar, os modelos não controlado e controlado do sistema, ilustrados na Figura 4.4, foram implementados no *software* TINA versão 2.7.4. Analisou-se o grafo de alcançabilidade de estados dos modelos supracitados, conforme descrito a seguir.

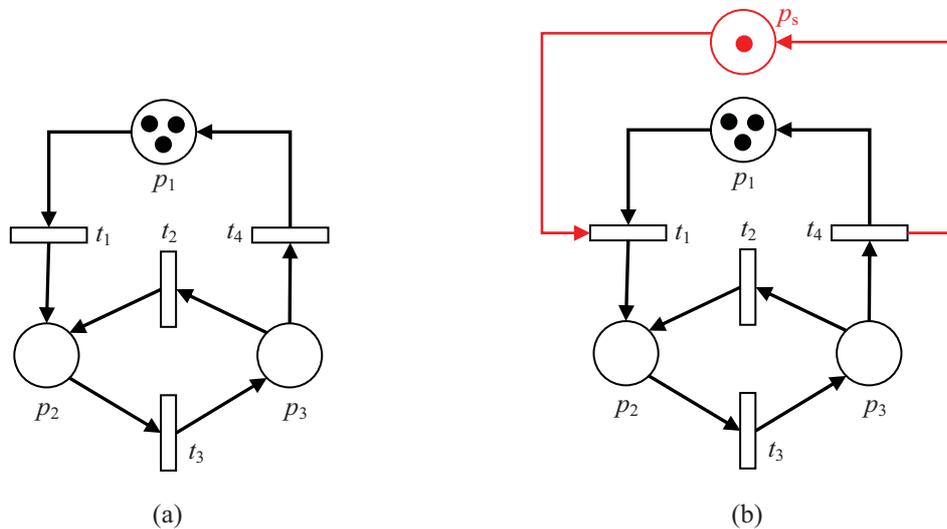


Figura 4.4 – Exemplo de aplicação do método dos invariantes de lugar.
 Fonte – Moody *et al.* (1994).

As marcações da rede não controlada (Figura 4.4(a)) são: $M_0 = (3 \ 0 \ 0)$, $M_1 = (2 \ 1 \ 0)$, $M_2 = (1 \ 2 \ 0)$, $M_3 = (0 \ 3 \ 0)$, $M_4 = (0 \ 2 \ 1)$, $M_5 = (0 \ 1 \ 2)$, $M_6 = (0 \ 0 \ 3)$, $M_7 = (1 \ 0 \ 2)$, $M_8 = (1 \ 1 \ 1)$ e $M_9 = (2 \ 0 \ 1)$. As marcações da rede submetidas à restrição de controle (Figura 4.4(b)) são: $M_0 = (3 \ 0 \ 0 \ 1)$, $M_1 = (2 \ 1 \ 0 \ 0)$ e $M_2 = (2 \ 0 \ 1 \ 0)$. Note que, neste caso, a soma das fichas nos lugares p_2 e p_3 é sempre menor ou igual a um.

Caso o analista deseje especificar restrições funcionais tais como: (i) duas transições não podem disparar simultaneamente; ou (ii) uma transição não pode disparar quando um determinado lugar contiver fichas, o método dos invariantes de lugar pode não ser adequado ou até utilizável. Conforme Moody *et al.* (1994), uma outra forma de estabelecer restrições de controle é através da supervisão do vetor de disparo das transições.

Seja (N, M_0) uma rede de Petri com marcação inicial M_0 , um processo do sistema pode satisfazer uma restrição do tipo:

$$M(p_i) + q_j \leq 1 \quad (4.11)$$

em que q_j é o j -ésimo elemento do vetor de disparos q . Essa restrição significa que o disparo de t_j e a existência de fichas em p_i são eventos mutuamente excludentes, ou seja, t_j não pode disparar enquanto houverem fichas em p_i , e p_i não pode conter fichas no momento do disparo de t_j .

Tendo em vista a simplicidade em se lidar com restrições baseadas nos invariantes de lugar, deve-se procurar um método de se transformar restrições do tipo 4.11 em restrições do tipo 4.7. Um artifício, ilustrado na Figura 4.5, é transformar a transição t_j em dois elementos: um lugar p_j' e uma transição t_j' .

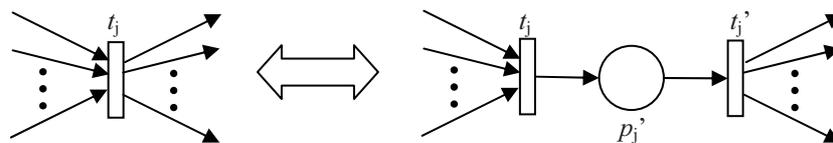


Figura 4.5 – Transformação de uma transição.
Fonte – Moody *et al.* (1994).

Uma operação como essa acresce a matriz de incidência original em uma linha e uma coluna e pouco altera a estrutura do modelo. O lugar p_j' simboliza um contador dos disparos de t_j , permitindo a imposição de restrições sobre a ocorrência dos seus disparos, conforme ilustra a seguinte inequação:

$$M(p_i) + M(p_j') \leq 1 \quad (4.12)$$

Percebe-se, portanto, que o método dos invariantes de lugar pode ser empregado para impor restrições do tipo 4.12. Segundo Moody *et al.* (1994), após a imposição do controle, pode-se retornar ao modelo inicial.

Até o momento, só foram apresentados exemplos de redes cujas transições são controláveis e observáveis; entretanto, em situações práticas, tal condição nem sempre poderá ser constatada.

A matriz de incidência não controlada, denotada por C_{nc} , corresponde às colunas da matriz de incidência original cujas transições são não controláveis; por sua vez, a matriz de incidência não observável, representada por C_{no} , corresponde às colunas da matriz de incidência original cujas transições são não observáveis.

Restrições de controle para transições não controláveis e não observáveis devem satisfazer, respectivamente, às seguintes condições:

$$L C_{nc} \leq 0 \quad (4.13)$$

$$L C_{no} = 0 \quad (4.14)$$

De acordo com Moody e Antsaklis (1997), as condições 4.13 e 4.14 indicam que é possível observar uma transição que não pode ser inibida; contudo, é ilegal inibir diretamente uma transição que não pode ser observada.

Tendo em vista a presença de eventos não controláveis e não observáveis em um sistema a ser supervisionado, a matriz L e o vetor \mathbf{b} devem ser modificados de modo a não interferirem nos eventos supracitados. Moody e Antsaklis (1997) propõem a seguinte transformação:

$$L' = R_1 + R_2 L \quad (4.15)$$

$$\mathbf{b}' = R_2 (\mathbf{b} + \mathbf{1}) - \mathbf{1} \quad (4.16)$$

em que:

- R_1 : matriz pertencente aos inteiros que satisfaz $R_1 M_p \geq 0, \forall M_p$;
- R_2 : matriz diagonal positiva definida pertencente aos inteiros;

- **1**: vetor de componentes iguais a 1, com a dimensão do número de restrições impostas.

Deste modo, as equações 4.9 e 4.10, modificam-se para

$$C_c = -(R_1 + R_2 L) C = -L' C \quad (4.17)$$

$$M_{c0} = R_2 (\mathbf{b} + \mathbf{1}) - \mathbf{1} - (R_1 + R_2 L) M_0 = \mathbf{b}' - L' M_0 \quad (4.18)$$

As matrizes R_1 e R_2 devem ser geradas de forma a possuírem propriedades convenientes. Operações de linha ou modelos de otimização via programação linear inteira mista são as duas abordagens correntes para a concepção de tais matrizes. Moody e Antsaklis (1996) apresentam quatro algoritmos para a geração das matrizes supramencionadas.

A seguir, será ilustrado um exemplo de imposição de restrições funcionais pelo método dos invariantes de lugar, para o caso de redes de Petri ordinárias com transições não controláveis. Na Figura 4.6, é ilustrado o modelo de uma máquina não confiável. A legenda da rede em questão é exposta na Tabela 4.1.

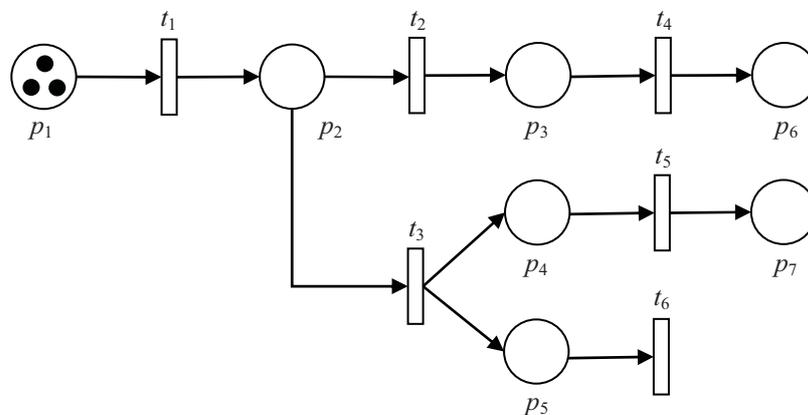


Figura 4.6 – Modelo não controlável de uma máquina não confiável.

Fonte – Moody e Antsaklis, (1997).

A máquina é dita não confiável porque ela pode apresentar defeitos, danificando uma dada peça na sua operação. A rede possui duas transições não controláveis: t_2 e t_3 . A transição t_3 representa a quebra da máquina e a transição t_2 simboliza o processamento de peças pela máquina.

Tabela 4.1 – Descrição dos lugares e das transições da rede de Petri da Figura 4.5.
 Fonte – Moody e Antsaklis, (1997).

Lugares		Transições	
p_1	Número de peças restantes	t_1	Peças movendo-se da fila de entrada para máquina
p_2	Máquina ocupada, o processamento da peça foi iniciado	t_2	Processamento da peça é completado
p_3	Espera para transferência para fila de peças completas	t_3	Falha da máquina, a peça é danificada
p_4	Espera para transferência para fila de peças defeituosas	t_4	Peça move-se para fila de peças completas
p_5	Máquina esperando para ser reparada	t_5	Peça move-se para fila de peças danificadas
p_6	Fila de peças completas	t_6	Reparo da máquina
p_7	Fila de peças defeituosas		

A falha da máquina é um evento que não pode ser diretamente inibido e, a partir do instante em que o processamento de uma peça é iniciado, este evento não pode ser contido. Assim, constata-se que as transições t_2 e t_3 são realmente não controláveis. A matriz de incidência não controlada será, portanto, uma matriz de seis linhas e duas colunas, correspondentes à segunda e à terceira colunas da matriz de incidência original.

Para o controle do sistema, devem ser impostas as seguintes restrições: $M(p_1) + M(p_5) \leq 1$ e $M(p_3) + M(p_4) \leq 1$. A primeira restrição significa que não se deve alimentar a máquina com novas peças enquanto a mesma estiver quebrada, já a segunda restrição impede que haja o conflito entre o transporte de peças acabadas e danificadas.

Após a geração das matrizes R_1 e R_2 com as propriedades desejáveis (MOODY e ANTSAKLIS, 1996; MOODY e ANTSAKLIS, 1997), aplicam-se as equações 4.17 e 4.18 para a determinação da matriz de incidência controlada e das marcações dos

lugares de controle. Os resultados obtidos são: $C_c = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{e}$

$$M_{c_0} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Na Figura 4.7 é ilustrado o modelo controlado para a máquina não confiável. Os lugares de controle monitoram a transição t_1 com o intuito de prevenir os disparos indesejáveis de t_2 e t_3 .

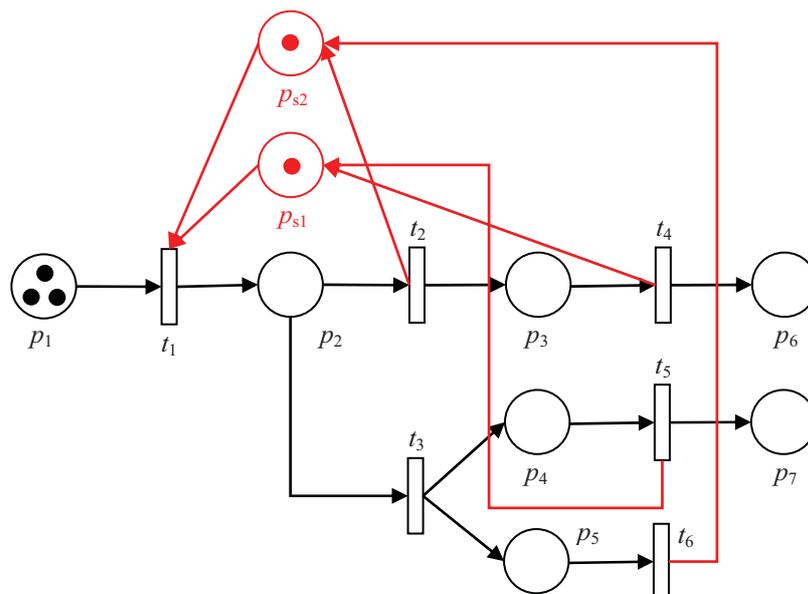


Figura 4.7 – A máquina não confiável controlada.
Fonte – Moody e Antsaklis, (1997).

Uma ferramenta computacional, disponível para Matlab 5.3 ou 6 da plataforma SunOS, para o controle supervísório de SED via método dos invariantes de lugar, é apresentada em Iordache e Antsaklis (2002). O aplicativo permite a imposição de restrições lineares em redes de Petri com transições não controláveis e não observáveis.

4.4 Método das redes de Petri com funções de habilitação de transições

Nas abordagens de controle apresentadas nos tópicos anteriores, o impedimento da ocorrência de estados indesejáveis era efetuado pela imposição de lugares de controle, os quais alteravam o conjunto de marcações acessíveis por uma dada rede de Petri, limitando-o a um subconjunto desejável. Tais procedimentos, entretanto, possuem alguns inconvenientes, conforme será explicitado a seguir.

Em primeiro lugar, a imposição de lugares de controle implica tanto na adição de novos lugares como na adição de novos arcos à rede a ser controlada. Deste modo, incrementa-se a complexidade do modelo e alteram-se as características do modelo do sistema. Em segundo lugar, uma mudança nas especificações de controle implica em modificações no modelo inicial, ainda que essas alterações sejam de pequeno porte.

Barroso (1996) propõe uma nova abordagem para a síntese de supervisores de sistemas a eventos discretos que elimina essas duas desvantagens dos métodos correntes de

controle baseados em redes de Petri. Através das Redes de Petri com funções de habilitação de transições (*RPFHT*), apresentadas no tópico 3.2.2 desta Dissertação de Mestrado, pode-se inibir o disparo indesejável de transições através de uma função binária. Uma visão geral do método em foco é apresentada na Figura 4.8.

Tendo em vista que existe uma segmentação entre as etapas de concepção do modelo do sistema, de síntese do supervisor e de operação do sistema, esta abordagem permite uma modularidade das especificações de controle. Várias especificações funcionais podem ser propostas sem que seja necessária nenhuma alteração no modelo inicial.

Segundo Barroso (1996), embora se tenha mostrado que os problemas de síntese de controladores possuem soluções com complexidade polinomial para um dado número de estados atingíveis por um sistema, em sistemas de grande porte o número de estados pode crescer exponencialmente. A síntese modular, geralmente, pode ser empregada para a mitigação deste problema, evidenciando-se, assim, mais uma vantagem do método em análise.

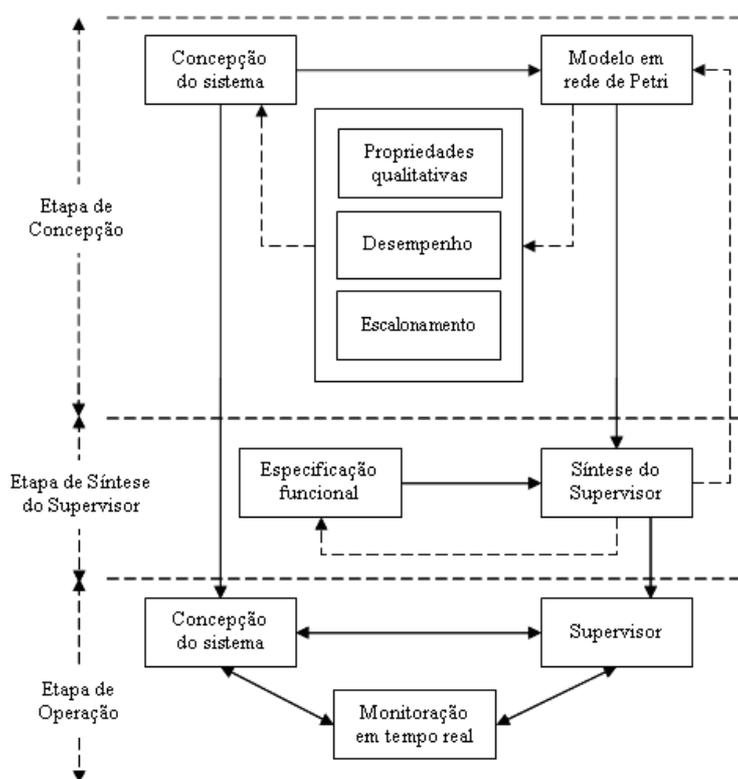


Figura 4.8 – Utilização de redes de Petri e Teoria do Controle supervisorio para concepção, análise e controle de um Sistema a Eventos Discretos.

Fonte – Barroso, (1996).

O procedimento para síntese de supervisores de SED via *RPFHT* é ilustrado na Figura 4.9. A etapa inicial é a concepção do modelo do sistema, em sua forma não controlada. A seguir, deve-se construir a árvore de cobertura de estados do modelo de modo a avaliar o conjunto de marcações alcançáveis pela rede. As especificações de controle são apontadas para, em seguida, serem obtidas as especificações possíveis. As funções de habilitação das transições são determinadas e, por fim, tem-se a *RPFHT* supervisora.

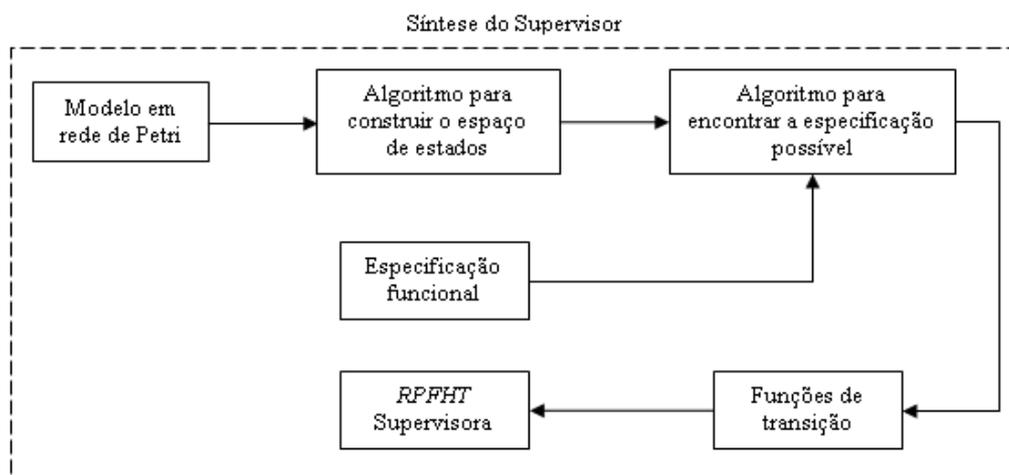


Figura 4.9 – Diagrama de blocos do procedimento de síntese do supervisor.
Fonte – Barroso, (1996).

Conforme Cardoso e Valette (1997), o conjunto de marcações acessíveis de uma rede de Petri marcada é o conjunto das marcações que podem ser atingidas a partir da marcação inicial, através de todas as seqüências de disparo possíveis. Após o disparo de cada transição, ter-se-á uma nova marcação, que será representada por um grafo em que os vértices correspondem às marcações da rede e os arcos às transições que propiciam a mudança de estados.

