

Karol Muñoz Salas

**MODELAGEM E ANÁLISE DE CIRCUITOS HIDRÁULICOS
USANDO REDES DE PETRI**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Automação e Sistemas.

Orientador: Prof. Dr. Victor Juliano De Negri

Florianópolis
2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
UFSC.

Muñoz Salas, Karol

Modelagem e Análise de Circuitos Hidráulicos usando
Redes De Petri / Karol Muñoz Salas; orientador, Victor
Juliano De Negri - Florianópolis, SC, 2014.
171p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Automação e Sistemas.

Inclui referências

1. Engenharia de Automação e Sistemas. 2. Sistema
Hidráulico. 3. Rede Canal-Agência. 4. Rede de Petri. 5. Model
Checking. I. De Negri, Victor Juliano. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas. III. Título.

Karol Muñoz Salas

**MODELAGEM E ANÁLISE DE CIRCUITOS HIDRÁULICOS
USANDO REDES DE PETRI**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia de Automação e Sistemas”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas.

Florianópolis, 23 de abril de 2014.

Prof. Jomi Fred Hübner, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Victor Juliano De Negri, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. José Eduardo Ribeiro Cury, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Edson Roberto De Pieri, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Acires Dias, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Aos meus pais, Miguel e Fresia.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pois sem ele não poderia estar atingindo este objetivo.

Ao Prof. Victor, pela permanente disponibilidade e paciência, assim como pelos conselhos e observações feitas durante a orientação.

Aos meus pais, Miguel e Fresia, por seu amor e apoio incondicionais.

A Robertina e aos meus irmãos, Karen e Angel, por seu apoio constante e também pela valiosa ajuda com algumas das responsabilidades que deixei em Perú para poder realizar o mestrado.

Ao Carlos, pela paciência e compreensão nos momentos difíceis.

A Michele, por ser minha família aqui em Brasil. Sua companhia e amizade foram muito importantes para a realização deste trabalho.

Aos meus colegas do LASHIP, pela colaboração, apoio e amizade.

A coordenação e a secretaria do PGEAS por todo o apoio prestado.

Finalmente, ao CAPES, pela bolsa brindada para a realização do mestrado.

*“The way of success is the way of continuous
pursuit of knowledge.”*

(Napoleon Hill, 1937)

RESUMO

Os sistemas hidráulicos situam-se dentro do domínio de sistemas mecatrônicos, pois são constituídos por circuitos hidráulicos e elétricos, assim como por programas implementados em controladores industriais. Em virtude disso, o projeto de sistemas hidráulicos é uma tarefa complexa e o estabelecimento de métodos durante as fases de desenvolvimento é muito importante. No entanto, até o momento não existe uma proposta consolidada. Frente a esta situação, o desenvolvimento de métodos de análise apresenta-se como uma alternativa para apoiar no projeto de sistemas hidráulicos. Nesse contexto, o presente trabalho propõe um procedimento para a verificação da concepção adotada para o circuito hidráulico. O método proposto considera o modelo do circuito hidráulico e o comportamento especificado. O modelo do circuito é representado por meio do uso da rede Canal – Agência e rede de Petri ordinária, também conhecida como rede de Petri lugar/transição. Por sua vez, a especificação do comportamento é representada por meio do uso da lógica temporal. Posteriormente, para analisar se o comportamento do circuito hidráulico está em conformidade ao esperado, emprega-se o método de verificação formal "*Model Checking*". Com o intuito de ilustrar as características do procedimento proposto, exemplos básicos de circuitos hidráulicos são apresentados. Os resultados obtidos neste trabalho mostram que o método proposto tem grande potencial de aplicação para a verificação da concepção de circuitos hidráulicos em geral.

Palavras-chave: sistema hidráulico, rede canal-agência, rede de Petri, model checking, sistema automático.

ABSTRACT

Hydraulic systems are considered as a part of mechatronic systems, as they are constituted by hydraulic and electrical circuits, as well as programs implemented in industrial controllers. As consequence, the design of hydraulic systems is a complex task and the establishment of methods during the phases of its development is very important. However up to date there is no consolidated proposal. After evaluating this situation, another approach is considered to support the design of hydraulic systems through the development of analytical methods. In this context, the aim of this research is to propose a procedure for verifying the constructive principle of hydraulic circuits. The proposed procedure considers the model of the hydraulic circuit and the specification of the expected behavior. The model of the hydraulic circuit is represented by using Channel - Agency net and ordinary Petri net, also known as a place/transition net. Moreover, the specification of the expected behavior is represented by using temporal logic. Subsequently, to analyze if the behavior of the hydraulic circuit is as expected, a formal verification tool "Model Checking" is used. Furthermore, examples of basic hydraulic circuits are presented to illustrate the main features of the proposed procedure. The results show that the proposed method has great potential for the verification of the design of hydraulic circuits in general.

Keywords: hydraulic system, channel-agency net, automatic system, Petri net, model checking.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Campos de aplicação da hidráulica e pneumática.	27
Figura 2. Uma visão abstrata do processo de projeto do sistema hidráulico.	28
Figura 3. Estrutura de um sistema hierárquico.	35
Figura 4. Ilustração de uma célula de manufatura.	36
Figura 5. Relação entre função, comportamento e estrutura.	40
Figura 6. Representação de um sistema automático usando rede C-A.	41
Figura 7. Representação gráfica de uma rede de Petri.	46
Figura 8. Arcos habilitadores e inibidores. (a) Exemplo de uma rede de Petri usando arco habilitador; (b) Exemplo de uma rede de Petri usando arco inibidor.	47
Figura 9. Rede de Petri e sua representação matricial.	48
Figura 10. Simbologia usada na rede Canal- Agência.	51
Figura 11. Exemplo de rede C-A: (a); Diagrama de circuito hidráulico; (b) Representação gráfica e (c) Representação matricial.	53
Figura 12. (a) Exemplo de um PFS com a identificação de seus elementos estruturais (fluxo de pacientes que procuram um Centro de Saúde); (b) Exemplo de um MFG com a identificação de seus elementos estruturais (detalhamento funcional da atividade atendimento).	55
Figura 13. Exemplo de um sistema modelado usando a metodologia PFS/MFG. (a) Descrição do sistema; (b) PFS do sistema; (c) MFG do sistema.	56
Figura 14. Etapas do <i>Model Checking</i>	60
Figura 15. CTL*, CTL e LTL.	63
Figura 16. Sistema hidráulico genérico. Fluxo de energia, matéria e informação.	68
Figura 17. Módulos de um sistema hidráulico.	68
Figura 18. Projeto de circuitos hidráulicos.	70
Figura 19. Circuitos com os mesmos componentes, mas com diferentes ligações entre a válvula e o cilindro.	71
Figura 20. Sistema de elevação com o posicionamento obtido pela válvula de retenção pilotada.	71
Figura 21. Deslocamento do cilindro ao longo do tempo do sistema de elevação.	72
Figura 22. Variações do sistema de elevação. (a) Circuito com válvula de centro fechado; (b) Circuito com válvula de centro fechado e sem a válvula de retenção pilotada.	73

Figura 23. Deslocamento do cilindro ao longo do tempo. (a) Circuito com válvula de centro fechado; (b) Circuito com válvula de centro fechado e sem a válvula de retenção pilotada.	74
Figura 24. Proposta para a verificação da concepção de circuitos hidráulicos.....	75
Figura 25. Etapas para a atividade de modelagem.	77
Figura 26. Circuito hidráulico e o seu modelo usando rede C-A.	78
Figura 27. Processos para a modelagem usando RP.	80
Figura 28. Elementos de uma agência ou componente hidráulico.	81
Figura 29. Elementos de uma válvula 4/2.	82
Figura 30. Elementos e interligações de uma válvula 4/2.	83
Figura 31. Modelo padrão em RP para uma porta de entrada.	84
Figura 32. Modelo padrão em RP para uma porta de saída.	84
Figura 33. Válvula 4/2 com detalhamento dos modelos padrão em RP das portas de entrada e de saída.	85
Figura 34. Modelo padrão em RP para o bloco de pressurização e despressurização de uma porta de entrada.	85
Figura 35. Exemplo de interligação dos elementos “Porta de entrada P” e “Pressurização/despressurização da porta de entrada P”.....	86
Figura 36. Modelo padrão em RP para o bloco de pressurização e despressurização de uma porta de saída.	87
Figura 37. Exemplo de interligação dos elementos “Porta de saída A” e “Pressurização/despressurização da porta de saída A”.	87
Figura 38. Elementos do bloco “Configuração das conexões paralela e cruzada”.	89
Figura 39. (a) Modelo padrão em RP para a configuração da conexão paralela ou cruzada da válvula de controle direcional 4/2; (b) Modelo equivalente da RP.	89
Figura 40. Interligação entre os elementos “Configuração da conexão paralela” e “Configuração da conexão cruzada”.....	90
Figura 41. Ligações das transições “t ₁ ” e “t ₂ ” da configuração paralela.	92
Figura 42. Ligações das transições “t ₅ ” e “t ₆ ” da configuração paralela.	93
Figura 43. Modelo padrão em RP da válvula de controle direcional 4/2.	94
Figura 44. Elementos de uma válvula 4/3.	95
Figura 45. Elementos e interligações de uma válvula 4/3.	96
Figura 46. Elementos do bloco “Configuração das conexões paralela, cruzada e centro”.....	96

Figura 47. (a) Modelo padrão em RP para a configuração da conexão do centro de uma válvula de controle direcional 4/3 com centro com porta P bloqueada e portas A, B e T interligadas; (b) Modelo sintetizado da RP.	97
Figura 48. Ligações das transições “t ₁ ” e “t ₃ ” da configuração do centro para uma válvula de controle direcional 4/3 com centro com porta P bloqueada e portas A, B e T interligadas.	99
Figura 49. Ligações das transições “t ₅ ” e “t ₆ ” da configuração centro para uma válvula de controle direcional 4/3 com centro com porta P bloqueada e portas A, B e T interligadas.	100
Figura 50. Modelo padrão da válvula 4/3 com centro com porta P bloqueada e portas T, A, e B interligadas.	101
Figura 51. (a) Modelo padrão em RP para a configuração da conexão do centro de uma válvula de controle direcional 4/3 com centro fechado; (b) Modelo sintetizado da RP.	102
Figura 52. (a) Modelo padrão em RP para a configuração da conexão do centro de uma válvula de controle direcional 4/3 com centro aberto; (b) Modelo sintetizado da RP.	103
Figura 53. Modelo padrão da válvula 4/3 com centro fechado.	105
Figura 54. Modelo padrão da válvula 4/3 com centro aberto.	106
Figura 55. Elementos de um cilindro assimétrico.	107
Figura 56. Elementos e interligações do cilindro assimétrico de dupla ação.	108
Figura 57. Modelo padrão em RP para o bloco de pressurização/despressurização para uma câmara.	109
Figura 58. Exemplo de interligação dos blocos “Porta de entrada A” e “Pressurização/despressurização da câmara A”.	110
Figura 59. Modelo padrão em RP para o bloco de movimento do cilindro.	110
Figura 60. Modelo padrão em RP do cilindro assimétrico de dupla ação.	112
Figura 61. Elementos de um motor-bomba.	113
Figura 62. Elementos e interligações do motor-bomba.	114
Figura 63. Modelo padrão em RP do motor-bomba.	114
Figura 64. Elementos e interligações do reservatório.	115
Figura 65. Modelo padrão em RP do reservatório.	115
Figura 66. Circuito hidráulico, o seu modelo usando rede C-A e a substituição do canal por seu modelo padrão em RP.	117
Figura 67. Circuito hidráulico, modelo usando rede C-A e modelo usando RP.	118

Figura 68. Ferramentas para formalização de propriedades e verificação no método proposto.....	119
Figura 69. Detalhe da etapa de verificação do método proposto.	120
Figura 70. Segundo exemplo. (a) Circuito hidráulico; (b) Modelo usando rede C-A.....	129
Figura 71. Terceiro exemplo. (a) Circuito hidráulico; (b) Modelo usando rede C-A.....	131
Figura 72. Quarto exemplo. (a) Circuito hidráulico; (b) Modelo usando rede C-A.....	133
Figura 73. Quinto exemplo. (a) Circuito hidráulico; (b) Modelo usando rede C-A.....	135
Figura 74. Sexto exemplo. (a) Circuito hidráulico; (b) Modelo usando rede C-A.....	137
Figura A. 1– Modelo em rede de Petri do circuito 1.....	151
Figura A. 2– Modelo em rede de Petri do circuito 2.....	153
Figura A. 3– Modelo em rede de Petri do circuito 3.....	155
Figura A. 4– Modelo em rede de Petri do circuito 4.....	157
Figura A. 5– Modelo em rede de Petri do circuito 5.....	159
Figura A. 6– Modelo em rede de Petri do circuito 6.....	161

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Ferramentas do <i>Model Checking</i>	65
Quadro 2. Portas de entrada e de saída para a válvula de controle direcional 4/2.....	82
Quadro 3. Lugares de entrada e saída das transições na configuração paralela e cruzada da válvula de controle direcional 4/2.....	91
Quadro 4. Portas de entrada e saída para a válvula de controle direcional 4/3.....	95
Quadro 5. Lugares de entrada e saída das transições na configuração centro da válvula de controle direcional 4/3 com centro com porta P bloqueada e portas A, B e T interligadas.....	98
Quadro 6. Lugares de entrada e saída das transições na configuração centro da válvula de controle direcional 4/3 com centro fechado.	103
Quadro 7. Lugares de entrada e saída das transições na configuração centro da válvula de controle direcional 4/3 com centro aberto.	104
Quadro 8. Portas de entrada e saída para o cilindro assimétrico de dupla ação.....	107
Quadro 9. Lugares de entrada e saída das transições no bloco “Movimento do cilindro”.	111
Quadro 10. Portas de entrada e saída para o motor-bomba.	113
Quadro 11. Lugares de entrada e saída das transições do elemento “Controle e repartição de fichas” do reservatório.	116
Quadro 12. Propriedade, especificação em LTL e no programa TINA para a verificação do fluxo de matéria e energia.	121
Quadro 13. Propriedade, especificação em LTL e no programa TINA para a verificação da pressão.....	122
Quadro 14. Portas de entrada e saída para a válvula 4/3 com centro tandem.	123
Quadro 15. Identificação dos estados nos modelos usando rede de Petri.	125
Quadro 16. Primeira propriedade para a verificação do fluxo de matéria e energia do circuito 1.	126
Quadro 17. Segunda propriedade para a verificação do fluxo de matéria e energia do circuito 1.	127
Quadro 18. Primeira propriedade para a verificação de pressão do circuito 1.....	128
Quadro 19. Segunda propriedade para a verificação de pressão do circuito 1.....	128
Quadro 20. Verificação do fluxo de matéria e energia e da pressão do circuito 2.....	130

Quadro 21. Verificação do fluxo de matéria e energia e da pressão do circuito 3.	131
Quadro 22. Verificação do fluxo de matéria e energia do circuito 3 mediante o uso de propriedades que descrevem um comportamento errado.	132
Quadro 23. Verificação do fluxo de matéria e energia e da pressão do circuito 4.	134
Quadro 24. Primeira e segunda propriedade para a verificação do fluxo de matéria e energia do circuito 5.	135
Quadro 25. Terceira e quarta propriedade para a verificação do fluxo de matéria e energia do circuito 5.	136
Quadro 26. Primeira propriedade para a verificação da pressão do circuito 5.	136
Quadro 27. Segunda propriedade para a verificação da pressão do circuito 5.	137
Quadro 28. Verificação do fluxo de matéria e energia do circuito 6. ...	138
Quadro 29. Verificação da pressão do circuito 6.	139

Quadro B. 1- Propriedade para a verificação do fluxo de matéria e energia do circuito 2.....	163
Quadro B. 2- Propriedade para a verificação da pressão do circuito 2.	163
Quadro B. 3- Propriedade para a verificação do fluxo de matéria e energia do circuito 3.....	164
Quadro B. 4- Propriedade para a verificação da pressão do circuito 3.	164
Quadro B. 5- Primeira propriedade para a verificação do fluxo de matéria e energia do circuito 4.....	165
Quadro B. 6- Primeira propriedade para a verificação da pressão do circuito 4.	165
Quadro B. 7– Primeira e segunda propriedade para a verificação do fluxo de matéria e energia do circuito 5.....	166
Quadro B. 8– Terceira e quarta propriedade para a verificação do fluxo de matéria e energia do circuito 5.	167
Quadro B. 9– Propriedades para a verificação da pressão do circuito 5.	168
Quadro B. 10– Primeira e segunda propriedade para a verificação do fluxo de matéria e energia do circuito 6.....	169
Quadro B. 11– Terceira propriedade para a verificação do fluxo de matéria e energia do circuito 6.....	170
Quadro B. 12– Propriedades para a verificação da pressão do circuito 6.	171

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LASHIP	Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos
C-A	Canal – Agência
RP	Rede de Petri
PFS/MFG	<i>Production Flow Schema e Mark Flow Graph</i>
RPI	Rede de Petri Interpretada
MFG	<i>Mark Flow Graph</i>
PFS	<i>Production Flow Schema</i>
LTL	<i>Linear Temporal Logic</i>
CTL	<i>Computational Tree Logic</i>
TINA	<i>Time Petri Net Analyzer</i>
LAAS	Laboratório de Análise e Arquitetura de Sistemas

LISTA DE SÍMBOLOS

p	Pressão	[N/ m ²]
F	Força	[N]
A	Área da seção transversal	[m ²]
Q	Vazão	[m ³ /s]
v	Velocidade do fluido	[m/s]

SUMÁRIO

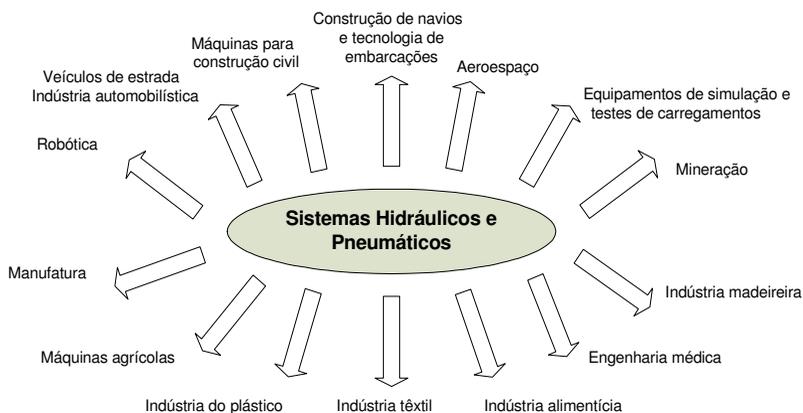
1 INTRODUÇÃO	27
2 SISTEMAS AUTOMÁTICOS	33
2.1 DEFINIÇÃO DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS	33
2.2 MODELAGEM DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS.....	36
2.2.1 Definição de modelo	36
2.2.2 Perspectivas para modelagem	37
2.2.3 Modelagem genérica dos Sistemas Automáticos.....	40
2.3 VERIFICAÇÃO DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS.....	41
2.3.1 Simulação e teste.....	42
2.3.2 Verificação formal.....	42
3 FERRAMENTAS PARA A MODELAGEM DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS	45
3.1 REDE DE PETRI	45
3.1.1 Descrição	45
3.1.2. Principais propriedades dinâmicas.....	49
3.1.3 Vantagens e desvantagens.....	50
3.2 REDE CANAL – AGÊNCIA.....	51
3.3 PRODUCTION FLOW SCHEMA / MARK FLOW GRAPH....	54
3.3.1 Production Flow Schema	54
3.3.2 Mark Flow Graph	54
3.3.3 Metodologia PFS/MFG	55
4 MÉTODO PARA VERIFICAÇÃO DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS	59
4.1 MODEL CHECKING	59
4.2 LÓGICA TEMPORAL	61
4.2.1 Propriedades usando a lógica temporal.....	62
4.2.2 CTL*, LTL e CTL.....	62

4.3 FERRAMENTAS DO MODEL CHECKING	65
4.4 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO MODEL CHECKING	65
5 SISTEMAS HIDRÁULICOS.....	67
5.1 DEFINIÇÃO DE SISTEMAS HIDRÁULICOS.....	67
5.2 FLUIDOS HIDRÁULICOS.....	69
5.2.1 Pressão	69
5.2.2 Vazão volumétrica.....	69
5.3 PROJETO DE CIRCUITOS HIDRÁULICOS	70
6 PROPOSTA PARA MODELAGEM E ANÁLISE DE CIRCUITOS HIDRÁULICOS	75
6.1 MODELAGEM DO CIRCUITO HIDRÁULICO	76
6.1.1 Modelagem usando a rede Canal – Agência	78
6.1.2 Modelagem usando rede de Petri lugar/transição.....	79
6.2 FORMALIZAÇÃO DE PROPRIEDADES E VERIFICAÇÃO.	118
6.3 LIMITAÇÕES DA PROPOSTA	122
7 APLICAÇÃO DA PROPOSTA EM CIRCUITOS HIDRÁULICOS.....	125
7.1 CIRCUITO HIDRÁULICO 1	126
7.2 CIRCUITO HIDRÁULICO 2.....	129
7.3 CIRCUITO HIDRÁULICO 3	130
7.4 CIRCUITO HIDRÁULICO 4.....	133
7.5 CIRCUITO HIDRÁULICO 5	134
7.6 CIRCUITO HIDRÁULICO 6.....	137
8 CONCLUSÕES.....	141
REFERÊNCIAS.....	143
APÊNDICE A – Modelos em rede de Petri dos circuitos de exemplo do Capítulo 7	151
APÊNDICE B – Verificação no programa TINA dos circuitos de exemplo do Capítulo 7	163

1 INTRODUÇÃO

A automação de processos vem crescendo em diversos setores industriais. Nesse contexto os sistemas hidráulicos são muito utilizados devido às vantagens que apresentam, como alta confiabilidade, boa precisão de posicionamento e baixa relação peso/potência (LINSINGEN, 2008). A hidráulica está presente nos domínios de máquinas ferramentas, dos equipamentos móveis da indústria das máquinas de construção, das indústrias siderúrgicas e metal-mecânica pesada, das máquinas agrícolas, do setor de transporte de elevação, das máquinas de injeção, dos robôs manipuladores, da indústria aeronáutica e aeroespacial, entre outros. Na Figura 1 apresentam-se os campos em que pode ser aplicada a hidráulica e a pneumática.

Figura 1. Campos de aplicação da hidráulica e pneumática.



Fonte: Adaptado de Ivantysynova (1998, apud DE NEGRI, 2001, p.4).

Os sistemas hidráulicos situam-se dentro do domínio de sistemas automáticos visto que são constituídos por componentes mecânicos, eletrônicos e de controle. Assim, os sistemas hidráulicos abarcam diferentes domínios tecnológicos e há necessidade do envolvimento de diversos especialistas, cada qual capaz de resolver aspectos técnicos em sua área de conhecimento.

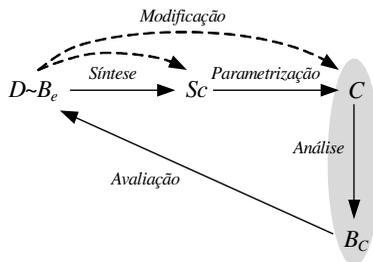
Além disso, o comportamento dos sistemas hidráulicos depende da concepção adotada para o circuito hidráulico propriamente dito, os circuitos elétricos e eletrônicos e a programação de controladores

digitais. Ainda por cima, a própria interação entre os componentes hidráulicos afeta o comportamento estático e dinâmico do sistema, requerendo um projeto adequado tanto com relação à escolha dos princípios construtivos quanto ao dimensionamento destes componentes.

Segundo Henke (1970), o projeto para os sistemas hidráulicos é um processo intuitivo que exige a experiência dos projetistas, além do conhecimento das ferramentas básicas da hidráulica, a fim de encontrar a melhor solução para um problema. Da mesma forma, Silva (1998) refere que em algumas fases do projeto de sistemas hidráulicos, a experiência do projetista serve de base para a tomada de decisões. Por outro lado, Nakashima e Baba (1989) indicam que a abordagem tradicional para o projeto de sistemas hidráulicos é extremadamente ineficiente. Segundo eles, o principal problema com esta abordagem ocorre quando os sistemas hidráulicos apresentam falhas, o que origina uma alta perda de tempo para a correção do erro, pois há muitos especialistas implicados no processo de projeto.

Em outro ponto de vista, Stein (1998) explica que no projeto de sistemas hidráulicos, não é possível começar com um conjunto de exigências (tarefas que devem ser realizadas) e em único passo obter de forma imediata o sistema hidráulico. Portanto, previamente, devem realizar-se os passos de sínteses, parametrização, análise, avaliação e modificação. O processo proposto por ele apresenta-se na Figura 2. Neste processo, “ D ” denota o conjunto de exigências e “ B_e ” o comportamento esperado do circuito hidráulico. “ S_C ” representa a sua estrutura e “ B_C ” denota o comportamento obtido pelo circuito “ C ” proposto. Assim, Stein destaca que na etapa de síntese, ou seja, na concepção do circuito hidráulico, é necessária muita criatividade por parte do projetista.

Figura 2. Uma visão abstrata do processo de projeto do sistema hidráulico.



Fonte: Adaptado de Stein (1998).

O cenário descrito acima, sobre o projeto de sistemas hidráulicos, continua válido até a data atual. Desta forma, com o fim de evitar que o projeto dependa da criatividade e experiência e do projetista, assim como para permitir dar segurança durante todas as fases do seu desenvolvimento, é importante o estabelecimento de métodos de projeto para os sistemas hidráulicos. Porém, também se pode deduzir que existe uma complexidade inerente a este tipo de sistemas, fazendo que esta tarefa não seja trivial.

No Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos (LASHIP) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina vem-se trabalhando nessa linha de pesquisa. Deste modo, trabalhos como de De Negri (1996), Silva (1998), Vinade (2003), Belan (2007), e Porciúncula (2009) têm contribuído nessa direção. No entanto, apesar dos esforços destes e outros pesquisadores, ainda não existe uma metodologia de projeto consolidada para os sistemas hidráulicos.

Em virtude disso, Stein (1998) propõe não se concentrar na automatização do projeto de sistemas hidráulicos senão, em seu lugar, se dedicar ao desenvolvimento de métodos de análise. Da mesma forma, Katoen (1999) afirma que, para os sistemas em geral, é importante se dedicar ao desenvolvimento de processos que facilitem sua análise automática para comprovar seu correto funcionamento. Por outro lado, Hong e Tessman (1998) asseguram que no campo da hidráulica é conhecido que a análise é muito importante, pois facilita o projeto de sistemas hidráulicos em um mínimo de tempo. Porém, também indicam que para que a análise seja eficaz, esta tem que ser realizada por uma pessoa com muita experiência no campo da hidráulica. Por último, Henke (1970) afirma que na análise de um sistema hidráulico, o julgamento intuitivo necessário é mínimo, mas exige ser um procedimento exaustivo que abranja todos os comportamentos possíveis do sistema.

Posto isso, pode-se deduzir que existe uma oportunidade para o desenvolvimento de métodos de análise para os sistemas hidráulicos devido à elevada dificuldade que apresenta a automatização do projeto. Dessa forma, a presente pesquisa de mestrado visa propor um método para facilitar a análise de circuitos hidráulicos por meio da verificação da sua concepção.

Para comprovar se a concepção do circuito hidráulico está correta, se propõe utilizar o método de verificação formal *Model*

Checking. Este método emprega algoritmos executados por *software*, portanto a intervenção do projetista é menor. O *Model Checking* precisa da representação formal do circuito hidráulico e da especificação do comportamento esperado. Para obter o modelo do circuito, propõe-se que a descrição seja realizada em torno de dois modelos: a rede Canal – Agência (C-A), que provê uma representação com as perspectivas funcional e estrutural; e a rede de Petri (RP) lugar – transição que permite a inserção do comportamento no circuito. O comportamento esperado é representado por meio do uso da lógica temporal. Posteriormente, com a representação formal do circuito e a especificação do comportamento, é realizado o processo de verificação usando um *software* que implementa o *Model Checking*. Este processo avaliará se a concepção do circuito hidráulico permite atingir seu objetivo, verificando o fluxo de matéria e energia, assim como a pressurização e despressurização nas portas dos componentes.

Estruturalmente a dissertação está subdividida em oito capítulos, sendo que este primeiro está dedicado a introduzir os assuntos que serão discutidos no decorrer do trabalho.

O segundo capítulo apresenta-se os sistemas automáticos como a área onde estão inclusos os sistemas hidráulicos. Assim, explica-se a complexidade inerente a este tipo de sistemas e como é relevante o uso de modelos para enfatizar as propriedades que são do interesse do projetista com o objetivo de simplificar o projeto e/ou a análise dos sistemas. Posteriormente, explica-se a importância dos métodos de verificação para ter certeza do correto funcionamento dos sistemas.

O terceiro capítulo apresenta as ferramentas de modelagem que são de interesse para a pesquisa. Portanto, descrevem-se as principais características da rede de Petri (MURATA, 1989), da rede Canal-Agência (BELAN, 2007) e por último da metodologia *Production Flow Schema* e *Mark Flow Graph* (PFS/MFG) (MIYAGI, 1996).

O quarto capítulo apresenta o método de verificação *Model Checking*. Assim, explicam-se as particularidades deste método e o formalismo utilizado para representar o comportamento esperado do circuito. Este capítulo também apresenta os programas disponíveis para realizar o processo de verificação e finalmente expõe as vantagens e limitações do *Model Checking*.

O quinto capítulo introduz as características de interesse para a pesquisa sobre os sistemas hidráulicos. Principalmente, enfatiza-se no projeto de circuitos hidráulicos e os erros que podem ser gerados visto que é um processo que depende da intuição e experiência do projetista.

O sexto capítulo apresenta o método proposto para a verificação da concepção dos circuitos hidráulicos, sendo detalhados os processos para obter a representação formal do circuito hidráulico e a especificação do comportamento. Além disso, descreve-se como é realizado, no *software*, o processo de verificação. Por último, este capítulo expõe as limitações do método proposto.

O sétimo capítulo, apresenta exemplos básicos com o intuito de ilustrar a aplicação do método proposto. Finalmente o oitavo e último capítulo discute os resultados obtidos e faz sugestões para trabalhos futuros.

2 SISTEMAS AUTOMÁTICOS

Neste capítulo descreve-se sobre os sistemas automáticos, área onde estão inclusos os sistemas hidráulicos visto que estes são constituídos por componentes mecânicos, eletrônicos e de controle. A combinação concorrente destas tecnologias permite que estes sistemas sejam altamente utilizados em diversas áreas. Assim, é importante o uso de modelos para o entendimento do sistema por especialistas de diferentes áreas. Igualmente, é de suma relevância ter certeza do correto funcionamento do sistema mediante o uso de métodos de verificação.