Se a rede for não-limitada, ou seja, se o número de estados alcançáveis pelo sistema for infinito, o grafo que representa o conjunto de marcações acessíveis crescerá indefinidamente. Para representar o grafo de estados de forma finita, utiliza-se o símbolo w , que representa uma quantidade infinita de estados naquele ramo do grafo.

Para construir o espaço de estados de uma rede, com vistas a supervisioná-la, Barroso (1996) propõe o Algoritmo Modificado da Árvore de Alcançabilidade (AMArA) que lista todas as marcações alcançáveis pela rede, todas as seqüências de transições disparáveis e todos os estados que levariam o sistema a falhas (tais como bloqueios ou

marcações que excedam a capacidade da rede). No Quadro 4.3 é apresentado o algoritmo AMArA.

Quadro 4.3 – Algoritmo Modificado da Árvore de Alcançabilidade para uma rede com capacidade finita (AMArA).

Fonte – Barroso, (1996).

<p>Algoritmo AMArA</p> <p>Início</p> <p>Passo 1: Rotule a marcação inicial M_0 e etiqüete-a como nova.</p> <p>Passo 2: Enquanto existirem marcações nova faça:</p> <ul style="list-style-type: none"> (a) Selecione uma nova marcação M; (b) Se M é idêntica a uma marcação existente, etiqüete-a como antiga; (c) Se nenhuma transição está habilitada em M, etiqüete M como bloqueada; (d) Enquanto existirem transições habilitadas em M, faça o seguinte para cada transição habilitada: <ul style="list-style-type: none"> (i) Obtenha a marcação M' que resulta do disparo de t em M; (ii) Se a capacidade de algum lugar p é excedida na marcação M', então substitua $M'(p)$ por w; (iii) Introduza M' como um nó da árvore, ligue o arco, com rótulo t, de M para M', e etiqüete M' como não-permitida se a capacidade de algum lugar foi excedida, de outra forma, etiqüete-a como nova. <p>Fim</p>
--

Tendo em vista que a rede possui n marcações acessíveis e que, para cada estado encontrado, o mesmo deve ser comparado, no pior caso, a todos os outros estados listados anteriormente, o AMArA possui a complexidade computacional $O(n^2)$.

Uma especificação funcional é obtida através da listagem das marcações indesejadas do modelo do sistema. O Algoritmo para a Construção do Gerador da Suprema Linguagem Controlável (ACGS), proposto por Barroso (1996), utiliza o grafo de marcações fornecido pelo AMArA, assim como as especificações de controle, para a determinação da lista de eventos a serem desabilitados da operação do sistema, juntamente com os estados proibidos. A seguir, no Quadro 4.4, é apresentado o ACGS.

Na Figura 4.10, é ilustrada uma rede Petri ordinária livre de controle que será controlada por meio do método *RPFHT*. Como dados do problema, tem-se a marcação inicial $M_0 = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$, assim como a seguinte especificação de controle: $\Sigma_c = \{t_4, t_5\}$, $\Sigma_{nc} = \{t_1, t_2, t_3, t_6, t_7\}$ e $Q_m = \{q_2\}$, que corresponde à marcação M_2 , o estado marcado do sistema.

Seja $\Sigma = \Sigma_c \cup \Sigma_{nc}$ o conjunto que contém todos os eventos associados às transições de uma rede de Petri, Σ_c corresponde ao conjunto de eventos (ou transições) controláveis e Σ_{nc} representa o conjunto de transições não controláveis. Q_m é o estado marcado da rede, isto é, o estado para o qual o objetivo do sistema é atingido.

Quadro 4.4 – Algoritmo para a Construção do Gerador da Suprema Linguagem Controlável (ACGS)
Fonte – Barroso, (1996).

<p>Algoritmo ACGS</p> <p>Início</p> <p>Passo 1: Criar uma lista dinâmica lista_bloq, e incluir na mesma os estados ou marcações bloqueadas, incluindo as marcações do tipo não permitida.</p> <p>Passo 2: Adicionar à lista_bloq os estados, não marcados, cuja única transição habilitada, se disparada, leva o sistema a um estado de bloqueio.</p> <p>Passo 3: Adicionar à lista os estados nos quais exista pelo menos uma transição habilitada, etiquetada por um evento não controlável, cujo disparo da transição leve o sistema para uma marcação na lista_bloq.</p> <p>Passo 4: Criar uma lista, lista_perigo, com os estados antecessores dos elementos (estados) da lista_bloq, juntamente com o evento que os liga, desde que o antecessor não esteja na lista_bloq. Esses eventos deverão estar sempre desabilitados quando o sistema se encontrar nesses estados.</p> <p>Passo 5: Dada a especificação desejada para o sistema, encontre a suprema linguagem controlável.</p> <p>Passo 6: Adicionar à lista_perigo os estados e seus respectivos eventos de saída a serem desabilitados para que a linguagem especificada seja executada, desde que estes estados não estejam ainda na lista_perigo.</p> <p>Fim</p>

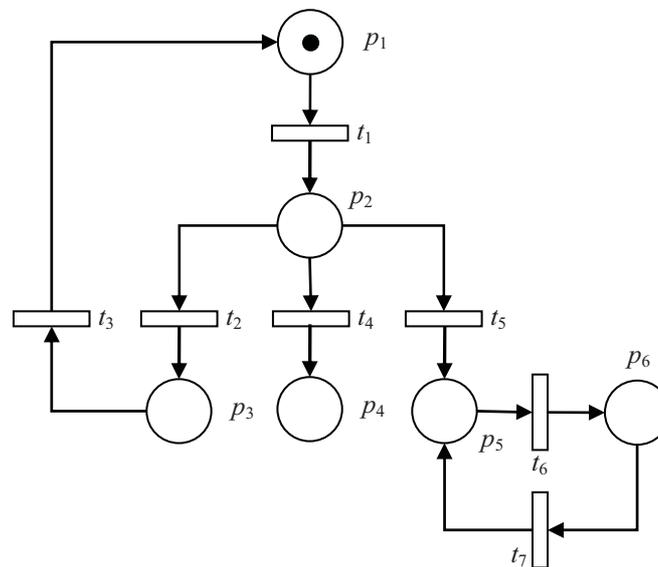


Figura 4.10 – Modelo *RP* – sistema com *livelock* e *deadlock*.
Fonte – Sousa, (2002).

Aplicando o AMArA ao exemplo em questão, obtém-se o grafo de alcançabilidade ilustrado na Figura 4.11. Note que o sistema possui um bloqueio no estado 3

(*deadlock*²⁰) e um conjunto de marcações poço (*livelock*²¹) nos estados 4 e 5. A RPFHT supervisora é ilustrada na Figura 4.12 e o diagrama de estados supervisionado é apresentado na Figura 4.13.

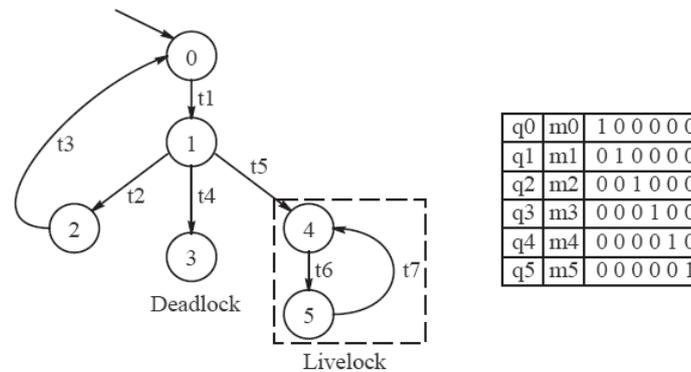


Figura 4.11 – Gerador inerente ao grafo de alcançabilidade do modelo da Figura 4.8.
Fonte – Sousa, (2002).

O sistema não atingirá os estados proibidos q_4 , q_5 e q_6 se, quando o sistema estiver no estado q_2 , as transições t_4 e t_5 não estiverem habilitadas, ou seja, em $M_1 = (0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$, $\varphi_4 = \varphi_5 = 0$. Para que o sistema atinja o estado marcado e não entre em bloqueio, as transições t_1 , t_2 e t_3 devem estar habilitadas, isto é, $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = 1$. As transições t_6 e t_7 não precisam ser monitoradas, pois a inibição do disparo de t_5 é condição suficiente para o impedimento da ocorrência do *livelock*.

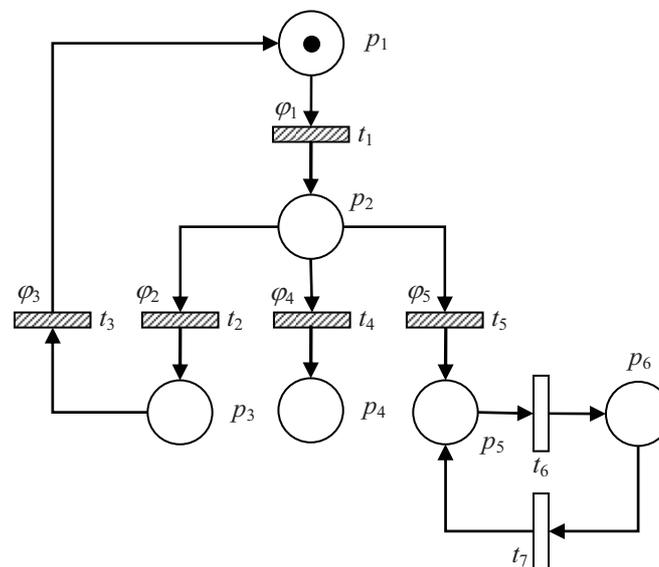


Figura 4.12 – RPFHT supervisora – sistema com *livelock* e *deadlock*.
Fonte – Sousa, (2002).

²⁰ Um *deadlock* (bloqueio) trata-se de uma marcação na qual, após o seu alcance, nenhuma transição da rede estará habilitada para disparar. Em termos práticos, a operação do sistema real é interrompida.

²¹Um *livelock* (conjunto de marcações poço) é um conjunto de marcações no qual o sistema não pode mais sair dele após sua entrada. Em outras palavras, trata-se de um conjunto de estados ao qual o sistema encontra-se “preso” após adentrar neste.

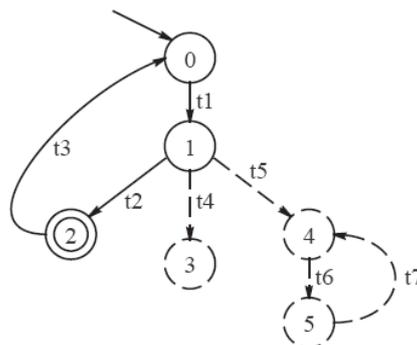


Figura 4.13 – Gerador da especificação 1: $\Sigma_c = \{t_4, t_5\}$, $\Sigma_{nc} = \{t_1, t_2, t_3, t_6, t_7\}$ e $Q_m = \{q_2\}$ – sistema com *livelock* e *deadlock*.
Fonte – Sousa, (2002).

Outra vantagem do método em análise é o fato de que *RPFHT* podem ser transformadas em redes de Petri ordinárias equivalentes. Para tanto, basta que as funções de habilitação de transições sejam substituídas por arcos ponderados, que ligam as transições que contêm funções de habilitação aos lugares da rede, de modo que as restrições impostas ao disparo das transições não sejam alteradas (BARROSO, 1996). A seguir, na Figura 4.14, é ilustrado um exemplo de rede de Petri supervisora equivalente.

Na Figura 4.14 (a) consta uma rede com sete lugares e cinco transições, em que foram impostas duas restrições de controle: $\varphi_1 = M(p_7) \geq 5$ e $\varphi_2 = M(p_7) \geq 4$. Na Figura 4.14 (b) é ilustrada uma rede Petri lugar-transição em que as duas especificações foram implementadas apenas pelo manuseio dos arcos de entrada e de saída das transições a terem seus disparos controlados.

Note que ao se colocar, associados ao lugar p_7 , um arco de saída com peso 5 e um arco de entrada com peso 4, a quantidade de fichas no lugar supracitado, após o disparo de t_1 , permanecerá igual a 1. Note que este artifício garante que t_1 só irá disparar quando p_7 contiver pelo menos cinco fichas. Raciocínio análogo pode ser traçado para a função de habilitação φ_2 .

Uma ferramenta computacional para o controle de SED por meio de redes de Petri, denominada Síntese de supervisores baseada em redes de Petri com funções de habilitação das transições (SuperSin) é apresentada em Sousa (2002) e Sousa e Barroso (2002). O aplicativo, desenvolvido em linguagem Pascal, está disponível para o sistema operacional Windows.

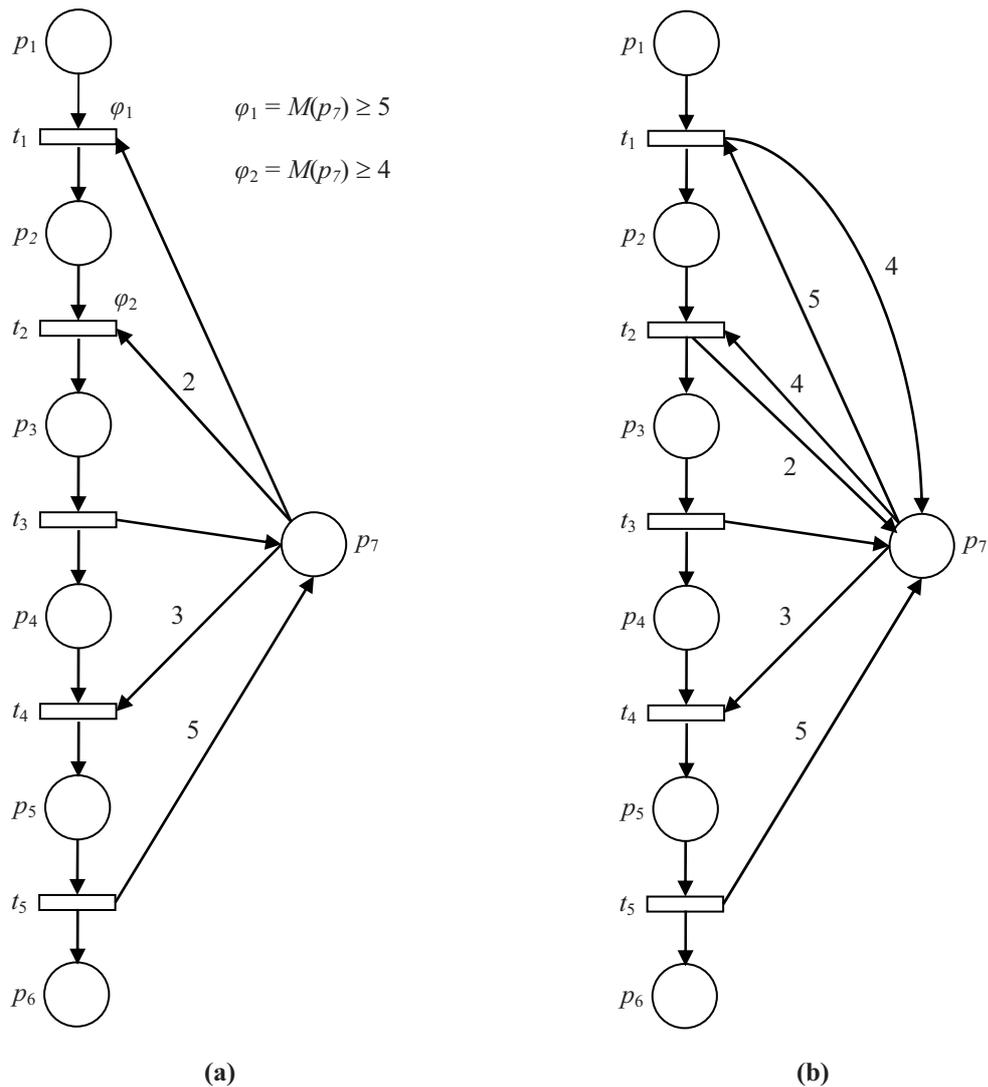


Figura 4.14 – Rede de Petri supervisora equivalente.
 Fonte – Barroso, (1996).

É pertinente destacar que, utilizando o artifício de concepção de redes de Petri supervisoras equivalentes (vide Figura 4.14), pode-se sintetizar um supervisor no programa SuperSin e transformar a rede com funções de habilitação de transições numa rede de Petri ordinária. Assim, pode-se implementar o sistema controlado em simuladores correntes de redes de Petri, com vistas a avaliar seu desempenho.

4.5 Outras abordagens

As seções anteriores apresentaram diversos métodos de controle supervisorio de SED's, baseados em redes de Petri, que foram julgados pelo autor como sendo os mais relevantes presentes na literatura. A abordagem de Holloway e Krogh (1994) constitui um marco sobre o tema, os métodos de Giua *et al.* (1992) e Moody *et al.* (1994) são os

mais enfocados pela literatura; já a abordagem de Barroso (1996) mostrou-se extremamente robusta e inovadora.

Existem, entretanto, muitos outros métodos, tanto no que tange às redes lugar – transição quanto às redes de alto nível. Como descrever minuciosamente todas as abordagens foge ao escopo do presente trabalho, serão ressaltadas, apenas, considerações de caráter geral sobre outras metodologias.

No campo das redes de Petri ordinárias, Braga (2006) propõe uma abordagem baseada em princípios de verificação formal para a supervisão de SED's. A metodologia proposta faz uso da Teoria das Regiões e das equações μ -calculus, generalizando a abordagem de Ramadge e Wonham.

Os métodos de controle supervisorio baseados em redes de Petri são recentes, sendo desenvolvidos a partir do início da década de noventa. A maioria dos esforços foi direcionada no sentido de solucionar problemas de controle em SED modelados por redes de Petri ordinárias. Portanto, métodos para controle em modelos desenvolvidos com redes de Petri de alto nível ainda são escassos e incipientes.

Makungu *et al.* (1996) e Makungu *et al.* (1999) apresentam uma contribuição no sentido de reduzir a complexidade de problemas de controle de SED, através da proposição de um algoritmo, dedicado às redes de Petri coloridas com número finito de cores e k -limitadas.

A simetria no grafo de alcançabilidade garante que diversas marcações possuem comportamento equivalente. A idéia básica do algoritmo em questão é reduzir o número de marcações a ser examinado através do agrupamento dos componentes que se comportam da mesma maneira dentro de uma classe equivalente. Portanto, os conjuntos de todas as marcações e disparos são particionados em classes disjuntas e não-vazias.

Fanti *et al.* (2002) estendem o método RGME às redes de Petri coloridas. Para tanto, apresentam uma RPC com cores associadas aos lugares e às transições. O método trabalha com vetores de multi-conjuntos, ao invés de vetores de inteiros, e assume que todas as transições do modelo a ser controlado são controláveis e observáveis.

Esta limitação do método foi superada, conforme apontam Seatzu e Giua (2004). Nesse artigo, aperfeiçoou-se o método RGME para redes de Petri coloridas, considerando-se a existência de eventos não controláveis e não observáveis.

Nenhum dos métodos apresentados até o momento considera influência do tempo no processo de mudança de estados, restringindo-se apenas a avaliar o comportamento do grafo de alcançabilidade ou árvore de cobertura. Tal premissa é muito forte e, em alguns casos, pode não condizer com a necessidade real da gestão de determinados sistemas.

Moody e Antsaklis (1998) apresentam a incorporação do tempo em restrições funcionais. Para tanto, atribuem tempo aos lugares da rede e utilizam restrições do tipo 4.11. Tendo em vista que a consideração do tempo, no processo de modelagem e análise, pode alterar o grafo de alcançabilidade de uma rede, faz-se necessário o desenvolvimento de um método que leve em consideração tal peculiaridade.

Quando uma rede de Petri contém uma grande quantidade de fichas, o número de estados alcançáveis explode, limitando a aplicabilidade prática das redes de Petri (DAVID e ALLA, 2001). Uma saída é modelar o fluxo de fichas como um processo contínuo, trabalhando-se, então, não com um conjunto de estados discretos, mas com intervalos de números reais. Nesse caso, utilizam-se as Redes de Petri Híbridas (*RPH*).

As *RPH* mesclam lugares discretos e lugares contínuos. Os lugares discretos, geralmente, representam elementos que controlam o funcionamento do sistema, tais como bombas hidráulicas, por exemplo. Já os lugares contínuos, denotam o fluxo de elementos no sistema, como, por exemplo, a vazão de um determinado produto.

As abordagens de controle clássicas, inerentes aos sistemas contínuos, não se aplicam às *RPH*. Moody e Antsaklis (1998), Koutsoukos *et al.* (1998), Iordache e Antsaklis (2006) e Villani (2004) apresentam abordagens para o controle supervisorio de sistemas híbridos via redes de Petri.

CAPÍTULO 5

RESTRIÇÕES DE CONTROLE SOBRE CORES DECOMPOSTAS

“O problema de controle será considerado plenamente solucionado quando a existência do controlador que force a especificação seja demonstrada e que este seja factível.”

Murray Wonham.

Neste capítulo é apresentado um método de controle supervisorio de Sistemas a Eventos Discretos, baseado em redes de Petri coloridas, denominado Restrições de Controle sobre Cores Decompostas (RCCD), desenvolvido pelo autor na presente Dissertação. A abordagem impõe restrições funcionais a cada cor individualmente. A estrutura deste capítulo é dividida em cinco seções, explicitadas a seguir.

Na primeira seção, são expostas considerações gerais acerca do método proposto, enfocando a importância de sua proposição. Na segunda seção, é apresentado o método. Na terceira seção, são realizados experimentos computacionais baseados em modelos teóricos com vistas a avaliar o comportamento do método. Na quarta seção, é apresentada a demonstração da validade do método em questão. Por fim, na quinta seção, apresenta-se a extensão do método proposto a outras classes de redes de Petri coloridas.

5.1 Considerações iniciais

É de notório conhecimento a utilidade pragmática das redes de Petri enquanto método de apoio à tomada de decisão na gestão de atividades industriais. Entretanto, tendo em vista as limitações das redes de Petri ordinárias e a complexidade dos sistemas a serem geridos, o uso de redes de Petri de alto nível, e, em especial, o uso de redes de Petri coloridas, permite a concepção de modelos mais compactos e robustos, facilitando a análise de tais sistemas (JENSEN, 1992; DESROCHERS e AL-JAAR, 1995).

O controle supervisorio é uma aplicação prática das redes de Petri coloridas que pode trazer grandes benefícios para a gestão de atividades industriais e logísticas. As redes de

Petri coloridas, contudo, possuem peculiaridades que dificultam e restringem a síntese de supervisores, conforme é dissertado a seguir.

A associação de variáveis, ou de operações entre variáveis, aos arcos de uma *RPC* torna complexa a matriz de incidência da rede analisada, impedindo o uso de abordagens matriciais, como, por exemplo, o método dos invariantes de lugar. O uso de comandos comuns em linguagens de programação, tais como comandos de repetição ou decisão, associados aos arcos da rede, tornam a tarefa da síntese de supervisores ainda mais difícil.

A explosão do grafo de alcançabilidade de estados é outro fator que dificulta a imposição de controladores em uma *RPC*. Redes com poucos lugares e transições podem atingir uma imensa quantidade de estados. Na medida em que o número de cores aumenta, o número de combinações entre as cores que podem compor a marcação de um dado lugar também aumenta, de modo que o grafo de alcançabilidade cresce exponencialmente (JENSEN, 1992).

A falta de padronização entre as linguagens associadas às redes de Petri coloridas também é um problema no que tange ao controle de tais modelos. Existem vários tipos de *RPCs* utilizadas pelos pesquisadores. O ideal seria que todos os analistas utilizassem um padrão, como, por exemplo, o CPN ML²², de modo que não fosse necessária a tradução de modelos para sua implementação no *CPNTools*²³.

No Capítulo 4 foram comentados dois métodos de controle supervisorio baseados em redes de Petri coloridas, métodos esses que serão sucintamente recapitulados a seguir.

Fanti *et. al.* (2003) e Seatzu e Giua (2004) estendem o método Restrições Generalizadas Mutuamente Excludentes (RGME) às redes de Petri coloridas; entretanto, fogem do padrão CPN ML ao associar cores também às transições.

²² CPN ML (*Colored Petri Net Modeling Language*) é uma linguagem de programação estritamente relacionada às redes de Petri coloridas.

²³ *CPNTools* é um editor de redes de Petri coloridas, de domínio público, desenvolvido e distribuído pela Universidade de Aarhus (Dinamarca). É, sem sombra de dúvida, a mais robusta ferramenta computacional disponível para edição, análise e simulação de redes de Petri coloridas.

Makungu *et al.* (1996) e Makungu *et al.* (1999) propõem um método que atua sobre a simetria do grafo de alcançabilidade de estados. Tais autores também não seguem o padrão CPN ML no exemplo exposto de aplicação do método, dificultando o emprego do mesmo.

5.2 Método proposto

Tendo em vista as considerações realizadas sobre a dificuldade da síntese de supervisores via redes de Petri coloridas, o presente trabalho apresenta um método que visa minorar algumas destas limitações.

Conforme abordado no Capítulo 4, os métodos de controle supervisorio baseados em redes de Petri que focam a análise da matriz de incidência são de fácil implementação computacional e aplicação. A idéia de analisar a matriz de incidência das redes de Petri coloridas é pouco atrativa devido aos motivos já mencionados. Mas aqui cabe a pergunta:

“Se o modelo for manipulado de modo a mitigar a complexidade da matriz de incidência, tal dificuldade pode ser vencida?”

Caso as funções dos arcos sejam expressas em termos de uma única variável, é possível separar as cores da rede de forma que cada função dos arcos possa ser expressa como um valor inteiro, conforme as redes de Petri ordinárias. Deste modo, pode-se analisar, separadamente, a matriz de incidência relativa a cada cor. Esta é a filosofia do método proposto, denominado Restrições de Controle sobre Cores Decompostas (RCCD). A seguir, no Quadro 5.1, é exposto o algoritmo do método RCCD.

Quadro 5.1 – Algoritmo do método das Restrições de Controle sobre Cores Decompostas (RCCD).

Algoritmo RCCD

Início

Passo 1: Dado um SED, desenvolver um modelo em redes de Petri coloridas, de modo que os arcos sejam função de uma única variável.

Passo 2: Definir as especificações de controle de modo que uma especificação não contenha mais de uma cor.

Passo 3: Analisando cada cor isoladamente, sintetizar supervisores utilizando o método dos invariantes de lugar.

Passo 4: Para cada lugar de controle inerente à especificação para uma cor, adicionar o número de fichas correspondente à marcação inicial das outras cores.

Fim

O método RCCD, claramente, apresenta um compromisso entre simplicidade de aplicação e abrangência, podendo ser aplicado a sistemas que possam ser modelados através de redes de Petri coloridas cujos arcos sejam funções de uma única variável. Apesar de se destinar a uma classe particular de modelos, o método supracitado pode ser facilmente aplicado em diversas situações práticas, além de poder seguir, sem necessitar de nenhuma adaptação, o padrão CPN ML. A seguir, serão apresentados exemplos de aplicação do RCCD.

Exemplo 1: Modelo apresentando um conjunto de cores com apenas um elemento $X = \{a\}$.

Na Figura 5.1, é apresentado um modelo sem controle e, na Figura 5.2, é ilustrado o sistema controlado, utilizando-se o método proposto. É pertinente ressaltar que a rede ilustrada abaixo é similar à rede exposta na Figura 4.3. Nota-se que esta se diferencia pela transformação das funções inteiras dos arcos por uma variável x , associada a um conjunto de cores X .

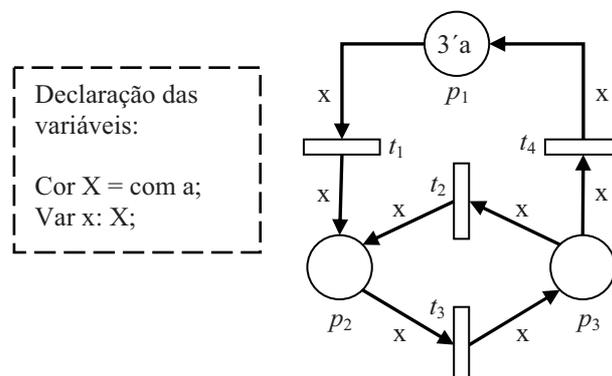


Figura 5.1 – Exemplo de rede de Petri colorida com um valor admissível para a variável x .

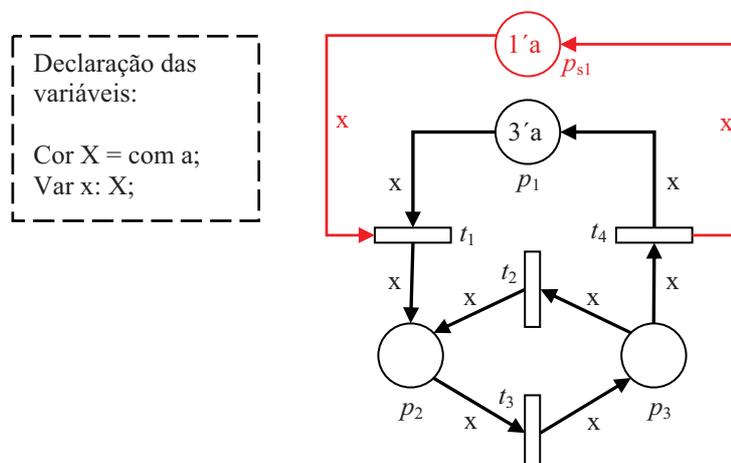


Figura 5.2 – Exemplo de aplicação do método RCCD.

No modelo apresentado na Figura 5.1, as três fichas contidas no lugar p_1 podem fluir livremente por todos os lugares da rede. Entretanto, admitindo-se que o sistema possua uma limitação física que impeça que os lugares p_2 e p_3 recebam mais de uma ficha ao mesmo tempo, a especificação funcional a qual o sistema estará sujeito é $M(p_2) + M(p_3) \leq 1$ 'a.

A matriz de incidência da rede de Petri ordinária ilustrada na Figura 4.3 é apresentada a seguir.

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

Tendo em vista que os pesos unitários dos arcos foram transformados numa variável x , a nova matriz de incidência, denotada C_{col} , será linearmente dependente da matriz de incidência da rede ordinária, tendo seus elementos multiplicados por x . Ou seja:

$$C_{col} = x.C = \begin{vmatrix} -x & 0 & 0 & x \\ x & x & -x & 0 \\ 0 & -x & x & -x \end{vmatrix}$$

Deste modo, pode-se perceber que, para impor restrições funcionais a uma rede de Petri colorida como a da Figura 5.1, basta dividir todos os elementos da sua matriz de incidência pela variável associada aos seus arcos e aplicar o método dos invariantes de lugar usando a nova matriz obtida.

5.3 Experimentos computacionais

Objetivando ampliar a compreensão acerca do comportamento do método proposto, foi realizada uma série de experimentos computacionais, relatados a seguir. Tais experimentos consistiram na modelagem e no controle de sistemas teóricos, seguidos da verificação da satisfação das especificações funcionais ao longo das simulações. Para tanto, foi utilizado o *software CPNTools*.

O *CPNTools* fornece o grafo de alcançabilidade de uma rede de Petri colorida; contudo, visualizar tal grafo, quando o mesmo possui dezenas de marcações, não é uma tarefa fácil.

As versões mais recentes do *CPNTools* permitem a implantação de monitores aos lugares e transições de uma rede. Os monitores possuem inúmeras funções, dentre elas, avaliar a quantidade de fichas armazenadas em um lugar em uma dada simulação ou parar a simulação caso um dado lugar armazene uma quantidade de fichas superior a um valor especificado. Assim, pode-se comprovar computacionalmente se uma dada especificação funcional foi satisfeita pelo emprego de lugares de controle.

Analisando as marcações da rede não controlada, do modelo exposto na Figura 5.1, tem-se que: $M_0 = (3a \ 0 \ 0)$, $M_1 = (2a \ a \ 0)$, $M_2 = (a \ 2a \ 0)$, $M_3 = (0 \ 3a \ 0)$, $M_4 = (0 \ 2a \ a)$, $M_5 = (0 \ a \ 2a)$, $M_6 = (0 \ 0 \ 3a)$, $M_7 = (a \ 0 \ 2a)$, $M_8 = (a \ a \ a)$ e $M_9 = (2a \ 0 \ a)$. A rede ilustrada na Figura 5.1 foi implementada no *CPNTools*, sendo imposta a restrição $M(p_2) + M(p_3) \leq 1$ 'a, conforme pode ser observado na Figura 5.2.

Atribuindo-se um monitor do tipo *breaking monitor*²⁴ (monitor de parada) aos lugares p_2 , p_3 e p_{s1} , bem como às transições t_1 , t_2 , t_3 e t_4 , pode-se verificar se a especificação funcional será violada. O monitor foi programado para parar a simulação caso a restrição $M(p_2) + M(p_3) \leq 1$ 'a não fosse satisfeita. Tendo em vista que a simulação não foi interrompida, constata-se que a especificação não foi infringida, e, por conseguinte, que o supervisor é válido para este exemplo. Também é fácil notar que o conjunto de marcações acessíveis pela nova rede é $M_0 = (a \ 3a \ 0 \ 0)$, $M_1 = (0 \ 2a \ a \ 0)$ e $M_2 = (0 \ 2a \ 0 \ a)$.

É pertinente salientar que, para redes cujas fichas possuam uma única cor, o método RCCD apresenta os mesmos resultados da aplicação do método dos invariantes de lugar, desenvolvido por Moody *et al.* (1994), quando aplicado na rede de Petri ordinária equivalente. Tal conclusão é advinda da dependência linear entre as matrizes de incidência dos dois modelos, conforme discutido no item 5.2 deste Capítulo.

²⁴ Um monitor do tipo *breaking monitor* irá parar uma simulação caso determinadas condições sejam estabelecidas. No caso do controle supervisorio, pode-se comprovar computacionalmente a validade de um supervisor se o monitor não interromper a simulação de um sistema controlado.

Contudo, na maioria das situações práticas, o conjunto de cores de uma *RPC* possui vários elementos distintos. Nestes casos, pode ocorrer que as especificações funcionais para uma cor influenciem a operação do sistema para as demais cores, de modo que uma transição possa não mais ser habilitada para fichas de determinadas cores.

Exemplo 2: Modelo ilustrando um conjunto de cores com dois elementos $X = \{a, b\}$.

A seguir, na Figura 5.3, é apresentado um exemplo de rede de Petri colorida cuja variável x , pertencente ao conjunto de cores X , assume dois tipos de valores: “a” e “b”.

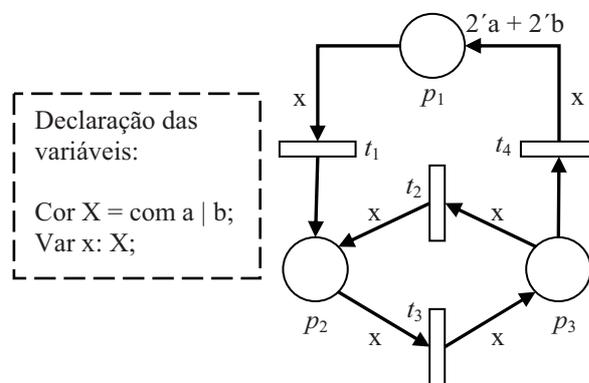


Figura 5.3 – Exemplo de rede de Petri colorida com dois valores admissíveis para a variável x .

No modelo apresentado acima, as quatro fichas contidas no lugar p_1 podem fluir livremente por todos os lugares da rede. Entretanto, admitindo-se que o sistema possua duas restrições operacionais, uma que impeça que os lugares p_2 e p_3 recebam mais de uma ficha da cor “a” ao mesmo tempo e outra que restrinja que o lugar p_3 armazene mais do que uma ficha da cor “b”, o sistema estará sujeito a duas especificações funcionais: $M(p_2) + M(p_3) \leq 1'a$ e $M(p_3) \leq 1'b$. A seguir, na Figura 5.4, é ilustrado o sistema controlado, baseado no algoritmo RCCD.

Analisando a rede de Petri colorida não controlada ilustrada na Figura 5.3 por intermédio do *CPNTools*, têm-se as seguintes marcações: $M_0 = (2a+2b \ 0 \ 0)$, $M_1 = (2a+b \ b \ 0)$, $M_2 = (2a+b \ 0 \ b)$, $M_3 = (2a \ 2b \ 0)$, $M_4 = (2a \ 0 \ 2b)$, $M_5 = (2a \ b \ b)$, $M_6 = (a+2b \ a \ 0)$, $M_7 = (a+2b \ 0 \ a)$, $M_8 = (2b \ 2a \ 0)$, $M_9 = (2b \ 0 \ 2a)$, $M_{10} = (2b \ a \ a)$, $M_{11} = (a \ a \ 2b)$, $M_{12} = (a \ 2b \ a)$, $M_{13} = (a \ a+2b \ 0)$, $M_{14} = (a \ 0 \ a+2b)$, $M_{15} = (a \ a+b \ b)$, $M_{16} = (a \ b \ a+b)$, $M_{17} = (b \ b \ 2a)$, $M_{18} = (b \ 2a \ b)$, $M_{19} = (b \ 2a+b \ 0)$, $M_{20} = (b \ 0 \ 2a+b)$, $M_{21} = (b \ a+b \ a)$,

$M_{22} = (b \ a \ a+b)$, $M_{23} = (0 \ 2a+2b \ 0)$, $M_{24} = (0 \ 0 \ 2a+2b)$, $M_{25} = (0 \ 2a \ 2b)$,
 $M_{26} = (0 \ 2b \ 2a)$, $M_{27} = (0 \ 2a+b \ b)$, $M_{28} = (0 \ b \ 2a+b)$, $M_{29} = (0 \ a+2b \ a)$,
 $M_{30} = (0 \ a \ a+2b)$, $M_{31} = (0 \ a+b \ a+b)$, $M_{32} = (a+b \ a+b \ 0)$, $M_{33} = (a+b \ a \ b)$,
 $M_{34} = (a+b \ 0 \ a+b)$ e $M_{35} = (a+b \ 0 \ a+b)$.

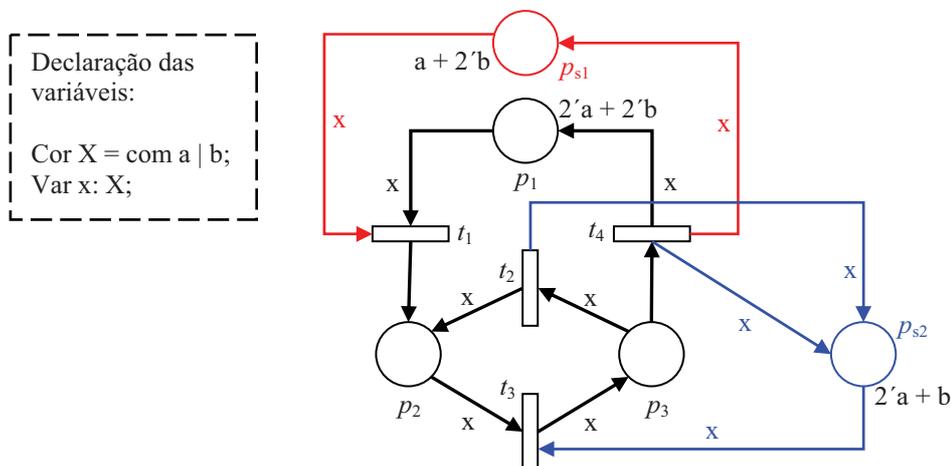


Figura 5.4 – Exemplo de aplicação do método RCCD considerando duas especificações.