O capítulo é composto por três seções principais. Inicialmente apresenta-se o conceito de sistema e sistema automático. Nesse contexto, descrevem-se as diferentes definições, características e particularidades. Na segunda seção define-se o que é um modelo e posteriormente detalha-se sobre as perspectivas utilizadas para a modelagem de sistemas em geral. Além disso, nesta seção, apresenta-se o modelo genérico para os sistemas automáticos. Na terceira seção se apresenta o conceito de verificação de sistemas e realiza-se uma comparação entres os três métodos de verificação mais utilizados: simulação, teste e verificação formal.

2.1 DEFINIÇÃO DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS

Antes de definir o que é um sistema automático é importante explicar o conceito de sistema. Hall e Fagen (1951, p.1, tradução nossa) apresentam o seguinte conceito: “um sistema é um conjunto de *objetos* com *relações* entre eles e seus *atributos*”. Esta definição proposta por Hall e Fagen (1951) foi uma das primeiras, mas tal como eles apontam é muito geral. Portanto, para o interesse da pesquisa apresenta-se o seguinte conceito:

Sistema é um conjunto finito de elementos reunidos para formar um todo sob certas regras bem definidas, por meio das quais existem determinadas relações precisas e definidas entre os elementos e para com seu ambiente. É possível que um sistema possa conter elementos isolados (i. e. elementos com nenhuma relação com outros), ou grupos isolados de elementos (i. e. o grupo não tem relações com outros elementos ou grupos dentro do conjunto). Os termos elemento e sistema são relativos. Um elemento também pode

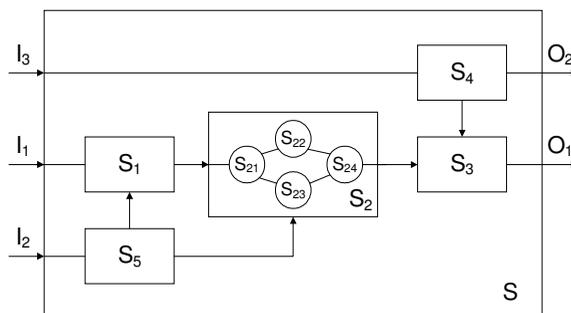
ser considerado como um sistema, e um sistema pode ser considerado como um elemento dentro de um sistema maior. Consequentemente, os sistemas são hierárquicos (HUBKA; EDER, 1988, apud DE NEGRI, 1996, p.24).

Com o propósito de uma melhor compreensão das definições de sistema de Hall e Fagen (1951) e de Hubka e Eder (1988, apud DE NEGRI, 1996, p.24), é importante entender os conceitos de objeto ou elemento, atributos e relações. Os *objetos* ou elementos são os componentes dos sistemas. Estes objetos podem ser de origem física, tais como botões, atuadores, entre outros e também podem ser de origem abstrata como equações, variáveis, processos, etc. Por outro lado, os *atributos* são as propriedades dos objetos. Por exemplo, no caso dos botões o atributo seria o estado em que se encontra. Finalmente, as *relações*, são aquelas que permitem que um determinado conjunto de objetos possa conformar um sistema (HALL; FAGEN, 1951).

Do conceito de Hubka e Eder (1988, apud DE NEGRI, 1996, p.24), é possível concluir também que cada parte que conforma um sistema pode ser considerada como um *subsistema*, isto é, um conjunto de objetos e relações entre eles e seus atributos. Da mesma forma, um objeto pode ser considerado também como um sistema. Deste modo, os sistemas têm níveis de organização, à medida que o sistema é desintegrado ou subdividido vai passando de uma menor a uma maior complexidade. No caso inverso, à medida que se integram os subsistemas em sistemas maiores se ganha uma maior compreensão do sistema completo e as relações que existem entre as partes que o conformam. Na Figura 3 (PAHL; BEITZ, 2007), apresenta-se um exemplo de um sistema hierárquico, o qual permite ilustrar o descrito anteriormente. Este sistema está constituído por cinco subsistemas: S1, S2, S3, S4 e S5. Da mesma forma, o subsistema S2 está composto por quatro subsistemas ou objetos: S21, S22, S23 e S24.

Outra característica importante do sistema é que tem uma fronteira mediante a qual se relaciona com seu *meio externo*. Este meio externo é o conjunto de objetos cujas mudanças das suas atribuições afetam o sistema e, ao mesmo tempo, o comportamento do sistema pode afetar estas atribuições. No caso do exemplo da Figura 3, a interação com o meio externo ocorre mediante as entradas: I1, I2, I3 e, também, mediante as saídas: O1, O2.

Figura 3. Estrutura de um sistema hierárquico.



Fonte: Pahl e Beitz (2007).

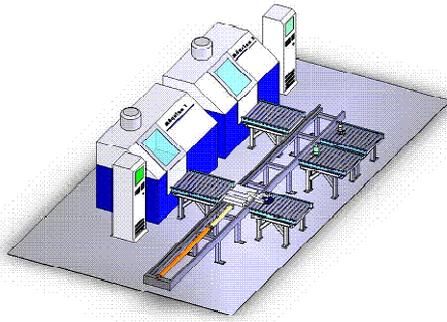
Um sistema de particular interesse para esta pesquisa é o sistema automático. Segundo De Negri, (1996, apud DE NEGRI; SANTOS, 2007) o sistema automático define-se como um conjunto de componentes interconectados que realizam as ações físicas juntamente com as funções de controle e processamento de informações. Além disso, estes sistemas também são conhecidos como sistemas de automação e/ou controle.

A automação permite observar o problema sob uma perspectiva discreta. Dessa forma, o sistema automático, sob esta visão, tem a função principal da realização de uma ou mais *ações* conforme uma lógica predeterminada e em resposta ao estado em que se encontra o equipamento e a ocorrência de *eventos*. As *ações* podem ser consideradas como as saídas ou as respostas do sistema automático. Por outro lado, os *eventos* correspondem aos sinais decorrentes da mudança do estado de um dispositivo (DE NEGRI; SANTOS, 2007).

Por sua vez, o controle permite observar o problema mais detalhadamente, avaliando-se a resposta de qualquer variável ao longo do tempo. Portanto, o sistema automático, sob esta perspectiva, tem a função principal da realização de uma ou mais *ações* que são observadas ao longo do tempo e cuja modificação decorre da aplicação de sinais de entrada (DE NEGRI; SANTOS, 2007).

Na Figura 4 pode-se observar uma célula de manufatura. Segundo De Negri e Santos (2007), este é um exemplo de um sistema automático devido à integração de elementos mecânicos, eletrônicos e de controle, como esteiras, máquinas CNC, controlador lógico programável, entre outros.

Figura 4. Ilustração de uma célula de manufatura.



Fonte: De Negri e Santos (2007).

2.2 MODELAGEM DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS

Conforme apresentado acima, os sistemas automáticos podem ser muito complexos e difíceis de entender. Por causa disto, precisa-se de descrições simplificadas que enfatizem certas propriedades do sistema enquanto outras, que não são do interesse do projetista, são suprimidas com o objetivo de facilitar o projeto e/ou a análise dos sistemas. Estas descrições simplificadas dão origem aos modelos (BOOCH, 1991, apud DE NEGRI, 1996, p.31).

O uso de modelos na área tecnológica é muito importante porque permite discutir mudanças e correções dos requerimentos do usuário a custo baixo e com o mínimo risco. Com custo baixo, porque o sistema ainda não está implementado e com o risco mínimo, porque as mudanças podem ser realizadas mais facilmente nos modelos do que sobre um sistema implementado.

2.2.1 Definição de modelo

Os modelos são abstrações da realidade que têm o objetivo de facilitar a compreensão dos sistemas complexos. Estes modelos permitem representar determinadas características do sistema sob estudo. Um conceito de modelo apresenta-se a seguir:

Um modelo é a interpretação explícita do entendimento de uma situação ou meramente das ideias acerca daquela situação. Este pode ser

expresso usando as matemáticas, os símbolos ou as palavras, mas essencialmente é uma descrição de entidades, processos ou atributos e as relações entre eles. Este pode ser prescritivo ou ilustrativo, mas acima de tudo precisa ser útil (WILSON, 1984, apud DE NEGRI, 1996, p.32).

Portanto, segundo o Wilson (1984, apud DE NEGRI, 1996, p.32), o importante é que todos os modelos atinjam o objetivo de simplificar o entendimento dos sistemas, sem importar as ferramentas ou técnicas que tenham sido utilizadas para sua obtenção. Heylighen (1993, p. 1, tradução nossa), confirma o argumento anterior ao declarar “[...] modelos que tentam representar o ambiente de tal modo que, permitam simplificar ao máximo a resolução de problemas”.

2.2.2 Perspectivas para modelagem

Os modelos podem ser desenvolvidos mediante a aplicação de uma ou mais perspectivas (pontos de vista). Sendo assim, os meios de modelagem aplicados nos sistemas complexos como os sistemas automáticos, seguem fundamentalmente as perspectivas funcional, estrutural e comportamental. A junção destes três tipos de modelo permite fornecer a descrição completa do sistema e, ao mesmo tempo, facilita a integração das informações destes sistemas com outras ferramentas de análise de projeto (DE NEGRI, 1996).

Na metodologia de projeto apresentada por Rodenacker (1971 apud CHIANG; PENNATHUR; MITAL, 2001) originou-se os conceitos de função, estrutura e comportamento (ZHANG; LIN; SINHA, 2011). Assim, a proposta de Rodenacker (1971 apud CHIANG; PENNATHUR; MITAL, 2001) permitiu o desenvolvimento de muitas pesquisas sobre as perspectivas funcional, estrutural e comportamental para a modelagem de sistemas. Algumas das pesquisas mais importantes são de: Gero (1990), Umeda *et al.* (1990), Brown (2003), Gero e Kannengiesser (2003), Zhang, Lin e Sinha (2011), Goel, Rugaber e Vattam (2009), Hashem e Mioduser (2013). Na sequência, descrevem-se em maior detalhe estas três perspectivas.

2.2.2.1 Perspectiva Funcional

Com a finalidade de entender a perspectiva funcional, é importante definir o que é função. Múltiplas pesquisas definem o termo função, a seguir apresentam-se algumas delas:

“[Define-se] a função como uma descrição do comportamento captada pelo reconhecimento humano, embora o comportamento de modo como este seja utilizado. Ou seja, uma função [...] está representada sob a forma de fazer algo” (UMEDA *et al.*, 1990, p. 183, tradução nossa).

“[Define-se] o termo função como a relação de entrada / saída de um sistema cuja finalidade é a realização de uma tarefa” (PAHL; BEITZ, 2007, p. 31, tradução nossa).

O conceito de Umeda *et al.* (1990) refere-se ao propósito do objeto. No entanto, a definição de Pahl e Beitz (2007), baseia-se no conceito apresentado por Rodenacker (1971 apud CHIANG; PENNATHUR; MITAL, 2001). Ele define a função como a transformação de energia, matéria e informação, entre a entrada e a saída de um sistema. Esta última definição é aceita no projeto de sistemas, mas segundo Umeda *et al.* (1990) e Chiang, Pennathur e Mital (2001) tem limitações porque em alguns casos existem objetos ou sistemas onde não se apresenta a transformação de matéria, energia ou informação entre a entrada e a saída.

Por conseguinte, apresenta-se uma definição de função que permita reunir todos estes conceitos: a *função* de um objeto define-se como o propósito ou objetivo deste, sendo que o objeto em questão pode provocar um efeito sobre o ambiente externo. A influência sobre o meio externo involucra o processamento de matéria, energia e/ou informação.

Além da definição de função é importante, também, considerar que os sistemas são hierárquicos (HUBKA; EDER, 1988, apud DE NEGRI, 1996, p.24). Em virtude disso, os sistemas têm uma função global que é o resultado da função de cada um dos seus componentes e como estes estão interligados entre si.

Portanto, a perspectiva funcional permite estabelecer a função de cada componente no sistema e a inter-relação entre elas para que um sistema atenda a uma função global. Os modelos desenvolvidos usando uma perspectiva funcional permitem responder a pergunta: **O que o sistema faz?** (DE NEGRI; SANTOS, 2007).

2.2.2.2 *Perspectiva Estrutural*

Define-se como estrutura de um sistema o conjunto de componentes interligados de uma forma significativa. Além disso, a estrutura do sistema considera uma fronteira que o isola do meio externo. (GOEL; RUGABER; VATTAM, 2009) (ZHANG, LIN, SINHA, 2011).

Dorst e Vermaas (2005, p.19, tradução nossa) confirma o conceito anterior de estrutura e adiciona o termo de materiais, ao inferir: “estrutura refere-se aos materiais dos componentes que o conformam, as dimensões destes materiais e a forma como estes materiais e componentes estão relacionados geometricamente”.

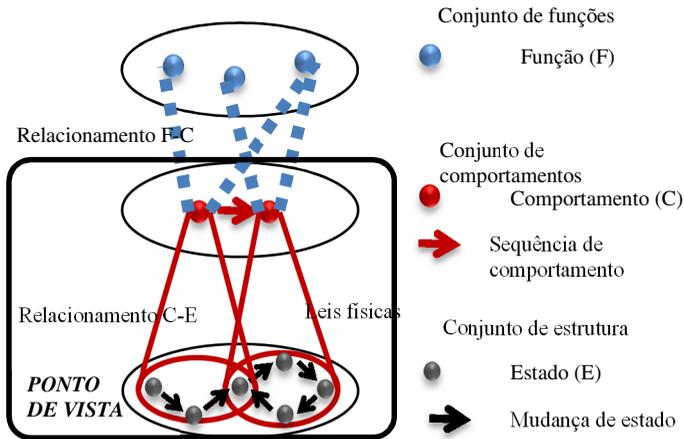
Por conseguinte, a perspectiva estrutural permite obter um modelo para descrever o projeto fisicamente, considerando seus componentes e as relações entre eles, sendo que estas podem ser de tipo físico, de comunicação ou de tipo hierárquico. Além disso, esta perspectiva também permite representar a geometria do sistema e as propriedades estruturais como tipo de material, cor, massa, área, entre outras. Este tipo de modelo responde à pergunta: **Onde as funções são implementadas?** (DE NEGRI; SANTOS, 2007).

2.2.2.3 *Perspectiva Comportamental*

O comportamento define-se como a maneira como os sistemas agem sobre o meio externo em resposta a uma entrada e considerando as condições internas do sistema. No caso dos sistemas que não têm memória (não têm armazenamento de energia), se consideram como sistemas com comportamento instantâneo já que sua resposta apenas depende da entrada e não se identifica condições internas. Esta perspectiva permitirá obter modelos que possam responder a pergunta: **Como ou quando a função do sistema é executada?** (GOEL; RUGABER; VATTAM, 2009) (DE NEGRI; SANTOS, 2007).

Em suma, a relação entre as três perspectivas, que permitem uma descrição completa dos sistemas, é mostrada na Figura 5 (TAKEDA *et al.*, 1994). Como pode ser observado, o conjunto de funções de um sistema está baseado no seu comportamento e este, por sua vez, é dependente de sua estrutura.

Figura 5. Relação entre função, comportamento e estrutura.



Fonte: Adaptado de Takeda *et al.* (1994).

2.2.3 Modelagem genérica dos Sistemas Automáticos

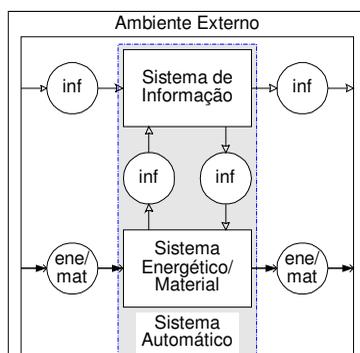
Dentro de qualquer sistema pode-se identificar três categorias de elementos que fluem e se transformam: matéria, energia e informação (RODENACKER, 1971 apud CHIANG; PENNATHUR; MITAL, 2001). A matéria é um conceito de origem física que pode ter propriedades como cor, peso, forma, etc. Da mesma forma, a energia, tem um conceito de origem física e frequentemente se manifesta como energia elétrica, mecânica, hidráulica, entre outras. Por último, a informação está relacionada à interpretação de fatos e ao termo sinal, que é a forma física como a informação é transmitida.

“Os sistemas estão destinados a alcançar algum objetivo ou conjunto de objetivos a través da manipulação e controle de matéria, energia e informação” (FREDERICK; CARLSON, 1971, apud DE NEGRI, 1996, p.37).

Por conseguinte, conforme o descrito por Frederick e Carlson (1971, apud DE NEGRI, 1996, p.37) e por Rodenacker (1971 apud CHIANG; PENNATHUR; MITAL, 2001), os sistemas automáticos também se encarregam de manipular energia, matéria e informação

dentro de um processo específico, com o propósito de provocar uma mudança no ambiente externo do sistema. Sendo assim, o sistema automático pode ser modelado estruturalmente como um **subsistema energético/material** acoplado a um **subsistema de informação** através de canais de informação internos. Simultaneamente, ambos os subsistemas interagem com o ambiente externo mediante o recebimento e fornecimento de energia, matéria e/ou informação, conforme pode ser observado na Figura 6 (DE NEGRI, 1996).

Figura 6. Representação de um sistema automático usando rede C-A.



Fonte: De Negri (1996).

No **subsistema energético/material** acontece a transformação dos recursos por meio de máquinas e de dispositivos que transformam energia e/ou matéria. Entretanto, o **subsistema de informação** abarca os equipamentos que processam sinais e dados, tais como computadores e controladores lógicos programáveis. Estes equipamentos são capazes de extrair informações do subsistema energético/material, processá-las e, posteriormente, utilizá-las para alterar o funcionamento deste (DE NEGRI, 1996).

2.3 VERIFICAÇÃO DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS

Visto que o uso de sistemas automáticos vem crescendo continuamente em diversos setores industriais, isto tem motivado aos pesquisadores a desenvolver técnicas e ferramentas para a verificação do seu correto funcionamento. Assim, essas técnicas e ferramentas de verificação têm o intuito de facilitar a análise dos sistemas automáticos.

A verificação é a confirmação de que os requisitos especificados, no início do projeto, foram cumpridos. Portanto, segundo o Lam (2005), o processo de verificação inicia com uma implementação e confirma se esta satisfaz determinadas especificações. A verificação permite responder a pergunta: **O sistema está construído corretamente?**

Os métodos mais utilizados para verificar o correto funcionamento de um sistema são: simulação, teste e verificação formal (KATOEN, 1999). A seguir, apresentam-se em maior detalhe estes três métodos.

2.3.1 Simulação e teste

Segundo Cvijanovic (2011), a simulação e o teste são as técnicas mais empregadas para assegurar o bom funcionamento de um sistema, porém estes métodos têm suas limitações. Estes dois métodos usam o procedimento de tentativa e erro para descobrir falhas no sistema, o que pode levar uma grande quantidade de tempo para verificar todas as combinações possíveis ou sequência de entradas. É importante notar que, no caso de sistemas grandes e muito complexos será inviável simular ou testar todas as combinações possíveis (KATOEN, 1999). Além disso, com a simulação e o teste, o projetista concentra-se em como o sistema pode falhar e não em que funcione do modo certo.

A seguir, descreve-se a diferença entre simulação e teste (KATOEN,1999):

- A *simulação* usa representações abstratas, isto é, modelos, que ajudem a entender melhor os processos, a arquitetura ou a operação de fluxo do sistema antes de investir tempo e dinheiro no desenvolvimento de um sistema real.
- O *teste*, por outro lado, é realizado sobre o produto físico permitindo executar diferentes cenários e validar se os resultados estão corretos.

Conforme apresentado acima, a simulação e o teste não são procedimentos exaustivos porque cobrem apenas um conjunto limitado de possíveis comportamentos. Consequentemente, eles não oferecem garantias de segurança e qualidade. Diante dessa situação, o uso da verificação formal se apresenta como alternativa.

2.3.2 Verificação formal

A verificação formal é uma técnica que tem como objetivo determinar o correto funcionamento de um sistema e garantir que todos seus possíveis comportamentos tenham sido testados. Os métodos matemáticos são a base para a verificação formal. Estes permitem verificar se um sistema está livre de erros com relação a alguma propriedade. Assim, este método utiliza o modelo do sistema e a especificação da propriedade que descreve o comportamento esperado. Finalmente, com a verificação formal é possível determinar se o modelo satisfaz esta especificação (KATOEN, 1999).

Visto que a verificação formal utiliza métodos matemáticos, pode-se assegurar o seguinte: se o método indica que o sistema é correto em relação a uma determinada especificação, então o sistema é de fato correto. Do mesmo modo, se o método de verificação afirma que um sistema não é correto, então existe de fato um erro no sistema.

Por outro lado, segundo Sanghavi (2010), na verificação formal, o projetista concentra-se apenas em que o sistema se comporte corretamente e não em como este pode falhar. Além disso, a verificação formal permite verificar sistemas que não estão completamente terminados. Nesses casos, pode-se ajudar ao projetista a encontrar erros que podem afetar o correto funcionamento do sistema final.

Em resumo, a verificação formal precisa de (KATOEN, 1999):

- Um modelo do sistema geralmente constituído por um conjunto de estados e transições.
- Um método para formalizar as propriedades.
- Um conjunto de regras para determinar se o modelo satisfaz as especificações.

Existem diferentes técnicas de verificação formal, entre elas destaca-se: a verificação de equivalências (KÜHLMANN; KROHM, 1997, apud BIERE, 2001), a prova de teoremas (KAUFMANN; MANOLIOS; MOORE, 2000, apud BIERE, 2001) e o *Model Checking* (CLARKE; GRUMBERG; PELED, 1999). Este último método é de interesse para a pesquisa, portanto, será explicado no capítulo quatro.

3 FERRAMENTAS PARA A MODELAGEM DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS

Com o objetivo de facilitar a análise de sistemas automáticos, utilizam-se modelos para representar as perspectivas funcional, estrutural e comportamental (DE NEGRI; SANTOS, 2007). Assim, empregam-se diversas ferramentas para sua obtenção como, por exemplo, rede de Petri (MURATA, 1989), rede Canal- Agência (DE NEGRI, 1996), *Production Flow Schema* e *Mark Flow Graph* (MIYAGI, 1996).

O capítulo é composto por três seções principais. Na primeira seção descreve-se a rede de Petri, suas definições, regras de disparo, e propriedades. Logo, na segunda seção, define-se a rede Canal-Agência e apresenta-se um exemplo para entender como é utilizada na modelagem de sistemas. Por último, na terceira seção, explica-se a metodologia *Production Flow Schema* e *Mark Flow Graph*. Nesta seção, também é apresentado um exemplo para uma melhor compreensão.

3.1 REDE DE PETRI

A rede de Petri é uma ferramenta de modelagem gráfica e matemática de sistemas. Segundo Wang (2007), o termo de RP surgiu em 1962, na área das ciências da computação, dentro da dissertação de Carl Adam Petri. Desde essa data até a atualidade têm existido muitas pesquisas, tutorias, livros e conferências sobre a RP, devido às múltiplas vantagens que apresentam. Conseqüentemente, hoje em dia, a RP constitui uma das ferramentas fundamentais para a modelagem de sistemas automáticos.

3.1.1 Descrição

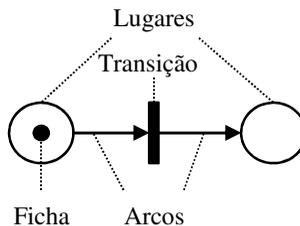
O modelo básico da RP, também chamado RP lugar/transição, pode ser representado graficamente e matricialmente. Na Figura 7, apresenta-se a *representação gráfica* da RP. Nesta representação, a RP está associada a um grafo bipartido com os seguintes elementos principais (CARDOSO; VALETTE, 1997):

- *Lugares* que são representados por círculos. Estes lugares são interpretações de condições, procedimentos, estados parciais, entre outros. Estes podem ter um elemento chamado *ficha* ou marca, representado como

pontos negros. A presença de uma ficha ou marca em um lugar é interpretada como a verificação da condição associada a esse determinado lugar. No caso de ausência da ficha, a condição associada a esse lugar é falsa. Ainda por cima, as fichas também podem representar um recurso ou peça em um determinado estado do sistema.

- *Transições* que são representadas por barras retangulares. As transições estão associadas a um evento que ocorre no sistema.
- *Arcos* dirigidos, os quais permitem unir as transições com os lugares e vice-versa. É importante notar que não pode existir nenhuma ligação lugar-lugar ou transição-transição. Além disso, cada arco dirigido possui um número que indica seu peso, o qual determina a quantidade de fichas que consome de um lugar ou que deposita em um lugar, sempre que se tenha disparado ou executado uma transição. Os arcos dirigidos que não tenham um número consomem e depositam apenas uma marca (CARDOSO; VALETTE, 1997).

Figura 7. Representação gráfica de uma rede de Petri.



Fonte: Elaborada pelo autor.

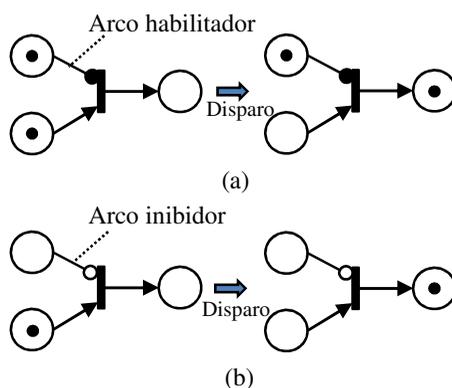
Além dos elementos básicos da RP, apresentados anteriormente, existem outros elementos que permitem melhorar a funcionalidade da modelagem de sistemas usando RP. Neste trabalho são de principal interesse os arcos inibidores e habilitadores.

Um arco inibidor (Figura 8a) conecta um lugar a uma transição e é representado por uma linha que termina com um pequeno círculo em lugar de uma seta como no caso dos arcos regulares. O arco inibidor

desabilita a transição quando o lugar de entrada tem uma ficha. Por sua vez, a transição é permitida quando o lugar de entrada, ligado à transição usando arco inibidor, não tem ficha e os outros lugares de entrada, ligados mediante arcos regulares, têm pelo menos uma ficha por peso do arco (BLUME *et al.*, 2007).

Da mesma forma, um arco habilitador (Figura 8b) conecta um lugar a uma transição e é representado por uma linha que termina com um pequeno círculo em lugar de uma seta como no caso dos arcos regulares. Ao contrário do arco inibidor, este tipo de arco habilita a transição quando o lugar de entrada tem uma ficha. Assim, a transição é permitida somente se o lugar de entrada, ligado à transição usando arco habilitador, tem ficha e os outros lugares de entrada, ligados com arcos regulares, também têm pelo menos uma ficha por peso do arco. É importante notar que nenhuma ficha é removida através de um arco habilitador quando a transição é disparada (MIYAGI, 1996).

Figura 8. Arcos habilitadores e inibidores. (a) Exemplo de uma rede de Petri usando arco habilitador; (b) Exemplo de uma rede de Petri usando arco inibidor.



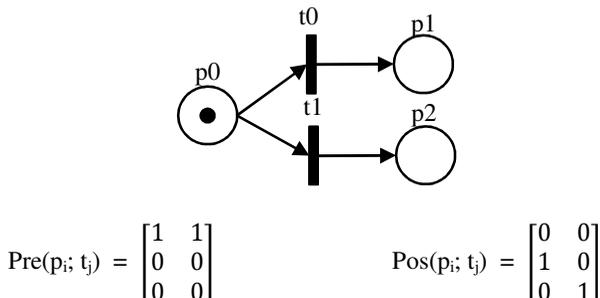
Fonte: Elaborada pelo autor.

O comportamento das RP pode ser descrito em termos dos seus estados e suas mudanças. O estado do sistema na RP, isto é, a repartição das fichas, muda conforme as seguintes regras de execução ou de disparo (MURATA, 1989) (SAMANTA; SARKAR, 2012):

- Uma transição é habilitada se somente se existe pelo menos uma ficha por peso do arco no lugar de entrada desta transição.
- Uma transição habilitada pode ou não ser executada (isto depende apenas do caráter não determinístico do evento)
- A execução de uma transição habilitada remove as fichas de todos seus lugares de entrada, considerando o peso do arco dirigido, e agregam fichas a todos seus lugares de saída, também considerando o peso do arco dirigido.

Na *representação matricial* das RP, utiliza-se uma matriz de incidência anterior e outra matriz de incidência posterior. A matriz de incidência anterior está constituída pelos elementos $a_{ij} = \text{Pre}(p_i; t_j)$ que indicam o peso do arco ligando o lugar de entrada p_i à transição t_j . Por outro lado, a matriz de incidência posterior está constituída pelos elementos $b_{ij} = \text{Pos}(p_i; t_j)$ que indicam o peso do arco ligando a transição t_j ao lugar de saída p_i (CARDOSO; VALETTE, 1997). Seguidamente, na Figura 9 apresenta-se um exemplo básico de uma RP e suas matrizes de incidência anterior e posterior.

Figura 9. Rede de Petri e sua representação matricial.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Além da descrição da RP usando representações gráficas e matriciais, uma RP pode-se definir formalmente como uma quintupla (Equação 1):

$$RP = (P, T, F, W, M_0) \quad (1)$$

Onde:

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ é o conjunto finito de lugares.

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ é o conjunto finito de transições.

$F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ é o conjunto de arcos dirigidos.

$W: F \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$ é uma função do peso dos arcos.

$M_0: P \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$ é a marcação inicial da rede.

A marcação inicial de uma RP é o conjunto de fichas que possui cada lugar da rede no seu início. Uma RP com a estrutura (P, T, F, W) sem especificar sua marcação inicial é denotada por N . Por outro lado, uma RP com uma marcação inicial dada é denotada por $RP = (N, M_0)$ (MURATA, 1989).

3.1.2. Principais propriedades dinâmicas

A capacidade de modelagem da RP decorre nas suas propriedades, as quais se dividem em duas grandes áreas: as dependentes da marcação inicial, chamadas propriedades dinâmicas ou do comportamento, e as propriedades independentes das marcações, chamadas estruturais ou estáticas (MURATA, 1989) (GIRAULT; VALK, 2003). Na sequência descrevem-se as principais propriedades dinâmicas da RP (MURATA, 1989).

Alcançabilidade. Os modelos dos sistemas usando RP permitem descrever se o sistema pode alcançar determinado estado ou se tem algum comportamento em particular. Uma RP terá a propriedade de alcançabilidade se puder atingir um determinado estado (conjunto de marcações) após uma sequência de disparos de transições a partir do estado inicial.

Limitação. Uma RP é limitada se o número de marcas da rede em cada lugar não excede de um número finito k para qualquer estado alcançável desde o estado inicial.

Segurança. Um lugar de uma RP é seguro se o número de fichas nesse lugar não excede a unidade. Portanto, uma RP é segura se todos os lugares da rede são seguros.

Vivacidade. Uma RP é viva se não importa qual estado tiver sido alcançado, sempre será possível uma nova sequência de execuções até alcançar outro novo estado. Esta propriedade indica que uma rede

garante uma operação livre de bloqueios (*deadlocks*). Esta propriedade é desejável na execução de programas.

Reversível. Uma RP é reversível se para cada estado existente dentro da rede, o estado inicial é alcançável desde esse estado.