Atribuindo-se um monitor de parada aos lugares p_2 e p_3 , p_{s1} e p_{s2} , bem como às transições t_1 , t_2 , t_3 e t_4 , constatou-se que as especificações não foram transgredidas, e, conseqüentemente, que os lugares de controle são válidos.

Após a simulação da rede, constatou-se que as marcações acessíveis pela mesma são: $M_0 = (2a+2b \ 0 \ 0 \ a+2b \ 2a+b)$, $M_1 = (a+2b \ a \ 0 \ 2b \ 2a+b)$, $M_2 = (2a+b \ b \ 0 \ a+b \ 2a+b)$, $M_3 = (a+2b \ 0 \ a \ 2b \ a+b)$, $M_4 = (a \ a+b \ b \ 0 \ 2a)$, $M_5 = (2a+b \ 0 \ a+b \ b \ 2a)$, $M_6 = (2a \ 2b \ 0 \ a \ 2a+b)$, $M_7 = (a+b \ a+b \ 0 \ b \ 2a+b)$, $M_8 = (a+b \ a \ b \ b \ 2a)$, $M_9 = (a \ a+2b \ 0 \ 0 \ 2a+b)$, $M_{10} = (2a \ b \ b \ a \ 2a)$, $M_{11} = (a+b \ 0 \ a+b \ b \ a)$, $M_{12} = (a \ 2b \ a \ 0 \ a+b)$, $M_{13} = (a+b \ a \ b \ b \ 2a)$ e $M_{14} = (a \ b \ a+b \ 0 \ a)$.

Assim, para a rede da Figura 5.4, mesmo sendo considerado o controle sobre duas cores, nenhuma especificação funcional foi infringida durante a simulação. Isso se deve ao Passo 4 do algoritmo apresentado no Quadro 5.1, conforme é explicitado a seguir.

Para impor a primeira restrição, isto é, $M(p_2) + M(p_3) \leq 1'a$, necessita-se de um lugar de controle, denotado p_{s1} , com uma marcação inicial $M(p_{s1}) = 1'a$. Contudo, se o lugar p_{s1} tivesse tal marcação inicial, a transição t_1 jamais poderia disparar para a cor “b”,

implicando em um bloqueio do sistema em relação a esta cor. Raciocínio análogo pode ser exposto com base na segunda restrição, ou seja, $M(p_3) \leq 1'b$.

Tendo em vista que a marcação inicial da rede é $M_0 = (2a+2b \ 0 \ 0)$, adicionam-se duas fichas do tipo “a” no lugar p_{s2} e duas fichas do tipo “b” em p_{s1} . Tais fichas não possuem um significado físico para o sistema ou para o seu controle e podem, então, ser chamadas de *pseudofichas*.

5.4 Demonstração da validade do método

O método RCCD foi aplicado com êxito nos dois exemplos ilustrados. Demonstrou-se computacionalmente, através de simulações, que as especificações de controle em ambos os casos foram satisfeitas; entretanto, tais situações podem consistir em casos específicos. Para a extensão da aplicabilidade do método, a sua veracidade deve ser comprovada de modo geral.

Hopcroft *et al.* (2001) levantam dois paradigmas existentes na ciência da computação acerca da prova formal. De um lado, uns cientistas acreditam que a veracidade de um programa é satisfeita por testes, e, de outro lado, outros crêem que é necessária a prova formal para garantia do bom funcionamento de um programa. Os autores afirmam que tais paradigmas não se restringem apenas à idealização de programas de computador, mas também à demonstração de propriedades de formalismos matemáticos, tais como os Autômatos.

Hopcroft *et al.* (2001) apontam para os seguintes tipos de demonstração ou prova em ciência da computação:

- Provas dedutivas: a partir de premissas, ou hipóteses, chega-se a uma conclusão.
- Redução a definições: quando não se tem certeza de como se iniciar uma prova, convertem-se todos os termos das hipóteses para suas definições.
- Outros tipos: abordagens empregadas na matemática, tais como se-então e se-e-somente-se.

Será proposto então o Teorema RCCD e, para comprová-lo, será utilizada uma prova do tipo dedutiva, conforme descrito a seguir.

Teorema RCCD: A síntese de um controlador de uma rede de Petri colorida pelo método RCCD é baseada na seguinte premissa: Se

$$\sum_{i=1}^k b_i + \sum_{j=1}^l b_j^* - LM_0 \geq 0 \quad (5.1)$$

em que:

- b_i : vetor, com dimensão $n_c \times 1$, cujos elementos representam a quantidade de fichas impostas pelas especificações funcionais;
- b_j^* : vetor, com dimensão $n_c \times 1$, cujos elementos representam as pseudofichas;
- i : índice que varia de 1 até o número de cores k ;
- j : índice que varia de 1 até o número de especificações l ;
- L : matriz com dimensão $n_c \times n$, em que cada um de seus elementos é igual a um, se o lugar for submetido a uma restrição de controle, sendo igual a zero, caso contrário;
- M_0 : marcação inicial da rede.

então a rede de Petri colorida a ser controlada, com matriz de incidência C_{col} , terá matriz de incidência controlada C_{colc} e marcação inicial M_{c0} dadas por:

$$C_{colc} = -L C_{col} \quad (5.2)$$

$$M_{c0} = \sum_{i=1}^k b_i + \sum_{j=1}^l b_j^* - LM_0 \quad (5.3)$$

Prova: Se uma rede colorida é composta por arcos com funções de uma única variável, sua matriz de incidência é linearmente dependente à matriz de incidência de uma rede de Petri lugar-transição equivalente. Então, conforme o método dos invariantes proposto por Moody *et al.* (1994), a equação (5.2) irá impor invariantes de lugar do tipo da equação 4.6:

$$x^T C = 0 \quad (5.4)$$

conforme descrito no tópico 4.3 desta Dissertação de Mestrado.

De acordo com o Teorema 3.2, para síntese de controladores em redes de Petri ordinárias, apresentado em Moody e Antsaklis (1998), tem-se a seguinte relação (vide Anexo 1):

$$b - LM_0 \geq 0$$

Se a inequação acima não é verdadeira, as características da rede irão violar as restrições de controle; caso contrário, a adição de uma variável de folga, para transformação da desigualdade supracitada em igualdade, incorrerá na adição de um lugar de controle à rede.

Como a abordagem RCCD, estendida para as redes de Petri coloridas, trabalha com cada cor isoladamente, tem-se que

$$\sum_{i=1}^k b_i - LM_0 \geq 0$$

em que i varia de 1 até k cores e cada elemento do vetor supracitado é igual ao número de fichas a ser limitado pelo controlador. Cada vetor b_i terá elementos apenas de sua cor correspondente.

Entretanto, através de experimentos computacionais, constatou-se que, para que a rede não sofra bloqueio em relação às outras fichas coloridas não envolvidas na especificação, é necessária a adição de uma nova parcela

$$\sum_{i=1}^k b_i + \sum_{j=1}^l b_j^* - LM_0 \geq 0$$

em que j varia de 1 até l . Os valores de l dependerão do número de especificações funcionais e do número de cores. Os elementos do vetor supramencionado dizem respeito às pseudofichas a serem adicionadas aos lugares de controle.

Após uma manipulação algébrica, tem-se que

$$LM_0 \leq \sum_{i=1}^k b_i + \sum_{j=1}^l b^*_j$$

A inequação ilustrada acima pode ser transformada numa igualdade através da adição de uma variável de folga

$$LM_0 + M_{c_0} = \sum_{i=1}^k b_i + \sum_{j=1}^l b^*_j$$

em que M_{c_0} é a marcação inicial dos lugares de controle.

Por fim, a prova é concluída da seguinte forma:

$$M_{c_0} = \sum_{i=1}^k b_i + \sum_{j=1}^l b^*_j - LM_0$$

Diante do exposto, pode-se constatar que, caso uma rede de Petri colorida tenha seus arcos com funções de uma única variável, se as cores forem controladas isoladamente e se pseudofichas forem adicionadas ao modelo para garantia da fluidez de fichas das demais cores, então lugares de controle podem ser adicionados de modo a controlar as marcações da rede.

Aplicando-se as equações 5.2 e 5.3 na rede ilustrada na Figura 5.4, será corroborada a demonstração do Teorema RCCD. De acordo com a equação 5.2, a matriz de incidência da rede em análise é dada por:

$$C_{colc} = \begin{vmatrix} -x & 0 & 0 & x \\ x & x & -x & 0 \\ 0 & -x & x & -x \\ -x & 0 & 0 & x \\ 0 & x & 0 & x \end{vmatrix}$$

Em seguida, aplicando-se a equação 5.3, tem-se que:

$$M_{c0} = \begin{Bmatrix} a \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ b \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 2b \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 2a \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 2a+2b \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} a+2b \\ 2a+b \end{Bmatrix}$$

A marcação $M(p_{s1}) \leq 1'a + 2'b$ significa que o lugar de controle p_{s1} terá uma ficha do tipo “a”, para impor a especificação $M(p_2) + M(p_3) \leq 1'a$, e duas pseudofichas do tipo “b”, de modo a garantir a fluidez das fichas da cor “b” com o disparo de t_1 .

A marcação $M(p_{s2}) \leq 2'a + 1'b$ significa que o lugar de controle p_{s2} terá duas pseudofichas do tipo “a”, de forma a permitir a fluidez das fichas da cor “a” com o disparo de t_2, t_3 e t_a , e uma ficha da cor “b” para impor a especificação $M(p_3) \leq 1'b$.

É imprescindível destacar que a prova do Teorema RCCD deriva da demonstração do Teorema que comprova a veracidade dos lugares de controle no método dos invariantes de lugar, desenvolvido para as redes de Petri lugar-transição, conforme apresentado no Anexo 1 desta Dissertação. No Teorema RCCD, a inovação é a parcela $\sum_{j=1}^l b^*_j$, que permite a fluidez de fichas pela rede, independente de sua presença numa dada especificação de controle.

5.5 Aplicação em redes com arcos com funções de mais de uma variável

Conforme comentado anteriormente, o método RCCD tem sua aplicabilidade limitada, pois se destina a controlar redes de Petri coloridas cujos arcos sejam função de apenas uma variável. Esta particularidade restringe a grande vantagem das RPC que é a utilização de diversas variáveis com vistas a compactar o modelo. Assim, procedeu-se no sentido de transpor, ao menos parcialmente, esta limitação do RCCD.

Ao utilizar-se mais de uma variável em um arco, o analista deseja-se, com o disparo de uma dada transição, retirar duas ou mais fichas de seus lugares de entrada e, possivelmente, adicionar duas ou mais fichas em seus lugares de saída. Nesses casos, as transições poderão ter lugares de entrada portando fichas de cores distintas associadas a variáveis distintas.

Nesse contexto, a estratégia para decomposição das cores se dará através da decomposição da matriz de incidência do modelo. O método será aplicado no controle das subredes que formam o modelo, sendo formadas subredes envolvendo apenas uma variável.

Tal abordagem é válida, pois a lógica dos invariantes de lugar é determinar subredes em uma rede de Petri em que a soma das fichas, em um dado conjunto de lugares, seja constante.

A rede de Petri ilustrada na Figura 5.3, que foi utilizada nos exemplos anteriores, não se constitui um bom exemplo para a apresentação do método RCCD em modelos com arcos portando mais de uma variável, pois o modelo em questão não representa uma situação de compartilhamento de recursos. Assim, foi desenvolvido outro exemplo com vistas a clarificar a potencialidade do método proposto, conforme ilustrado na Figura 5.5.

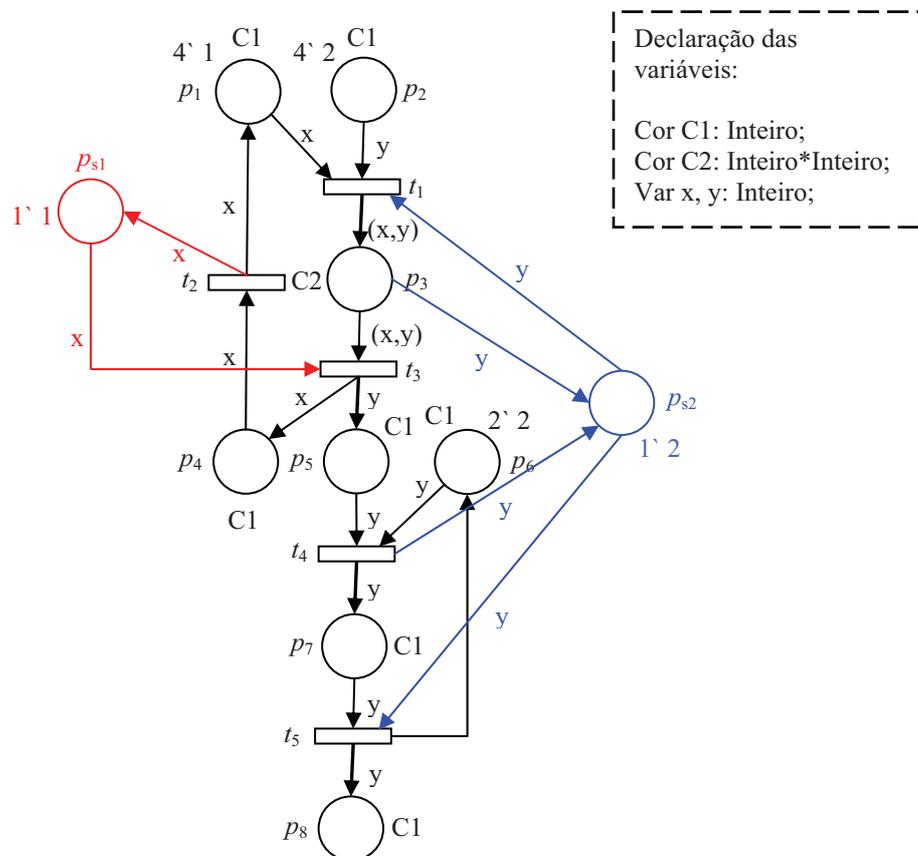


Figura 5.5 – Exemplo de aplicação do método RCCD considerando arcos com funções de mais de uma variável.

Na rede de Petri ilustrada na Figura 5.5, são apresentados dois monitores sintetizados por intermédio do método RCCD. Existem dois conjuntos de cores: C1, do tipo inteiro, e C2, equivalente a um produto cartesiano do tipo inteiro. O conjunto de cores C2 tem esta particularidade por causa das transições t_1 e t_3 , que removem fichas, de duas cores distintas, concomitantemente. As variáveis “x” e “y” são do tipo inteiro.

As especificações de controle são: $M(p_3) + M(p_4) \leq 1'1$ e $M(p_3) + M(p_6) \leq 1'2$. A primeira restrição impõe ao modelo que a soma das fichas dos lugares p_3 e p_4 seja igual a, no máximo, uma ficha de cor 1 e segunda especificação impõe ao modelo que a soma das fichas dos lugares p_3 e p_6 seja igual a, no máximo, uma ficha de cor 2.

A matriz de incidência da rede sem controle apresentada na Figura 5.5, ou seja, sem os lugares p_{s1} e p_{s2} , é dada por:

$$C = \begin{vmatrix} -x & x & 0 & 0 & 0 \\ -y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (x,y) & 0 & -(x,y) & 0 & 0 \\ 0 & -x & x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & y & -y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -y & y \\ 0 & 0 & 0 & y & -y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & y \end{vmatrix}$$

Nota-se que a matriz de incidência exposta acima pode ser expressa pela soma das seguintes matrizes:

$$C = \begin{vmatrix} -x & x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -x & x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & y & -y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -y & y \\ 0 & 0 & 0 & y & -y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & y \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (x,y) & 0 & -(x,y) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

No caso da especificação envolvendo apenas a variável “x”, o modelo pode ser decomposto na seguinte subrede:

$$C_x = \begin{vmatrix} -x & x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x & 0 & -x & 0 & 0 \\ 0 & -x & x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

A matriz de incidência C_x possui elementos relacionados apenas à variável “x”, sendo desconsiderados os elementos portadores da variável “y”. É importante destacar a redução dos elementos formados pelo par (x,y) para a variável “x”. Os arcos cuja função equivale ao vetor (x,y) transportam, simultaneamente, fichas portando “x” e “y”. Se uma especificação bloquear o disparo de uma transição para a variável “x”, ela também estará desabilitada para a variável “y”, sendo a recíproca também verdadeira.

Deste modo, o lugar de controle, ao atuar sobre a variável “x”, também atua, indiretamente, sobre a variável “y”, e vice-versa. O vetor (x,y) pode ser reduzido para (x) ou (y), sem perda de informação. Trata-se, apenas, de um artifício matemático para transformar a matriz de incidência de uma rede de Petri colorida de modo que esta possua as propriedades requeridas para o emprego do RCCD.

A seguir, é ilustrada a matriz de incidência inerente apenas à variável “y”.

$$C_y = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ y & 0 & -y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & y & -y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -y & y \\ 0 & 0 & 0 & y & -y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & y \end{vmatrix}$$

A decomposição da matriz de incidência em subredes recai em um caso particular do método RCCD, cuja veracidade foi demonstrada no tópico 5.4. No caso do modelo ilustrado na Figura 5.5, verificou-se que as especificações funcionais realmente foram impostas.

O método proposto mostra-se promissor e pode ser aplicado no controle de sistemas reais. O uso de redes de Petri coloridas para a modelagem da CP/BDMA pode permitir um modelo compacto, mesmo sendo consideradas diversas variáveis do sistema. Assim, o método RCCD torna-se útil por permitir o controle supervisorio em redes de Petri coloridas de uma maneira mais simples do que os métodos correntes empregados na literatura. A seguir, no Capítulo 6, são apresentados o modelo e o controle da cadeia em foco.

CAPÍTULO 6

MODELAGEM E CONTROLE DA CADEIA PRODUTIVA DO BIODIESEL DA MAMONA

“Todos os modelos são errados, mas alguns são úteis”.

George Box.

Neste capítulo é apresentada a modelagem e o controle supervisorio da cadeia produtiva do biodiesel da mamona. A estrutura de capítulos é dividida em cinco seções, explicitadas a seguir. Na primeira seção, são delineadas as atividades da cadeia em foco. Na segunda seção, apresenta-se uma arquitetura para o controle supervisorio de sistemas logísticos. Na terceira seção, é idealizado o modelo da CP/BDMA e, na quarta seção, é apresentado o seu controle. Por fim, na quinta seção, é apresentada a avaliação de desempenho do sistema.

6.1 Mapeamento das atividades da CP/BDMA

Conforme Saito (2000) *apud* Yamada *et al* (2002), podem-se representar as cadeias agroindustriais do açúcar e do álcool por um arquétipo simplificado com três elos: insumo, representado pelos produtores rurais, cujo principal componente é a própria cana-de-açúcar; usinas, representadas por usinas de açúcar e de álcool; e mercado, cujos agentes são representados por empresas de atacado e varejo.

A cadeia da mamona pode ser adequada a esta abordagem por se tratar também de uma cadeia agroindustrial detentora destes três elos. O modelo concebido enfocou o elo insumos, a interface insumo/usinas e o elo usina. Optou-se por uma modelagem agregada que enfocasse o comportamento geral da cadeia.

O modelo de Avaliação do Desempenho Logístico de Cadeias Produtivas (ADELCAP), proposto por Costa (2002), foi desenvolvido com a finalidade de auxiliar a avaliação do desempenho logístico de cadeias produtivas agroindustriais de maneira genérica. O presente trabalho fez uso da metodologia ADELCAP, aplicando-a ao caso da cadeia produtiva da mamona.

Diante do exposto, buscou-se mapear as atividades mais significativas da cadeia do biodiesel da mamona, como etapa subjacente ao processo de modelagem. Tal mapeamento foi realizado através de consultas bibliográficas e de visitas técnicas realizadas à Secretaria de Desenvolvimento Agrário (SDA/Ceará) e à empresa TECBIO.

Com base no levantamento realizado, pode-se propor oito principais etapas da CP/BDMA, descritas a seguir. Na Figura 6.1, faz-se uma síntese esquemática dos produtos e atividades ao longo da CP/BDMA.

▪ **Fornecimento de insumos:**

As matérias-primas utilizadas para a produção da mamona são sementes, fertilizantes, herbicidas e água. Com exceção da água, obviamente, todos os demais são obtidos de fontes externas à unidade produtiva. Operários e maquinário também são insumos da cadeia produtiva em questão.

▪ **Produção (na lavoura):**

Depois da aquisição dos insumos por parte da unidade produtiva, é iniciado o processo de produção. Este processo é composto por atividades manuais (adubação, calagem, plantio, desbaste e replantio) e mecanizadas (aração e gradagem). O tempo da etapa de produção na lavoura, desde o preparo do terreno até o final do crescimento das culturas, é cerca de três meses.

▪ **Transporte interno:**

Depois da colheita, as bagas de mamona deverão ser transportadas até o local de beneficiamento. Este transporte geralmente é realizado por operários, carroças ou tratores.

▪ **Beneficiamento e armazenagem:**

Após o transporte interno, deve-se fazer o beneficiamento da mamona com uma máquina beneficiadora. Em seguida, a colheita beneficiada deverá ser armazenada.

▪ **Transporte de baga:**

A colheita deverá ser transportada da agroindústria para a planta de esmagamento. Este transporte será interno se a planta de esmagamento se localizar dentro da agroindústria e será externo caso contrário.

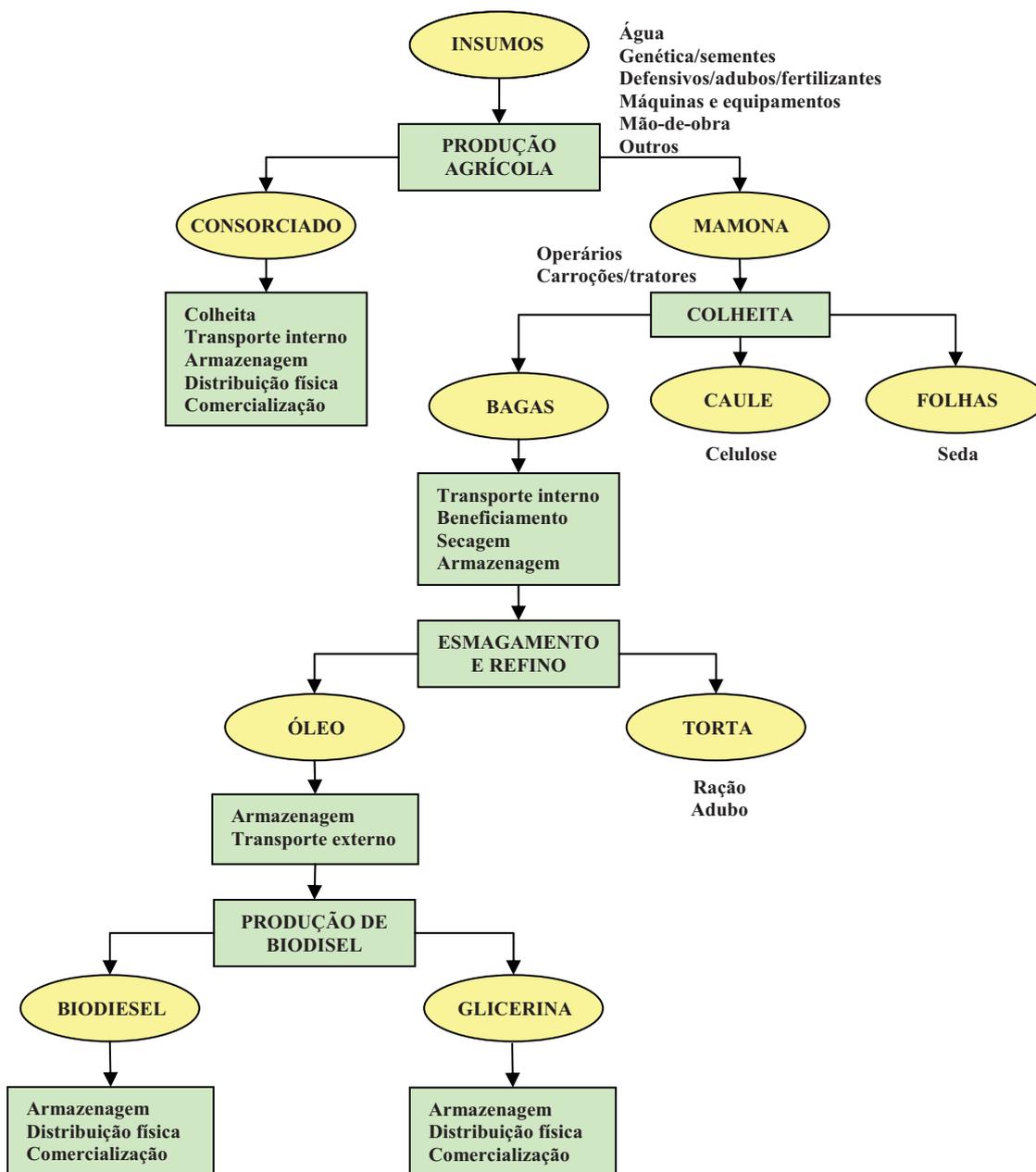


Figura 6.1 – Diagrama simplificado dos produtos e atividades na CP/BDMA.

▪ **Produção de óleo e torta:**

Na planta de esmagamento a colheita será prensada, dividindo-se então em óleo, torta e perdas. Esta etapa da cadeia em questão é muito importante, pois é o óleo que irá participar da composição do biodiesel.

▪ **Transporte de óleo e torta:**

O óleo obtido após o esmagamento da mamona deverá ser transportado para a planta de produção de biodiesel, enquanto a torta deverá ser encaminhada para a planta de produção de adubo e ração.

- **Comercialização:**

Consiste na venda dos produtos, oriundos da cadeia analisada, aos seus clientes finais.

6.2 Proposição de uma arquitetura de controle supervísório para sistemas logísticos

A literatura aborda o controle supervísório enquanto método para a coordenação de atividades em sistemas flexíveis de manufatura, de transmissão de energia, de transportes e de telecomunicações. No levantamento bibliográfico realizado, não foram encontrados trabalhos que relatassem uma visão integrada dos processos em um sistema logístico sob a ótica do controle supervísório.

Deste modo, uma contribuição a ser dada pelo presente trabalho consiste na definição de uma arquitetura para o controle supervísório de sistemas logísticos. Com base na proposta de Zhou (1991) para uma arquitetura de controle para sistemas inteligentes de manufatura, propõe-se uma adaptação para o caso de sistemas logísticos, conforme ilustrado na Figura 6.2.

A hierarquia do modelo conceitual é composta por três níveis, explicitados a seguir:

- **Tomador de decisão:** o tomador de decisão é o ator que, com base nos seus conhecimentos, experiência e informações disponíveis, especifica o comportamento desejado para o sistema logístico;
- **Controlador supervísório:** o supervisor consiste em um modelo do sistema logístico, baseado em redes de Petri, que representa uma abstração verossímil do sistema real, permitindo a avaliação do seu desempenho e a imposição das especificações propostas pelo tomador de decisão; e
- **Controlador local:** ator que controla processos pontuais, em nível operacional, não tendo uma visão geral do sistema como um todo.

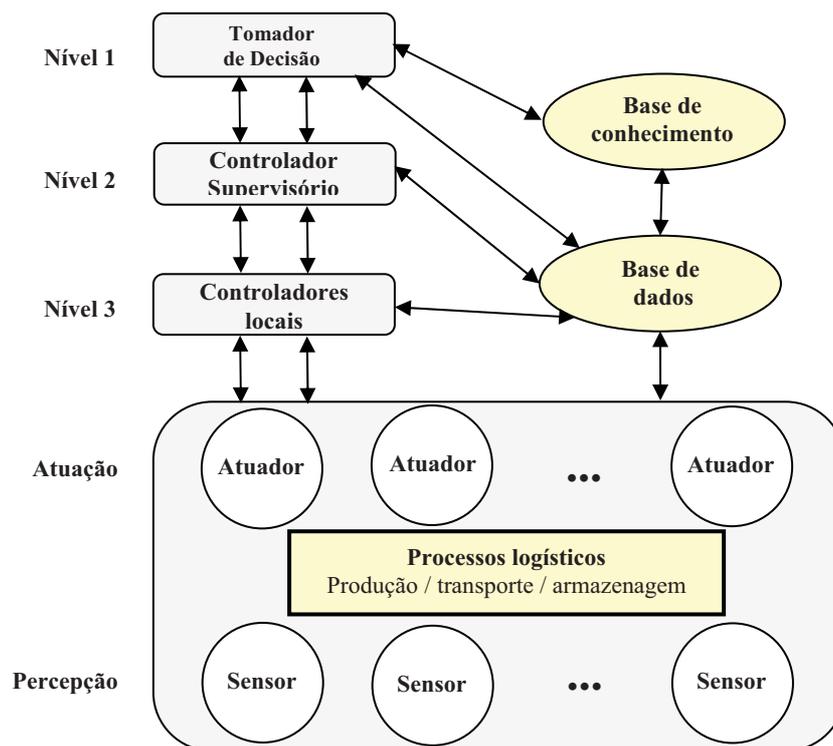


Figura 6.2 – Proposta de arquitetura de controle supervisão para sistemas logísticos.
Fonte: Adaptado de Zhou, (1991).

Os atores denominados atuadores devem atuar sob o sistema logístico, com vistas a implementar as especificações de controle, e os sensores devem captar as respostas do sistema.

Existem dois paradigmas relacionados ao controle supervisão de SED, dentre os quais estão incluídos os sistemas logísticos: um baseado no uso de sistemas de informação conectados aos processos em tempo real e outro no qual essa condição não ocorre.

No caso do uso de sistemas de informação acompanhando o sistema logístico em tempo real, o tomador de decisão pode ser um computador que, com base nos dados coletados e em um sistema de aprendizagem (tal como redes neurais artificiais ou outra técnica de inteligência artificial para acumulação de conhecimento), determina quais as ações a serem tomadas pelo sistema logístico. O modelo está conectado em tempo real ao sistema logístico e acompanha e controla suas atividades. Os controladores locais são sistemas informatizados que executam as especificações delegadas pelo tomador de decisão. É pertinente salientar que, neste paradigma, a participação humana no processo de tomada de decisão é limitada, podendo, inclusive, inexistir.

No segundo paradigma, não há um acompanhamento em tempo real das atividades do sistema logístico e a participação humana é fundamental. O tomador de decisões é um técnico, com experiência no sistema em análise, que determina quais as ações a serem executadas. O modelo permite ao analista ter uma visão global do sistema, bem como inferir como este vai se comportar nos cenários concebidos. Os controladores locais podem ser trabalhadores, que irão operacionalizar (via sistema de computadores) as especificações funcionais estabelecidas pelo tomador de decisão.

6.3 Concepção e análise do modelo

Com vistas a obter informações reais de uma CP/BDMA em funcionamento no Estado do Ceará, entrou-se em contato com uma empresa produtora de biodiesel; contudo, tal empresa não colaborou com o presente estudo.

Diante de tal problema, optou-se por realizar a proposição de uma cadeia. Apesar de se tratar de um modelo teórico, este será baseado em informações verossímeis, constituindo-se em uma boa referência para tomada de decisões na cadeia.

Na Tabela 6.1 são ilustrados dados inerentes à produção de mamona de alguns municípios do sertão central do Estado do Ceará, obtidos junto à EMATERCE. Com base nestas informações, será proposta uma cadeia teórica, seguida de sua política de controle. Nota-se que a quantidade de produtores é bastante elevada, e, por conseguinte, a dispersão geográfica, as capacidades de produção e os processos destes tendem a possuir grande variabilidade. Deste modo, optou-se por modelar a cadeia a partir da distribuição das bagas, que estarão armazenadas em Centros de Distribuição (CDs) dispostos em locais arbitrados.

Tabela 6.1 – Dados estimados de produção de mamona, no Estado do Ceará, para o ano de 2007.

Municípios	Área cultivada (ha)	Produção esperada (ton)	Número de produtores
Canindé	669	400	444
Tauá	608	365	467
Santa Quitéria	426	260	312
Pedra Branca	180	115	97
Quixadá	150	90	100
Quixeramobim	150	90	100
Total:	2183	1320	1520

Em seguida, as bagas seguirão, via modal rodoviário, para a Planta de Esmagamento (PE), que transformará os grãos em óleo. Por fim, o óleo será transportado, em caminhões-tanque, para a Planta de Produção (PP), que transformará o óleo de mamona em biodiesel. O modelo não contemplará os demais subprodutos da CP/BDMA. Na Figura 6.3, é ilustrada uma visão espacial da cadeia teórica proposta.

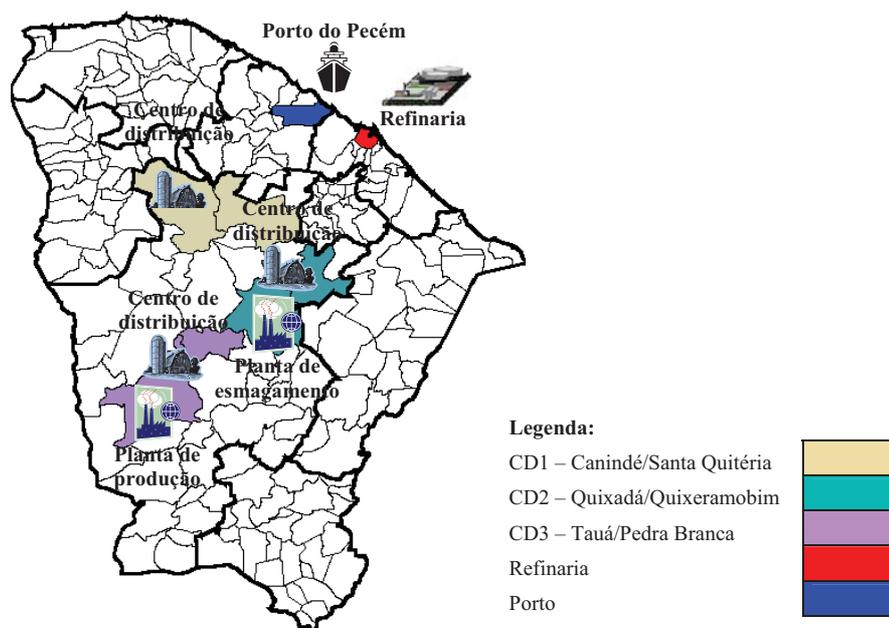


Figura 6.3 – Visão espacial das facilidades logísticas da cadeia proposta.

Diante do exposto, apresenta-se a seguir, na Figura 6.4, o modelo da operação da CP/BDMA baseado em redes de Petri coloridas. Nas Tabelas 6.2 e 6.3, são descritas as características do modelo. As premissas utilizadas na modelagem são:

- 1 CD em Canindé (CD1), atendendo Santa Quitéria e Canindé (municípios em cor bege na Figura 6.3) e armazenando uma safra de 660 toneladas;
- 1 CD em Quixadá (CD2), atendendo Quixadá e Quixeramobim (municípios em cor verde na Figura 6.3) e armazenando uma safra de 180 toneladas;
- 1 CD em Tauá (CD3), atendendo Tauá e Pedra Branca (municípios em cor violeta na Figura 6.3) e armazenando uma safra de 480 toneladas.
- 1 PE em Quixadá, com capacidade de 20 ton/dia;
- 1 PP em Tauá, com capacidade de 20m³/dia;
- 1 refinaria em Fortaleza;
- 1 porto em Pecém;
- Caminhões, para o transporte de baga, com capacidade de 10 toneladas; e

- Caminhões-tanque, para o transporte de óleo e biodiesel, com capacidade de 10.000 litros.

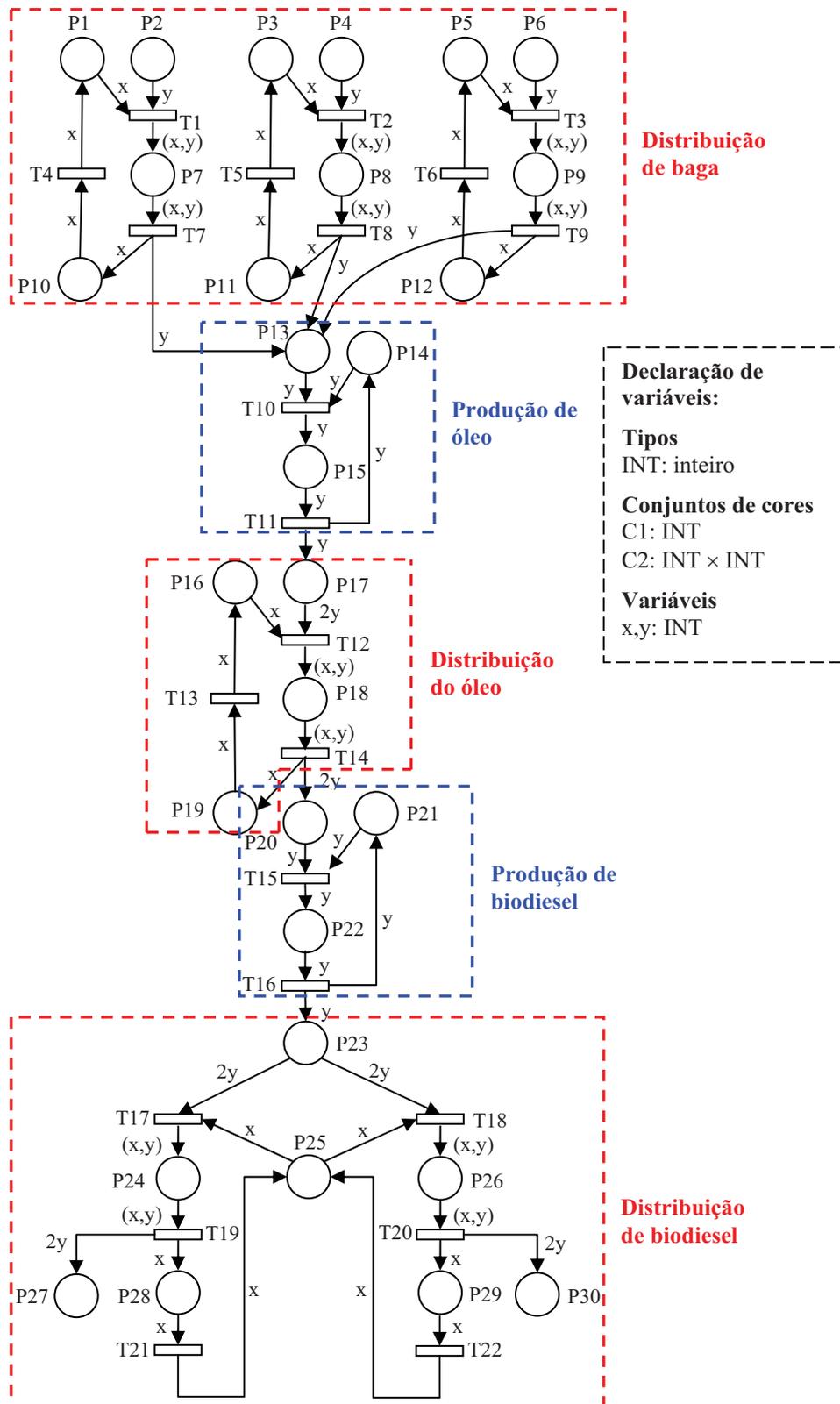


Figura 6.4 – Modelagem da CP/BDMA proposta baseada em redes de Petri coloridas.

Tabela 6.2 – Legenda dos lugares da rede apresentada na Figura 6.4.