3.1.2.1 Métodos de análise das propriedades dinâmicas da rede de Petri

Os métodos de análise das propriedades dinâmicas são três (MURATA, 1989):

- *Árvore de cobertura.* Ou também chamado árvore de alcançabilidade, o qual permite calcular todas as possíveis repartições de fichas.
- *Matriz de incidência.* Este método é utilizado para analisar a RP sem depender da repartição de fichas inicial, dando mais relevância para a estrutura da rede.
- *Regras de redução.* Este método permite converter sistemas complexos em sistemas simples preservando suas propriedades originais.

O primeiro método de análise é aplicável para todos os tipos de rede, mas deve-se ter cuidado com o tamanho da rede, pois é possível se apresente o problema de explosão de estados. Os outros dois métodos são poderosos, mas às vezes somente podem ser aplicados em certos tipos de RP (MURATA, 1989).

3.1.3 Vantagens e desvantagens

Uma vantagem da RP é que permite aos usuários descrever os sistemas fazendo uso de notações gráficas, o que permite um melhor entendimento e identificação dos estados, das ações e da relação de fluxo. Além disto, a RP pode ser usada em vários níveis de abstração, possibilitando a representação da estrutura e dinâmica de sistemas de maneira hierárquica. Por outro lado, a RP também apresenta desvantagens, como a dificuldade na sua análise e o fato de que o desenvolvimento dos modelos de sistemas usando RP não é uma tarefa simples (MURATA, 1989) (REISIG, 1992).

Outra desvantagem do modelo básico da RP é que carece de interpretação de sinais de entrada e de saída para a interação com o meio externo ou com o sistema de informação de um sistema automático. Consequentemente, uma RP não é a suficientemente adequada para o projeto de sistemas automáticos sendo requerido o uso das redes de Petri

interpretadas (RPI), as quais consideram o meio externo do processo. O termo “interpretadas” é utilizado para destacar o fato que a influência do meio externo no sistema está baseado nas entradas e saídas do sistema (CARDOSO; VALETTE, 1997). Dessa forma, apresenta-se o *Mark Flow Graph* (MFG) como extensão interpretada da RP para aplicação em diferentes níveis de modelagem.

Outras variantes da RP não contemplam o comportamento do sistema. A rede C-A e o *Production Flow Schema* (PFS) são exemplos de este tipo de variantes da RP, porém estes permitem a obtenção de uma representação em um nível conceitual. Assim, estas ferramentas são utilizadas como um primeiro passo no desenvolvimento de um modelo mais detalhado que considera a dinâmica do comportamento do sistema. (REISIG, 1992).

3.2 REDE CANAL – AGÊNCIA

A rede C-A é um grafo direcionado bipartido composto por dois elementos básicos: unidades ativas representadas por retângulos e unidades passivas representadas por círculos, os quais estão ligados por arcos direcionados que representam o fluxo de recursos como energia, matéria e informação. (DE NEGRI, 1996). Portanto, a importância do uso deste tipo de rede baseia-se na simplicidade dos elementos utilizados e também na sua fácil compreensão para qualquer usuário. A simbologia utilizada na rede C-A, para sua *representação gráfica*, pode ser observada na Figura 10.

Figura 10. Simbologia usada na rede Canal- Agência.

Elementos básicos			
Símbolo	Nome	Perspectiva Funcional	Perspectiva Estrutural
	Unidade Ativa	Atividade	Agência
	Unidade Passiva	Recurso	Canal
Arcos			
Símbolo	Tipo de recurso	Símbolo para canal oculto	
	Fluxo de informação		Canal de informação
	Fluxo de energia		Canal de energia
	Fluxo de matéria		Canal de matéria
	Fluxo de energia /matéria		Canal de energia/matéria

Fonte: Belan (2007).

A rede C-A permite obter o modelo do sistema usando as perspectivas funcional e estrutural. Na perspectiva funcional da rede C-A, as unidades passivas são os recursos que fluem pelo sistema como energia, matéria e a informação. Por outro lado, as unidades ativas correspondem às operações aplicadas sobre estes recursos. Na perspectiva estrutural da rede, as unidades passivas (canais) correspondem aos componentes do sistema que dão suporte para que os recursos possam fluir sem causar modificação no seu estado. As unidades ativas (agências) correspondem aos locais onde acontecem as atividades. É importante observar que a orientação indicada pelos arcos que acoplam estes elementos não tem significado sob o ponto de vista estrutural (DE NEGRI, 1996).

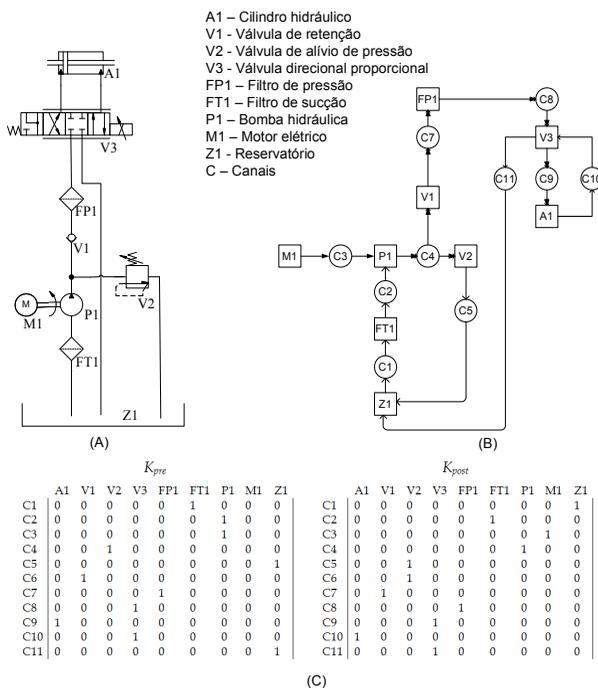
O apresentado anteriormente refere-se à representação gráfica, mas a rede C-A também pode ser representada matematicamente. No trabalho de Belan (2007), propõe-se um formalismo que permite a geração de uma *representação matricial* da rede C-A equivalente à representação gráfica. Nesta representação, apresentam-se a matriz anterior e a matriz posterior. A matriz anterior relaciona os canais precedentes de cada agência e por outro lado, a matriz posterior relaciona os canais posteriores de cada agência.

Com esta representação matricial, Belan (2007) propõe métodos que auxiliem na verificação do modelo, destacando-se o método de análise de coerência estrutural e o método de análise de coerência de fluxo de recurso.

- O método de análise de coerência estrutural tem o objetivo de verificar se não existe nenhuma ligação canal-canal ou agência-agência e também comprova se o tipo de arco está coerente com o tipo de recurso que o percorre. Da mesma forma, este método permite a determinação dos canais e agências de suprimento e/ou consumo de recursos.
- O método de análise de coerência de fluxo de recursos obedece ao princípio de conservação de massa e energia, a qual estabelece que “nada se perde, nada se cria, tudo se transforma”. Portanto, este método tem a função de verificar que todo recurso que entra no sistema deve poder sair, e também que todo recurso que sai do sistema deve ter como origem um canal de suprimento.

A proposta de Belan (2007) é aplicada para a modelagem e análise de uma pequena central hidroelétrica, com o objetivo de avaliar a eficiência e real utilidade. Sendo assim, e com o objetivo de demonstrar de uma maneira simples como é feita a modelagem usando rede C-A, a Figura 11 apresenta um exemplo extraído de Porciúncula (2009).

Figura 11. Exemplo de rede C-A: (a); Diagrama de circuito hidráulico; (b) Representação gráfica e (c) Representação matricial.



Fonte: Porciúncula (2009).

Este exemplo mostra a equivalência direta entre um circuito hidráulico e a sua representação gráfica e matricial usando rede C-A. Na representação gráfica, cada componente hidráulico é substituído por uma agência e cada interligação entre os componentes é substituída por um canal. Na representação matricial, têm-se as matrizes de incidência anterior e posterior descrevendo a relação entre os canais e agências conforme sua precedência ou posterioridade.

3.3 PRODUCTION FLOW SCHEMA / MARK FLOW GRAPH

Production Flow Schema / Mark Flow Graph (PFS/ MFSG) (MIYAGI, 1996) é uma metodologia que relaciona duas abordagens, portanto é importante iniciar com a definição de cada uma destas por separado para depois aprofundar na abordagem PFS/MFG.

3.3.1 Production Flow Schema

O *Production Flow Schema* é um grafo bipartido que permite a representação em um nível conceitual de abstração do sistema sem considerar sua dinâmica de comportamento. A ênfase do PFS está na identificação dos componentes ativos e passivos do sistema, como o fluxo de itens (“coisas”) entre estes elementos. O fluxo de itens representa o processo de vinculação e desvinculação de itens a uma atividade e em cuja execução estão envolvidos (MIYAGI, 1996).

Os elementos estruturais de um PFS são três: *atividade*, que representa os componentes ativos; *interatividade* ou distribuidor, que representa os componentes passivos; e *arco*, que indica a relação lógica entre os componentes do sistema. É importante indicar que, a diferença da RP, o PFS não possui o conceito de marcação ou ficha (MIYAGI, 1996) (GUSTIN *et al.*, 2002).

A Figura 12a mostra um exemplo de um sistema de atenção em um Centro de Saúde usando PFS. Neste modelo, identificam-se os elementos estruturais do PFS.

3.3.2 Mark Flow Graph

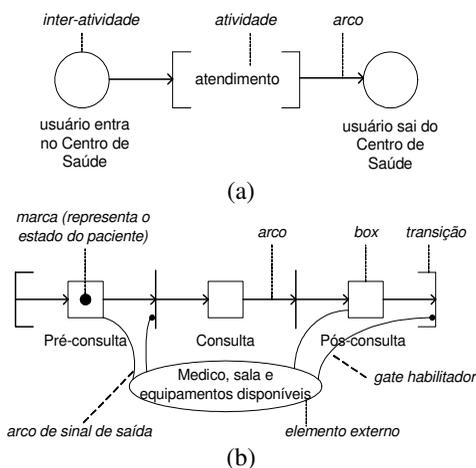
O *Mark Flow Graph* é uma técnica derivada da rede de Petri e permite a representação da dinâmica do sistema, além de considerar também as condições externas que afetam seu comportamento. Esta ferramenta é efetiva também para especificar e executar estratégias de controle.

Os elementos estruturais do MFG são: *marcas*, que indicam a manutenção de condições; *boxes*, que representam condições e (pré e póscondições) que podem estar associadas ao modo de operação ou à disponibilidade de um recurso do sistema; *transições*, que correspondem a um evento que causa a mudança de estado do sistema; *arcos*, os quais estabelecem relações causais entre os eventos e as condições ou vice-versa; *gates*, que habilitam ou inibem a ocorrência dos eventos correspondentes as transições; e *arco de sinal de saída*, que permite a

representação explícita da interação do grafo com elementos externos do modelo (MIYAGI, 1996) (GUSTIN *et al.*, 2002).

A Figura 12b mostra o modelo MFG do processo de *atendimento* para o exemplo do Centro de Saúde. Na figura também é possível identificar todos os elementos que conformam o modelo MFG.

Figura 12. (a) Exemplo de um PFS com a identificação de seus elementos estruturais (fluxo de pacientes que procuram um Centro de Saúde); (b) Exemplo de um MFG com a identificação de seus elementos estruturais (detalhamento funcional da atividade atendimento).



Fonte: Miyagi, Miyagi e Kasil (2001).

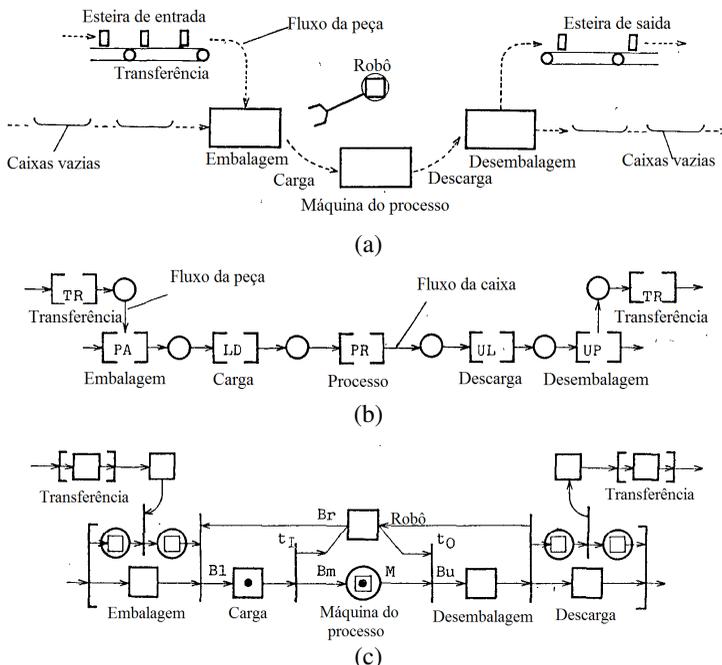
3.3.3 Metodologia PFS/MFG

Na metodologia PFS/MFG, o modelo conceitual, isto é o PFS, é devidamente convertido em um modelo do comportamento dinâmico do sistema, o MFG. Isto é feito usando uma abordagem *top-down*. Esta técnica consiste na modelagem de sistemas seguindo um procedimento sistemático baseado na interpretação hierárquica da estrutura e funções do sistema. Entre o modelo PFS e o modelo em MFG podem existir diversos níveis intermediários sendo que esta característica é útil para facilitar a compreensão geral do sistema e das implicações de cada setor (HASEGAWA; TAKAHASHI; MIYAGI, 1988).

A Figura 13 apresenta o modelo de um sistema usando a metodologia PFS/MFG. A descrição do sistema está apresentada na

Figura 13a, posteriormente com base nesta descrição é elaborado o PFS. Neste modelo (Figura 13b) se identificam sete atividades. A Figura 13c apresenta o MFG do sistema, onde é detalhado o comportamento dinâmico de determinadas atividades, como processamento, embalar e desembalar. O detalhamento do modelo depende do requerimento do projetista.

Figura 13. Exemplo de um sistema modelado usando a metodologia PFS/MFG. (a) Descrição do sistema; (b) PFS do sistema; (c) MFG do sistema.



Fonte: Adaptado de Hasegawa, Takashi e Miyagi (1988).

Diferentes pesquisas e trabalhos usam a metodologia PFS/MFG como base para o desenvolvimento dos métodos de projeto conforme o setor de aplicação. No trabalho de Munemassa e Miyagi, (1997) a metodologia PFS/MFG usa-se para propor uma forma de sistematizar a modelagem e análise quantitativa de sistemas de manufatura por rede de Petri estocásticas generalizadas. Por outro lado, no estudo de Gustin (1999), a metodologia PFS/MFG é aplicada para propor um método para

a modelagem de sistemas elevadores em edifícios inteligentes. Outro trabalho é de Miyagi, Miyagi e Kisil (2001), que utiliza a metodologia PFS/MFG para modelagem e análise de sistemas de saúde. Na pesquisa de Kaneshiro, Villani e Miyagi (2005), emprega-se a metodologia PFS/MFG para o projeto de sistemas de proteção contra incêndio. Igualmente no estudo de Igei *et al.* (2007), é proposta uma abordagem para a modelagem e análise de sistemas distribuídos e abertos para automação predial, baseada na tecnologia LonWorks. Finalmente, na pesquisa de Costa (2007), a metodologia PFS/MFG é aplicada para o projeto de um sistema supervisorio da planta de propulsão de um navio varredor.

As pesquisas apresentadas seguem, em geral, quatro etapas para a obtenção do modelo do sistema. A primeira etapa inicia com a descrição das características, os requisitos e as funções do sistema. Na segunda etapa, o sistema a ser modelado é definido e as informações do sistema são analisadas, por último, é verificada a validade e a viabilidade técnica do atendimento das necessidades. A terceira etapa consiste no desenvolvimento do modelo estrutural do sistema, identificando as partes que o compõem e seus subsistemas. Na quarta etapa são obtidos os modelos comportamentais, a partir do refinamento dos modelos estruturais, usando a metodologia PFS/MFG. Por último, analisa-se o comportamento dos modelos com a finalidade de validar e verificar se estes atendem os requisitos, por meio da simulação e da interpretação dos resultados.

Este capítulo apresentou algumas ferramentas disponíveis para a modelagem de sistemas automáticos sendo que cada uma de elas tem a suas vantagens e desvantagens e o uso de elas depende dos trabalhos onde serão aplicadas. Neste trabalho, em particular, para a modelagem dos sistemas se usa as ferramentas rede C-A e a RP lugar/transição. A primeira ferramenta é usada para a modelagem estrutural/funcional do sistema e a segunda é empregada para a modelagem comportamental.

4 MÉTODO PARA VERIFICAÇÃO DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS

Nesta dissertação, concentra-se no estudo de um método específico de verificação formal que está baseado no uso da lógica temporal: o *Model Checking*. Neste método, a participação do projetista é menor, comparado com a simulação e o teste, visto que a verificação é realizada de forma automática por *software*.

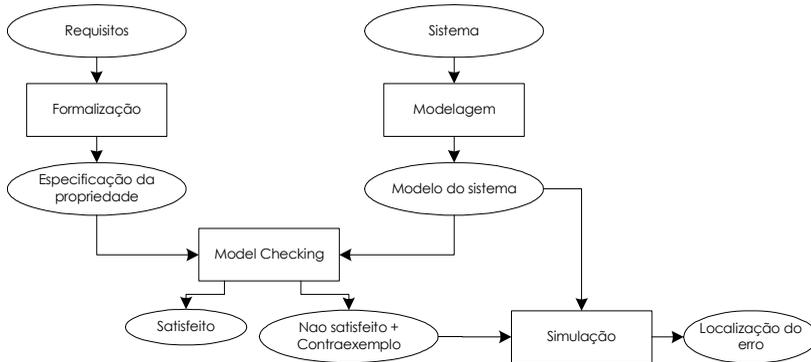
Assim, o capítulo é composto por quatro seções principais. Na primeira seção, descrevem-se o conceito e o processo do *Model Checking*. Na segunda seção, apresenta-se a lógica temporal, assim como as propriedades que podem ser expressas usando esta lógica. Posteriormente, detalham-se alguns formalismos da lógica temporal, como CTL*, *Linear Temporal Logic* (LTL), *Computational Tree Logic* (CTL), e os elementos que são empregados por estes formalismos para a especificação das propriedades. Na sequência, na terceira seção, mostram-se algumas ferramentas do *Model Checking*. Por fim, na última seção, as vantagens e limitações do *Model Checking* são explicadas.

4.1 MODEL CHECKING

O *Model Checking* é uma técnica de verificação formal que foi desenvolvida de forma independente por Clarke e Emerson, e também por Queille e Sifakis nos anos 1980. Este método foi concebido como uma técnica de verificação automática de sistemas de estado finito, mediante a realização de uma pesquisa exaustiva no espaço de estado do sistema, com o fim de determinar se o sistema cumpre certas especificações. Para atingir o objetivo de verificar automaticamente o correto funcionamento do sistema, o *Model Checking* utiliza algoritmos executados por *software* (CLARKE; GRUMBERG; PELED, 1999).

As etapas do *Model Checking* podem ser observadas na Figura 14 (BAIER; KATOEN, 2008). Assim, ao começar o processo de verificação formal usando *Model Checking*, o projetista deve dispor inicialmente da descrição do sistema e de seus requisitos ou propriedades do comportamento esperado.

Figura 14. Etapas do *Model Checking*.



Fonte: Adaptado de Baier e Katoen (2008).

Como se observa na Figura 14, o método pode iniciar pelo processo de *Formalização*. Nesta etapa, as propriedades devem ser transformadas em especificações usando um formato que possa ser entendido pelo algoritmo na etapa de verificação. Para descrever as propriedades podem-se usar as seguintes abordagens (BIERE, 2001):

- **Lógica temporal.** Nesta abordagem a descrição das propriedades é desenvolvida utilizando a lógica temporal cujo uso é frequente na verificação de *hardware* e *software*. Uma maior explicação sobre a lógica temporal é apresentada na seção 4.2.
- **Autômato.** A descrição operacional das propriedades é feita usando um grafo que descreva o seu comportamento.

Estas duas abordagens são complementares, pois algumas propriedades podem ser expressas mais facilmente usando a lógica temporal e outras usando autômatos.

Posteriormente, continua-se o processo de *Model Checking* com a *Modelagem* do sistema. Para obter o modelo do sistema podem-se utilizar diversas ferramentas, como a estruturas de *Kripke* (CLARKE, 2008) ou rede de Petri, o importante é que este modelo possa ser entendido pelo algoritmo usado na etapa da verificação.

Por sua vez, a etapa de *Verificação (Model Checking)* utiliza o *model checker* que permite a exploração exaustiva e facilita a verificação automática das especificações. O *model checker* faz uso de

diferentes algoritmos (BIERE, 2001) para poder realizar a verificação do sistema. No caso que o modelo satisfaça a especificação, pode-se continuar com a verificação de outras propriedades ou com o refinamento do modelo. Além disso, uma das características importantes nesta etapa é que se a especificação não é satisfeita, então, gera-se um exemplo que a refuta. Este exemplo detalha por que o modelo não satisfaz a especificação, e pode ser usado para identificar a origem do erro. Por fim, na etapa de simulação, o exemplo que refuta a especificação é reproduzido no modelo (CLARKE; GRUMBERG; PELED, 1999) (BAIER; KATOEN, 2008).

Conforme a explanação acima, é possível afirmar que o *Model Checking* apresenta as seguintes características (KŘENA; VOJNAR, 2013):

- *Automação*: não é necessária a ajuda humana para a verificação.
- *Robustez*: se um método de verificação afirma que um sistema é correto em relação a uma determinada especificação, então o sistema é de fato correto.
- *Confiabilidade*: se um método de verificação anuncia que um sistema não é correto, então existe de fato um erro no sistema.
- *Conclusão*: o método de verificação sempre termina.

4.2 LÓGICA TEMPORAL

Conforme descrito previamente, o processo do *Model Checking* é uma técnica automatizada que verifica se o sistema satisfaz uma propriedade. Para descrever as propriedades são empregados autômatos e a lógica temporal. Assim, nesta pesquisa concentra-se na descrição das propriedades usando a lógica temporal.

Em 1957, Arthur Prior escreveu um artigo influente, proclamando a necessidade de um formalismo bem simbólico para analisar questões filosóficas sobre o tempo. As expressões de tempo, como por exemplo, “em algum momento no futuro”, “sempre no futuro” ou “sempre no passado”, podem ser expressas utilizando a lógica temporal. Embora as origens de tal lógica estejam na filosofia, sua principal aplicação é na área de verificação formal. Amir Pnueli propôs, em 1977, usar a lógica temporal para especificar e pensar sobre problemas de sistemas complexos.

A lógica temporal (CLARKE; GRUMBERG; PELED, 1999) (DIAZ, 2013) permite especificar propriedades dinâmicas de um sistema sem a introdução explícita do tempo. A ideia é descrever sequências de transições de estado em um sistema que evolui com o tempo. Por exemplo: “eventualmente acontecerá A”, “nunca acontecerá P”, etc.

4.2.1 Propriedades usando a lógica temporal

As seguintes propriedades podem ser especificadas com a lógica temporal (BAIER; KATOEN, 2008):

- *Propriedade de alcançabilidade*: esta propriedade verifica se determinada condição pode ser atingida.
- *Propriedade de segurança*: permite-se corroborar se alguma situação ou evento nunca ocorrerá. Normalmente expressa requisitos que devem ser mantidos continuamente pelo sistema. São propriedades invariantes do sistema.
- *Propriedade de vivacidade*: verifica se algum evento acontece eventualmente. Requisitos que não devem ser mantidos continuamente, mas cuja realização eventual (ou continuada) se deve garantir. Esta propriedade é mais forte que alcançabilidade.
- *Propriedade de justiça*: confirma se um acontecimento ocorrerá infinitamente no sistema.
- *Propriedade livre de bloqueio*: expressa que um processo não pode estar em uma situação a partir da qual não pode evoluir.

Existem outras propriedades, como exclusão mútua, resposta e precedência, mas estas podem ser expressas fazendo o uso das propriedades mencionadas anteriormente.

4.2.2 CTL*, LTL e CTL

No contexto da lógica temporal existem diversos formalismos, alguns deles são: LTL, CTL e CTL*.

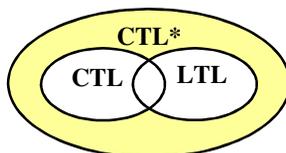
O CTL* (BAIER; KATOEN, 2008) especifica propriedades da árvore de computação de um sistema de transição. Esta árvore (infinita) é obtida através da designação de um estado do sistema como a raiz

(estado inicial) e mostra todas as possíveis computações a partir desse estado.

Por outro lado, o LTL é o subconjunto de fórmulas de caminho do CTL* (Figura 15) que são construídas apenas a partir das proposições atômicas que são aquelas que permitem dar informação sobre os estados. O LTL resolve o problema local do *Model Checking*: Dado um modelo de estrutura finita M , uma fórmula Φ e um estado “ s ” que pertence a M , determinar se “ s ” satisfaz Φ . Quanto ao CTL, este é o subconjunto de fórmulas de estado do CTL* (Figura 15) e está relacionado com a lógica da árvore de computação. O CTL resolve o problema global do *Model Checking*: Dado um modelo de estrutura finita M e uma fórmula Φ determinar o conjunto de estados em M que satisfazem Φ (KŘENA; VOJNAR, 2013).

É importante notar que não pode ser comparada a expressividade do LTL e do CTL, visto que existem propriedades em uma que não podem ser expressas na outra e vice-versa (BAIER; KATOEN, 2008). Um exemplo é a propriedade de equidade ou justiça já que esta propriedade não pode ser expressa em CTL.

Figura 15. CTL*, CTL e LTL.



Fonte: Elaborada pelo autor.

As fórmulas do LTL compreendem o uso dos seguintes elementos (KŘENA; VOJNAR, 2013):

- *Proposições atômicas*
- *Operadores booleanos*: constante (*True* ou *False*), negação (\neg), conjunção (\wedge), disjunção (\vee), implicação (\rightarrow) e bi-implicação (\leftrightarrow).
- *Operadores temporais*: são usados para descrever propriedades de um caminho na árvore de computação. Os operadores temporais são os seguintes:
 - X : faz referência a um próximo estado. Por exemplo, a fórmula $X\Phi$ indica que a propriedade Φ é válida no estado seguinte.

- F : faz referência ao futuro ou eventualmente. Por exemplo, a fórmula $F\Phi$ indica que a propriedade Φ eventualmente será válida.
- G : faz referência a global. Por exemplo, a fórmula $G\Phi$ indica que a propriedade Φ é válida em todo o caminho subsequente.
- U : algo acontece até que outra coisa aconteça. Por exemplo, a fórmula $\alpha U\Phi$ indica que a propriedade α é válida até que a propriedade Φ o seja.
- R (*Release*). Por exemplo, a fórmula $\alpha W\Phi$ indica quando a ocorrência de um estado onde α é válida liberta Φ de ser.

A mistura de vários destes operadores é a força da lógica temporal. No caso da mistura de F e G é muito usada para expressar propriedades de repetição. Por exemplo, a fórmula lógica $GF\Phi$ tem o significado de sempre no futuro, isto quer dizer que ao longo de uma execução infinitas vezes a propriedade Φ vai ser válida. Entretanto a fórmula lógica $FG\Phi$ significa que todo o tempo, a partir de um determinado momento, a propriedade Φ será válida.

As fórmulas do CTL devem estar precedidas pelos quantificadores de caminho que permitem quantificar sobre o conjunto de execuções. A quantificação sobre caminhos é dada pelos quantificadores “ A ” (para todos os caminhos) e “ E ” (existe um caminho). Estes quantificadores são usados em um estado particular do sistema de transição e posteriormente são avaliados na árvore de computação associada a esse estado (BAIER; KATOEN, 2008).

Além disso, é possível utilizar a combinação de operadores temporais com os quantificadores de caminho. Alguns exemplos de combinações são os seguintes (KŘENA; VOJNAR, 2013):

- $EF\Phi$ – Existe o caminho, no futuro, em que Φ é válida.
- $AF\Phi$ – É inevitável que Φ seja válida para todos os caminhos.
- $EG\Phi$ – Existe um caminho de execução que Φ sempre é válida.
- $AG\Phi$ – Para todas as execuções Φ sempre é válida.
- $AGF\Phi$ – Todas as execuções para todos os estados no futuro, a propriedade Φ será satisfeita.
- $AGEF\Phi$ – Para todas as execuções e para todos os estados, existe um caminho tal que no futuro a

propriedade Φ será satisfeita. Isto quer dizer que existem caminhos onde Φ não é alcançável.

4.3 FERRAMENTAS DO MODEL CHECKING

Hoje em dia existem muitas ferramentas (*model checkers*) disponíveis para executar a verificação de modelos. Portanto, o projetista deverá escolher a ferramenta apropriada dependendo do que ele deseje verificar. A seguir, no Quadro 1, apresenta-se algumas ferramentas de verificação. Neste quadro especifica-se o formalismo que utiliza cada ferramenta, tanto para a modelagem como para a propriedade.

Quadro 1. Ferramentas do *Model Checking*.

Ferramenta	Formalismo para modelagem	Formalismo para a propriedade
BANDERA (CORBETT <i>et al.</i> , 2000)	Java	CTL, LTL
KRONOS (DAWS <i>et al.</i> , 1996)	Autômatos	CTL com tempo
LTSA (MAGREE, 1999)	Sequências de ações (forma algébrica)	LTL
NUSMV (CIMATTI <i>et al.</i> , 1999)	<i>Symbolic Model Verification (SMV)</i>	CTL, LTL
SPIN (HOLZMANN, 1997)	Promela	LTL
TINA (BERTHOMIEU; RIBET; VERNADAT, 2004)	Rede de Petri	LTL
UPPAAL (BEHRMANN; DAVID; LARSEN, 2004)	Autômatos	CTL

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO MODEL CHECKING

O *Model Checking* apresenta muitas vantagens em comparação com outros métodos de verificação (CLARKE, 2008):

- O usuário do *Model Checking* não precisa desenvolver as provas do correto funcionamento do sistema. As únicas coisas que o usuário deve fornecer são: a descrição do sistema e a propriedade a ser verificada. Posteriormente, o processo de *Model Checking* é realizado de forma automática.
- O *Model Checking* é um processo rápido em comparação com outros métodos.
- Conforme descrito anteriormente, o processo de *Model Checking* proporciona exemplos de execução se a especificação não é satisfeita. Estes exemplos são de muita importância em sistemas complexos, visto que facilitam a identificação da origem do erro.
- Não é necessário especificar completamente o modelo do sistema para começar com o processo de verificação. O *Model Checking* pode ser usado durante o desenvolvimento de modelos de sistemas complexos.

O *Model Checking* também apresenta algumas limitações como, por exemplo, a dificuldade do uso de lógica temporal para a formalização de algumas propriedades. Outra limitação é que a verificação é feita sobre o modelo do sistema e, portanto, os resultados dependerão do processo de modelagem e se o modelo está realmente correto. Da mesma forma, se considera a possibilidade que o *model checker* apresente problemas no seu algoritmo e que os resultados não sejam os corretos. No entanto, a principal limitação do *Model Checking* é a explosão de estados, visto que o número de estados do sistema global pode ser muito grande. A maioria das pesquisas nesta área tem como objetivo encontrar alguma solução para este tema (BAIER; KATOEN, 2008).