Lugar	Descrição	Conjunto de cores associado
P1	Caminhão disponível no CD 1	C1
P2	Safra armazenada no CD1	C1
P3	Caminhão disponível no CD 2	C1
P4	Safra armazenada no CD2	C1
P5	Caminhão disponível no CD 3	C1
P6	Safra armazenada no CD3	C1
P7	Safra em trânsito, do C1 para a PE	C2
P8	Safra em trânsito, do C2 para a PE	C2
P9	Safra em trânsito, do C3 para a PE	C2
P10	Caminhão pronto para retornar ao CD1	C1
P11	Caminhão pronto para retornar ao CD2	C1
P12	Caminhão pronto para retornar ao CD3	C1
P13	Safra na PE	C1
P14	Capacidade disponível da PE	C1
P15	Óleo em produção	C1
P16	Caminhão-tanque disponível na PE	C1
P17	Óleo armazenado	C1
P18	Óleo em trânsito da PE para a PP	C2
P19	Caminhão-tanque pronto para retornar para a PE	C1
P20	Óleo na PP	C1
P21	Capacidade disponível da PP	C1
P22	Biodiesel em produção	C1
P23	Biodiesel armazenado	C1
P24	Biodiesel em trânsito para a refinaria	C2
P25	Caminhão-tanque disponível na PP	C1
P26	Biodiesel em trânsito para o porto	C2
P27	Biodiesel na refinaria	C1
P28	Caminhão-tanque, na refinaria, pronto para retornar para a PP	C1
P29	Caminhão-tanque, no porto, pronto para retornar para a PP	C1
P30	Biodiesel no porto	C1

Tabela 6.3 – Legenda das transições da rede apresentada na Figura 6.4.

Transição	Descrição	Tempo de disparo (min)
T1	Carregamento do caminhão, com baga, no CD 1	60
T2	Carregamento do caminhão, com baga, no CD 2	60
T3	Carregamento do caminhão, com baga, no CD 3	60
T4	Retorno do caminhão para o CD1	99
T5	Retorno do caminhão para o CD2	231
T6	Retorno do caminhão para o CD3	10
T7	Transporte e descarregamento do caminhão, advindo do CD1	207
T8	Transporte e descarregamento do caminhão, advindo do CD2	407
T9	Transporte e descarregamento do caminhão, advindo do CD3	75
T10	Produção do óleo	48
T11	Armazenagem do óleo	5
T12	Carregamento do caminhão-tanque, com óleo	5
T13	Retorno do caminhão-tanque à PE	231
T14	Transporte e descarregamento do caminhão-tanque para a PP	352
T15	Produção do biodiesel	24
T16	Armazenagem do biodiesel	5
T17	Carregamento do caminhão-tanque, com biodiesel	5
T18	Carregamento do caminhão-tanque, com biodiesel	5
T19	Transporte e descarregamento do caminhão-tanque para a refinaria	517
T20	Transporte e descarregamento do caminhão-tanque para o porto	573
T21	Retorno do caminhão, advindo da refinaria, para a PP	345
T22	Retorno do caminhão, advindo do porto, para a PP	382

No modelo apresentado na Figura 6.4, são delimitadas, de forma meramente ilustrativa, as atividades de distribuição de baga, produção de óleo, distribuição de óleo, produção de biodiesel e distribuição de biodiesel.

A variável “x”, que é do tipo inteiro, representa caminhões utilizados na distribuição da safra, do óleo e do biodiesel. Se, por exemplo, adicionarmos, ao lugar P1, seis fichas com $x = 1$, teremos seis caminhões que poderão ser diferenciados ao longo das simulações, fato que não ocorreria se fossem utilizadas as redes de Petri lugar-transição.

A variável “y”, que também é do tipo inteiro, representa a safra que, posteriormente, se transforma em óleo e em biodiesel. De modo análogo ao descrito no parágrafo anterior, as frações de safra, de óleo e de biodiesel também podem ser diferenciadas ao longo das simulações.

O conjunto de cores C1 é associado àqueles lugares que não portam concomitantemente fichas de variáveis distintas. Já o conjunto de cores C2, associa-se aos lugares que armazenam, simultaneamente, fichas portando as variáveis “x” e “y”.

A marcação do lugar p_1 , correspondente ao CD1, será $M(p_1) = 66'y$, em que cada ficha do tipo “y” representa dez toneladas de safra. Analogamente, as marcações dos lugares p_2 e p_3 serão $M(p_2) = 18'y$ e $M(p_3) = 48'y$.

As marcações dos lugares p_1 , p_3 e p_5 corresponderão às quantidades de caminhões alocados para o transporte de baga e as marcações dos lugares p_{16} e p_{25} corresponderão ao número de caminhões-tanque designados para o transporte de óleo e de biodiesel, respectivamente. As marcações destes lugares serão variadas, com vistas a efetuar a avaliação de desempenho logístico do sistema.

Na Tabela 6.3, são apresentados os tempos associados aos disparos das transições da rede. Tais tempos permitem ao modelo avaliar o desempenho da cadeia em análise. Tendo em vista que não foi possível aferir estes dados em campo, dada a indisponibilidade por parte de empresas atuantes no setor, buscou-se estimar estes tempos de forma a orientar o modelo para a realidade. A seguir, descreve-se a estipulação destes tempos.

▪ Tempos de transporte de baga

As distâncias rodoviárias entre os municípios considerados na cadeia proposta foram determinadas por intermédio do sistema Totem, *software*, de livre domínio, disponibilizado pelo Departamento de Edificações, Rodovias e Transportes (DERT) do Estado do Ceará. Admitiu-se que a velocidade dos caminhões carregados era de 40km/h, sendo esta de 60km/h para caminhões descarregados. Tal consideração é usual em estudos de transportes (RICARDO e CATALANI, 1990).

- Tempo de ida do CD1 para a PE = $98(\text{km})/40(\text{km/h}) = 2,45\text{h} = 147\text{min}$
- Tempo de ida do CD2 para a PE = $232,1(\text{km})/40(\text{km/h}) = 5,78\text{h} = 347\text{min}$
- Tempo de ida do CD3 para a PE = $10(\text{km})/40(\text{km/h}) = 0,25\text{h} = 15\text{min}$
- Tempo de volta do PE para o CD1 = $98(\text{km})/60(\text{km/h}) = 1,64\text{h} = 99\text{min}$
- Tempo de volta do PE para o CD2 = $232,1(\text{km})/60(\text{km/h}) = 3,85\text{h} = 231\text{min}$
- Tempo de volta do PE para o CD3 = $10(\text{km})/60(\text{km/h}) = 0,17\text{h} = 10\text{min}$

▪ Tempos de carregamento e descarregamento de baga, óleo e biodiesel

O tempo de carregamento de baga consiste no tempo em que a safra, disposta no CD, é acondicionada no caminhão, enquanto o tempo de descarregamento de baga diz respeito ao tempo em que a safra, localizada no caminhão, é depositada em seu destino. De modo análogo, podem ser definidos os tempos de carregamento e descarregamento de óleo e biodiesel. No modelo em questão, tais tempos foram arbitrados como segue:

- Tempo de carregamento/d Descarregamento do caminhão com baga = 1h = 60 min;
- Tempo de carregamento/d Descarregamento do caminhão com óleo/biodiesel = 5 min.

▪ Tempos de produção

Os tempos de produção de óleo e biodiesel foram convencionados com base nas capacidades da PE e da PP, ou seja.

- Tempo unitário de produção de óleo = 1,25ton/h;
- Tempo unitário de produção de biodiesel = 5 m³/h.

▪ **Tempos de transporte de óleo e biodiesel**

Os tempos de transporte de óleo e biodiesel, que foram convencionados de maneira análoga aos tempos de transporte de baga, são apresentados a seguir:

- Tempo de ida do PE para a PP = $232,1(\text{km})/40(\text{km/h}) = 5,78\text{h} = 347\text{min}$;
- Tempo de volta do PP para a PE = $232,1(\text{km})/60(\text{km/h}) = 3,85\text{h} = 231\text{min}$;
- Tempo de ida da PP para a Refinaria = $344,7(\text{km})/40(\text{km/h}) = 8,62\text{h} = 517\text{min}$;
- Tempo de volta da Refinaria para a PP = $344,7(\text{km})/60(\text{km/h}) = 5,75\text{h} = 345\text{min}$;
- Tempo de ida do PP para o Porto = $381,8(\text{km})/40(\text{km/h}) = 9,55\text{h} = 573\text{min}$;
- Tempo de volta do Porto para a PP = $381,8(\text{km})/60(\text{km/h}) = 6,36\text{h} = 382\text{min}$.

O modelo apresentado na Figura 6.4 foi implementado no *software CPNTools* e, em seguida, foi realizada uma análise de suas propriedades, conforme descrito a seguir. Tal análise permitiu a validação lógica do modelo.

A rede não é reiniciável, pois não existe nenhuma marcação a ser alcançada que permita o retorno à marcação inicial. A não verificação desta propriedade corrobora com os princípios empregados na modelagem proposta. As fichas representam, em essência, equipamentos e produtos (safra, óleo e biodiesel). Se os produtos vão sendo transformados ao longo da cadeia, não é desejável que o sistema volte ao seu estado inicial. Se isso ocorresse, o biodiesel transformaria-se em safra, o que seria um absurdo.

A rede não é viva, pois no término da operação de embarque e desembarque, o sistema entra em bloqueio. Como se partiu da premissa de que, a partir do momento que toda safra fosse transformada em biodiesel, o sistema pararia de operar, a ausência da vivacidade é coerente com os princípios empregados no processo de modelagem.

A limitação depende da marcação da rede. A verificação da limitação é de suma importância para a constatação da coerência do modelo, pois, a partir da análise dessa propriedade, pode-se avaliar se existe algum erro na rede que está produzindo ou excluindo fichas de modo não condizente com o modelo idealizado. Verificou-se a

limitabilidade na rede modelada no software *CPNtools* e viu-se que ela era coerente com as marcações utilizadas.

6.4 Controle do sistema

Avaliando o comportamento do modelo através de simulações, foi possível identificar alguns problemas nos processos da cadeia, conforme elucidado a seguir.

Primeiramente, devido à quantidade da safra ser muito superior à capacidade da PE, ocorre espera por parte das bagas para o seu devido processamento. Os caminhões podem transportar frações da produção agrícola mesmo que a planta de esmagamento ainda não esteja apta a processá-las. Isso incorre em ineficiência, pois forma-se um estoque intermediário desnecessário.

O ideal é que as frações da safra sejam transportadas somente no momento em que elas sejam requeridas pela planta de esmagamento. Problema análogo ocorre entre a planta de esmagamento e a planta de produção de biodiesel.

Outro problema é a alocação de biodiesel para os mercados interno e externo. Deve existir algum instrumento de controle que designe a frota de veículos para seu destino correto, de modo a evitar falha na entrega.

Diante do exposto, podem ser propostas quatro especificações de controle para a moderação dos fluxos físicos, ao longo da cadeia em análise:

- $M(p_7) + M(p_8) + M(p_9) + M(p_{13}) \leq k_1$;
- $M(p_{18}) + M(p_{20}) \leq k_2$;
- $M(p_{24}) + M(p_{27}) \leq k_3$; e
- $M(p_{26}) + M(p_{30}) \leq k_4$.

Cada especificação incorrerá em um lugar de controle na rede, o qual deve ser determinado pelas equações 5.2 e 5.3, explicitadas no Capítulo 5. O valor de cada constante k_i pode ser modificado de acordo com o desejo do analista. A primeira restrição controla o fluxo de safra entre os CDs e a PE; a segunda restrição controla o fluxo de óleo entre a PE e a PP; e terceira e a quarta restrições monitoram, respectivamente, a designação de caminhões para a refinaria e para o porto.

Com base na matriz de incidência controlada, pode-se determinar a estrutura do modelo controlado, conforme ilustrado na Figura 6.5.

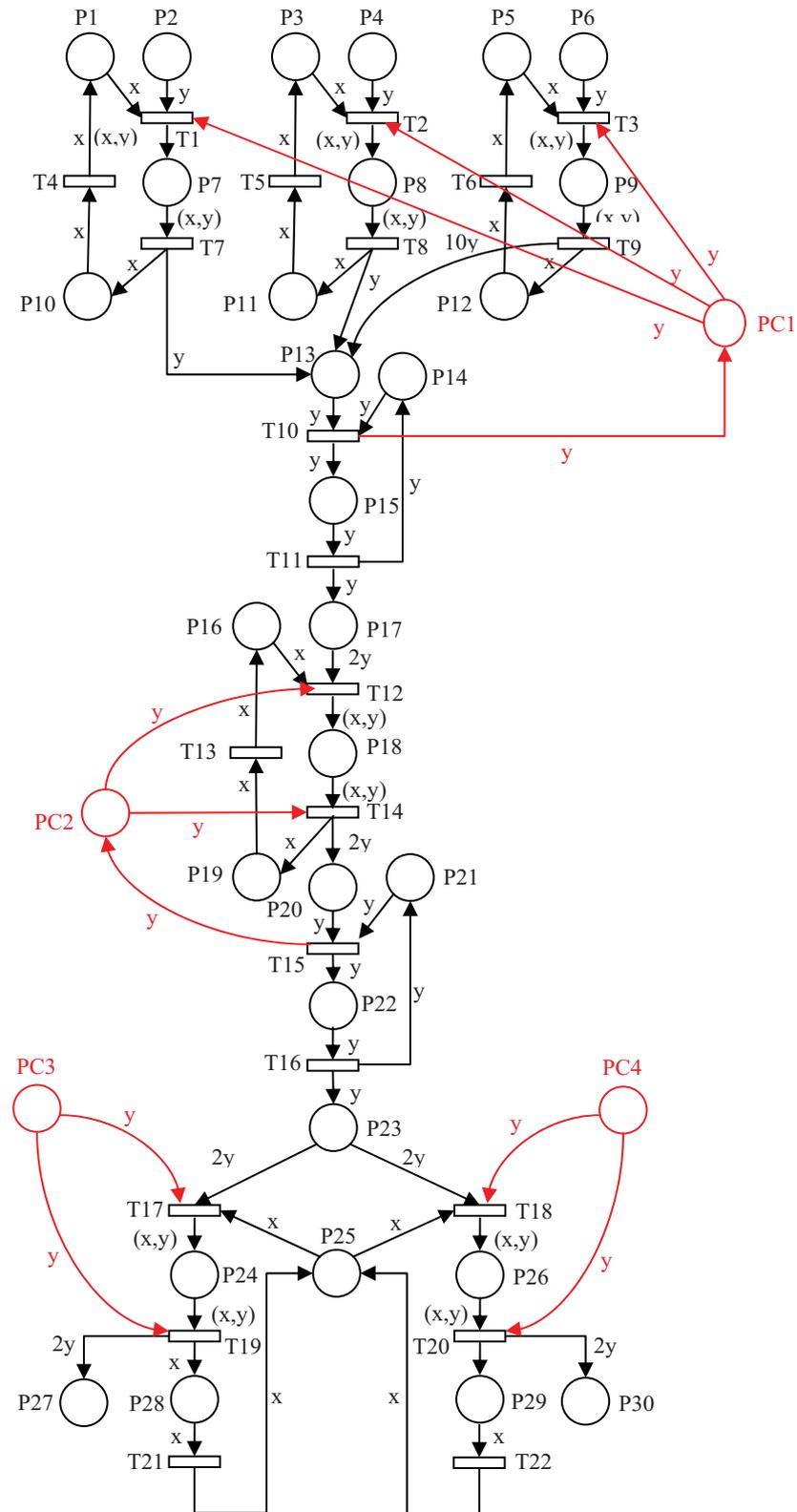


Figura 6.5 – Modelo controlado.

A seguir, na Tabela 6.4, são descritos os lugares de controle da rede apresentada na Figura 6.5. O lugar de controle PC1 modera o fluxo de caminhões entre os centros de distribuição e a planta de esmagamento, alocando veículos apenas quando a planta tiver capacidade para recebê-los. Evitam-se, deste modo, ineficiências tais como estoques intermediários desnecessários e filas.

Tabela 6.4 – Legenda dos lugares de controle da rede apresentada na Figura 6.5.

Lugar	Descrição	Conjunto de cores associado
PC1	Controla o fluxo de safra entre os CD's e a PE	C1
PC2	Controla o fluxo de óleo entre a PE e a PP	C1
PC3	Aloca biodiesel para o mercado interno	C1
PC4	Aloca biodiesel para o mercado externo	C1

O lugar de controle PC2 tem função análoga ao lugar de controle PC1, atuando sobre os fluxos de óleo entre a planta de esmagamento e a planta de produção de biodiesel. Mais uma vez, constata-se que o controle supervisor da cadeia em foco pode minorar suas ineficiências operacionais.

Os lugares de controle PC3 e PC4 relacionam-se ao conceito de eficácia, pois se destinam a designar caminhões-tanque de biodiesel para a refinaria e para o porto, respectivamente. Tendo em vista a grande quantidade de viagens a serem realizadas, quando a safra crescer bastante e caso o sistema não seja monitorado, caminhões podem ser alocados para destinos errôneos.

Diante do exposto, ressalta-se que a metodologia empregada pelo presente trabalho permite incrementar a efetividade da Cadeia Produtiva do Biodiesel da Mamona (CP/BDMA), podendo ser estendida a outras cadeias agroindustriais.

No que concerne à arquitetura de controle supervisor de sistemas logísticos, proposta no item 6.2 do presente capítulo, podem ser tecidos os seguintes comentários:

- O tomador de decisão poderia ser o Gestor da Cadeia Produtiva (GCP), proposto por Arruda *et al.* (2004). O tomador de decisão, com base em informações disponíveis, irá compor o modelo para supervisão e avaliação de desempenho do sistema, bem como determinar quais as especificações funcionais pertinentes.

- O modelo apresentado neste capítulo constituiria o supervisor, que poderia controlar o sistema, em tempo real ou não.
- Os controladores locais seriam os atores que iriam garantir a satisfação das restrições, impostas no modelo, ao sistema real. Tais atores seriam computadores, no caso do supervisor monitorar o sistema em tempo real, ou técnicos, no caso de um sistema não monitorado em tempo real.

6.5 Avaliação de desempenho

Com vistas a apresentar o modelo como ferramenta de apoio à tomada de decisão na CP/BDMA, optou-se por avaliar o desempenho do modelo controlado²⁵. Sendo o modelo teórico, não será possível validar o mesmo estatisticamente, conforme preconizam Shannon (1975) e Medina e Chwift (2006). É pertinente destacar que foi realizada a validação lógica do modelo, conforme elucidado no item 6.3.

Saito *et al.* (1999) e Scramin e Batalha (1999, 2004a, 2004b) ressaltam a importância do emprego de modelagem computacional na realização de análises quantitativas de desempenho de configurações operacionais alternativas em cadeias agroindustriais. Através de simulação computacional, os gestores de sistemas agroindustriais podem se antecipar a possíveis problemas, implementando, por conseguinte, alternativas de intervenção de maior qualidade.

Embora o modelo apresentado no presente trabalho não constitua um sistema real, é de suma importância avaliar o desempenho de um sistema antes mesmo de sua implantação. Mesmo que o modelo proposto não constitua uma contribuição de cunho prático, a metodologia empregada pelo presente trabalho pode ser utilizada tanto no planejamento quanto na operação de cadeias.

No que concerne à avaliação de desempenho de sistemas logísticos, e, em especial, de cadeias produtivas agroindustriais, Alves (1997, p.171) destaca que o tempo de ciclo é uma importante medida de desempenho logístico, que “representa a percepção do cliente sobre o período que há entre a colocação do pedido e a recepção na entrega do produto”.

²⁵ A avaliação de desempenho se deu no ciclo de apoio à produção industrial e no ciclo de distribuição física (vide Figura 2.6).

No caso da cadeia em foco, o tempo de ciclo consistirá no tempo operacional decorrido entre o transporte da safra à Planta de Esmagamento até a chegada de biodiesel na refinaria e/ou no porto. Tal abordagem está em consonância com os trabalhos de Costa (2002), Prata *et al.* (2006) e Machado *et al.* (2006).

Para a avaliação de desempenho do sistema, serão propostos dois cenários:

- Cenário A: 75% da produção destinada para o mercado interno e 25% da produção destinada para o mercado externo; e
- Cenário B: 100% da produção voltada para o mercado interno.

No Cenário A, 75% do biodiesel produzido será encaminhado para a refinaria, enquanto 25% da produção será destinada para o porto, visando sua exportação. Nesse caso, $k_3 = 100'y$ e $k_4 = 32'y$ ²⁶. No caso do Cenário B, 100% do biodiesel será destinado para a refinaria. Assim, $k_3 = 132'y$ e $k_4 = 0$ ²⁷.

É pertinente salientar que, tendo em vista que $M(p_1) = 66'y$ (correspondente às 660 toneladas de safra no CD1), $M(p_2) = 18'y$ (correspondente às 180 toneladas de safra no CD2) e $M(p_3) = 48'y$ (correspondente às 160 toneladas de safra no CD3), a soma de k_3 e k_4 será sempre igual a $= 132'y$.

Dentro de cada proposta (Cenário A e Cenário B), foram estabelecidos oito cenários operacionais, de forma a analisar a performance do sistema sob várias circunstâncias. Os valores das marcações dos lugares p_1 , p_3 , p_5 , p_{16} e p_{25} , que correspondem aos equipamentos de transporte (caminhões e caminhões-tanque) empregados na cadeia, serão os parâmetros a serem variados.

Dentro deste contexto, foram estabelecidos oito cenários de operação para as proposições A e B, de modo a avaliar o comportamento da cadeia. Um resumo dos resultados obtidos é ilustrado nas Tabelas 6.5 e 6.6, bem como na Figura 6.6. Para ajudar na compreensão dos cenários propostos, será descrito, em detalhes, o cenário A1.

²⁶ Conforme exposto na Tabela 6.1, a safra total considerada na cadeia modelada é de 1320 toneladas. É pertinente salientar que, no modelo proposto, uma ficha corresponde a 10 toneladas de safra.

²⁷ As constantes k_3 e k_4 dizem respeito ao número de fichas a ser limitado pelos lugares de controle, conforme elucidado no item 6.4 deste Capítulo.

$M(p_4) = 1$, $M(p_5) = 1$ e $M(p_6) = 1$ significam que um caminhão será alocado para o transporte de safra junto aos CDs 1, 2 e 3, respectivamente. $M(p_{16}) = 1$ significa que um caminhão-tanque será destinado para transportar óleo da PE para a PP e $M(p_{25}) = 1$ representa um caminhão-tanque designado para transportar biodiesel da PP para a refinaria e/ou para o porto.

Tabela 6.5 – Resumo dos resultados obtidos para o macro cenário A.

Cenário	Descrição do cenário	Tempo de ciclo(h)
A1	$M(p_4) = 1, M(p_5) = 1, M(p_6) = 1, M(p_{16}) = 1$ e $M(p_{25}) = 1$.	1010,6
A2	$M(p_4) = 2, M(p_5) = 2, M(p_6) = 2, M(p_{16}) = 2$ e $M(p_{25}) = 2$.	546,8
A3	$M(p_4) = 3, M(p_5) = 3, M(p_6) = 3, M(p_{16}) = 3$ e $M(p_{25}) = 3$.	519,4
A4	$M(p_4) = 4, M(p_5) = 4, M(p_6) = 4, M(p_{16}) = 4$ e $M(p_{25}) = 4$.	522,7
A5	$M(p_4) = 1, M(p_5) = 1, M(p_6) = 1, M(p_{16}) = 1$ e $M(p_{25}) = 2$.	680,0
A6	$M(p_4) = 1, M(p_5) = 1, M(p_6) = 1, M(p_{16}) = 2$ e $M(p_{25}) = 2$.	622,9
A7	$M(p_4) = 3, M(p_5) = 3, M(p_6) = 3, M(p_{16}) = 1$ e $M(p_{25}) = 1$.	1007,5
A8	$M(p_4) = 1, M(p_5) = 1, M(p_6) = 1, M(p_{16}) = 3$ e $M(p_{25}) = 3$.	586,8

Tabela 6.6 – Resumo dos resultados obtidos para o macro cenário B.

Cenário	Descrição do cenário	Tempo de ciclo(h)
B1	$M(p_4) = 1, M(p_5) = 1, M(p_6) = 1, M(p_{16}) = 1$ e $M(p_{25}) = 1$.	976,2
B2	$M(p_4) = 2, M(p_5) = 2, M(p_6) = 2, M(p_{16}) = 2$ e $M(p_{25}) = 2$.	503,3
B3	$M(p_4) = 3, M(p_5) = 3, M(p_6) = 3, M(p_{16}) = 3$ e $M(p_{25}) = 3$.	430,2
B4	$M(p_4) = 4, M(p_5) = 4, M(p_6) = 4, M(p_{16}) = 4$ e $M(p_{25}) = 4$.	431,7
B5	$M(p_4) = 1, M(p_5) = 1, M(p_6) = 1, M(p_{16}) = 1$ e $M(p_{25}) = 2$.	671,1
B6	$M(p_4) = 1, M(p_5) = 1, M(p_6) = 1, M(p_{16}) = 2$ e $M(p_{25}) = 2$.	592,3
B7	$M(p_4) = 3, M(p_5) = 3, M(p_6) = 3, M(p_{16}) = 1$ e $M(p_{25}) = 1$.	974,3
B8	$M(p_4) = 1, M(p_5) = 1, M(p_6) = 1, M(p_{16}) = 3$ e $M(p_{25}) = 3$.	594,8

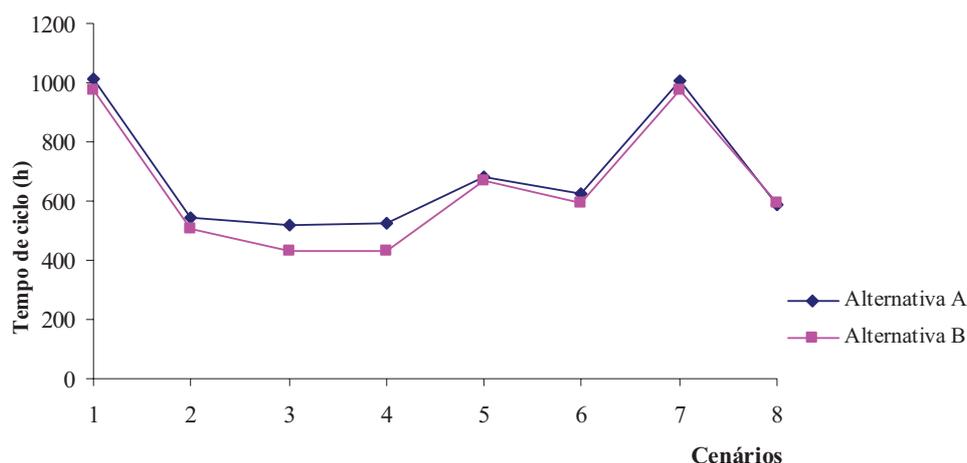


Figura 6.6 – Comportamento do tempo de ciclo ao longo dos cenários simulados nas alternativas A e B.

A seguir, são descritas as análises dos resultados das simulações. Ao se analisar os cenários A1 e A7, percebe-se que, alocando-se apenas um caminhão-tanque para o transporte de óleo e de biodiesel, o tempo de ciclo é bem superior em comparação aos

demais cenários. Por outro lado, nos cenários em que são utilizados muitos caminhões-tanque (A3, A4 e A8), os tempos de ciclo tendem a diminuir.

Analisando comparativamente os cenários A1 e A7, percebe-se que, mesmo triplicando-se o número de caminhões para o transporte de bagas e mantendo-se o número de caminhões-tanque fixo, a diminuição de tempo de ciclo é pouco significativa. Assim, constata-se que o número de caminhões-tanque impacta mais fortemente o tempo de ciclo do que o número de caminhões para o transporte de safra. Percebe-se, também, que a produtividade marginal devida ao acréscimo de equipamentos de transporte tende a zero, conforme elucidado pelos cenários A2, A3 e A4.

O desempenho do sistema para a proposta B foi semelhante à do sistema A, no que se refere à variação do tempo de ciclo advinda da mudança dos parâmetros. Entretanto, é pertinente a ressalva de que o tempo de ciclo da cadeia é menor quando esta se destina a atender exclusivamente o mercado interno.

A distinção entre os tempos de ciclo das propostas A e B é justificada pela maior distância a ser percorrida pelos caminhões-tanque cujo destino é o porto. A refinaria, por se localizar mais próxima da Planta de Produção, incorre em menores tempos de transporte. Nos cenários 3 e 4, onde a quantidade de viagens de caminhões-tanque é maior, a discrepância entre o desempenho das alternativas A e B é mais elevada.

Uma comparação entre os desempenhos das propostas A e B é ilustrada na Tabela 6.7 e na Figura 6.7.

Tabela 6.7 – Comparação entre os desempenhos das propostas A e B.

Cenário	Tempo de ciclo da proposta A (h)	Tempo de ciclo da proposta B (h)	Desvio (%)
1	1010,6	976,2	-3,5%
2	546,8	503,3	-8,6%
3	519,4	430,2	-20,7%
4	522,7	431,7	-21,1%
5	680	671,1	-1,3%
6	622,9	592,3	-5,2%
7	1007,5	974,3	-3,4%
8	586,8	594,8	1,3%

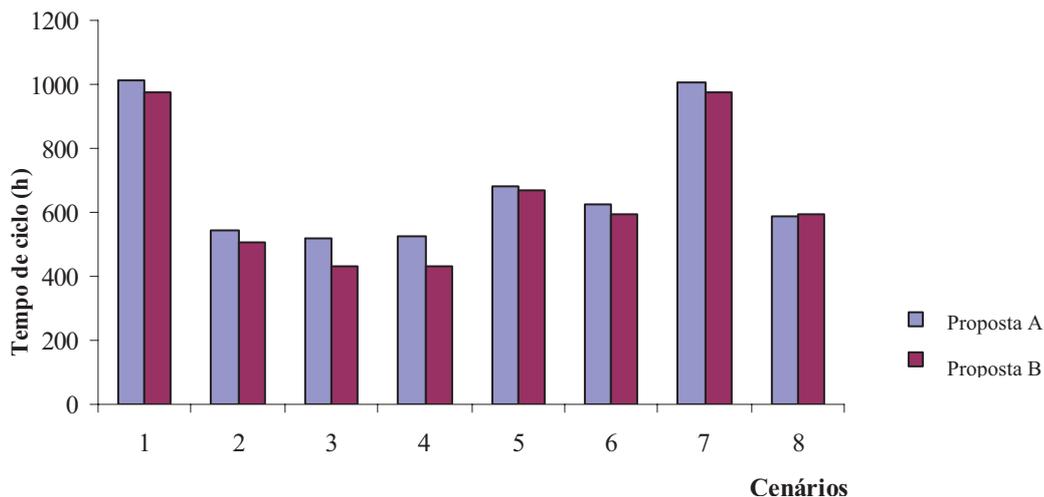


Figura 6.7 – Ilustração comparativa dos desempenhos das propostas A e B.

É cabível destacar que o modelo controlado, implementado no *CPNTools*, permite o acompanhamento de todos os seus elementos. Por utilizar cores para diferenciar a safra, o óleo, o biodiesel e os equipamentos de transporte, o modelo permite caracterizar, a cada instante da simulação, em qual estado se encontra cada um destes elementos e em que tempo estão sendo utilizados. Pode-se, portanto, efetuar-se uma avaliação mais detalhada do sistema como um todo.

Tendo em vista que a cadeia em análise é um sistema repleto de incertezas, decidiu-se realizar uma modelagem estocástica do mesmo. Como não foram aferidos dados em campo para o ajuste de funções de densidade de probabilidade às transições do modelo, adotou-se a premissa de que os tempos operacionais da cadeia fossem regidos pela distribuição exponencial.

Tal convenção foi fundamentada nas seguintes considerações:

- A distribuição exponencial é uma função de densidade de probabilidade contínua correntemente empregada na representação de processos de atendimento e de operação em estudos de simulação;
- Ela é função de apenas um parâmetro, o qual foi considerado como os tempos de disparo das transições. Como não foram aferidos tempos, estimar outros parâmetros, além do tempo médio, teria pouco sentido prático; e

- Conforme Bause e Kritzinger (2002), o grafo de alcançabilidade de uma rede de Petri é isomórfico a uma Cadeia de Markov. Assim, pode-se admitir que as transições entre estados sejam regidas por uma distribuição exponencial, tendo em vista seu caráter sem memória²⁸.

Como o modelo é probabilístico, cada vez que for rodada uma simulação, ele tenderá a ofertar resultados distintos, em termos de tempo de ciclo. Sendo assim, deve-se rodar o modelo n vezes de modo a obter um valor de tempo de ciclo médio que seja um bom estimador do tempo de operação do sistema.

Existem diversos métodos para a determinação do número de replicações a serem efetuadas em um modelo de simulação. Conforme Medina e Chwift (2006), um dos métodos para a consecução deste fim é a estipulação de um grande número de replicações do modelo, de forma que haja a convergência da média acumulada dos resultados do mesmo.

No caso do presente trabalho, convencionou-se, após diversos experimentos computacionais, que um número de 100 replicações, para cada cenário, é suficiente para a convergência dos resultados do modelo. A seguir, na Figura 6.8, é apresentada a convergência da média acumulada do tempo de ciclo, expresso em minutos, para o cenário A4.

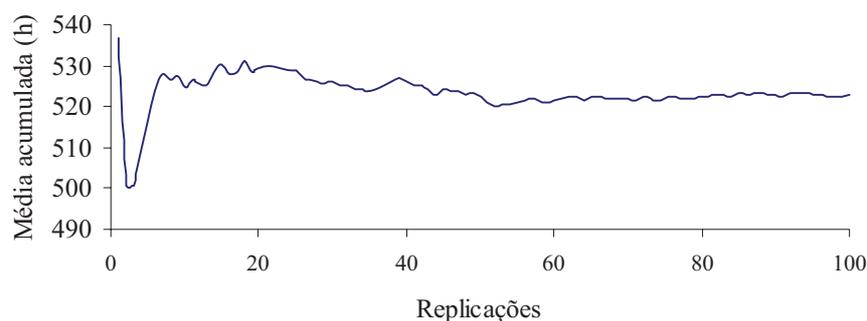


Figura 6.8 – Exemplo de convergência dos resultados da simulação (Cenário A4).

²⁸ Em 1907, um matemático russo chamado A.A. Markov descreveu uma classe de processos estocásticos que apresenta uma função de densidade de probabilidade tal que a probabilidade de se atingir um estado do sistema depende apenas do seu estado atual, independendo dos estados antecessores a este. No caso de uma Cadeia de Markov associada a uma rede de Petri, usualmente, admite-se que uma transição dispare segundo uma taxa λ de uma distribuição exponencial (BAUSE e KRITZINGER, 2002).

Analisando o desvio percentual entre a média acumulada entre os resultados de duas replicações consecutivas, percebe-se que o valor da média acumulada dos resultados do modelo sofre bruscas alterações nas primeiras replicações, mas converge para zero. Na Figura 6.9, é ilustrado um exemplo de uma análise desta natureza, realizada para o cenário A4.

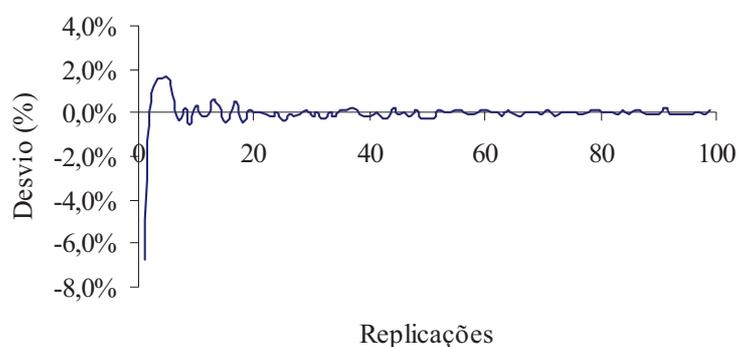


Figura 6.9 – Exemplo de convergência dos desvios entre as médias acumuladas dos resultados do modelo (Cenário A4).

A arquitetura de controle supervisorío de sistemas logísticos definida, o modelo desenvolvido, a proposta de controle e a avaliação de desempenho foram os principais produtos apresentados no presente capítulo. Diante do exposto, pode-se, no capítulo a seguir, explicitar as principais conclusões da pesquisa, assim como recomendações para futuros estudos.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

“Só há um caminho para a ciência ou para a filosofia: encontrar um problema, ver sua beleza e apaixonar-se por ele, casar e viver feliz com ele até que a morte vos separe – a não ser que encontrem um outro problema ainda mais fascinante, ou, evidentemente, a não ser que encontrem a solução. Mas, mesmo que obtenham uma solução, poderão então descobrir, para vosso deleite, a existência de toda uma família de problemas filhos, encantadores, ainda que talvez difíceis, para cujo bem-estar poderão trabalhar, com um sentido, até o fim dos vossos dias.”

Karl Popper.

Neste capítulo, são apresentadas as principais conclusões, sugestões para futuros estudos e considerações finais desta Dissertação de Mestrado, cuja estrutura é dividida em quatro seções, explicitadas a seguir. Na primeira seção, ressalta-se a relevância do trabalho e os resultados obtidos pelo mesmo. Na segunda seção, são destacadas as limitações da pesquisa realizada. Na terceira seção, são apresentadas recomendações para futuros trabalhos. Por fim, na quarta seção, são apresentadas as considerações finais da Dissertação.

7.1 Relevância, originalidade e resultados obtidos na pesquisa

Este trabalho consubstanciou uma Dissertação de Mestrado cujo objetivo primordial era elaborar um modelo, baseado em redes de Petri, para o controle da Cadeia Produtiva do Biodiesel da Mamona (CP/BDMA). Com o decorrer do estudo, passou-se a objetivar, também, o desenvolvimento de uma nova abordagem para o controle supervisão de Sistemas a Eventos Discretos, baseada em redes de Petri coloridas.

Tendo em vista a área de domínio do Programa de Mestrado ao qual esta Dissertação é submetida, pretendeu-se, desde o início da pesquisa, desenvolver um trabalho que contribuísse tanto na área de Logística quanto no domínio da Pesquisa Operacional.

No que se refere à relevância e à originalidade do trabalho, no domínio da Logística, pode-se destacar:

- A proposta de controle, apresentada pelo presente trabalho, mostrou-se consistente e promissora enquanto instrumento propiciador do controle dos fluxos físicos em cadeias produtivas;
- Não foram encontrados estudos na literatura que apresentassem proposta semelhante à reportada pelo presente trabalho, principalmente em se considerando SAI's;
- O modelo, implementado no *software CPNTools*, poderá vir a compor um Sistema de Apoio à Decisão (SAD) que permita a elaboração de cenários objetivando a efetividade de gestão da CP/BDMA; e
- Foi proposta uma arquitetura de controle supervisorio para sistemas logísticos.

No que concerne à área de Pesquisa Operacional, podem ser destacados os seguintes pontos sobre a relevância e a originalidade do trabalho:

- Foi proposto um método de controle supervisorio de Sistemas a Eventos Discretos baseado em redes de Petri coloridas, denominado Restrições de Controle sobre Cores Decompostas (RCCD);
- Não foi encontrada, na revisão de literatura que subsidiou o estudo, abordagem que permitisse a imposição de restrições, em redes de Petri coloridas, através da manipulação da matriz de incidência do modelo, tal como no método dos invariantes de lugar; e
- Por não trabalhar diretamente com o grafo de alcançabilidade de estados, o RCCD pode ser aplicado, com baixo custo computacional, na síntese de supervisores em redes de Petri coloridas.

7.2 Limitações da pesquisa

Com relação aos objetivos da pesquisa, estes foram atingidos, conforme pode ser observado ao longo desta Dissertação. Deve-se, entretanto, fazer uma ressalva no que concerne ao objetivo geral da pesquisa, que propunha a concepção de um modelo para o controle de atividades da CP/BDMA.