O *Model Checking* será usado neste trabalho para realizar a verificação do projeto dos circuitos hidráulicos cujo modelagem é feito primeiro usando redes C-A e logo RP. Portanto, o TINA é o software escolhido para fazer o processo de verificação.

5 SISTEMAS HIDRÁULICOS

Este capítulo visa enfatizar as características dos sistemas hidráulicos que são de interesse para a pesquisa e é composto por três seções principais. Na primeira seção apresenta-se a definição de sistema hidráulico. Na sequência, na segunda seção, detalham-se alguns conceitos relacionados ao fluido hidráulico. Por último, na terceira seção, explica-se o processo de projeto de circuitos hidráulicos. Esta seção enfatiza nos erros que podem surgir durante o projeto tendo em consideração que é uma tarefa que depende da intuição e experiência do projetista.

5.1 DEFINIÇÃO DE SISTEMAS HIDRÁULICOS

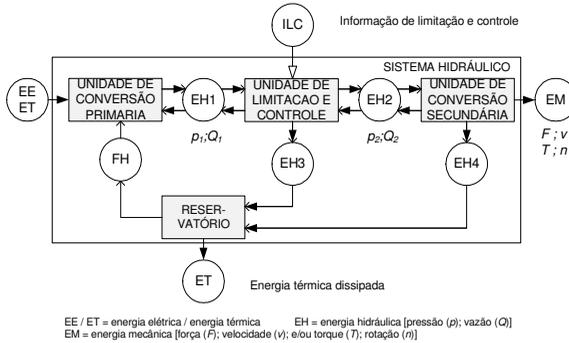
Segundo Linsigen (2008), “*um sistema hidráulico é um conjunto de elementos físicos convenientemente associados que, utilizando um fluido como meio de transferência de energia, permite a transmissão e controle de forças e movimentos*”. Com este conceito, pode-se concluir que um sistema hidráulico é, portanto, um sistema automático, pois está constituído por um conjunto de componentes interconectados, os quais têm como função principal converter a energia de entrada em uma energia mecânica útil.

A representação de um sistema hidráulico e o fluxo de energia, matéria e informação pode ser observada na Figura 16. A entrada de energia no sistema ocorre pela conversão de energia elétrica ou térmica em energia mecânica mediante o uso de um motor de acionamento. Na unidade de conversão primária (bomba) a energia mecânica é transformada em energia hidráulica (potência hidráulica = $p_1 Q_1$), sendo esta energia transferida ao fluido hidráulico. Entre as unidades de conversão primária e secundária encontra-se a unidade de limitação de controle (válvulas). Esta unidade controla a transmissão da energia hidráulica através de sinais de entrada externas e/ ou através de sinais de realimentação. Finalmente, a energia hidráulica é transformada em energia mecânica na unidade de conversão secundária (atuadores). Esta energia mecânica representada em forma de deslocamento será utilizada em acionamentos mecânicos para diversos fins.

Os sistemas hidráulicos, descritos em Linsigen (2008), podem ser complementados com dispositivos elétricos e eletrônicos, tais como válvulas de solenoide, sensores e interruptores elétricos, entre outros.

Também é possível o uso de controladores industriais, onde é programada a lógica de funcionamento do sistema.

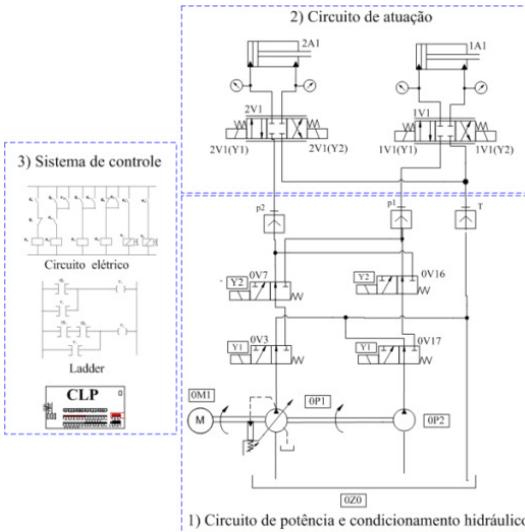
Figura 16. Sistema hidráulico genérico. Fluxo de energia, matéria e informação.



Fonte: Linsingen (2008).

Em outro ponto de vista, os sistemas hidráulicos podem ser subdivididos em três módulos conforme pode ser observado na Figura 17.

Figura 17. Módulos de um sistema hidráulico.



Fonte: Porciúncula (2009).

O *circuito de potência e condicionamento do fluido*, onde estão o motor e a bomba, tem a finalidade de converter energia elétrica em energia hidráulica controlada. Entretanto, o *circuito de atuação*, constituído pelas válvulas e os atuadores, tem a função de controlar e converter energia hidráulica em energia mecânica. Finalmente o *módulo de controle*, envolve o circuito elétrico e a programação implementada nos dispositivos eletrônicos. Este módulo tem a função de controlar as operações dos circuitos de atuação e de potência.

5.2 FLUIDOS HIDRÁULICOS

Conforme o explicado na seção anterior, o fluido hidráulico é o líquido utilizado como meio de transferência de energia para a transmissão e controle de forças e movimentos. Desta forma, pela importância da função do fluido em um sistema hidráulico e pelo interesse da pesquisa no comportamento do mesmo, é importante descrever os conceitos de algumas das suas variáveis como: pressão e vazão volumétrica.

5.2.1 Pressão

Define-se a pressão (Equação 2), em um fluido em repouso, como a força normal por unidade de área exercida em uma superfície plana imersa no fluido e é criada pelo bombardeamento de moléculas de fluido nesta superfície (MUNSON; YOUNG; OKIISHI, 1999).

$$p = \frac{F}{A} \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (2)$$

Onde:

F = força [N]

A = área da superfície [m²]

5.2.2 Vazão volumétrica

Define-se por vazão volumétrica (Equação 3) ao produto entre a velocidade média com que um fluido se desloca em uma tubulação e a área da seção transversal desta (MUNSON; YOUNG; OKIISHI, 1999).

$$Q = v \cdot A \text{ [m}^3\text{/s]} \quad (3)$$

Onde:

v = velocidade do fluido [m/s]

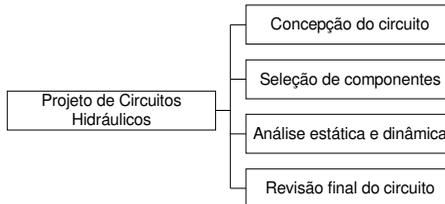
A = área da seção transversal [m²]

5.3 PROJETO DE CIRCUITOS HIDRÁULICOS

O projeto de sistemas hidráulicos é tratado como um projeto de sistemas automáticos. Este projeto envolve atividades de diferentes domínios tecnológicos e há necessidade do envolvimento de diversos especialistas.

Segundo Nakashima e Baba (1989), o projeto tradicional de circuitos hidráulicos é um processo feito em quatro etapas (Figura 18): concepção do diagrama do circuito; seleção de componentes; análise estática e dinâmica; e por último a revisão final. Cada etapa do projeto é realizada por pessoas com experiência em cada área. Este processo de projeto de sistemas hidráulicos continua válido até a data atual.

Figura 18. Projeto de circuitos hidráulicos.



Fonte: Adaptado de Nakashima e Baba (1989).

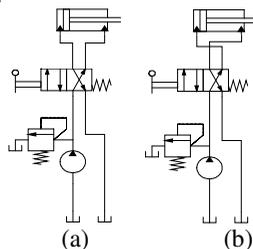
A primeira etapa do processo, a concepção do circuito, é uma tarefa complexa devido a que existe uma alta quantidade de possíveis soluções para a mesma aplicação. Assim, esta tarefa precisa da intuição, criatividade e experiência do projetista, o que pode permitir a presença de erros no diagrama final do circuito (HENKE, 1970) (STEIN, 1998) (SILVA, 1998).

Considerando que o cenário descrito anteriormente é válido até a data atual, o objetivo desta seção é apresentar as dificuldades que podem existir na concepção de circuitos hidráulicos e demonstrar como pequenos erros geram um comportamento indesejado do circuito.

A Figura 19 exemplifica dois circuitos hidráulicos que têm os mesmos componentes, mas as ligações entre a válvula direcional e o

atuador são diferentes. Esta diferença resulta no deslocamento em direções opostas para cada circuito. No caso da Figura 19a, quando a válvula direcional é ativada (posição paralela), o cilindro avança. Pelo contrário, se a válvula direcional do circuito da Figura 19b é ativada (posição paralela), o cilindro recua.

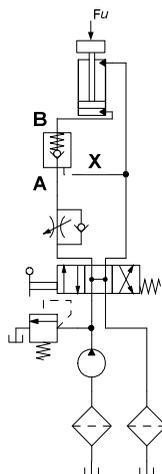
Figura 19. Circuitos com os mesmos componentes, mas com diferentes ligações entre a válvula e o cilindro.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Um segundo exemplo é mostrado na Figura 20. Este circuito, que é apresentado em Linsingen (2008), descreve um sistema de elevação, com posicionamento obtido por uma válvula de retenção pilotada.

Figura 20. Sistema de elevação com o posicionamento obtido pela válvula de retenção pilotada.

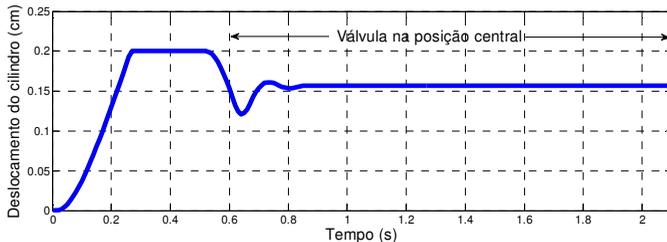


Fonte: Linsingen (2008).

Segundo Linsingen (2008), o elevador deve manter a sua posição durante um tempo relativamente longo, e o seu retorno deve ser estável e controlável. Se a válvula direcional não é ativada (centro aberto) então o elevador mantém a sua mesma posição devido ao efeito produzido pela válvula de retenção operada por piloto. Nestas circunstâncias, as únicas linhas pressurizadas são a câmara da base do cilindro e a linha que liga a porta B da válvula de retenção. Quando a válvula direcional é ativada (posição transversal) para recuar o cilindro, liga-se a linha da bomba e a câmara da haste do cilindro. A resistência ao movimento, ocasionada pela presença da válvula de retenção, aumenta a pressão na linha piloto (Porta X) e, conseqüentemente permite o retorno do cilindro.

O gráfico do deslocamento do cilindro deste circuito em função do tempo é mostrado na Figura 21 e foi obtida por simulação usando o programa AMESim[®] (IMAGINE S.A., 2000).

Figura 21. Deslocamento do cilindro ao longo do tempo do sistema de elevação.

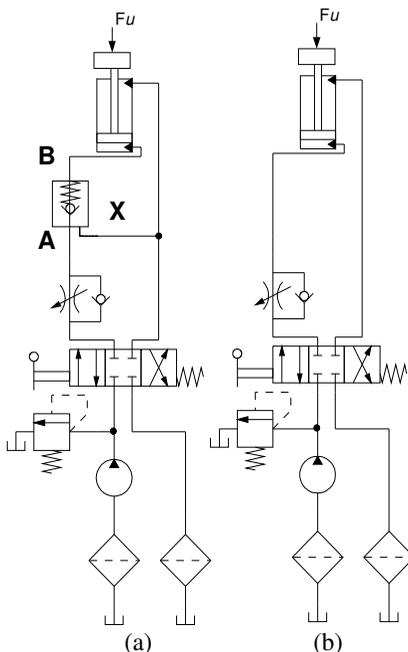


Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 22 mostra duas variações do circuito hidráulico para o sistema de elevação. A diferença do circuito mostrado na Figura 22a é que tem uma válvula de centro fechado. Por outro lado, o circuito mostrado na Figura 22b tem também uma válvula central fechada, mas não considera o uso de uma válvula de retenção operada por piloto. Os gráficos do deslocamento dos cilindros versus tempo destes circuitos foram obtidos por simulação no AMESim[®] e são mostrados na Figura 23. De acordo com os resultados de simulação, estes dois circuitos têm um comportamento semelhante. No caso do circuito mostrado na Figura 22a, quando a válvula direcional é desativada (centro fechado) o cilindro não mantém a sua posição, visto que a linha piloto (Porta X) da válvula

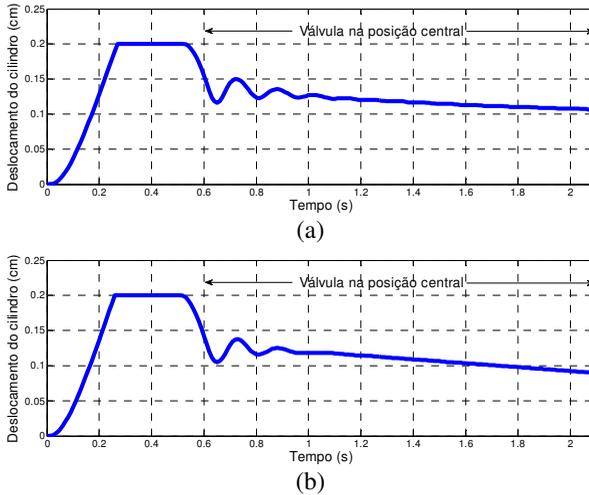
de retenção fica pressurizada e a presença de vazamento de válvula provoca o retorno do cilindro depois de um longo tempo. No caso do circuito mostrado na Figura 22b, quando a válvula direcional é desativada (centro fechado) o cilindro não mantém a sua posição, visto que a presença de vazamento de válvula provoca o retorno do cilindro depois de um longo tempo. É importante mencionar que em válvulas direcionais, existe uma folga entre as partes móveis e, conseqüentemente, uma fuga de fluido hidráulico sempre existe. Por este motivo, quando uma válvula de centro fechado é empregada em vez de uma válvula de centro aberto, a válvula de retenção operada por piloto não realiza a sua função de manter a posição do cilindro.

Figura 22. Variações do sistema de elevação. (a) Circuito com válvula de centro fechado; (b) Circuito com válvula de centro fechado e sem a válvula de retenção pilotada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 23. Deslocamento do cilindro ao longo do tempo. (a) Circuito com válvula de centro fechado; (b) Circuito com válvula de centro fechado e sem a válvula de retenção pilotada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

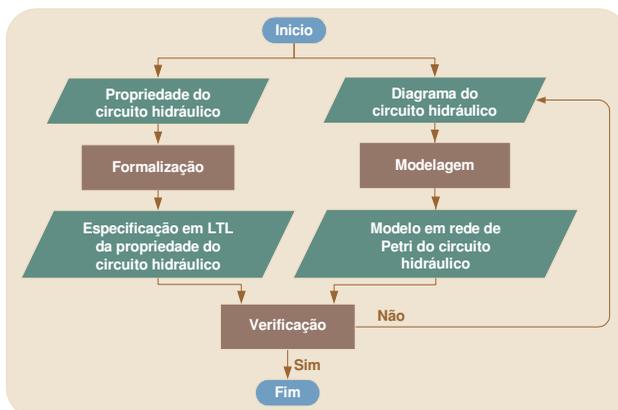
O apresentado nesta seção permite inferir que o projeto de circuitos hidráulicos tem muitos problemas devido a que, por exemplo, existe uma alta quantidade de possíveis soluções para a mesma aplicação. Assim, é necessário a definição de uma metodologia que permita realizar o projeto de forma mais rápida e confiável.

6 PROPOSTA PARA MODELAGEM E ANÁLISE DE CIRCUITOS HIDRÁULICOS

O projeto de circuitos hidráulicos é uma tarefa complexa, pois não tem uma metodologia o suficiente definida e depende unicamente da intuição e experiência do projetista, conforme explicado previamente. Consequentemente, há uma alta probabilidade de cometer um erro durante o processo de projeto, sendo que esta probabilidade aumenta com a complexidade do circuito. Assim, trabalhos como os de Stein (1998), Katoen (1999), Hong e Tessman (1998) inclinam-se pelo desenvolvimento de métodos de análise de circuitos hidráulicos devido à elevada dificuldade que apresenta a automatização do projeto.

Considerando o objetivo deste trabalho que é o desenvolver um método para a verificação da concepção do circuito hidráulico, apresenta-se a proposta ilustrada na Figura 24. Esta proposta usa o método de verificação formal *Model Checking* para comprovar a correta concepção de circuitos hidráulicos. O *Model Checking* é escolhido visto que é um método que utiliza algoritmos executados por software, o que permite uma verificação automática.

Figura 24. Proposta para a verificação da concepção de circuitos hidráulicos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Desta forma, no processo proposto, o projetista deve dispor inicialmente do circuito hidráulico e das propriedades que descrevem o

comportamento esperado. Posteriormente, realizam-se as atividades de *Modelagem* do circuito hidráulico e *Formalização* de propriedades. Neste trabalho, o modelo final do circuito hidráulico está representado usando RP. Posto isso, o programa *Time Petri Net Analyzer* (TINA) (BERTHOMIEU; RIBET; VERNADAT, 2004) possui um *model checker* que utiliza a RP como o formalismo para a modelagem dos sistemas (Quadro 1). Consequentemente, ao usar o programa TINA no trabalho, as propriedades devem ser formalizadas empregando a lógica temporal LTL. Finalmente, com o modelo em RP e as especificações, como resultado da formalização das propriedades, continua-se com a etapa da *Verificação (model checker)* usando o programa TINA. Se for verificado que a concepção do circuito está correta então o processo chega ao seu fim, no caso contrário, o circuito hidráulico deverá ser revisado.

Nesse contexto, é importante pormenorizar nas três atividades principais do processo proposto (Figura 24):

- Modelagem.
- Formalização.
- Verificação.

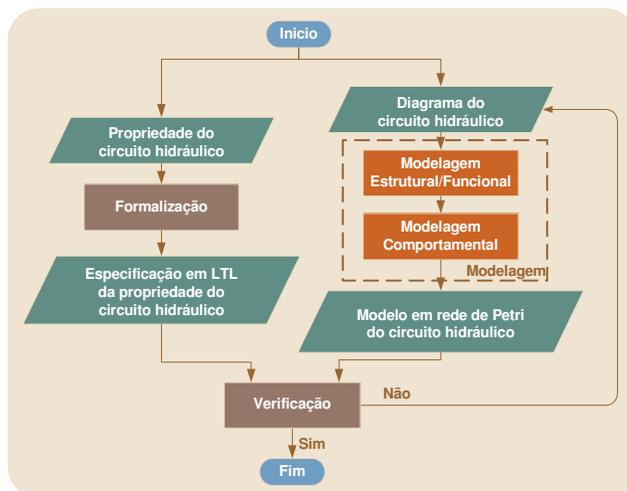
Desta forma, este capítulo é composto por três seções principais. Assim, na primeira seção, descreve-se a atividade de modelagem onde se apresenta o processo para obter o modelo de comportamento do circuito hidráulico em RP preservando sua estrutura, isto é, sendo possível identificar os seus componentes e as relações entre eles. Na segunda seção, apresentam-se, em conjunto as etapas de formalização das propriedades e verificação do circuito hidráulico, fazendo uso do programa TINA. Por fim, na última seção se detalham as limitações do método proposto.

6.1 MODELAGEM DO CIRCUITO HIDRÁULICO

Com o objetivo de obter um modelo que englobe a parte física e o comportamento do sistema, propõe-se que a atividade de *Modelagem* seja feita em duas etapas conforme pode ser observado na Figura 25.

A primeira etapa é a obtenção do modelo estrutural/funcional do circuito hidráulico. Na segunda etapa, a partir de este último modelo, obtém-se o modelo comportamental. Portanto, por meio da proposta de modelagem em duas etapas, é possível obter uma representação do circuito que descreva o seu comportamento, mas que também conserve a perspectiva estrutural/funcional do mesmo.

Figura 25. Etapas para a atividade de modelagem.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Esta proposta do desdobramento de modelagem em duas etapas tem como base a metodologia PFS/MFG (MIYAGI, 1996). Nessa metodologia, conforme mencionado no terceiro capítulo, inicia-se com a elaboração do modelo estrutural/funcional do sistema, isto é o PFS. Posteriormente, o PFS é convertido em um modelo do comportamento dinâmico, isto é o MFG. Por outro lado, entre o modelo PFS e o modelo em MFG, podem existir diversos níveis intermediários, sendo que esta característica é útil para facilitar a compreensão geral do sistema.

Nesta mesma linha, o trabalho de Santos (2003) apresenta uma proposta de descrição funcional, estrutural e comportamental baseada na metodologia PFS/MFG. Santos (2003) utiliza a rede C-A no lugar do PFS para a elaboração do modelo estrutural/funcional do sistema, considerando que existe uma equivalência entre o PFS e a rede C-A, conforme Hasegawa *et al.* (1999) e Miyagi *et al.* (1999). Além disso, para o desenvolvimento da representação comportamental, utilizam-se modelos de sistemas a eventos discretos baseados em autômatos, em vez do MFG.

Tendo como base os trabalhos de Miyagi (1996) e Santos (2003), propõe-se que a modelagem do circuito hidráulico se dê por meio da rede C-A e da RP lugar/transição. Assim, a proposta deste trabalho para

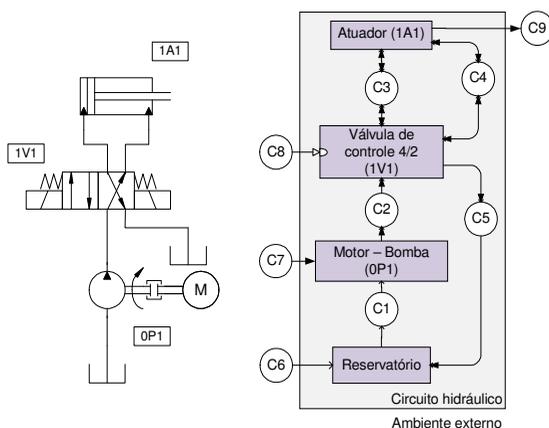
a modelagem estrutural/funcional é utilizar a rede C-A, da mesma forma que Santos (2003). Porém, para a modelagem comportamental se propõe empregar a RP lugar/transição. É importante notar que a proposta não contempla o uso de níveis intermediários porque parte-se do circuito hidráulico, ou seja, o método inicia no nível de implementação da máquina. Na sequência descreve-se em maior detalhe as duas etapas de modelagem propostas.

6.1.1 Modelagem usando a rede Canal – Agência

A rede C-A, conforme descrito no terceiro capítulo, permite uma fácil compreensão do sistema para qualquer usuário devido à simplicidade dos elementos utilizados. Além disso, é importante notar que no trabalho de Belan (2007) foi proposto um formalismo para a representação matricial da rede C-A equivalente à representação gráfica e foram desenvolvidos métodos que auxiliam na verificação do modelo sob uma perspectiva estrutural e funcional. Sendo assim, as contribuições de Belan (2007) podem ser uma vantagem, se no futuro for requerido trabalhar com uma formalização matemática ou realizar uma verificação da perspectiva estrutural ou funcional do circuito nesta etapa.

Na Figura 26 mostra-se um exemplo de um circuito hidráulico e o seu modelo usando rede C-A.

Figura 26. Circuito hidráulico e o seu modelo usando rede C-A.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A abordagem da rede C-A (DE NEGRI, 1996) é empregada para construir o modelo do circuito, ajudando a identificar as unidades passivas e ativas, isto é os componentes do circuito hidráulico e as relações que existem entre eles. No modelo usando rede C-A da Figura 26, é possível reconhecer os componentes do circuito hidráulico (agências) e as conexões entre eles (canais). Neste circuito identificam-se os seguintes agentes: atuador, válvula direcional 4/2, motor – bomba e reservatório. Além disso, distinguem-se cinco canais (C1, C2, C3, C4, C5) que representam as conexões entre as agências e quatro canais (C6, C7, C8, C9) de entrada e saída do circuito hidráulico que representam a interação com o ambiente externo. Por outro lado, neste modelo, também é possível reconhecer o fluxo de energia, matéria e informação entre os diferentes componentes.

6.1.2 Modelagem usando rede de Petri lugar/transição

A partir do modelo estrutural/funcional obtido na primeira etapa e desconsiderando os canais que representam a interação com o ambiente externo, é então possível incluir o comportamento do circuito hidráulico fazendo uso da RP lugar/transição.

Os circuitos hidráulicos, conforme explicado no quinto capítulo, utilizam um fluido como meio de transferência de energia, o que permite a transmissão e controle de forças e movimentos. Em virtude disso, neste trabalho, a inserção da perspectiva comportamental nos circuitos hidráulicos fundamenta-se em representar o seguinte.

- Fluxo de matéria e energia.
- Pressurização e despressurização dos componentes.

Para realizar esta inserção, se propõe modelos padrão em RP para cada tipo de agência, isto é para cada componente hidráulico. Da mesma forma, sugere-se um modelo padrão usando RP para o canal, isto é para representar a conexão entre um componente e outro. O desenvolvimento dos modelos padrão será explicado a seguir.

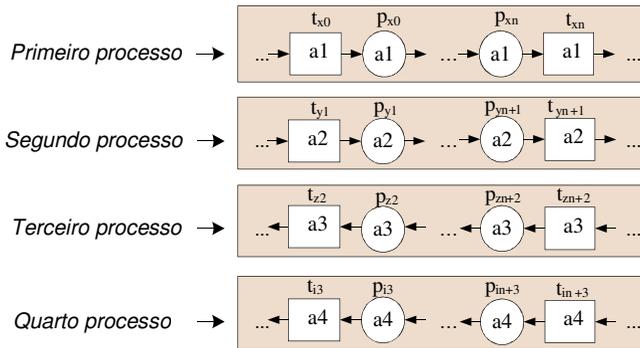
6.1.2.1 Desenvolvimento de modelos padrão para canais e agências usando RP lugar/transição.

Para a modelagem padrão dos canais e agências de circuitos hidráulicos, fundamentando-se na representação do fluxo de matéria e energia assim como na pressurização e despressurização dos componentes, emprega-se quatro processos relativamente

independentes. A independência relativa entre eles significa que em certos momentos os processos são totalmente independentes entre si, enquanto em outros necessitam de pontos de sincronização (CARDOSO; VALETTE, 1997).

Cada processo está associado a um caminho ou sequência de transições. Assim, para um melhor entendimento, algumas das transições e lugares de cada processo possuem etiquetas. Ao contrário dos nomes, as etiquetas estão localizadas dentro da transição ou lugar. Portanto, as etiquetas “a1”, “a2”, “a3” e “a4” correspondem ao primeiro, segundo, terceiro e quarto processo, respectivamente, conforme se mostra na Figura 27.

Figura 27. Processos para a modelagem usando RP.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O primeiro processo representa a conexão com um suprimento de energia/matéria, por exemplo, com uma bomba. Por sua vez, o segundo processo representa a conexão com a linha do retorno do circuito, por exemplo, com um reservatório. Por outro lado, o terceiro processo permite a despressurização dos componentes e o quarto processo possibilita a pressurização dos componentes.

Além disso, é importante mencionar que cada processo utiliza uma ficha. Assim, a ficha para o primeiro processo é fornecida pelos elementos que proporcionam o suprimento de energia e para o segundo processo pelos elementos que permitem a conexão com o retorno. No entanto, a ficha no terceiro processo é o resultado da chegada de ficha do segundo processo (retorno) a um lugar que representa a presença de carga ou de uma restrição na tubulação. Por outro lado, a ficha do quarto processo é gerada pela chegada de uma ficha do primeiro processo

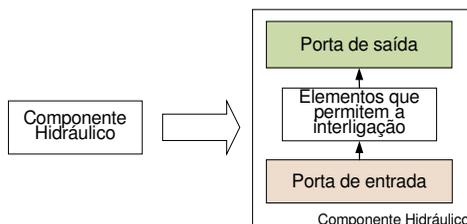
(suprimento de energia) a um lugar que representa a presença de carga ou de uma restrição na tubulação.

Posteriormente, será mostrado que os modelos resultantes em RP, considerando estes quatro processos, permitem analisar a pressurização e o fluxo de matéria e energia do circuito.

6.1.2.1.1 Modelos padrão das agências

O processo de obtenção do modelo padrão das agências inicia tendo em consideração que toda agência possui portas de entrada e/ou portas de saída. Além disso, a agência tem elementos que permitem a ligação entre as portas, que no momento será considerado como uma caixa preta, conforme o mostrado na Figura 28. A porta de entrada é definida como a porta física por onde o componente recebe o fluido hidráulico e a porta de saída como a porta física do componente que entrega o fluido hidráulico a outro componente do circuito.

Figura 28. Elementos de uma agência ou componente hidráulico.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim, considerando-se este conceito para as portas de entrada e de saída, estabelecem-se a seguir os tipos de porta para cada componente e detalham-se os elementos que permitem sua interligação. Devido à ampla variedade de componentes hidráulicos, este trabalho concentra-se no desenvolvimento de modelos padrão em RP dos seguintes componentes:

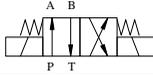
- Válvula de controle direcional 4/2.
- Válvula de controle direcional 4/3.
- Cilindro assimétrico de dupla ação.
- Motor - Bomba.
- Reservatório

Válvula de controle direcional 4/2

As válvulas de controle direcional permitem direcionar o fluido a diferentes pontos do circuito hidráulico, assim como a interrupção da vazão. Este tipo de válvula caracteriza-se por ter um número de vias e um número de posições. O número de vias é o número de portas da válvula e o número de posições é a quantidade de estados estáveis que a válvula pode assumir, promovendo ou interrompendo a interligação entre vias (LINSINGEN, 2008).

O símbolo e a definição adotada nesta dissertação para as portas de entrada e saída, em uma válvula de controle direcional com quatro vias e duas posições, são apresentados no Quadro 2.

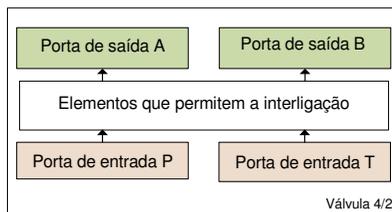
Quadro 2. Portas de entrada e de saída para a válvula de controle direcional 4/2.

Componente hidráulico	Símbolo	Portas de entrada	Portas de saída
Válvula 4/2		P, T	A, B

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 29, mostram-se os elementos de uma válvula 4/2, sendo possível identificar as portas de entrada e de saída, conforme o estabelecido no Quadro 2. O conjunto de elementos que permitem a interligação entre as portas é mantido como uma caixa preta.

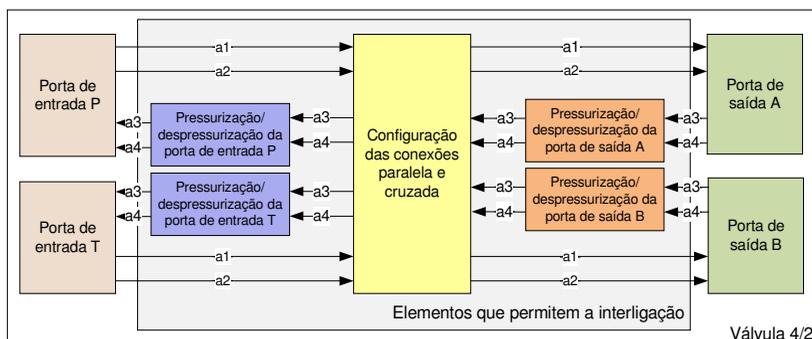
Figura 29. Elementos de uma válvula 4/2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como o modelo comportamental da válvula de controle direcional 4/2 está baseado nos quatro processos explicados anteriormente (sequências de transições com etiquetas “a1”, “a2”, “a3”, “a4”), na Figura 30 apresentam-se os elementos ou blocos que permitem a interligação entre as portas assim como as ligações necessárias para representar os quatro processos em uma válvula de controle direcional 4/2.

Figura 30. Elementos e interligações de uma válvula 4/2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

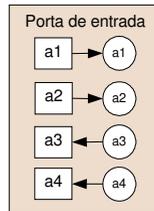
Na Figura 30, identificam-se nove blocos. Estes blocos podem ser agrupados em cinco classes:

- i. *Bloco para uma porta de entrada:* “Porta de entrada P” e “Porta de Entrada T”.
- ii. *Bloco para uma porta de saída:* “Porta de saída A” e “Porta de saída B”.
- iii. *Bloco de pressurização/despressurização para uma porta de entrada:* “Pressurização/despressurização da porta de entrada P” e “Pressurização/despressurização da porta de entrada T”.
- iv. *Bloco de pressurização/despressurização para uma porta de saída:* “Pressurização/despressurização da porta de saída A” e “Pressurização/despressurização da porta de saída B”.
- v. *Bloco para a configuração das duas posições da válvula:* “Configuração das conexões paralela e cruzada”.

Na sequência são descritos os modelos padrão em RP para cada classe de bloco.

O *bloco para uma porta de entrada* tem uma representação padrão usando RP, conforme se pode observar na Figura 31. Este modelo padrão da porta de entrada emprega quatro conjuntos transição-lugar, sendo que cada conjunto representa um dos quatro processos explicados anteriormente e são identificados pelas etiquetas.

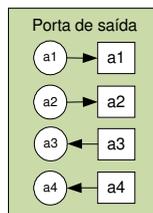
Figura 31. Modelo padrão em RP para uma porta de entrada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Por outro lado, *o bloco para uma porta de saída* tem uma representação padrão usando RP, conforme se pode observar na Figura 32. Este modelo padrão da porta de saída emprega quatro conjuntos lugar-transição, sendo que cada conjunto representa um dos quatro processos e da mesma forma são identificados pelas etiquetas.

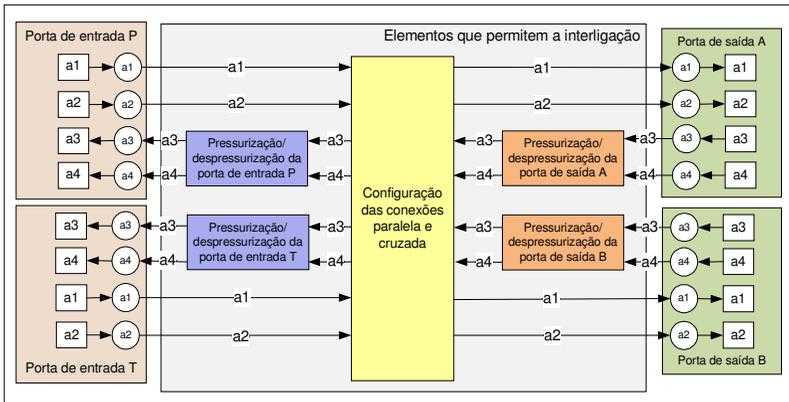
Figura 32. Modelo padrão em RP para uma porta de saída.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Considerando que as transições dos modelos padrão em RP das portas de entrada e saída são os elementos de fronteira da válvula 4/2, substitui-se os blocos “Porta de entrada P”, “Porta de entrada T”, “Porta de saída A” e “Porta de saída B” da Figura 30 por seus modelos. Na Figura 33, mostra-se o resultado desta substituição. O procedimento é feito respeitando as ligações, transições e lugares de cada processo.

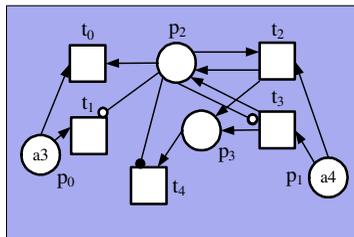
Figura 33. Válvula 4/2 com detalhamento dos modelos padrão em RP das portas de entrada e de saída.



Fonte: Elaborada pelo autor.

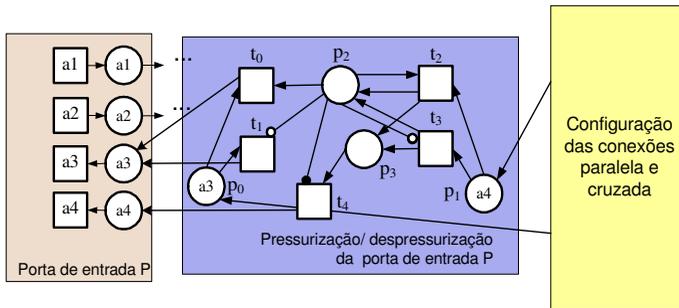
Na Figura 34, apresenta-se o modelo padrão em RP do *bloco de pressurização/despressurização para uma porta de entrada* (Figura 30). Este modelo possui um lugar (“ p_2 ”) que representa a pressão da porta, isto é, quando esse lugar tem uma ficha significa que essa porta está pressurizada. Portanto, o bloco de pressurização/despressurização para uma porta de entrada é o encarregado de colocar ou retirar a ficha do lugar que representa a pressão da porta de entrada (“ p_2 ”), conforme requerido. Na Figura 35 está exemplificada a interligação deste modelo com a porta de entrada P.

Figura 34. Modelo padrão em RP para o bloco de pressurização e depressurização de uma porta de entrada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 35. Exemplo de interligação dos elementos “Porta de entrada P” e “Pressurização/despressurização da porta de entrada P”.



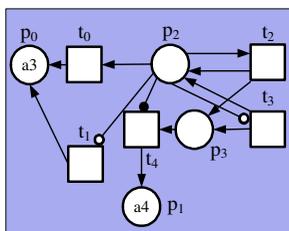
Fonte: Elaborada pelo autor.

Neste modelo, o processo de pressurização inicia quando o lugar com etiqueta “a4” (ou nome “p1”) possui uma ficha fornecida pelo bloco “Configuração das conexões paralela e cruzada” (Figura 35). Posteriormente, as transições “t2” e “t3” permitem pressurizar a porta de entrada, isto é, colocar uma ficha no lugar “p2”. Utilizam-se duas transições porque se consideram duas possíveis condições iniciais do lugar “p2”: a transição “t2” será habilitada quando o lugar “p2” possui ficha (a porta está pressurizada inicialmente) e a transição “t3” será habilitada quando o lugar “p2” não possui ficha (a porta não está pressurizada inicialmente). Após a pressurização da porta, a ficha continua seu caminho pelo lugar “p3”. A transição “t4” deve ser ligada ao lugar que representa o quarto processo (lugar com etiqueta “a4”) no bloco “Porta de entrada P”, conforme mostrado na Figura 35. Por outro lado, o processo de depressurização inicia-se quando o lugar com etiqueta “a3” (ou nome “p0”) possui uma ficha fornecida pelo bloco “Configuração das conexões paralela e cruzada” (Figura 35). Depois, as transições “t0” e “t1” permitem depressurizar a porta de entrada, isto é, retirar a ficha do lugar “p2”, se houver. Empregam-se duas transições porque se consideram as duas possíveis condições iniciais do lugar “p2”: a transição “t0” será habilitada quando o lugar “p2” possui ficha (a porta está pressurizada inicialmente) e a transição “t1” será habilitada quando o lugar “p2” não possui ficha (a porta não está pressurizada inicialmente). Ambas as transições “t0” e “t1” devem ser ligadas ao lugar que representa o terceiro processo (lugar com etiqueta “a3”) no bloco “Porta de entrada P”, conforme mostrado na Figura 35.

A interligação da Figura 35 é um exemplo para os blocos da porta P. A mesma interligação deve ser realizada entre os blocos: “Porta de entrada T” e “Pressurização/despressurização da porta de entrada T”.

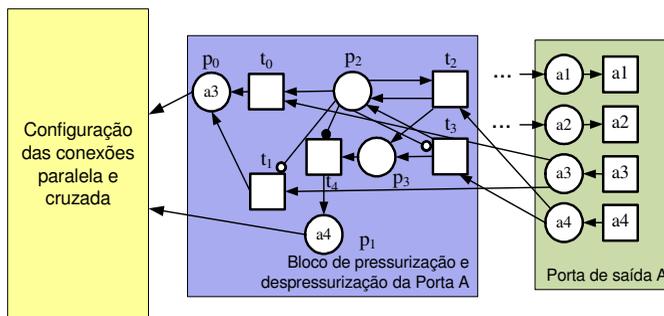
Na Figura 36, apresenta-se o modelo padrão em RP do *bloco de pressurização/despressurização para uma porta de saída* (Figura 30). Este modelo, da mesma forma que na porta de entrada, possui um lugar (“ p_2 ”) que representa a pressão da porta, isto é, quando esse lugar tem uma ficha significa que essa porta está pressurizada. Portanto, o bloco de pressurização/despressurização para uma porta de saída é o encarregado de colocar ou retirar a ficha do lugar que representa a pressão da porta de saída (“ p_2 ”), conforme requerido. Na Figura 37 está exemplificada a interligação deste modelo com a porta de saída A.

Figura 36. Modelo padrão em RP para o bloco de pressurização e depressurização de uma porta de saída.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 37. Exemplo de interligação dos elementos “Porta de saída A” e “Pressurização/despressurização da porta de saída A”.



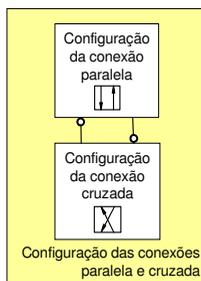
Fonte: Elaborada pelo autor.

No modelo da Figura 36, o processo de pressurização inicia-se quando o lugar, que representa o quarto processo (lugar com etiqueta “a4”) no bloco “Porta de saída A” e que está ligado às transições “t₂” e “t₃” (Figura 37), possui uma ficha. Posteriormente, as transições “t₂” e “t₃” permitem pressurizar a porta de saída, isto é, colocar uma ficha no lugar “p₂”. Utilizam-se duas transições porque se consideram duas possíveis condições iniciais do lugar “p₂”: a transição “t₂” será habilitada quando o lugar “p₂” possui ficha (a porta está pressurizada inicialmente) e a transição “t₃” será habilitada quando o lugar “p₂” não possui ficha (a porta não está pressurizada). Após a pressurização da porta, a ficha deve continuar seu caminho pelo lugar “p₃” e depois pelo lugar “p₁”. O lugar com etiqueta “a4” (ou nome “p₁”) deve ser ligado ao bloco “Configuração das conexões paralela e cruzada” (Figura 37). Por outro lado, o processo de despressurização inicia-se quando o lugar que representa o terceiro processo (lugar com etiqueta “a3”) no bloco “Porta de saída A”, ligado às transições “t₀” e “t₁” (Figura 37), possui uma ficha. Depois, as transições “t₀” e “t₁” permitem despressurizar a porta de saída, isto é, retirar a ficha do lugar “p₂”, se houver. Empregam-se duas transições porque se consideram duas possíveis condições iniciais do lugar “p₂”: a transição “t₀” será habilitada quando o lugar “p₂” possui ficha (a porta está pressurizada inicialmente) e a transição “t₁” será habilitada quando o lugar “p₂” não possui ficha (a porta não está pressurizada inicialmente). Após a despressurização da porta, a ficha continua seu caminho pelo lugar “p₀”. O lugar com etiqueta “a3” (ou nome “p₀”) deve ser ligado ao bloco “Configuração das conexões paralela e cruzada” (Figura 37).

A interligação da Figura 37 é um exemplo para os blocos da porta A. A mesma interligação deve ser realizada entre os blocos: “Porta de saída B” e “Pressurização/despressurização da porta de saída B”.

O último tipo bloco a descrever é o *bloco para a configuração das duas posições da válvula*, isto é o bloco com o nome “Configuração das conexões paralela e cruzada”. Este elemento será subdividido em dois blocos: “Configuração da conexão paralela” e “Configuração da conexão cruzada”, conforme apresentado na Figura 38. Além disso, como pode ser observado na Figura 38, existe uma interligação entre estes dois blocos por meio de dois arcos inibidores. Estes arcos permitem controlar que a válvula não possa estar em duas posições simultaneamente. Estas ligações com os arcos inibidores serão explicadas posteriormente em maior detalhe.

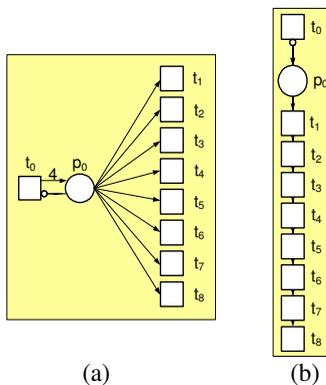
Figura 38. Elementos do bloco “Configuração das conexões paralela e cruzada”.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim, o modelo padrão em RP tanto para o bloco “Configuração da conexão paralela” como para o bloco “Configuração da conexão cruzada”, está constituído por nove transições e um lugar que representam o seu comportamento, conforme se mostra na Figura 39a. Este modelo padrão possui uma transição (“ t_0 ”) que permite selecionar a configuração da válvula. Ao disparar esta transição (“ t_0 ”), quatro fichas são colocadas no lugar que representa a seleção da configuração (“ p_0 ”). Quando esse lugar tem ficha significa que a válvula está nessa posição ou configuração (cruzada ou paralela). A Figura 39b apresenta um modelo equivalente ao da Figura 39a.

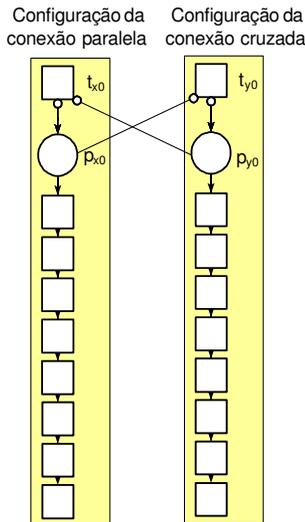
Figura 39. (a) Modelo padrão em RP para a configuração da conexão paralela ou cruzada da válvula de controle direcional 4/2; (b) Modelo equivalente da RP.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Por outro lado, na Figura 40 apresenta-se a interligação entre os blocos “Configuração da conexão paralela” e “Configuração da conexão cruzada” por meio dos arcos inibidores (Figura 38). Assim, por exemplo, quando o lugar que representa a seleção da configuração paralela (“ p_{x0} ”) tem ficha, as transições que permitem selecionar a configuração paralela ou cruzada (“ t_{x0} ” e “ t_{y0} ”) são desabilitadas devido à presença dos arcos inibidores. Da mesma forma, quando o lugar que representa a seleção da configuração cruzada (“ p_{y0} ”) tem ficha, as transições que permitem selecionar a configuração paralela ou cruzada (“ t_{x0} ” e “ t_{y0} ”) são desabilitadas.

Figura 40. Interligação entre os elementos “Configuração da conexão paralela” e “Configuração da conexão cruzada”.



Fonte: Elaborada pelo autor.

As transições dos modelos em RP para os blocos “Configuração da conexão paralela” e “Configuração da conexão cruzada” têm como função realizar a conexão entre os blocos das portas de entrada e saída da válvula e a conexão entre os blocos de pressurização/despressurização das portas de entrada e de saída (Figura 30). Os lugares de entrada e de saída para cada transição, conforme a configuração da conexão, apresentam-se no Quadro 3. Os lugares estão em função da etiqueta em cada bloco.

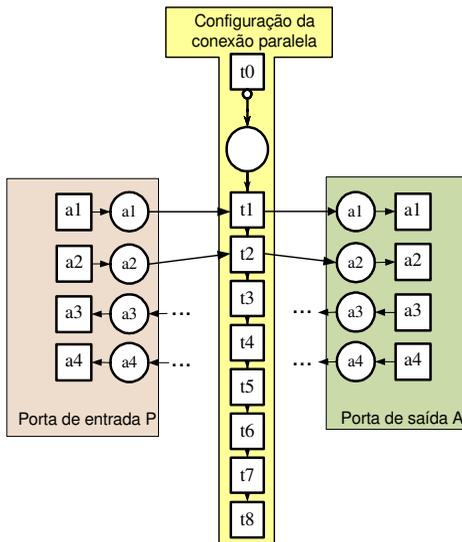
Quadro 3. Lugares de entrada e saída das transições na configuração paralela e cruzada da válvula de controle direcional 4/2.

	t_i	Entrada	Saída
Paralela	t ₁	Lugar “a1” do bloco “Porta de entrada P”	Lugar “a1” do bloco “Porta de saída A”
	t ₂	Lugar “a2” do bloco “Porta de entrada P”	Lugar “a2” do bloco “Porta de saída A”
	t ₃	Lugar “a1” do bloco “Porta de entrada T”	Lugar “a1” do bloco “Porta de saída B”
	t ₄	Lugar “a2” do bloco “Porta de entrada T”	Lugar “a2” do bloco “Porta de saída B”
	t ₅	Lugar “a3” do bloco de “Pressurização/despressurização da porta de saída A”.	Lugar “a3” do bloco de “Pressurização/despressurização da porta de entrada P”.
	t ₆	Lugar “a4” do bloco de “Pressurização/despressurização da porta de saída A”.	Lugar “a4” do bloco de “Pressurização/despressurização da porta de entrada P”.
	t ₇	Lugar “a3” do bloco de “Pressurização/despressurização da porta de saída B”.	Lugar “a3” do bloco de “Pressurização/despressurização da porta de entrada T”.
	t ₈	Lugar “a4” do bloco de “Pressurização/despressurização da porta de saída B”.	Lugar “a4” do bloco de “Pressurização/despressurização da porta de entrada T”.
Cruzada	t ₁	Lugar “a1” do bloco “Porta de entrada P”	Lugar “a1” do bloco “Porta de saída B”
	t ₂	Lugar “a2” do bloco “Porta de entrada P”	Lugar “a2” do bloco “Porta de saída B”
	t ₃	Lugar “a1” do bloco “Porta de entrada T”	Lugar “a1” do bloco “Porta de saída A”
	t ₄	Lugar “a2” do bloco “Porta de entrada T”	Lugar “a2” do bloco “Porta de saída A”
	t ₅	Lugar “a3” do bloco de “Pressurização/despressurização da porta de saída A”.	Lugar “a3” do bloco de “Pressurização/despressurização da porta de entrada T”.
	t ₆	Lugar “a4” do bloco de “Pressurização/despressurização da porta de saída A”.	Lugar “a4” do bloco de “Pressurização/despressurização da porta de entrada T”.
	t ₇	Lugar “a3” do bloco de “Pressurização/despressurização da porta de saída B”.	Lugar “a3” do bloco de “Pressurização/despressurização da porta de entrada P”.
	t ₈	Lugar “a4” do bloco de “Pressurização/despressurização da porta de saída B”.	Lugar “a4” do bloco de “Pressurização/despressurização da porta de entrada P”.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, por exemplo, a transição “t₁” no bloco “Configuração da conexão paralela” (Quadro 3) tem como entrada o lugar associado ao primeiro processo (etiqueta “a1”) do modelo padrão do bloco “Porta de entrada P” (Figura 33), e como saída o lugar associado ao primeiro processo (etiqueta “a2”) do modelo padrão do bloco “Porta de saída A” (Figura 33). A transição “t₂” no bloco de configuração paralela (Quadro 3) tem como entrada o lugar associado ao segundo processo (etiqueta “a2”) do modelo padrão do bloco “Porta de entrada P” (Figura 33), e como saída o lugar associado ao segundo processo (etiqueta “a2”) do modelo padrão do bloco “Porta de saída A” (Figura 33). As interligações de estas duas transições são mostradas na Figura 41.

Figura 41. Ligações das transições “t₁” e “t₂” da configuração paralela.

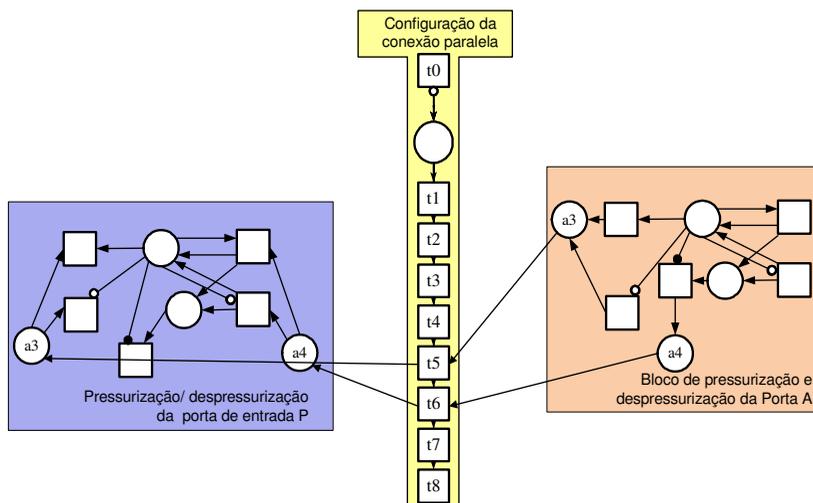


Fonte: Elaborada pelo autor.

Por outro lado, a transição “t₅” no bloco “Configuração da conexão paralela” (Quadro 3) tem como entrada o lugar associado ao terceiro processo (etiqueta “a3”) do modelo padrão do bloco “Pressurização/despressurização da porta de saída A” (Figura 37), e como saída o lugar associado ao terceiro processo (etiqueta “a3”) do modelo padrão do bloco “Pressurização/despressurização da porta de entrada P” (Figura 35). A transição “t₆” no bloco “Configuração da

conexão paralela” (Quadro 3) tem como entrada o lugar associado ao quarto processo (etiqueta “a4”) do modelo padrão do bloco “Pressurização/despressurização da porta de saída A” (Figura 37), e como saída o lugar associado ao quarto processo (etiqueta “a4”) do modelo padrão do bloco “Pressurização/despressurização da porta de entrada P” (Figura 35). As interligações de estas duas transições são mostradas na Figura 42.

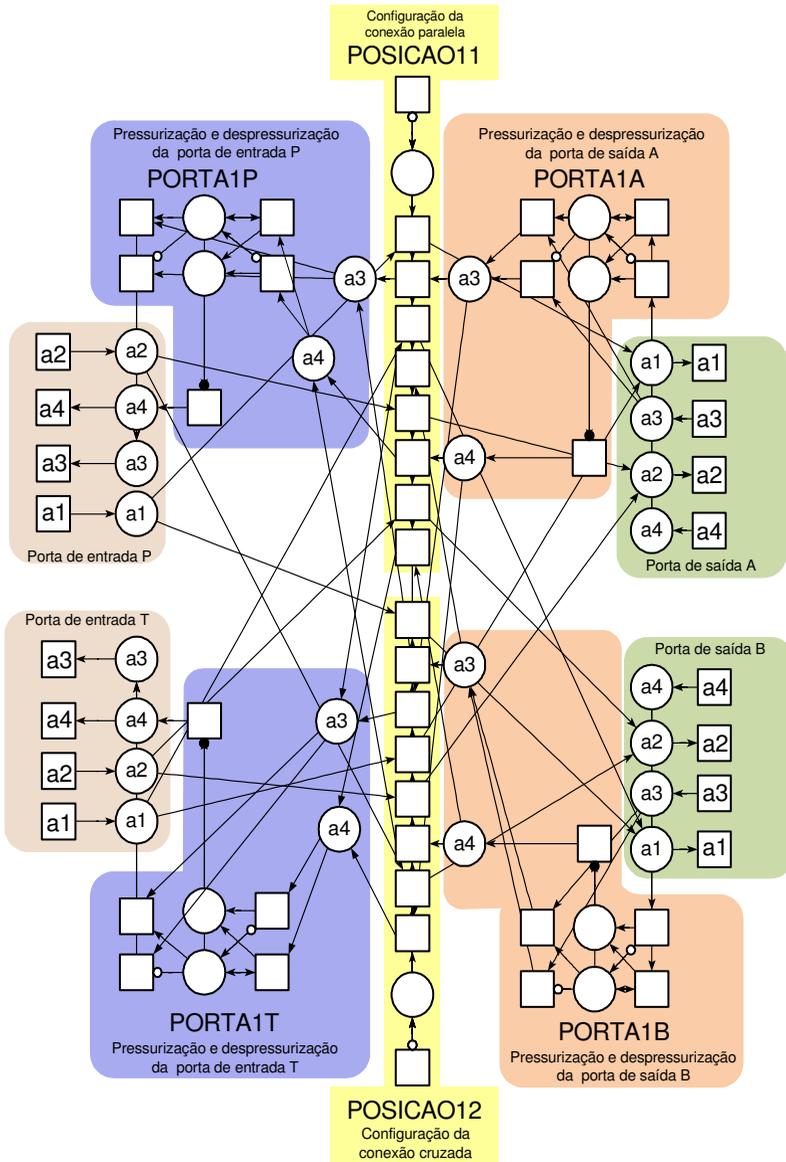
Figura 42. Ligações das transições “t5” e “t6” da configuração paralela.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A inserção das interligações e dos modelos padrão em RP para cada classe de bloco, identificada na Figura 30, permitirá a obtenção do modelo padrão da válvula usando RP, tal como mostrado na Figura 43. Neste modelo é possível identificar os modelos dos blocos “Configuração da conexão paralela”, “Configuração da conexão cruzada”, assim como os modelos dos blocos das portas de entrada e saída e dos blocos de pressurização e depressurização para cada uma delas. Os lugares com nome “PORTA1P”, “PORTA1A”, “PORTA1T”, “PORTA1B” representam a pressão da porta P, A, T e B, respectivamente. Os lugares com nome “POSICAO11” e “POSICAO 12” representam a seleção da configuração paralela e cruzada da válvula, respectivamente.

Figura 43. Modelo padrão em RP da válvula de controle direcional 4/2.

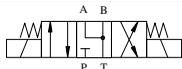


Fonte: Elaborada pelo autor.

Válvula de controle direcional 4/3

O símbolo e a definição adotada nesta dissertação para as portas de entrada e saída, para uma válvula de controle direcional com quatro vias e três posições de centro com porta P bloqueada e portas A, B e T interligadas, são apresentados no Quadro 4.

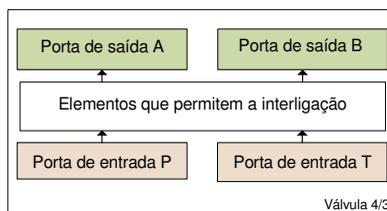
Quadro 4. Portas de entrada e saída para a válvula de controle direcional 4/3.

Componente hidráulico		Porta de entrada	Porta de saída
Válvula 4/3		P, T	A, B

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 44, mostram-se os elementos de uma válvula 4/3, sendo possível identificar as portas de entrada e de saída, conforme o estabelecido no Quadro 4. O conjunto de elementos que permitem a interligação entre as portas é mantido como uma caixa preta.

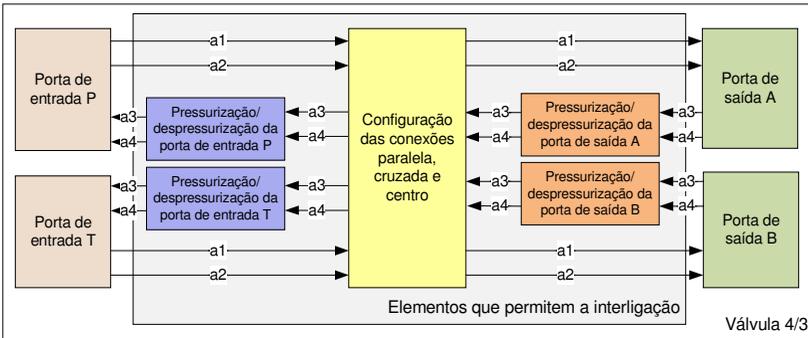
Figura 44. Elementos de uma válvula 4/3.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como o modelo comportamental da válvula de controle direcional 4/3 está baseado nos quatro processos (sequências de transições com etiquetas “a1”, “a2”, “a3”, “a4”), na Figura 45 apresentam-se os elementos ou blocos que permitem a interligação entre as portas assim como as ligações necessárias para representar os quatro processos em uma válvula de controle direcional 4/3.

Figura 45. Elementos e interligações de uma válvula 4/3.

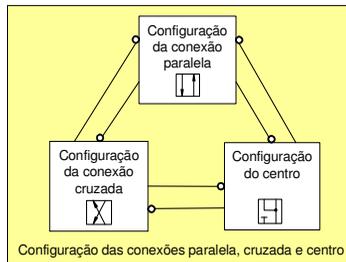


Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim, comparando os elementos de uma válvula 4/3 (Figura 45) e de uma válvula 4/2 (Figura 30), conclui-se que ambas as válvulas possuem os mesmos elementos, a exceção do bloco de “Configuração das conexões paralela, cruzada e centro”. Portanto, a obtenção do modelo em RP da válvula 4/3 partirá da descrição deste bloco visto que os outros blocos com suas interligações já foram explicados na obtenção do modelo padrão em RP da válvula 4/2.

O bloco “Configuração das conexões paralela, cruzada e centro” será subdividido em três elementos: “Configuração da conexão paralela”, “Configuração da conexão cruzada” e “Configuração do centro”, conforme apresentado na Figura 46.

Figura 46. Elementos do bloco “Configuração das conexões paralela, cruzada e centro”.



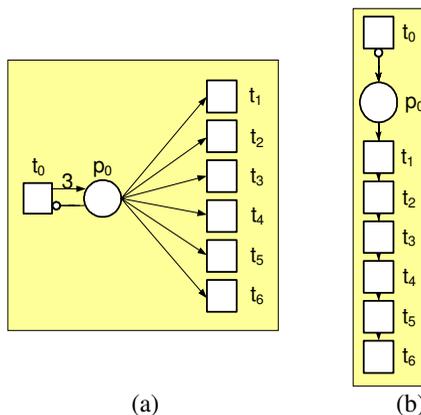
Fonte: Elaborada pelo autor.

Além disso, como pode ser observado na Figura 46, existe uma interligação entre estes três blocos por meio de arcos inibidores. Estes arcos não permitem que a válvula possa estar em duas ou mais posições simultaneamente, conforme explicado no modelo da válvula 4/2 (Figura 40).

Assim, os modelos padrão em RP e suas interligações tanto para o bloco “Configuração da conexão paralela” como para o bloco “Configuração da conexão cruzada”, são os mesmos que aqueles explicados na válvula 4/2 (Figura 39a). Portanto, nesta seção concentra-se em explicar o elemento “Configuração do centro” *para uma válvula de controle direcional com quatro vias e três posições de centro com porta P bloqueada e portas A, B e T interligadas*.