A maior dificuldade encontrada no presente estudo foi a obtenção de dados concretos para a elaboração e validação do modelo supracitado. Tal problema se deveu, principalmente, aos seguintes fatores:

- No Estado do Ceará, local de realização do estudo, a cadeia em foco ainda é incipiente e pouco estruturada; e
- Em consulta a uma empresa de grande porte atuante no setor, esta não se mostrou disponível para contribuir com o presente trabalho.

Para contornar estas dificuldades, optou-se pela elaboração de um modelo teórico, com vistas a mostrar que a aplicação dos procedimentos propostos poderia incrementar a efetividade da cadeia em análise.

A redução de estoques intermediários desnecessários e a alocação racionalizada de frotas aos seus destinos foram condições propiciadas pela metodologia empregada, que se prestam, sem dúvida, para a elevação da eficiência e da eficácia da cadeia em estudo.

O modelo conceitual foi implementado no *software CPNTools* e foi possível demonstrar computacionalmente que a metodologia empregada no trabalho serviu para controlar os fluxos na cadeia modelada, de acordo com as especificações funcionais pré-estabelecidas.

Embora seja um fator limitante, o emprego de um modelo sobre um sistema teórico não compromete os resultados obtidos pelo presente trabalho, pois a modelagem desenvolvida foi baseada em uma cadeia com estrutura de atividades conhecida e em informações verossímeis e factíveis. Assim, o modelo pode ser adaptado, *mutatis mutandis*, a um caso real, dada a sua consistência metodológica.

Pode-se salientar, também, que a modelagem empregada não contemplou todas as atividades da CP/BDMA. Processos tais como a aquisição de insumos e a comercialização não foram considerados no modelo.

Outra limitação do estudo foi a não consideração dos custos na avaliação de desempenho do sistema. Sabe-se que a abordagem logística prima pela obtenção de soluções que propiciem menor custo global para o sistema. Entretanto, o conhecimento dos custos no âmbito da CP/BDMA no semi-árido nordestino ainda não está bem consolidado. Existe uma Dissertação, ora em desenvolvimento no Mestrado em

Logística e Pesquisa Operacional (GESLOG/UFC), que se destina a ampliar a compreensão dos custos da cadeia supramencionada.

Outro fator limitante no presente trabalho foi a dissociação entre o controle dos fluxos logísticos e o tempo de operação do sistema. Na prática, a consideração do tempo na imposição de restrições ao sistema seria de suma relevância para o atendimento de pedidos.

Dado o caráter incipiente do controle supervisorio de Sistemas a Eventos Discretos, cujos primórdios datam do limiar da década de oitenta, a questão do tempo ainda está pouco sedimentada no estado atual de tal campo de conhecimento. Tal condição deve ser superada ao longo dos próximos anos, devido aos esforços que vêm sendo realizados por vários pesquisadores.

7.3 Proposições para futuros estudos

O tema explorado neste trabalho é bastante amplo, pois muitos desdobramentos podem surgir a partir de particularidades do problema. Deste modo, são reportadas sugestões para aprofundamento do tema pesquisado, bem como de outros temas afins.

No domínio da Logística, as seguintes sugestões podem ser salientadas:

- A modelagem apresentada deve ser aplicada em uma cadeia real, aliada à avaliação do seu desempenho logístico;
- A modelagem proposta pode considerar mais de uma variável para medida de desempenho;
- A inclusão dos custos logísticos deve ser incorporada à abordagem proposta;
- A coleta e o armazenamento de informação em tempo real, ao longo da cadeia, por intermédio de Tecnologia da Informação (TI), deve ser pesquisada;
- Deve ser averiguada a cadeia de produção de biodiesel através de óleos e gorduras residuais, com base nos preceitos da Logística Reversa;
- Os outros módulos do controle de sistemas de produção agrícola, apresentados em Koumboulis *et al.* (2006), devem ser desenvolvidos para o caso da cadeia em análise; e

- Deve ser investigada a articulação de sensores e atuadores em cadeias produtivas agroindustriais, e, em especial, na CP/BDMA.

No domínio da Pesquisa Operacional, as seguintes proposições podem ser destacadas:

- Devem ser dirigidos novos esforços de pesquisa sobre o RCCD, de modo a estender as classes de redes nas quais o método pode ser aplicado;
- Deve-se aprimorar o RCCD, de forma a permitir o controle, em uma única especificação funcional, de mais de uma cor;
- Deve-se investigar a aplicação do RCCD envolvendo eventos não controláveis e não observáveis;
- Deve-se pesquisar um modo de implementar funções de guarda no *software CPNTools* que lidem com as marcações dos lugares. Deste modo, o método das Redes de Petri com Funções de Habilitação das Transições (*RPFHT*) pode ser facilmente estendido para o caso das redes de Petri coloridas; e
- Devem ser pesquisadas condições que facilitem o controle supervisorio de SED envolvendo o tempo.

7.4 Considerações finais

Dado o caráter rudimentar da cadeia que serviu de base ao presente trabalho, envolvendo pequenos produtores dispersos no sertão central do Estado do Ceará, um sistema plenamente informatizado, para o controle supervisorio da CP/BDMA, certamente incorreria em inviabilidade técnica e econômica. Cabe ao Gestor da Cadeia Produtiva (GCP) implementar um sistema híbrido (homem-máquina) para subsidiar a tomada de decisão na cadeia em análise.

É pertinente ressaltar que a metodologia apresentada no presente trabalho é condição necessária, mas não suficiente, para a garantia da eficiência e da eficácia no âmbito de cadeias produtivas agroindustriais, cabendo diversas outras ações de gestão efetiva, continuada e sustentável.

Finalmente, a proposta do presente trabalho enquadra-se no promissor campo de pesquisa da agroinformática e promete muitos desdobramentos (SIGRIMIS *et al.* 2001; KOUMBOULIS, *et al.* 2006).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, M. R. P. A. Logística Agroindustrial. In: BATALHA, M. O. **Gestão Agroindustrial**, São Paulo: Editora Atlas, 1997, cap.4, p.139–214.

ARRUDA, J.B.F; NOBRE JÚNIOR, E.F.; MENDES, R.A. Uma proposta de gestão para a cadeia produtiva do biodiesel da mamona (CP/BDM) . In: I Congresso Brasileiro da Mamona, Campina Grande, 2005.

ARRUDA, J. B. F.; MENDES, R. A. Diagnóstico Logístico da Cadeia Produtiva do Biodiesel da Mamona (CP/BDMA): O Caso do Ceará. In: I Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel, Brasília, 2006.

ATHEY, T.H. **Systematic systems approach: an integrated method for solving systems problems**, New Jersey: Prentice-Hall, 1982.

BALLOU, R.H. **Logística empresarial**. São Paulo: Editora Atlas, 2001.

BARROSO, G.C. **Uma nova abordagem para síntese de supervisores de sistemas a eventos discretos**. 1996. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFPB, Campina Grande.

BATALHA, M. O. Sistemas agroindustriais: definições e correntes metodológicas. In: _____. **Gestão Agroindustrial**, São Paulo: Editora Atlas, 1997, cap.1, p.23–48.

BAUSE, F.; KRITZINGER, P.S. **Stochastic Petri Nets – An Introduction to the Theory**. Lengerich: Vieweg, 2002.

BERTHOMIEU, B.; DIAZ, M. Modeling and verification of time dependent systems using time Petri nets. **IEEE Transactions on Software Engineering**, v 17, p. 259-273, 1991.

BRAGA, R. P. F. **Contribuições ao controle supervisorio de sistemas a eventos discretos modelados por redes de Petri**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

CARDOSO, J.; VALETTE, R. **Redes de Petri**. Florianópolis: Editora UFSC, 1997.

CASSANDRAS, G.C.; LAFORTUNE, S. **Introduction to discrete event systems**. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 1999.

CHRISTOPHER, M. **Logística e Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos**. São Paulo: Editora Pioneira, 2001.

COSTA, E.J.S.C. **Avaliação do Desempenho Logístico de Cadeias Produtivas Agroindustriais: Um Modelo com Base no Tempo de Ciclo**. Fortaleza. 2002.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, UFC, Fortaleza.

CURY, J.E.R. Teoria de controle supervisorio de sistemas a eventos discretos. In: V Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Canela, 2001.

DAVID, R.; ALLA, H. On hybrid Petri nets. **Discrete Events Dynamic Systems: Theory and Applications**, v 11, p. 9-40, 2001.

DESROCHERS, A.A.; AL-JAAR, R.Y. **Applications of Petri nets in manufacturing systems**. United States of America: IEEE Press, 1995.

DESROCHERS, A.A.; DEAL, T. J.; FANTI, M. P. Complex token Petri nets. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Washington, 2003.

FANTI, M.P.; GIUA, A.; SEATZU, C. Generalized mutual exclusions constraints and monitors for colored Petri nets. In: Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Washington, 2003.

FOLINAS, D.; VLACHPOULOU, M.; MANOS, B. A web-based integration of data and processes in the agribusiness supply chain. In: EFITA 2003 Conference, Debrecen, 2003.

FREITAS, L. A. F.; NOBRE JÚNIOR, E. F. Gestão da Cadeia de Suprimentos (Supply Chain Management): Considerações para aplicação na Cadeia de Produção Agroindustrial do Biodiesel da Mamona. In: Simpósio de Engenharia de Produção, Bauru, 2004a.

FREITAS, L. A. F.; NOBRE JÚNIOR, E. F. Logística de distribuição do biodiesel da mamona: Prováveis canais de distribuição e a integração dos prestadores de serviços logísticos. In: Simpósio de Engenharia de Produção, Bauru, 2004b.

GEEDES. Disponível em: <<http://www.economia.esalq.usp.br/~geedes/geedes.html>>. Acesso em 21 mar. 2007.

GIUA, A. **Petri net as discrete event models for supervisory control**. 1992. PhD Thesis – Rensselaer Polytechnic Institute, New York.

GIUA, A.; DICESARE, F.; SILVA, M. Generalized mutual exclusions constraints on nets with uncontrollable transitions. In: Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Chicago, 1992.

HAAS, P.J. **Stochastic Petri nets – modelling, stability and simulation**. New York: Springer, 2002.

HOLLOWAY L. E.; HOSSAIN, F. Feedback Control for Sequencing Specifications in Controlled Petri Nets. In: Third International Conference on Computer Integrated Manufacturing, New York, 1992.

HOLLOWAY L. E.; KROGH. B. H. Controlled Petri nets: A tutorial survey. In: 11th International Conference on Analysis and Optimization of Systems, Berlin, 1994.

HOLLOWAY, L.E; KROGH, B.H.; GIUA, A. A survey of Petri net methods for controlled discrete event systems. **Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications**, v 7, p. 151 – 190, 1997.

HOPCROFT, J.E.; MOTWANI, R.; ULLMAN, J.D. **Introduction to automata theory, languages and computation**. United States of America, Addison – Wesley, 2001.

IORDACHE, M. V.; ANTSAKLIS, P.J. Software tools for the supervisory control of Petri nets based on place invariants. Technical Report of the ISIS Group, Notre Dame, 2002.

IORDACHE, M. V.; ANTSAKLIS, P.J. **Supervisory control of concurrent systems: a Petri nets structural approach**. Boston, Birkhäuser, 2006.

JENSEN, K. **Coloured Petri nets: basic concepts, analysis methods and practical use – Volume 1: basic concepts**. Denmark: Springer-Verlag, 1992.

KOUMBOULIS, F. N.; TZAMTI, M. P.; PAVLOVIC, M. Decision support systems in agribusiness. In: IEEE 3rd International Conference on Mechatronics, Budapest, 2006.

KOURI, J.; SANTOS, R. F. Aspectos econômicos do agronegócio da mamona no Brasil. In: II Congresso Brasileiro da Mamona, Aracaju, 2006.

KOUTSOUKOS, X. D.; HE, K. X.; LEMMON, M. D.; ANTSAKLIS, P. J. Timed Petri net in hybrid systems: stability and supervisory control. **Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications**, v 8, p. 137 – 173, 1998.

MACHADO, R. R. M.; SILVA, M. L.; MACHADO, C. C.; LEITE, H. C. Avaliação do desempenho logístico do transporte rodoviário de madeira utilizando rede de Petri em uma empresa florestal de Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 30, p. 999-1008, 2006.

MAKUNGU, M; BARBEAU, M.; ST-DENIS, R. Synthesis of controllers of processes modeled as colored Petri nets. **Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications**, v 9, p. 147-169, 1999.

MAKUNGU, M; ST-DENIS, R.; BARBEAU, M. A colored Petri net-based approach to the design of controllers. In: Proceedings of 35th Conference on Decision and Control, Cobe, 1996.

MARSAN, M.A.; G. BALBO; CONTE, G.; DONATELLI S.; FRANCESCHINIS G. **Modeling with generalized stochastic Petri nets**. Torino: John Wiley & Sons, 1995.

MEDINA, C. A.; CHWIF, L. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos**. São Pulo: Bravarte, 2006.

MOLDT, D.; KORDON, F. Systems engineering and validation. In: **Petri nets for systems engineering – a guide to modeling, verification and applications**. Springer-Verlag Press. Germany, 2003.

MENDES, R. A. **Diagnóstico, análise de governança e proposição de gestão para a cadeia produtiva do biodiesel da mamona (CP/BDMA): o caso do Ceará**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, UFC, Fortaleza.

MOODY, J.O.; ANTSAKLIS, P.J. **Supervisory control of discrete event systems using Petri nets**. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 1998.

MOODY, J.; YAMALIDOU, K.; LEMMON, M.; ANTSAKLIS, P. Feedback control of Petri nets based on place invariants. In: 32th Proceedings of Conference on Decision and Control, Lake Buena Vista, 1994.

MOODY, J.; ANTSAKLIS, P. Supervisory control using efficient linear techniques: a tutorial introduction. In: Proceedings of 5th IEEE Mediterranean Conference on Control and Systems, Paphos, 1997.

MOODY, J.; ANTSAKLIS, P. Supervisory control of Petri nets with uncontrollable/unobservable transitions. In: Proceedings of 35th IEEE Conference on Decision and Control, Kobe, 1996.

MURATA, T.; Petri Nets: properties, analysis and applications. **Proceedings of the IEEE**, v. 77, p. 541-580, 1989.

OLIVEIRA, L. B; COSTA, A. O. Biodiesel: uma experiência de desenvolvimento sustentável. In: Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro, 2002.

PARENTE, J.S.P. **Biodiesel: uma aventura tecnológica num país engraçado**. Fortaleza: NUTEC, 2003.

Petrobras. Disponível em: <<http://www2.petrobras.com.br>>. Acesso em 19 ago. 2007.

PRAÇA, E. R.; COUTINHO, E. J. R.; NOBRE JÚNIOR, E. F.; ARRUDA, J. B. F.; SILVA, J. L. C. Determinação da localização otimizada de plantas de esmagamento da mamona e de plantas de produção de biodiesel: o caso do Estado do Ceará. In: V Rencontre Internationale de Recherche Logistique, Fortaleza, 2004.

PRATA, F.C. **Principais culturas do Nordeste**. Fortaleza: Imprensa Universitária da Universidade Federal do Ceará, 1977.

PRATA, B. A.; ARRUDA, J. B. F.; BARROSO, G. C. Modeling of mamona biodiesel supply chain: a Petri nets approach. In: XXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Belém, 2006.

RAGHAVAN, N. R.; VISWANADHAM, N. Performance analysis of supply chain networks using Petri nets. In: Proceedings of 38th IEEE Conference on Decision and Control, Phoenix, 1999.

RAMADGE, P. J. G.; WONHAM, W. M. The control of Discrete Event Systems. **Proceedings of IEEE**, v. 77, p. 81-98, 1989.

RICARDO, H.S., CATALANI, G. **Manual Prático de Escavação – Terraplangem e Escavação de Rocha**, São Paulo: Pini, 1990.

SAITO, J. R.; FIGUEIREDO, R. S.; BATALHA, M. O. Simulando cadeias agroindustriais. In: II Workshop Brasileiro de Gestão de Sistemas Agroalimentares, Ribeirão Preto, 1999.

SCRAMIN, F. C. L.; BATALHA, M. O. Supply chain management em cadeias agroindustriais: discussões acerca das aplicações no setor lácteo brasileiro. In: II Workshop Brasileiro de Gestão de Sistemas Agroalimentares, Ribeirão Preto, 1999.

SCRAMIN, F. C. L.; BATALHA, M. O. Método para avaliação de benefícios em cadeias de suprimento. In: XXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Florianópolis, 2004a.

SCRAMIN, F. C. L.; BATALHA, M. O. Método para avaliação de benefícios em cadeias de suprimento: um estudo de caso. **Gestão e Produção**, v. 11, n. 3, p. 331 – 342, 2004b.

SEATZU, C; GIUA, A. Monitor design for colored Petri nets with uncontrollable and unobservable transition. In: Proceedings of 7th Workshop on Discrete Event Systems, Reims, 2004.

SHANNON, R. E. **Systems simulation: the art and science**. New Jersey: Prentice-Hall, 1975.

SIGRIMIS, N.; ANTSAKLIS, P.; GROUMPOS, P. P. Advances in control of agriculture and the environment. **IEEE Control Systems Magazine**, p. 8 – 12, 2001.

SOUSA, J.R.B. **SuperSin – uma ferramenta para síntese de supervisores baseada em redes de Petri com funções de habilitação das transições**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

SOUSA, J. R. B.; BARROSO, G. C. SSRP - Uma Ferramenta para a Síntese de Supervisores Baseada em Redes de Petri com Funções de Habilitação das Transições. In: XIV - Congresso Brasileiro de Automática, Natal, 2002.

VIDAL, J.W.B.; VASCONCELLOS, G.F. **Poder dos trópicos**, São Paulo: Casa amarela, 1998.

VILLANI, E. **Modelagem e análise de sistemas supervisórios híbridos**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica da universidade de São Paulo, São Paulo.

WOLFERT, J.; GOEWIE, E. A.; BEULENS, A. J. M. Dynamic product flow model for a mixed ecological farm. In: 1st European Conference for Information Technology in Agriculture, Copenhagen, 1997.

YAMADA, C.M.; PORTO, A.J.V.; INAMASU, R.Y., Aplicação dos conceitos de modelagem e de redes de Petri na análise do processo produtivo da indústria sucroalcooeira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 6, p. 809-820, 2002.

ZHOU, M. C. Combination of Petri nets and intelligent decision makers for manufacturing systems control. In: Proceedings of the 1991 IEEE International Symposium on Intelligent Control, Arlington, 1991.

ANEXO 1

O presente anexo apresenta a demonstração do método dos invariantes de lugar, cuja fonte é Moody e Antsaklis (1998, p. 28).

Teorema da síntese de controladores: Se

$$b - LM_0 \geq 0 \tag{1}$$

em que:

- b_i : vetor, com dimensão $n_c \times 1$, cujas componentes armazenam a quantidade de fichas impostas pelas especificações funcionais;
- L : matriz com dimensão $n_c \times n$, em que cada um de seus elementos é igual a um, se o lugar for submetido a uma restrição de controle, sendo igual a zero, caso contrário;
- M_0 : marcação inicial da rede.

então a rede de Petri colorida a ser controlada, com matriz de incidência C , terá matriz de incidência controlada C_c e marcação inicial M_{c0} dadas por:

$$C_c = -L C \tag{2}$$

$$M_{c0} = b - LM_0 \tag{3}$$

Prova: Se a inequação (1) não é verdadeira, então, obviamente, $LM_0 > b$ e as condições iniciais do sistema violam as restrições. Se a inequação é verdadeira, então a equação (3) mostra que as condições iniciais do controlador são definidas por um vetor representando a folga em cada uma das restrições representadas por $LM_0 \leq b$. A equação (2) força invariantes, incorrendo em um ciclo fechado no sistema.