O modelo padrão em RP para o elemento “Configuração do centro” está constituído por sete transições e um lugar, conforme se mostra na Figura 47a. Este modelo padrão possui uma transição (“ t_0 ”) que permite selecionar a configuração da válvula. Ao disparar esta transição (“ t_0 ”), três fichas são colocadas no lugar que representa a seleção da configuração do centro (“ p_0 ”). Quando esse lugar tem ficha significa que a válvula está na posição central. A Figura 47b apresenta um modelo sintetizado ao da Figura 47a.

Figura 47. (a) Modelo padrão em RP para a configuração da conexão do centro de uma válvula de controle direcional 4/3 com centro com porta P bloqueada e portas A, B e T interligadas; (b) Modelo sintetizado da RP.



Fonte: Elaborada pelo autor.

As transições do modelo em RP para o bloco “Configuração do centro” têm como função realizar a conexão entre os blocos das portas

de entrada e saída da válvula e a conexão entre os blocos de pressurização/despressurização das portas de entrada e de saída (Figura 45). Os lugares de entrada e de saída para cada transição deste elemento, apresentam-se no Quadro 5. Os lugares estão em função da etiqueta em cada bloco.

Quadro 5. Lugares de entrada e saída das transições na configuração centro da válvula de controle direcional 4/3 com centro com porta P bloqueada e portas A, B e T interligadas.

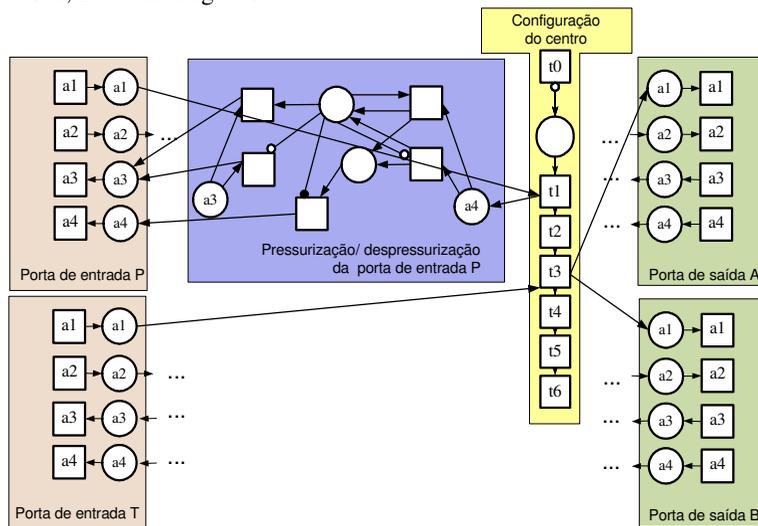
	t_i	Entrada	Saída
Centro	t ₁	Lugar “a1” do bloco “Porta de entrada P”	Lugar “a4” do bloco “Pressurização/despressurização da porta de entrada P”
	t ₂	Lugar “a2” do bloco “Porta de entrada P”	Lugar “a3” do bloco “Pressurização/despressurização da porta de entrada P”
	t ₃	Lugar “a1” do bloco “Porta de entrada T”	Lugar “a1” do bloco “Porta de saída A” e Lugar “a1” do bloco “Porta de saída B”
	t ₄	Lugar “a2” do bloco “Porta de entrada T”	Lugar “a2” do bloco “Porta de saída A” e Lugar “a2” do bloco “Porta de saída B”
	t ₅	Lugar “a3” do bloco de “Pressurização/despressurização da porta de saída A” e Lugar “a3” do bloco de “Pressurização/despressurização da porta de saída B”	Lugar “a3” do bloco de “Pressurização/despressurização da porta de entrada T”.
	t ₆	Lugar “a4” do bloco de “Pressurização/despressurização da porta de saída A” e Lugar “a4” do bloco de “Pressurização/despressurização da porta de saída B”	Lugar “a4” do bloco de “Pressurização/despressurização da porta de entrada T”.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, por exemplo, a transição “t₁” (Quadro 5) tem como entrada o lugar associado ao primeiro processo (etiqueta “a1”) do modelo padrão do bloco “Porta de entrada P” (Figura 31), e como saída o lugar associado ao quarto processo (etiqueta “a4”) do modelo padrão do bloco “Pressurização/despressurização da porta de entrada P” (Figura 35). A transição “t₃” (Quadro 5) tem como entrada o lugar associado ao

primeiro processo (etiqueta “a1”) do modelo padrão do bloco “Porta de entrada T” (Figura 31), e como saída os lugares associados ao primeiro processo (etiqueta “a1”) dos modelos padrão dos blocos “Porta de saída A” e “Porta de saída B” (Figura 32). As interligações de estas duas transições são mostradas na Figura 48.

Figura 48. Ligações das transições “t₁” e “t₃” da configuração do centro para uma válvula de controle direcional 4/3 com centro com porta P bloqueada e portas A, B e T interligadas.

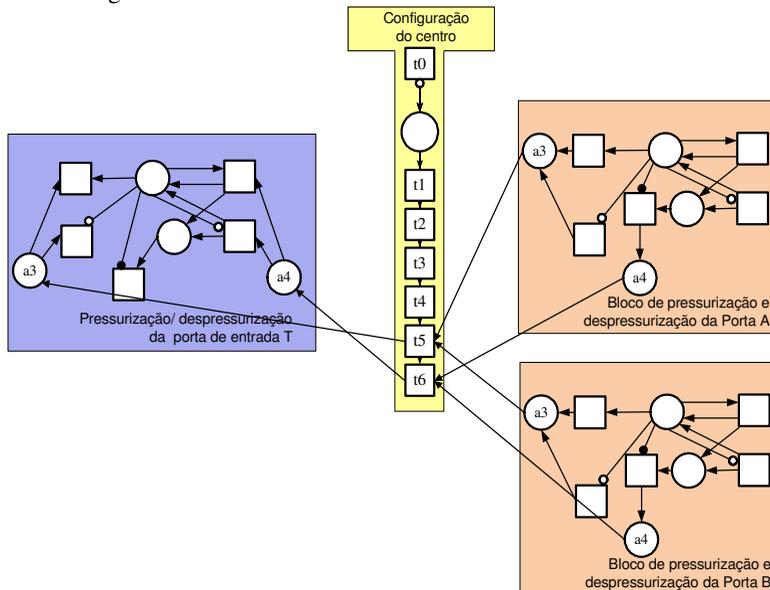


Fonte: Elaborada pelo autor.

Por outro lado, a transição “t₅” (Quadro 5) tem como entrada os lugares associados ao terceiro processo (etiqueta “a3”) dos modelos padrão dos blocos “Pressurização/despressurização da porta de saída A” e “Pressurização/despressurização da porta de saída B” (Figura 37), e como saída o lugar associado ao terceiro processo (etiqueta “a3”) do modelo padrão do bloco “Pressurização/despressurização da porta de entrada T” (Figura 35). A transição “t₆” no bloco “Configuração da conexão paralela” (Quadro 5) tem como entrada os lugares associados ao quarto processo (etiqueta “a4”) dos modelos padrão dos blocos “Pressurização/despressurização da porta de saída A” e “Pressurização/despressurização da porta de saída B” (Figura 37), e como saída o lugar associado ao quarto processo (etiqueta “a4”) do modelo padrão do bloco “Pressurização/despressurização da porta de

entrada T” (Figura 35). As interligações de estas duas transições são mostradas na Figura 49.

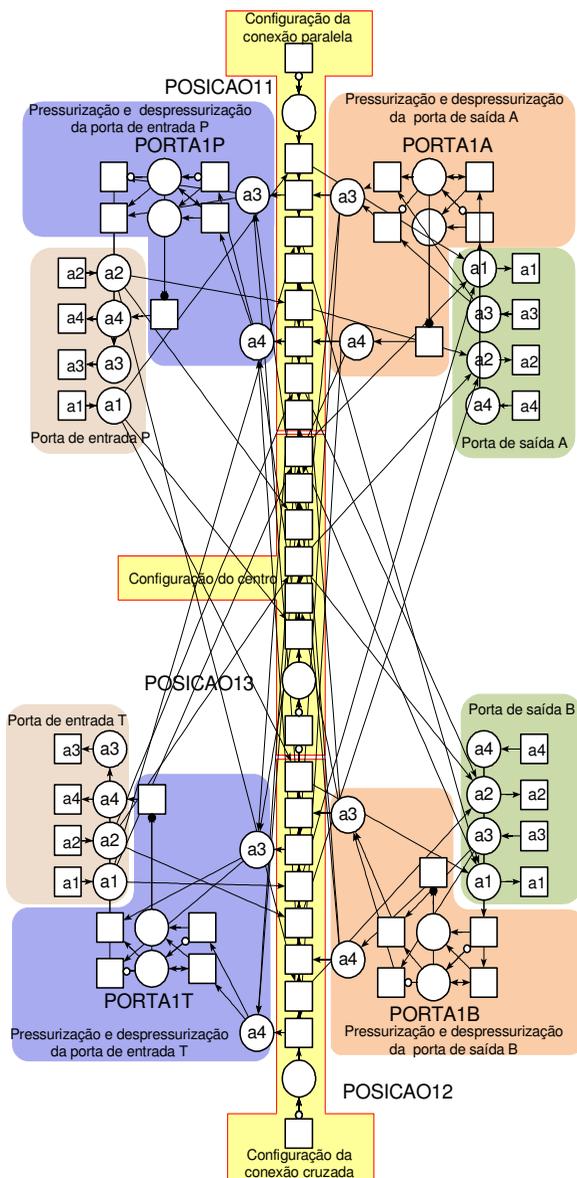
Figura 49. Ligações das transições “t₅” e “t₆” da configuração centro para uma válvula de controle direcional 4/3 com centro com porta P bloqueada e portas A, B e T interligadas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A inserção das interligações e dos modelos padrão em RP para cada classe de bloco, identificados na Figura 45, permitirá a obtenção do modelo padrão em RP da válvula 4/3 com centro com porta P bloqueada e portas T, A, e B interligadas, tal como mostrado na Figura 50. Neste modelo é possível identificar os modelos dos blocos “Configuração da conexão paralela”, “Configuração da conexão cruzada”, “Configuração do centro”, assim como os modelos dos blocos das portas de entrada e saída e dos blocos de pressurização e despressurização para cada uma delas. Os lugares com nome “PORTA1P”, “PORTA1A”, “PORTA1T”, “PORTA1B” representam a pressão da porta P, A, T e B, respectivamente. Os lugares com nome “POSICAO11”, “POSICAO 12” e “POSICAO13” representam a seleção da configuração paralela, cruzada e centro da válvula, respectivamente.

Figura 50. Modelo padrão da válvula 4/3 com centro com porta P bloqueada e portas T, A, e B interligadas.

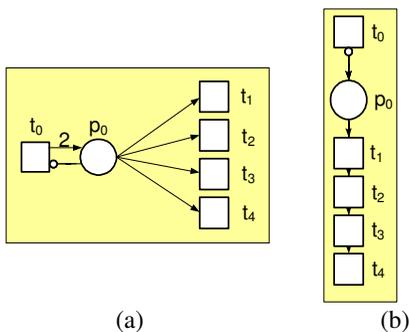


Fonte: Elaborada pelo autor.

Por outro lado, no caso de válvulas 4/3 com outro tipo de centro, o único que deve ser modificado é o bloco “Configuração do centro”. Assim, a seguir detalham-se os modelos padrão em RP das válvulas 4/3 com centro fechado e centro aberto.

O modelo padrão em RP para o elemento “Configuração do centro” para uma *válvula 4/3 com centro fechado* está constituído por cinco transições e um lugar, conforme se mostra na Figura 51a. Este modelo padrão também possui uma transição (“ t_0 ”) que permite selecionar a configuração da válvula. Ao disparar esta transição (“ t_0 ”), duas fichas são colocadas no lugar que representa a seleção da configuração do centro (“ p_0 ”). Quando esse lugar tem ficha significa que a válvula está na posição central. A Figura 51b apresenta um modelo sintetizado ao da Figura 51a.

Figura 51. (a) Modelo padrão em RP para a configuração da conexão do centro de uma válvula de controle direcional 4/3 com centro fechado; (b) Modelo sintetizado da RP.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os lugares de entrada e de saída para cada transição deste elemento, apresentam-se no Quadro 6. Os lugares estão em função da etiqueta em cada bloco. A inserção das interligações e dos modelos padrão em RP para cada classe de bloco, identificados na Figura 45, permitirá a obtenção do modelo padrão em RP da válvula 4/3 com fechado, tal como mostrado na Figura 53.

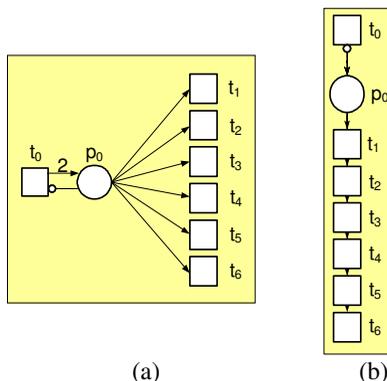
Quadro 6. Lugares de entrada e saída das transições na configuração centro da válvula de controle direcional 4/3 com centro fechado.

t_i	Entrada	Saída
t_1	Lugar “a1” do bloco “Porta de entrada P”	Lugar “a4” do bloco “Pressurização/despressurização da porta de entrada P”
t_2	Lugar “a2” do bloco “Porta de entrada P”	Lugar “a3” do bloco “Pressurização/despressurização da porta de entrada P”
t_3	Lugar “a1” do bloco “Porta de entrada T”	Lugar “a4” do bloco “Pressurização/despressurização da porta de entrada T”
t_4	Lugar “a2” do bloco “Porta de entrada T”	Lugar “a3” do bloco “Pressurização/despressurização da porta de entrada P”

Fonte: Elaborado pelo autor.

O modelo padrão em RP para o elemento “Configuração do centro” para *uma válvula 4/3 com centro aberto* está constituído por sete transições e um lugar, conforme se mostra na Figura 52.

Figura 52. (a) Modelo padrão em RP para a configuração da conexão do centro de uma válvula de controle direcional 4/3 com centro aberto; (b) Modelo sintetizado da RP.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Este modelo padrão também possui uma transição (“ t_0 ”) que permite selecionar a configuração da válvula. Ao disparar esta transição (“ t_0 ”), duas fichas são colocadas no lugar que representa a seleção da

configuração do centro (“p₀”). Quando esse lugar tem ficha significa que a válvula está na posição central. A Figura 52b apresenta um modelo sintetizado ao da Figura 52a. Os lugares de entrada e de saída para cada transição deste elemento, apresenta-se no Quadro 7. Os lugares estão em função da etiqueta em cada bloco.

Quadro 7. Lugares de entrada e saída das transições na configuração centro da válvula de controle direcional 4/3 com centro aberto.

t_i	Entrada	Saída
t ₁	Lugar “a1” do bloco “Porta de entrada P” e Lugar “a1” do bloco “Porta de entrada T”	Lugar “a1” do bloco “Porta de saída A” e Lugar “a1” do bloco “Porta de saída B”
t ₂	Lugar “a2” do bloco “Porta de entrada P” e Lugar “a2” do bloco “Porta de entrada T”	Lugar “a2” do bloco “Porta de saída A” e Lugar “a2” do bloco “Porta de saída B”
t ₃	Lugar “a1” do bloco “Porta de entrada P” e Lugar “a2” do bloco “Porta de entrada T”	Lugar “a2” do bloco “Porta de saída A” e Lugar “a2” do bloco “Porta de saída B”
t ₄	Lugar “a2” do bloco “Porta de entrada P” e Lugar “a1” do bloco “Porta de entrada T”	Lugar “a2” do bloco “Porta de saída A” e Lugar “a2” do bloco “Porta de saída B”
t ₅	Lugar “a3” do bloco “Pressurização/despressurização da porta de saída A” e Lugar “a3” do bloco “Pressurização/despressurização da porta de saída B”	Lugar “a3” do bloco “Pressurização/despressurização da porta de entrada P” e Lugar “a3” do bloco “Pressurização/despressurização da porta de entrada T”
t ₆	Lugar “a4” do bloco “Pressurização/despressurização da porta de saída A” e Lugar “a4” do bloco “Pressurização/despressurização da porta de saída B”	Lugar “a4” do bloco “Pressurização/despressurização da porta de entrada P” e Lugar “a4” do bloco “Pressurização/despressurização da porta de entrada T”

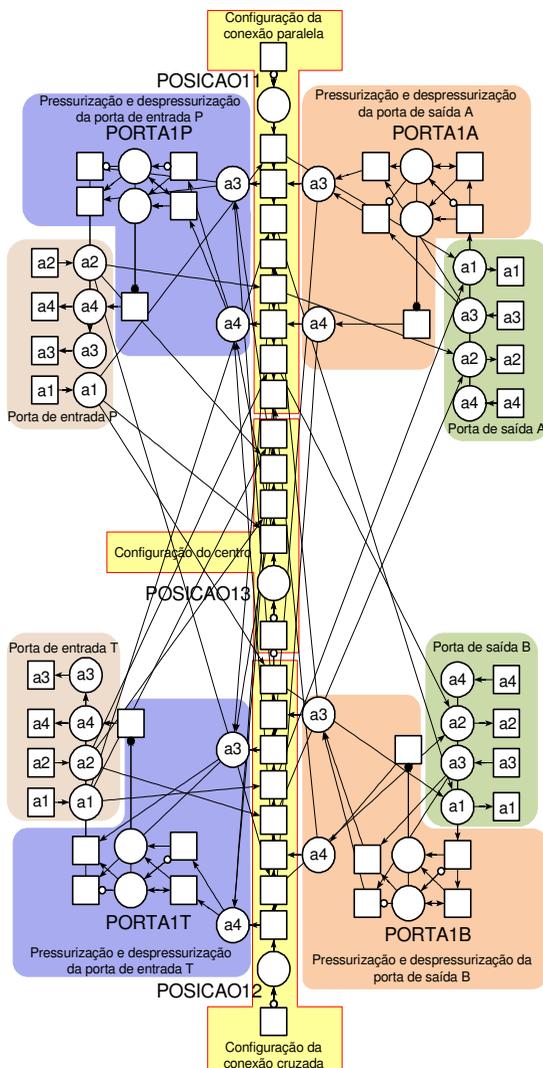
Fonte: Elaborado pelo autor.

A inserção das interligações e dos modelos padrão em RP para cada classe de bloco, identificados na Figura 45, permitirá a obtenção do modelo padrão em RP da válvula 4/3 com centro com porta P bloqueada e portas T, A, e B interligadas, tal como mostrado na Figura 54.

Na Figura 53 e na Figura 54, os lugares com nome “PORTA1P”, “PORTA1A”, “PORTA1T”, “PORTA1B” representam a pressão da porta P, A, T e B, respectivamente. Os lugares com nome

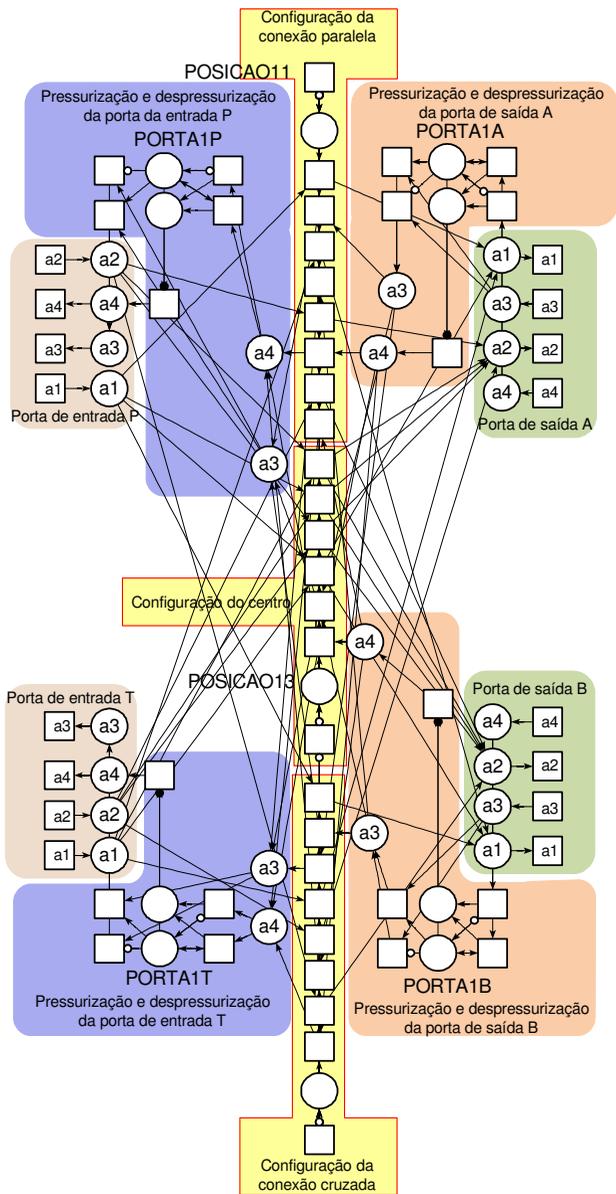
“POSICAO11”, “POSICAO 12” e “POSICAO13” representam a seleção da configuração paralela, cruzada e centro da válvula, respectivamente.

Figura 53. Modelo padrão da válvula 4/3 com centro fechado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 54. Modelo padrão da válvula 4/3 com centro aberto.

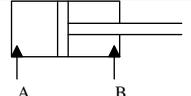


Fonte: Elaborada pelo autor.

Modelagem de cilindros de dupla ação.

Os cilindros têm a função de transformar a energia hidráulica em energia mecânica. O cilindro analisado nesta seção é um cilindro assimétrico cujo símbolo e a definição adotada nesta dissertação para as portas de entrada e saída são apresentados no Quadro 8.

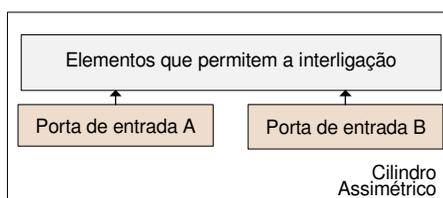
Quadro 8. Portas de entrada e saída para o cilindro assimétrico de dupla ação.

Componente hidráulico		Porta de entrada	Porta de saída
Cilindro assimétrico de dupla ação		A, B	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 55, mostram-se os elementos de um cilindro assimétrico, sendo possível identificar as portas de entrada, conforme o estabelecido no Quadro 8. O conjunto de elementos que permitem a interligação entre as portas é mantido como uma caixa preta.

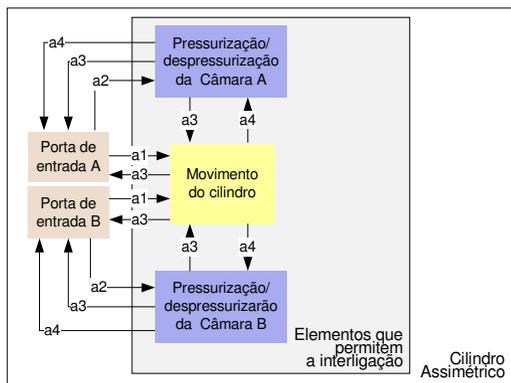
Figura 55. Elementos de um cilindro assimétrico.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A modelagem da perspectiva comportamental do cilindro baseia-se também em representar o fluxo da matéria e energia, e a pressurização e despressurização dos componentes. Para atingir este objetivo, o modelo final deve possuir os elementos e as interligações descritas na Figura 56.

Figura 56. Elementos e interligações do cilindro assimétrico de dupla ação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 56, identificam-se cinco elementos que podem ser agrupados em três classes:

- i. *Bloco para uma porta de entrada*: “Porta de entrada A” e “Porta de Entrada B”.
- ii. *Bloco de pressurização/despressurização para uma câmara*: “Pressurização/despressurização da câmara A” e “Pressurização/despressurização da câmara B”.
- vi. *Bloco para o movimento do cilindro*: “Movimento do cilindro”.

Na sequência são descritos os modelos padrão em RP para cada classe de bloco.

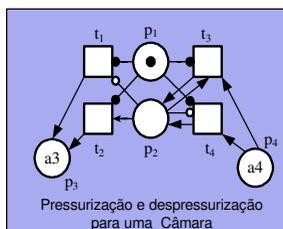
O *bloco para uma porta de entrada* tem uma representação padrão usando RP, conforme apresentado e explicado na Figura 31.

O modelo padrão em RP para o *bloco de pressurização/despressurização para uma câmara* apresenta-se na Figura 57. Este modelo possui um lugar (“ p_2 ”) que representa a pressão da câmara, isto é, quando esse lugar tem uma ficha significa que essa câmara está pressurizada. Portanto, o bloco de pressurização/despressurização para uma câmara é o encarregado de colocar ou retirar a ficha do lugar que representa a pressão da câmara (“ p_2 ”), conforme requerido. Além disso, este modelo possui um lugar que representa a restrição da câmara (“ p_1 ”). Este lugar sempre terá uma ficha. Na Figura 58 está exemplificada a interligação deste modelo com a porta de entrada A.

Neste modelo (Figura 57), o processo de pressurização inicia-se quando o lugar com etiqueta “a4” (ou nome “p4”) possui uma ficha fornecida pelo bloco “Movimento do cilindro” (Figura 58). Posteriormente, as transições “t3” e “t4” permitem pressurizar a câmara do cilindro, isto é, colocar uma ficha no lugar “p2”. Utilizam-se duas transições porque se consideram duas possíveis condições iniciais do lugar “p2”: a transição “t2” será habilitada quando o lugar “p2” possui ficha (a câmara está pressurizada inicialmente) e a transição “t3” será habilitada quando o lugar “p2” não possui ficha (a câmara não está pressurizada inicialmente). As transições “t3” e “t4” devem ser ligadas ao lugar que representa o quarto processo (lugar com etiqueta “a4”) no bloco “Porta de entrada A”, conforme mostrado na Figura 58. Por outro lado, o processo de despressurização inicia-se quando o lugar que representa o segundo processo (lugar com etiqueta “a2”) no bloco “Porta de entrada A”, ligado às transições “t1” e “t2” (Figura 58), possui uma ficha. Depois, as transições “t1” e “t2” permitem despressurizar a câmara, isto é, retirar a ficha do lugar “p2”, se houver. Empregam-se duas transições porque se consideram duas possíveis condições iniciais do lugar “p2”: a transição “t0” será habilitada quando o lugar “p2” possui ficha (a câmara está pressurizada inicialmente) e a transição “t1” será habilitada quando o lugar “p2” não possui ficha (a câmara não está pressurizada inicialmente). Após a despressurização da porta, a ficha continua seu caminho pelo lugar “p3”. O lugar com etiqueta “a3” (ou nome “p3”) deve ser ligado ao bloco “Movimento do cilindro” (Figura 58).

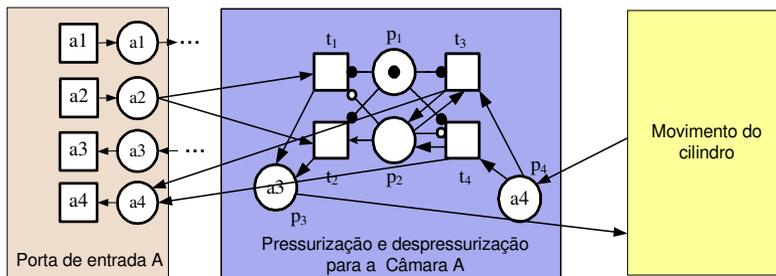
A interligação da Figura 58 é um exemplo para a câmara A. A mesma interligação deve ser realizada entre os blocos: “Porta de entrada B” e “Pressurização/despressurização da câmara B”.

Figura 57. Modelo padrão em RP para o bloco de pressurização/despressurização para uma câmara.



Fonte: Elaborada pelo autor.

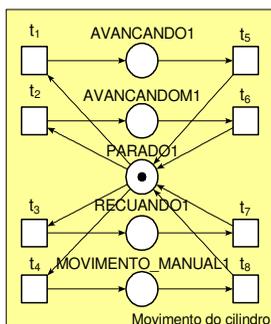
Figura 58. Exemplo de interligação dos blocos “Porta de entrada A” e “Pressurização/despressurização da câmara A”.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O modelo em RP do *bloco para o movimento do cilindro* (Figura 56) apresenta-se na Figura 59.

Figura 59. Modelo padrão em RP para o bloco de movimento do cilindro.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Este modelo possui cinco lugares que descrevem cinco tipos de movimentos: parado (“Parado1”), avançando (“Avancando1”), recuando (“Recuando1”), livre movimento (“Movimento_manual1”) e avançando a maior velocidade (“AvancandoM1”). No lugar que representa a posição “parado” do cilindro (“Parado1”) sempre terá uma ficha no início da verificação, visto que descreve a sua condição inicial. O lugar que representa o movimento “avançando” (“Avancando1”) possuirá uma ficha quando pela câmara A chega uma ficha do primeiro processo

(conexão com o suprimento de energia/matéria) e pela câmara B chega uma ficha do segundo processo (conexão com o retorno). Por sua vez, o lugar que representa o movimento “recuando” (“Recuando1”) possuirá uma ficha quando pela câmara A chega uma ficha do segundo processo (conexão com o retorno) e pela câmara B chega uma ficha do primeiro processo (conexão com o suprimento de energia/matéria). Por outro lado, o lugar que representa o “livre movimento” (“Movimento_manual1”) possuirá uma ficha quando pelas câmaras A e B chegam fichas do segundo processo (conexão com o retorno). Por último, quando pelas câmaras A e B chegam fichas do primeiro processo (conexão com o suprimento de energia) o lugar que representa o movimento “avançando a maior velocidade” (“AvancandoM1”) possuirá uma ficha.

As transições do modelo da Figura 59 têm como função realizar a conexão entre os blocos das portas de entrada do cilindro e a conexão entre os blocos de pressurização/despressurização das câmaras (Figura 56). Os lugares de entrada para as transições “t₁”, “t₂”, “t₃” e “t₄”, assim como os lugares de saída para as transições “t₅”, “t₆”, “t₇” e “t₈” apresentam-se no Quadro 9. Os lugares estão em função da etiqueta em cada bloco.

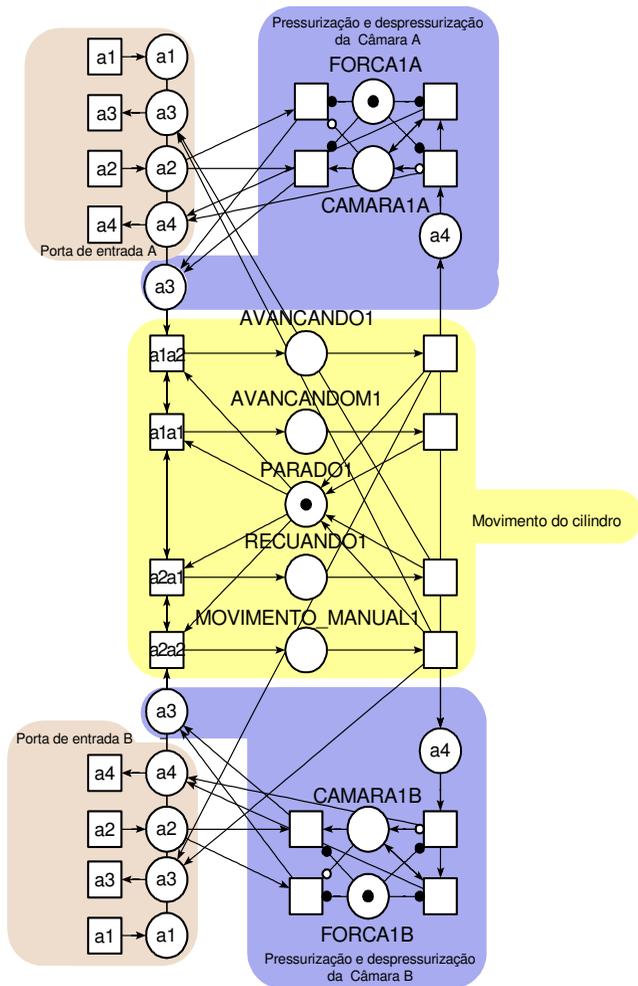
Quadro 9. Lugares de entrada e saída das transições no bloco “Movimento do cilindro”.

t_i	Entradas
t ₁	Lugar “a1” do bloco “Porta de entrada A” e Lugar “a3” do bloco “Pressurização/despressurização da câmara B”
t ₂	Lugar “a1” do bloco “Porta de entrada A” e Lugar “a1” do bloco “Porta de entrada B”
t ₃	Lugar “a3” do bloco “Pressurização/despressurização da câmara A” e Lugar “a1” do bloco “Porta de entrada B”
t ₄	Lugar “a3” do bloco “Pressurização/despressurização da câmara A” e Lugar “a3” do bloco “Pressurização/despressurização da câmara B”
t_i	Saídas
t ₅	Lugar “a4” do bloco “Pressurização/despressurização da câmara A” e Lugar “a3” do bloco “Porta de entrada B”
t ₆	Lugar “a4” do bloco “Pressurização/despressurização da câmara A” e Lugar “a4” do bloco “Pressurização/despressurização da câmara B”
t ₇	Lugar “a3” do bloco “Porta de entrada A” e Lugar “a4” do bloco “Pressurização/despressurização da câmara B”
t ₈	Lugar “a3” do bloco “Porta de entrada A” e Lugar “a3” do bloco “Porta de entrada A”

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, com base na representação da Figura 56 e com a inserção do modelo padrão para todas as classes de blocos, é possível obter o modelo padrão usando RP do cilindro assimétrico. O modelo em RP para o cilindro assimétrico mostra-se na Figura 60.

Figura 60. Modelo padrão em RP do cilindro assimétrico de dupla ação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Modelagem de motor-bomba

O conjunto motor-bomba é o conjunto de elementos que converte a energia elétrica em energia mecânica e a energia mecânica é convertida em energia hidráulica. Assim, o conjunto motor-bomba transmite energia através de fluido hidráulico. O símbolo e a definição adotados nesta dissertação para as portas de entrada e saída para o motor-bomba são apresentados no Quadro 10.

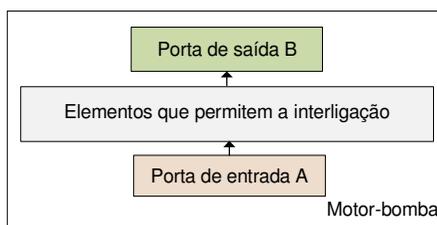
Quadro 10. Portas de entrada e saída para o motor-bomba.

Componente hidráulico		Porta de entrada	Porta de saída
Motor - bomba		A	B

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 61, mostram-se os elementos de um motor-bomba, sendo possível identificar as portas de entrada, conforme o estabelecido no Quadro 10. O conjunto de elementos que permitem a interligação entre as portas é mantido como uma caixa preta.

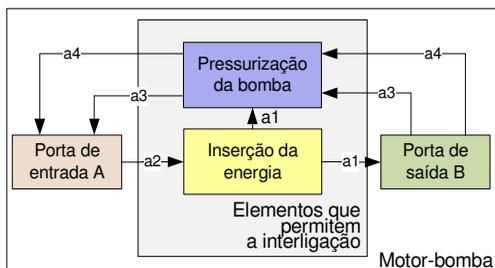
Figura 61. Elementos de um motor-bomba.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A modelagem da perspectiva comportamental do cilindro baseia-se também em representar o fluxo da matéria e energia, e a pressurização e despressurização dos componentes. Para atingir este objetivo, o modelo final deve possuir os elementos e as interligações descritas na Figura 62.

Figura 62. Elementos e interligações do motor-bomba.

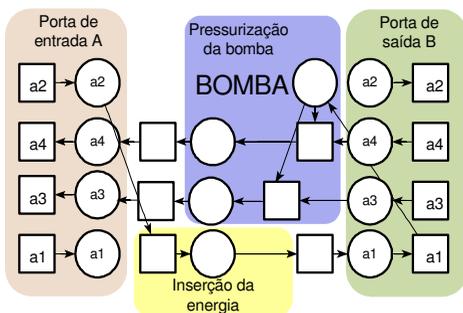


Fonte: Elaborada pelo autor.

Os blocos “Porta de entrada A” e “Porta de saída B” (Figura 62), têm uma representação padrão usando RP, conforme apresentado e explicado na Figura 31 e na Figura 32.

Conforme mostrado na Figura 62, quando o bloco “Inserção de energia” recebe uma ficha do segundo processo, o motor bomba muda o caminho da ficha ao primeiro processo. O bloco “Pressurização da bomba” possui um lugar que representa a pressão do motor-bomba (“BOMBA”), isto é, quando o lugar tem uma ficha significa que o motor bomba enviou uma ficha pela sequência de transições com a etiqueta “a1”. O modelo padrão usando RP do motor-bomba mostra-se na Figura 63.

Figura 63. Modelo padrão em RP do motor-bomba.

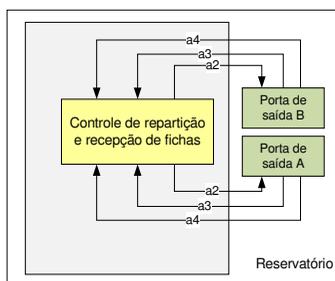


Fonte: Elaborada pelo autor.

Modelagem de reservatório

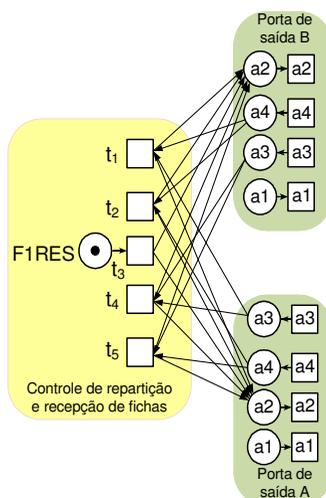
A modelagem da perspectiva comportamental baseia-se em entregar fichas que representam a conexão com o reservatório, assim como de receber as fichas de pressurização ou depressurização. Para atingir este objetivo, o modelo final deve possuir os elementos e as interligações descritas na Figura 64. Assim, o modelo padrão em RP do reservatório pode ser observado na Figura 65.

Figura 64. Elementos e interligações do reservatório.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 65. Modelo padrão em RP do reservatório.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 65, a transição “t₃” tem como entrada o lugar “FIRE” e como saídas os lugares “a₂” dos blocos “Porta de entrada B” e “Porta de entrada A”. O lugar “FIRE” possui a ficha que representa a conexão com um elemento de retorno e será enviada pela sequência de transições com etiqueta “a₂” (segundo processo). Os lugares de entrada e saída para as transições “t₁”, “t₂”, “t₄” e “t₅” do elemento “Controle e repartição de fichas” (Figura 65), são descritos no Quadro 11. Os lugares estão em função da etiqueta em cada bloco.

Quadro 11. Lugares de entrada e saída das transições do elemento “Controle e repartição de fichas” do reservatório.

t _i	Entradas	Saídas
t ₁	Lugar “a ₄ ” do bloco “Porta de entrada B” e Lugar “a ₃ ” do bloco “Porta de entrada A”	Lugar “a ₂ ” do bloco “Porta de entrada B” e Lugar “a ₂ ” do bloco “Porta de entrada A”
t ₂	Lugar “a ₄ ” do bloco “Porta de entrada B” e Lugar “a ₄ ” do bloco “Porta de entrada A”	
t ₄	Lugar “a ₃ ” do bloco “Porta de entrada B” e Lugar “a ₃ ” do bloco “Porta de entrada A”	
t ₅	Lugar “a ₃ ” do bloco “Porta de entrada B” e Lugar “a ₄ ” do bloco “Porta de entrada A”	

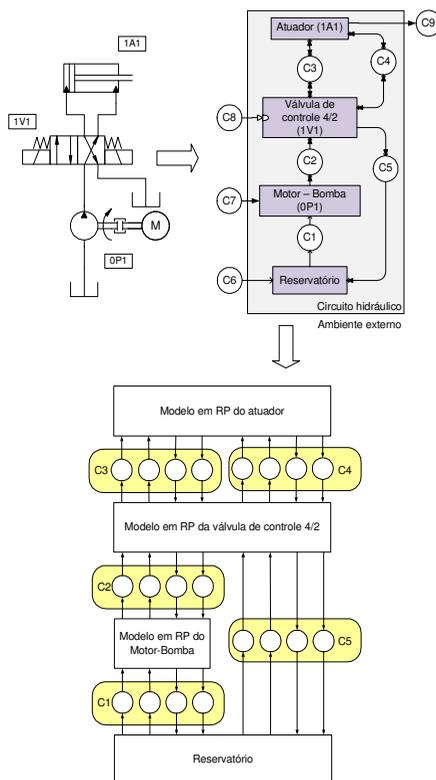
Fonte: Elaborado pelo autor.

6.1.2.1.2 Modelo padrão do canal e arco.

O modelo padrão em RP do canal está representado por quatro lugares. Cada lugar representa um processo e junto aos arcos permitirá a união entre os componentes. Para a modelagem dos arcos em RP, não se considera a orientação nem o tipo de seta do modelo usando rede C-A, o importante é permitir a união entre os componentes respeitando a direção e independência dos quatro processos.

Assim, dando continuidade ao estudo da Figura 26, é possível transformar os lugares e seus arcos por seus modelos em RP, conforme pode ser observado na Figura 66.

Figura 66. Circuito hidráulico, o seu modelo usando rede C-A e a substituição do canal por seu modelo padrão em RP.

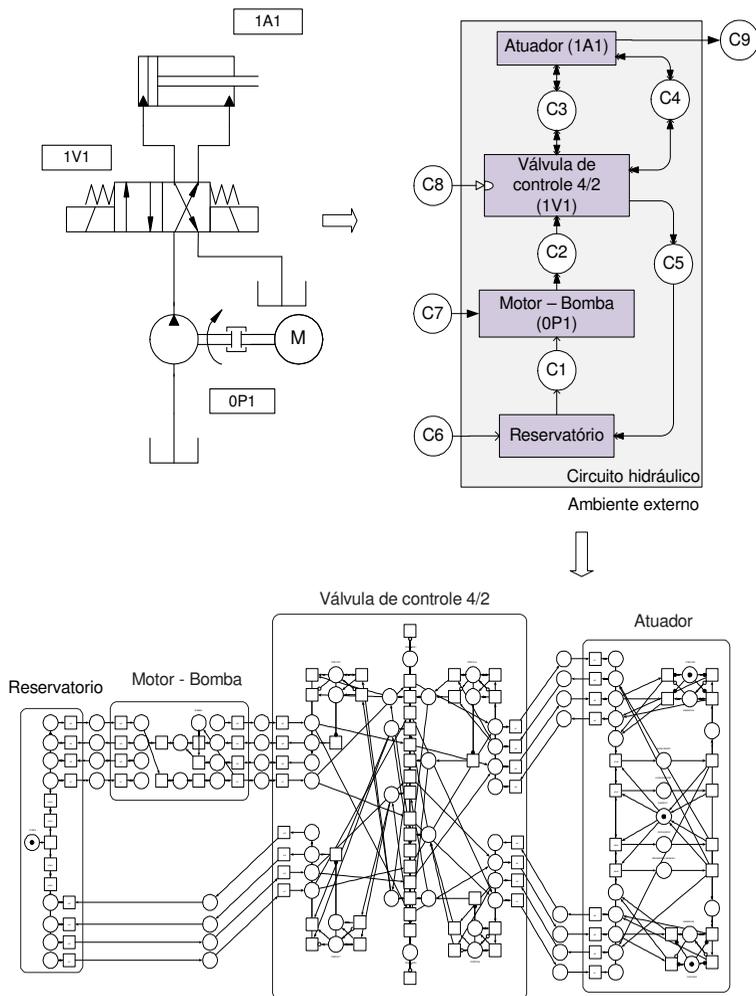


Fonte: Elaborada pelo autor.

Em suma, a RP global do circuito é obtida rapidamente através da substituição dos modelos padrão em RP das agências e dos canais da rede C-A. Na Figura 67 apresenta-se o exemplo anterior (Figura 66) com seus modelos usando rede C-A e RP. O modelo global do circuito usando RP da Figura 67 pode ser observado em melhor detalhe na Figura A. 1 a qual está localizada no Apêndice A.

É importante ressaltar que neste nível de modelagem, usando RP, os componentes e as relações entre eles são preservados e seus detalhes estão descritos em uma perspectiva comportamental.

Figura 67. Circuito hidráulico, modelo usando rede C-A e modelo usando RP.



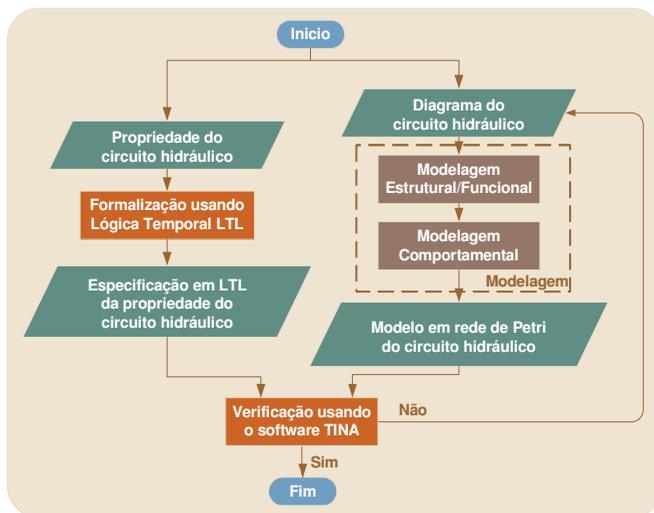
Fonte: Elaborada pelo autor.

6.2 FORMALIZAÇÃO DE PROPRIEDADES E VERIFICAÇÃO

Ao ter concluído a atividade de modelagem, gera-se como resultado o modelo comportamental do circuito hidráulico e, portanto,

pode-se dar início as etapas de formalização e verificação do método proposto (Figura 68).

Figura 68. Ferramentas para formalização de propriedades e verificação no método proposto.



Fonte: Elaborada pelo autor.

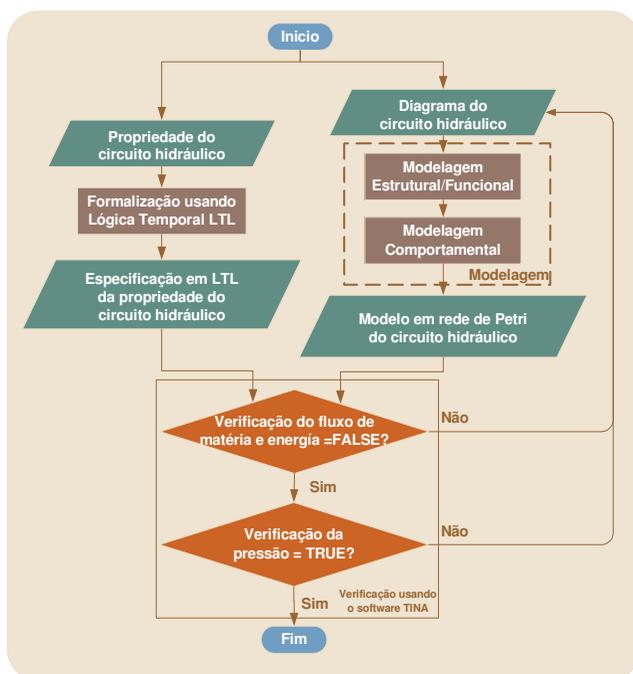
A *Formalização* de propriedades tem como objetivo descrever as propriedades em um formato que possa ser entendido pelo algoritmo utilizado na etapa de verificação. Sendo que a etapa de verificação é realizada pelo programa TINA (BERTHOMIEU; RIBET; VERNADAT, 2004), portanto as propriedades devem ser formalizadas empregando a lógica temporal LTL. O programa TINA (BERTHOMIEU; RIBET; VERNADAT, 2004), foi desenvolvido pelo Laboratório de Análise e Arquitetura de Sistemas (LAAS/CNRS) da França. Este programa é utilizado neste trabalho porque permite a edição e análise de RP ordinárias e temporais. Assim, o *model checker* disponível no TINA atualmente, é denominado “*selt*”, que permite a verificação entre um modelo de RP e uma especificação em LTL. Segundo Berthomieu e Vernadat (2006), outras propostas de *model checkers* estão sendo elaboradas para este programa.

Continuando com o processo de formalização das propriedades, é relevante mencionar que na atividade de modelagem se estabeleceu

modelos padrão em RP para cada tipo de agência e igualmente, propõe-se um modelo padrão para o canal usando RP. Conforme mencionado previamente, o desenvolvimento destes modelos padrão fundamenta-se em representar o fluxo da matéria e energia, assim como a pressurização e despressurização dos componentes.

Portanto, da mesma forma do que na modelagem, nesta etapa devem estabelecer-se propriedades para realizar o processo de verificação. Conseqüentemente, com base nos modelos desenvolvidos para cada componente, se propõe especificações em LTL para dois tipos de verificação. Assim, a verificação é realizada em duas etapas, conforme pode ser observado na Figura 69.

Figura 69. Detalhe da etapa de verificação do método proposto.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A primeira etapa é a *verificação do fluxo de matéria e energia*. O cenário proposto, nesta etapa, supõe que a seleção de determinada posição da válvula e determinado movimento do atuador são possíveis

no circuito. Assim, o objetivo da verificação, neste caso, é constatar se o cenário proposto é plausível dentro das características do circuito, isto é, se é possível que o sistema evolua de acordo com as imposições temporais descritas. Para realizar esta verificação se emprega uma negação do cenário proposto. Esta estratégia é comumente utilizada em LTL para verificar especificações que expressam condições possíveis ao longo de algum caminho. Conseqüentemente, se o resultado da verificação é falso, então o cenário proposto é plausível e procede-se com a segunda etapa da verificação. No caso contrário, se o resultado é verdadeiro então o circuito hidráulico deve ser revisado.

A seguir, no Quadro 12, apresenta-se a propriedade padrão desta primeira etapa, a especificação em LTL e no programa TINA.

Quadro 12. Propriedade, especificação em LTL e no programa TINA para a verificação do fluxo de matéria e energia.

Propriedade
Não é possível atingir a situação em que determinado “estado que identifica a seleção da posição da válvula” e determinado “estado que identifica o tipo movimento do atuador” estejam ativos simultaneamente no circuito.
Especificação em LTL
$\neg (F (“estado que identifica a seleção da posição da válvula” \wedge “estado que identifica o tipo movimento do atuador”))$
Especificação no programa TINA
$\neg \langle > (“estado que identifica a seleção da posição da válvula” \wedge “estado que identifica o tipo movimento do atuador”)$

Fonte: Elaborado pelo autor.

A segunda etapa é a *verificação da pressão*. Nesta verificação, o cenário proposto supõe que determinado movimento do atuador resultará finalmente na pressurização e despressurização de determinados componentes. Para este tipo de verificação é utilizada a propriedade de vivacidade. Esta propriedade expressa que sob certas condições algo no final ocorrerá. Assim, nesta verificação, se o resultado é verdadeiro então a concepção do circuito está correta. Pelo contrário, se o resultado da verificação é falso, gera-se um exemplo que pode ser usado para identificar a origem do erro para posteriormente proceder com a revisão do circuito.

A seguir, no Quadro 13, apresenta-se a propriedade padrão da etapa de verificação de pressão, sua especificação em LTL e no programa TINA.

Quadro 13. Propriedade, especificação em LTL e no programa TINA para a verificação da pressão.

Propriedade
Para todos os casos, se for ativado determinado “estado que identifica o tipo movimento do atuador” então é certo que finalmente acontecerá a ativação de determinados “estados que identificam a pressurização dos componentes” e a desativação de determinados “estados que identificam a pressurização dos componentes”
Especificação em LTL
$G(\text{“estado que identifica o tipo movimento do atuador”} \Rightarrow F((\text{“estados que identificam a pressurização dos componentes”}) \wedge \neg (\text{“estados que identificam a pressurização dos componentes”})))$
Especificação no programa TINA
<code>[] (("estado que identifica o tipo movimento do atuador") => <> (("estados que identificam a pressurização dos componentes") ^ ~ ("estados que identificam a pressurização dos componentes")))</code>

Fonte: Elaborado pelo autor.

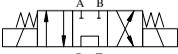
6.3 LIMITAÇÕES DA PROPOSTA

Neste momento, o método proposto apresenta a limitação de não poder ser utilizado nos circuitos que possuem componentes, onde não se respeite as definições das portas de entrada e saída descritas anteriormente.

Um exemplo de válvula cujo comportamento em um circuito não pode ser verificado, usando o método proposto, é a válvula de quatro vias e três posições com centro tandem. O símbolo e a definição das portas de entrada e saída para uma válvula 4/3 com centro tandem, são apresentados no Quadro 14.

Nessa válvula, as portas P e T se comportam como portas de entrada e as portas A e B se comportam como portas de saída. No entanto, a porta T também se comporta como porta de saída. Portanto, isto não permite que os circuitos que possuem este tipo de válvula possam ser analisados usando o método proposto neste trabalho.

Quadro 14. Portas de entrada e saída para a válvula 4/3 com centro tandem.

Componente hidráulico	Símbolo	Portas de entrada	Portas de saída
Válvula 4/3 com centro tandem		P, T	A, B, T

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em geral, o método proposto não pode ser utilizado se no circuito existe uma válvula de controle direcional que apresente as seguintes situações:

- As portas A ou B funcionam como portas de entrada, isto é como portas por onde o componente recebe o fluido hidráulico.
- As portas P ou T funcionem como portas de saída, isto é como portas do componente que entrega o fluido hidráulico a outro elemento do circuito.

Assim, a fundamentação do método apresentado, poderá dar origem a modificações que gradualmente permitam atender todos os tipos de componentes e configurações dos circuitos hidráulicos.

7 APLICAÇÃO DA PROPOSTA EM CIRCUITOS HIDRÁULICOS

Visando um melhor entendimento do método proposto, na sequência apresenta-se sua aplicação em seis circuitos hidráulicos básicos. No Quadro 15 pode-se identificar o nome dos estados que serão utilizados na etapa de verificação dos circuitos.

Quadro 15. Identificação dos estados nos modelos usando rede de Petri.

Representação		Nome do estado
Seleção da posição da válvula 1V1	Posição paralela	POSICAO11
	Posição cruzada	POSICAO12
Seleção da posição da válvula 1V2	Posição paralela	POSICAO21
	Posição cruzada	POSICAO22
Seleção da posição da válvula 1V3	Posição paralela	POSICAO11
	Posição cruzada	POSICAO12
	Posição central	POSICAO13
Tipo de movimento do atuador 1A1	Avançando	AVANCANDO1
	Avançando a maior v.	AVANCANDOM1
	Recuando	RECUANDO1
	Parado	PARADO1
	Livre movimento	MOVIMENTO_MANUAL1
Tipo de movimento do atuador 1A2	Avançando	AVANCANDO2
	Avançando a maior v.	AVANCANDOM2
	Recuando	RECUANDO2
	Parado	PARADO2
	Livre movimento	MOVIMENTO_MANUAL2
Pressão do atuador 1A1	Pressão na câmara A	CAMARA1A
	Pressão na câmara B	CAMARA1B
Pressão do atuador 1A2	Pressão na câmara A	CAMARA2A
	Pressão na câmara B	CAMARA2B
Pressão da válvula 1V1 e 1V3	Pressão na porta P	PORTA1P
	Pressão na porta T	PORTA1T
	Pressão na porta A	PORTA1A
	Pressão na porta B	PORTA1B
Pressão da válvula 1V2	Pressão na porta P	PORTA2P
	Pressão na porta T	PORTA2T
	Pressão na porta A	PORTA2A
	Pressão na porta B	PORTA2B

Fonte: Elaborado pelo autor.

7.1 CIRCUITO HIDRÁULICO 1

Nesta seção, verifica-se o exemplo do circuito hidráulico da Figura 67. O modelo em RP (Figura A. 1) do circuito, conforme o explicado no capítulo anterior, é obtido mediante a substituição das agências e canais do modelo usando rede C-A por seus modelos padrões em RP. Portanto, tendo em consideração o modelo em RP do circuito hidráulico e as propriedades que deve satisfazer, se procede a realizar a formalização em LTL e a verificação. No Quadro 15 podem-se identificar os nomes dos estados que são de interesse para este circuito.

A seguir, no Quadro 16 apresenta-se a primeira propriedade da verificação do fluxo de matéria e energia, a especificação em LTL, a verificação no programa TINA e o resultado. Conforme explicado anteriormente, o cenário proposto, nesta etapa, supõe que a seleção de determinada posição da válvula com determinado movimento do atuador são possíveis no circuito.

Quadro 16. Primeira propriedade para a verificação do fluxo de matéria e energia do circuito 1.

Verificação do fluxo de matéria e energia - Propriedade 1
Não é possível atingir a situação em que a válvula 1V1 está na posição paralela (POSICAO11) e o atuador 1A1 está avançando (AVANCANDO1) simultaneamente.
Especificação em LTL
$\neg (F (POSICAO11 \wedge AVANCANDO1))$
Verificação no programa TINA
<pre> -<>(POSICAO11 /\ AVANCANDO1)); FALSE state 0: F1RES F2RES FORCA1A FORCA1B PARADO1 -t28 ... (preserving T)-> state 139: AVANCANDO1 FORCA1A FORCA1B PORTA1B PORTA1P POSICAO11*2 p33 -t84 ... (preserving POSICAO11 /\ AVANCANDO1)-> state 438: FORCA1A FORCA1B PARADO1 PORTA1B PORTA1P POSICAO11*2 p15 p33 p79 [accepting all] 0.000s </pre>
Resultado da verificação
FALSO

Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado da verificação, conforme pode ser observado no Quadro 16, é falso. Portanto o cenário proposto é plausível e o *model checker* mostra um exemplo. Assim, o circuito está correto para esta especificação. Nesse contexto, se pode continuar com a verificação da segunda propriedade para o fluxo de matéria e energia.

No Quadro 17, apresenta-se a segunda propriedade da verificação do fluxo de matéria e energia, a especificação em LTL, a verificação no programa TINA e o resultado. Da mesma forma, o resultado da verificação da segunda propriedade é falso. Portanto o cenário proposto também é plausível. Assim, o circuito está correto e se da por concluída a etapa de verificação do fluxo de energia e matéria.

Quadro 17. Segunda propriedade para a verificação do fluxo de matéria e energia do circuito 1.

Verificação do fluxo de matéria e energia - Propriedade 2
Não é possível atingir a situação em que a válvula 1V1 está na posição cruzada (POSICAO12) e o atuador 1A1 está recuando (RECUANDO1) simultaneamente.
Especificação em LTL
$\neg (F (POSICAO12 \wedge RECUANDO1))$
Verificação no programa TINA
<pre> - (<> (POSICAO12 /\ RECUANDO1)); FALSE state 0: F1RES F2RES FORCA1A FORCA1B PARADO1 -t28 ... (preserving T)-> state 512: CAMARA1B FORCA1A FORCA1B PORTA1B PORTA1P POSICAO12*2 RECUANDO1 p33 -t83 ... (preserving POSICAO12 /\ RECUANDO1)-> state 763: CAMARA1B FORCA1A FORCA1B PARADO1 PORTA1B PORTA1P POSICAO12*2 p33 p69 p8 [accepting all] 0.000s </pre>
Resultado da verificação
FALSO

Fonte: Elaborado pelo autor.

Posteriormente, se procede com a segunda etapa que consiste em verificar a pressão nos componentes conforme o movimento do atuador. Esta etapa, conforme explicado previamente, assume que determinado movimento do atuador por fim pressurizará e despressurizará determinados componentes. No Quadro 18, apresenta-se a primeira

propriedade da etapa de verificação de pressão, sua especificação em LTL, a verificação no programa TINA e o resultado.

Quadro 18. Primeira propriedade para a verificação de pressão do circuito 1.

Verificação da pressão - Propriedade 1
Para todos os casos, se o atuador 1A1 está avançando (AVANCANDO1) então é certo que finalmente serão pressurizadas a câmara A do atuador 1A1 (CAMARA1A) e as portas P e A da válvula 1V1 (PORTA1P e PORTA1A).
Especificação em LTL
$G(AVANCANDO1 \Rightarrow F(CAMARA1A \wedge PORTA1P \wedge PORTA1A))$
Verificação no programa TINA
[] (AVANCANDO1 => <> (CAMARA1A /\ PORTA1P /\ PORTA1A)); TRUE 0.047s
Resultado da verificação
VERDADEIRO

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, o resultado da verificação da pressão para esta propriedade é verdadeiro e conclui-se que o circuito até o momento está correto. Logo, se prossegue com a segunda propriedade para a verificação da pressão. No Quadro 19, apresentam-se a propriedade, a sua especificação em LTL e a verificação no programa TINA.

Quadro 19. Segunda propriedade para a verificação de pressão do circuito 1.

Verificação da pressão - Propriedade 2
Para todos os casos, se o atuador 1A1 está recuando (RECUANDO1) então é certo que finalmente serão pressurizadas a câmara B do atuador 1A1 (CAMARA1B), e as portas P e B da válvula 1V1 (PORTA1P e PORTA1B).
Especificação em LTL
$G(RECUANDO1 \Rightarrow F(CAMARA1B \wedge PORTA1P \wedge PORTA1B))$
Verificação no programa TINA
[] (RECUANDO1 => <> (CAMARA1B /\ PORTA1P /\ PORTA1B)); TRUE 0.016s
Resultado da verificação
VERDADEIRO

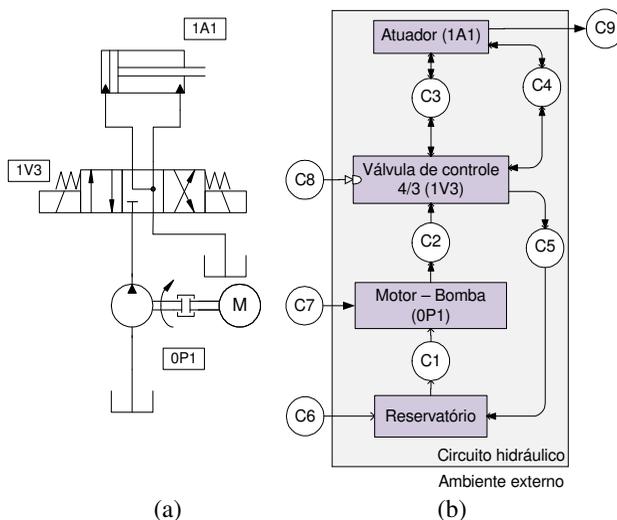
Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado da última propriedade também é verdadeiro. Em suma, todas as propriedades foram verificadas e, portanto, pode-se concluir que a concepção do circuito hidráulico está correta.

7.2 CIRCUITO HIDRÁULICO 2

Na Figura 70, apresenta-se o segundo circuito hidráulico e sua representação usando rede C-A. Este circuito difere do primeiro exemplo visto que utiliza uma válvula de quatro vias e três posições com centro com porta P bloqueada e portas A, B e T interligadas.

Figura 70. Segundo exemplo. (a) Circuito hidráulico; (b) Modelo usando rede C-A.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O modelo usando RP do circuito pode ser observado na Figura A. 2 (Apêndice A). Da mesma forma, no Quadro 15 podem-se identificar os nomes dos estados que serão utilizados na etapa de verificação.

Para este circuito, é realizada a verificação somente para a posição central, pois o processo para as posições paralela e cruzada da válvula é similar ao realizado no primeiro circuito do capítulo. Assim, no Quadro 20 apresentam-se as propriedades para a verificação da pressão e do fluxo de matéria e energia e o resultado de ambas. As

especificações em LTL e a verificação no programa TINA mostram-se nos Quadro B. 1 e Quadro B. 2.

Quadro 20. Verificação do fluxo de matéria e energia e da pressão do circuito 2.

<i>Verificação do fluxo de matéria e energia</i>	
Propriedade 1	Resultado
Não é possível atingir a situação em que a válvula 1V3 está na posição central (POSICAO13) e o atuador 1A1 tenha livre movimento (MOVIMENTO_MANUAL1) simultaneamente.	FALSO
<i>Verificação da pressão</i>	
Propriedade 1	Resultado
Para todos os casos, se o atuador 1A1 tem livre movimento (MOVIMENTO_MANUAL1) então é certo que finalmente será pressurizada a porta P (PORTA1P) da válvula 1V3 e as portas e câmaras restantes não deverão estar pressurizadas (PORTA1A, PORTA1B, PORTA1T, CAMARA1A, CAMARA1B).	VERDADEIRO

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos resultados obtidos em ambos os processos de verificação, é possível concluir que a concepção do circuito é correta.

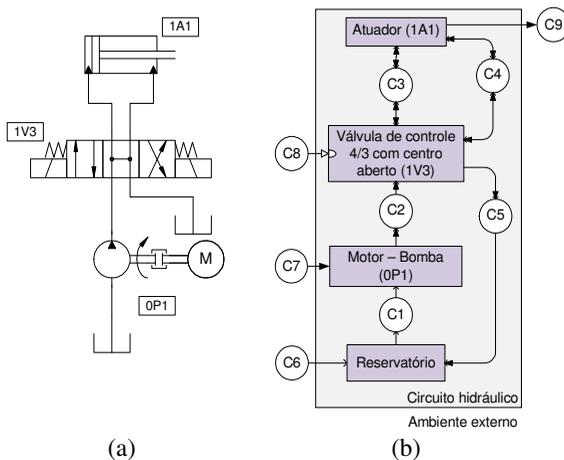
7.3 CIRCUITO HIDRÁULICO 3

Na Figura 71, apresenta-se o terceiro circuito hidráulico e sua representação usando rede C-A. Neste circuito, utiliza-se uma válvula de quatro vias e três posições com centro aberto.

O modelo usando RP do circuito pode ser observado na Figura A. 3 (Apêndice A). Neste circuito, da mesma forma que no circuito anterior, é realizada a verificação somente para a posição central. Assim, no Quadro 21 apresentam-se as propriedades para a verificação da pressão e do fluxo de matéria e energia e o resultado de ambas. As especificações em LTL e a verificação no programa TINA mostram-se nos Quadro B. 3 e Quadro B. 4.

Os resultados obtidos em ambos os processos de verificação permitem concluir que a concepção do circuito é a correta.

Figura 71. Terceiro exemplo. (a) Circuito hidráulico; (b) Modelo usando rede C-A.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Quadro 21. Verificação do fluxo de matéria e energia e da pressão do circuito 3.

Verificação do fluxo de matéria e energia	
Propriedade 1	Resultado
Não é possível atingir a situação em que a válvula 1V3 está na posição central (POSICAO13) e o atuador 1A1 tenha livre movimento (MOVIMENTO_MANUAL1).	FALSO
Verificação da pressão	
Propriedade 1	Resultado
Para todos os casos, se o atuador 1A1 tem livre movimento (MOVIMENTO_MANUAL1) então por fim nenhuma porta ou câmara estará pressurizada (PORTA1P, PORTA1A, PORTA1B, PORTA1T, CAMARA1A, CAMARA1B).	VERDADEIRO

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o intuito de demonstrar que o modelo do circuito está certo, emprega-se uma propriedade que descreve um comportamento errado. A propriedade descreve o seguinte cenário: para todos os casos, se a válvula está na posição central então o cilindro sempre permanecerá na

posição parado. O resultado de esta propriedade deve ser falso e deve demonstrar que se a válvula está na posição central o cilindro tem um movimento livre. No Quadro 22, apresenta-se a propriedade e o resultado da verificação, assim como a especificação em LTL e a verificação no programa TINA.

Quadro 22. Verificação do fluxo de matéria e energia do circuito 3 mediante o uso de propriedades que descrevem um comportamento errado.

<i>Verificação do fluxo de matéria e energia</i>	
Propriedade 2	Resultado
Para todos os casos, se a válvula 1V3 está na posição central (POSICAO13) então sempre o atuador 1A1 permanece parado (PARADO1).	FALSO
Especificação em LTL	
$G(POSICAO13 \Rightarrow G PARADO1)$	
Verificação no programa TINA	
<pre> - [] (POSICAO13 => []PARADO1); FALSE state 0: F1RES FORCA1A FORCA1B PARADO1 -t24 ... (preserving T)-> state 448: BOMBA FORCA1A FORCA1B PARADO1 PORTA1P POSICAO13 p17 p29 -t94 ... (preserving POSICAO13)-> state 449: BOMBA FORCA1A FORCA1B PARADO1 PORTA1P POSICAO13 p26 p29 -t120 ... (preserving T)-> state 687: BOMBA FORCA1A FORCA1B MOVIMENTO_MANUAL1 PORTA1A PORTA1P POSICAO13 -t160 ... (preserving - PARADO1)-> state 703: BOMBA FORCA1A FORCA1B PARADO1 PORTA1A PORTA1P POSICAO13 p15 p8 [accepting all] 0.000s </pre>	

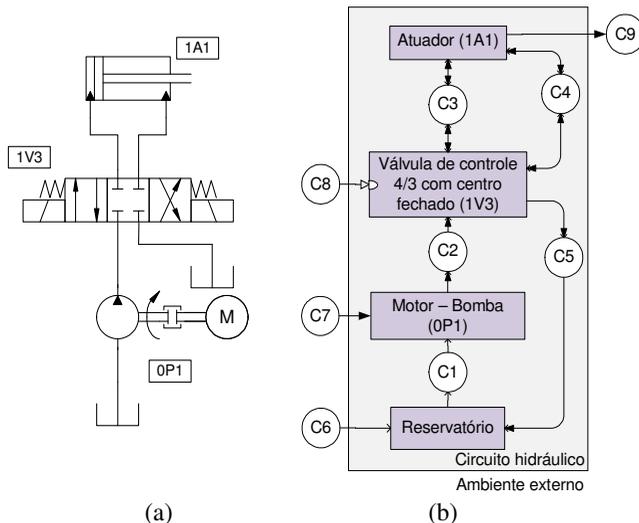
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na verificação do fluxo de matéria e energia da propriedade que descreve um comportamento errado (Quadro 22), o resultado é falso. O software TINA entrega um exemplo que refuta a especificação. O exemplo apresenta a sequência de marcações Este resultado valida o modelo do circuito hidráulico, mostrando que quando a válvula se encontra na posição central o cilindro tem um movimento livre (“MOVIMENTO_MANUAL1”).

7.4 CIRCUITO HIDRÁULICO 4

Na Figura 72 apresenta-se o quarto circuito hidráulico e sua representação usando rede C-A. Este circuito, diferentemente dos anteriores, utiliza uma válvula de quatro vias e três posições com centro fechado.

Figura 72. Quarto exemplo. (a) Circuito hidráulico; (b) Modelo usando rede C-A.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O modelo usando RP do circuito pode ser observado na Figura A. 4 (Apêndice A). Da mesma forma, no Quadro 15 podem-se identificar os estados que serão utilizados na etapa de verificação.

Para este circuito, da mesma forma do que no circuito anterior, é realizada a verificação somente na posição central. Assim, no Quadro 23 apresentam-se as propriedades para a verificação da pressão e do fluxo de matéria e energia e o resultado de ambas. Para este tipo de válvula na posição central, o cilindro permanece na sua condição inicial “parado”, visto que não tem carga, portanto, na verificação de pressão se deve constatar que a pressurização e despressurização nos componentes sejam mantidas. As especificações em LTL e a verificação no programa TINA encontram-se nos Quadro B. 5 e Quadro B. 6.

Quadro 23. Verificação do fluxo de matéria e energia e da pressão do circuito 4.

<i>Verificação do fluxo de matéria e energia</i>	
Propriedade 1	Resultado
Não é possível atingir a situação em que a válvula 1V3 está na posição central (POSICAO13) e o atuador 1A1 está parado (PARADO1).	FALSO
<i>Verificação da pressão</i>	
Propriedade 1	Resultado
Para todos os casos, se a câmara A do atuador 1A1 (CAMARA1A) e as portas P e A da válvula 1V3 (PORTA1P e PORTA1A) estão pressurizadas e a câmara B do atuador 1A1 (CAMARA1B) e as portas T e B da válvula 1V3 (PORTA1T e PORTA1B) estão despressurizadas e é selecionada a posição central da válvula (POSICAO13) então é certo que finalmente será mantida esta situação.	VERDADEIRO

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados do processo de verificação para as propriedades do Quadro 23 permitem concluir que a concepção do circuito, de este quarto exemplo, é a correta.

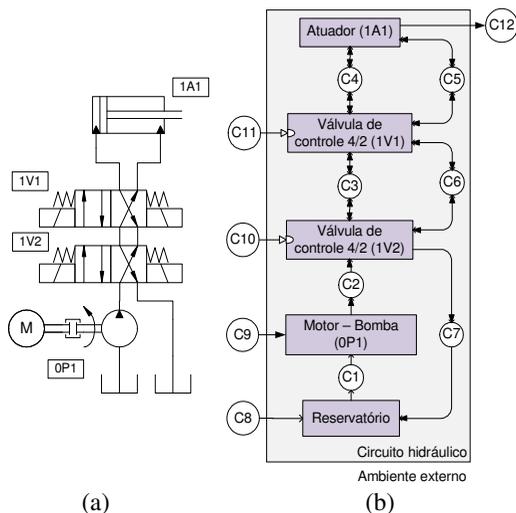
7.5 CIRCUITO HIDRÁULICO 5

Na Figura 73, apresenta-se o quinto circuito hidráulico e sua representação usando rede C-A.

Este circuito é formado por duas válvulas de quatro vias e duas posições em serie, um cilindro assimétrico e o motor-bomba. Assim, o modelo usando RP do circuito pode ser observado na Figura A. 5 (Apêndice A). Da mesma forma, no Quadro 15 podem-se identificar os estados que serão utilizados na etapa de verificação.

Para este circuito é verificado o fluxo de energia e matéria para quatro propriedades que representam as combinações possíveis das posições das duas válvulas. Portanto, no Quadro 24 e no Quadro 25 apresentam-se as propriedades para a verificação do fluxo de matéria e energia e o seu resultado. As especificações em LTL e a verificação no programa TINA mostram-se nos Quadro B. 7 e Quadro B. 8.

Figura 73. Quinto exemplo. (a) Circuito hidráulico; (b) Modelo usando rede C-A.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Quadro 24. Primeira e segunda propriedade para a verificação do fluxo de matéria e energia do circuito 5.

<i>Verificação do fluxo de matéria e energia</i>	
Propriedade 1	Resultado
Não é possível atingir a situação em que a válvula 1V1 está na posição paralela (POSICAO11), a válvula 1V2 está também na posição paralela (POSICAO21) e o atuador está avançando (AVANCANDO) simultaneamente.	FALSO
Propriedade 2	Resultado
Não é possível atingir a situação em que a válvula 1V1 está na posição cruzada (POSICAO12), a válvula 1V2 está na posição cruzada (POSICAO22) e o atuador está avançando (AVANCANDO) simultaneamente.	FALSO

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 25. Terceira e quarta propriedade para a verificação do fluxo de matéria e energia do circuito 5.

Propriedade 3	Resultado
Não é possível atingir a situação em que a válvula 1V1 está na posição paralela (POSICAO11), a válvula 1V2 está na posição cruzada (POSICAO22) e o atuador está recuando (RECUANDO1) simultaneamente.	FALSO
Propriedade 4	Resultado
Não é possível atingir a situação em que a válvula 1V1 está na posição cruzada (POSICAO12), a válvula 1V2 está na posição paralela (POSICAO21) e o atuador está recuando (RECUANDO1) simultaneamente.	FALSO

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para este circuito é verificada a pressão para duas propriedades, que representam os possíveis movimentos do cilindro. Portanto, no Quadro 26 e no Quadro 27 apresentam-se as propriedades para a verificação da pressão e o seu resultado. As especificações em LTL e a verificação no programa TINA mostram-se no Quadro B. 9.

Os resultados de ambos os processos de verificação da pressão e do fluxo de matéria e energia permitem concluir que a concepção, de este quinto exemplo, é o correta.

Quadro 26. Primeira propriedade para a verificação da pressão do circuito 5.

<i>Verificação da pressão</i>	
Propriedade 1	Resultado
Para todos os casos, se o atuador 1A1 está avançando (AVANCANDO1), então é certo que finalmente serão pressurizadas a câmara A do atuador 1A1 (CAMARA1A), as portas P e A da válvula 1V1 e 1V2 (PORTA1P, PORTA1A, PORTA2P, PORTA2A) ou serão pressurizadas a câmara A do atuador 1A1 (CAMARA1A), as portas P e B da válvula 1V1 (PORTA1P, PORTA1B) e as portas T e A da válvula 1V2 (PORTA2T, PORTA2A).	VERDADEIRO

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 27. Segunda propriedade para a verificação da pressão do circuito 5.

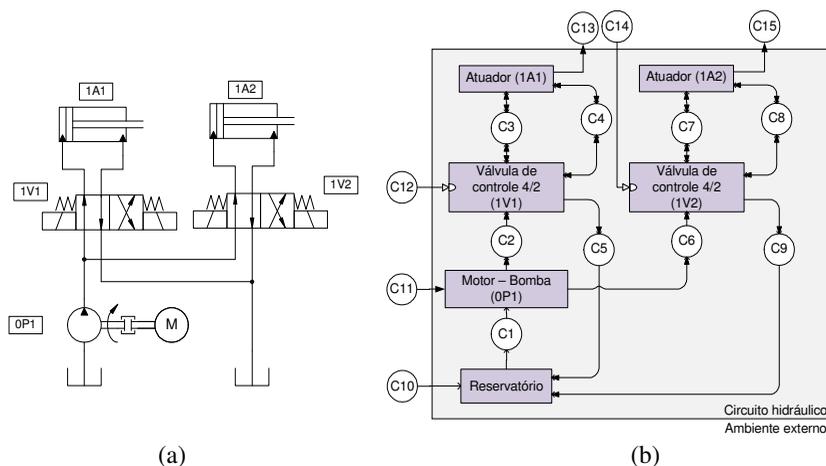
Propriedade 2	Resultado
Para todos os casos, se o atuador 1A1 está recuando (RECUANDO1), então é certo que finalmente serão pressurizadas a câmara B do atuador 1A1 (CAMARA1B), as portas P e A da válvula 1V1 (PORTA1P, PORTA1A) e as portas P e B da válvula 1V2 (PORTA2P, PORTA2B) ou serão pressurizadas a câmara B do atuador 1A1 (CAMARA1B), as portas P e B da válvula 1V1 (PORTA1P, PORTA1B) e as portas T e B da válvula 1V2 (PORTA2T, PORTA2B).	VERDADEIRO

Fonte: Elaborado pelo autor.

7.6 CIRCUITO HIDRÁULICO 6

Na Figura 74, apresenta-se o sexto circuito hidráulico e sua representação usando rede C-A. Este circuito está constituído por duas válvulas de quatro vias e duas posições em paralelo, dois cilindros assimétricos e um motor-bomba. Assim, o modelo usando RP do circuito pode ser observado na Figura A. 6 (Apêndice A).

Figura 74. Sexto exemplo. (a) Circuito hidráulico; (b) Modelo usando rede C-A.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para este circuito é verificado o fluxo de energia e matéria para três propriedades, onde duas representam o funcionamento independente de cada válvula e a outra propriedade o funcionamento simultâneo de ambas. No Quadro 28 apresentam-se as propriedades. As especificações em LTL e a verificação no programa TINA mostram-se nos Quadro B. 10 e Quadro B. 11.

Quadro 28. Verificação do fluxo de matéria e energia do circuito 6.

<i>Verificação do fluxo de matéria e energia</i>	
Propriedade 1	Resultado
Não é possível atingir a situação em que a válvula 1V1 está na posição paralela (POSICAO11) e o atuador 1A1 está avançando (AVANCANDO1) simultaneamente.	FALSO
Propriedade 2	Resultado
Não é possível atingir a situação em que a válvula 1V2 está na posição paralela (POSICAO21) e o atuador 1A2 está avançando (AVANCANDO2) simultaneamente.	FALSO
Propriedade 3	Resultado
Não é possível atingir a situação em que a válvula 1V2 está na posição paralela (POSICAO21) e o atuador 1A2 está avançando (AVANCANDO2) e a válvula 1V1 está na posição cruzada (POSICAO12) e o atuador 1A1 está recuando (RECUANDO1) simultaneamente.	FALSO

Fonte: Elaborado pelo autor.

A verificação da pressão é realizada para três propriedades, da mesma forma do que na verificação do fluxo de energia e matéria, duas propriedades representam o funcionamento independente de cada válvula e a outra propriedade o funcionamento simultâneo de ambas. Portanto, no Quadro 29 apresentam-se as propriedades para a verificação da pressão e o seu resultado. As especificações em LTL e a verificação no programa TINA mostram-se no Quadro B. 12.

Os resultados de ambos os processos de verificação da pressão e do fluxo de matéria e energia permitem concluir que a concepção, de este sexto exemplo, é a correta.

Quadro 29. Verificação da pressão do circuito 6.

<i>Verificação da pressão</i>	
Propriedade 1	Resultado
Para todos os casos, se o atuador 1A1 está avançando (AVANCANDO1) então é certo que finalmente serão pressurizadas a câmara A do atuador 1A1(CAMARA1A), as portas P e A da válvula 1V1 (PORTA1P e PORTA1A).	VERDADEIRO
Propriedade 2	Resultado
Para todos os casos, se o atuador 1A2 está recuando (RECUANDO2) então é certo que finalmente serão pressurizadas a câmara B do atuador 1A2 (CAMARA2B), as portas P e B da válvula 1V2 (PORTA2P e PORTA2B)	VERDADEIRO
Propriedade 3	Resultado
Para todos os casos, se o atuador 1A2 está recuando (RECUANDO2) e o atuador 1A1 está avançando (AVANCANDO1), então é certo que finalmente serão pressurizadas a câmara B do atuador 1A2 (CAMARA2B) e as portas P e B da válvula 1V2 (PORTA2P e PORTA2B) e a câmara A do atuador 1A1(CAMARA1A), as portas P e A da válvula 1V1 (PORTA1P e PORTA1A).	VERDADEIRO

Fonte: Elaborado pelo autor.

8 CONCLUSÕES

O trabalho apresentado nesta dissertação surgiu da necessidade de dar suporte ao processo de projeto de sistemas hidráulicos. O projeto tradicional de sistemas hidráulicos é uma tarefa que depende muito da intuição e experiência do projetista. Consequentemente, durante o processo de projeto, a possibilidade de errar é muito grande, e à medida que se incrementa a complexidade do sistema aumenta também a probabilidade de cometer um erro. Diante dessa situação, Stein (1998), Katoen (1999), Hong e Tessman (1998) propõem estabelecer métodos de análise que permitam auxiliar ao projetista durante o processo de projeto.

Com base nesse panorama, o presente trabalho propõe um método de verificação da concepção dos circuitos hidráulicos com o intuito de facilitar sua análise. Portanto, se sugere utilizar o método de verificação formal “*Model Checking*”, que executa o processo de forma automática mediante o uso de algoritmos em programas, evitando assim a interferência do projetista. O *Model Checking* em comparação com outros métodos de verificação, como a simulação ou o teste que cobrem apenas um conjunto limitado de possíveis comportamentos do sistema, permite realizar uma pesquisa exaustiva com o fim de determinar se o sistema cumpre certas especificações. Porém, para realizar o processo de verificação, precisa-se das representações formais tanto do circuito hidráulico assim como das propriedades do comportamento esperado. Nesse contexto, de obtenção das representações formais, concentra-se a principal contribuição da dissertação.

O processo de modelagem do circuito hidráulico tem como objetivo obter uma representação que preserve sua estrutura, isto é, os componentes e as relações entre eles, e seus detalhes deverão estar descritos em uma perspectiva comportamental. Portanto, esta tarefa representa significativamente um desafio maior do que descrever o comportamento do circuito como um todo sem respeitar a sua estrutura. Assim, o processo é realizado em duas etapas: a primeira etapa é a obtenção do modelo estrutural/funcional do circuito hidráulico; e a segunda etapa consiste em, a partir de modelo estrutural, obter o modelo comportamental. Para a obtenção do modelo estrutural utiliza-se a rede C-A, e para obter o modelo comportamental empregam-se a RP. A inserção da perspectiva comportamental no modelo estrutural baseia-se em representar o fluxo de matéria e energia e a pressurização e despressurização das portas dos componentes por meio de quatro processos. Para facilitar a obtenção do modelo comportamental do

circuito hidráulico estabelecem-se modelos padrão em RP para os agentes (componentes) e seus canais (interligações entre os componentes). É importante notar que a conservação da perspectiva estrutural no modelo final permitirá facilitar a análise do comportamento do circuito hidráulico. Por outro lado, também se definem as propriedades para o processo de verificação. Estas propriedades são formalizadas usando a lógica temporal LTL.

Após as formalizações do circuito hidráulico e as propriedades do comportamento esperado, o processo de verificação é realizado em duas etapas. A primeira etapa é a “Verificação do fluxo de matéria e energia” e a segunda etapa é a “Verificação da pressão”.

Os exemplos de aplicação, apresentados no sétimo capítulo, visam expor como o método é empregado para circuitos básicos com diferentes tipos de válvulas e/ou configurações das mesmas. Os resultados obtidos mostram que o método proposto tem potencial para a verificação da concepção de circuitos hidráulicos de uma maneira mais rápida e mais confiável já que se preserva a estrutura do circuito. No entanto, este método apresenta limitações para o uso de alguns componentes hidráulicos. Por esse motivo, a continuação desta pesquisa permitirá a inclusão de modificações que gradualmente possibilitem atender todos os tipos de componentes e configurações dos circuitos hidráulicos.

Finalmente, outra sugestão para trabalhos futuros é a construção de uma ferramenta computacional, capaz de obter o modelo comportamental do circuito de forma automática, de tal maneira que o processo de verificação possa ser realizado rapidamente. Esta última sugestão é importante para que a proposta consiga ser aceita pela área prática.

REFERÊNCIAS

BAIER, Christel; KATOEN Joost-Pieter. **Principles of model checking**. Cambridge: MIT press, 2008.

BELAN, Henri C. **Formalização da Rede de Petri Canal-Agência para Projeto de Equipamentos Industriais**. 2007. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

BERTHOMIEU, Bernard; RIBET, Pierre O.; VERNADAT, François. The tool tina—construction of abstract state spaces for petri nets and time petri nets. **International Journal Of Production Research** **42**, [S.l.], n.14, p. 2741-2756, 2004.

BERTHOMIEU, Bernard; VERNADAT, François. **Time petri nets analysis with TINA**. In: QUANTITATIVE EVALUATION OF SYSTEMS, 3rd, 2006, [S.l.]. IEEE, 2006. p.123-124.

BHERMANN, Gerd; DAVID, Alexandre; LARSEN, Kim. **A tutorial on UPPAAL**. Denmark: Springer Berlin Heidelberg, 2004. Disponível em: <<http://people.cs.aau.dk/~adavid/publications/21-tutorial.pdf>>. Acesso em: 31 jan. 2014.

BIERE, Armin. **Verifying sequential behavior with model checking**. In ASIC, 2001, [S.l.]. Proceedings 4th International Conference on. [S.l.]: IEEE, 2001. p. 29-32.

BLUME, Holger; SYDOW, Thorsten.V.; SCHLEIFER, Jochen; NOLL, Tobias G. Petri Net Based Modelling of Communication in Systems on Chip. **Petri Net: Theory and Application: ARS-Publishing**, [S.l.] , 2007.

BROWN, David C. **Functional, behavioral and structural features**. In ASME 2003 INTERNATIONAL DESIGN ENGINEERING TECHNICAL CONFERENCES AND COMPUTERS AND INFORMATION IN ENGINEERING CONFERENCE, 2003, [S.l.]. American Society of Mechanical Engineers, 2003. p. 895-900.

CARDOSO, Janette; VALETTE Robert. **Redes de Petri**. Florianópolis: Editora da UFSC, 1997.

CHIANG, Wen-Chuan; PENNATHUR, Arunkumar; MITAL, Anil. Designing and manufacturing consumer products for functionality: a literature review of current function definitions and design support tools. **Integrated Manufacturing Systems** **12**, [S.l.], no. 6, p. 430-448, 2001.

CIMATTI, Alessandro; CLARKE, Edmund; GIUNCHIGLIA, Fausto; ROVERI, Marco. **NuSMV: A new symbolic model verifier**. In: Computer Aided Verification. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 1999. pp. 495-499.

CLARKE, Edmund M.; GRUMBERG, Orna; PELED Doron. **Model checking**. [S.l.]: MIT press, 1999.

CLARKE, Edmund M. **The birth of model checking**. In: 25 Years of Model Checking. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2008. p. 1-26.

CORBETT, James C.; DWYER, Matthew B.; HATCLIFF, John; LAUBACH, Shawn, PASAREANU, Corina S.; ZHENG, Hongjun. **Bandera: Extracting finite-state models from Java source code**. In Software Engineering, 2000, [S.l.]. Proceedings of the 2000 International Conference on. [S.l.]: IEEE, 2000. p. 439-448.

COSTA, Cristiano. **Projeto do sistema supervisorio da planta de propulsão de um navio varredor**. 2007. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

CVIJANOVIC, Dragana. **Model checking**, 2011. Disponível em: <<http://www0.cs.ucl.ac.uk/staff/ucacwxe/lectures/3C05-02-03/aswe17-essay.pdf>>. Acesso em: 25 jan. 2014.

DAWS, Conrado; OLIVERO, Alfredo; TRIPAKIS, Stavros; YOVINE, Sergio. **The tool KRONOS**. In: Hybrid Systems III. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 1996. p. 208-219

DE NEGRI, Victor J. **Estruturação da modelagem de sistemas automáticos e sua aplicação a um banco de testes para sistemas**

hidráulicos. 1996. 180 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996.

DE NEGRI, Victor J. **Sistemas hidráulicos e pneumáticos para automação e controle. Parte I – Princípios gerais da hidráulica e pneumática.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina. No prelo 2001.

DE NEGRI, Victor J.; SANTOS, Eduardo A. **Projeto de sistemas de automação da manufatura.** In: AGUIRRE, Luis A. Enciclopédia de automática: Controle e Automação (Vol. 1). São Paulo: Edgard Blucher, 2007. cap. 15, p.382-417.

DIAZ, Michel. **Petri nets: fundamental models, verification and applications.** USA: John Wiley & Sons, 2013.

DORST, Kees; VERMAAS, Pieter E. John Gero's Function-Behaviour-Structure model of designing: a critical analysis. **Research in Engineering Design** 16, [S.l.], n. 1-2, p. 17-26, 2005.

GERO, John S. Design prototypes: a knowledge representation schema for design. **AI magazine** 11, [S.l.], n. 4, p. 26, 1990.

GERO, John S.; KANNENGIESSER, Udo. A function-behavior-structure view of social situated design agents. **Proceedings of the CAADRIA03**, [S.l.], 2003.

GIRAULT, Claude; VALK, Rüdiger. **Petri nets for systems engineering: a guide to modeling, verification, and applications.** Berlin e New York: Springer-Verlag, 2003.

GOEL, Ashok K.; RUGABER, Spencer; VATTAM, Swaroop. Structure, behavior, and function of complex systems: the structure, behavior, and function modeling language. **AI EDAM** 23, [S.l.], n. 1, p. 23-35, 2009.

GUSTIN, Gladys B. **Aplicação de redes de Petri interpretadas na modelagem de sistemas de elevadores em edifícios inteligentes.** 1999.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica/ Mecatrônica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

GUSTIN, Gladys B.; MIYAGI, Paulo E.; SANTOS FILHO, Diolino J.; VILLANI, Emilia; MARUYAMA, Newton. Petri net approach for modelling system integration in intelligent buildings. **Journal of The Brazilian Society of Mechanical Sciences** **24**, [S.l.], n. 4, p. 341-350, 2002.

HALL, Arthur D.; FAGEN, Robert E. Definition of system. **General Systems** **1**, [S.l.], n. 1, p.18-28, 1956.

HASEGAWA, Kensuke; TAKAHASHI, Kouji; MIYAGI, Paulo E. Application of the mark flow graph to represent discrete event production systems and systems control. **Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers** **24**, [S.l.], n.1, pp.67-75, 1988.

HASEGAWA, Kensuke. On resource arc for petri net modelling of complex resource sharing system. **Journal of Intelligent and Robotic Systems** **26**, [S.l.], n. 3-4, p. 423-437, 1999.

HASHEM, Kamel; MIODUSER, David. Learning by Modeling (LbM): Understanding Complex Systems by Articulating Structures, Behaviors, and Functions. **Learning** **4**, [S.l.], no. 4, 2013.

HENKE, Russell W. **Introduction to fluid power circuits and systems**. USA: Addison-Wesley Publishing Company, 1970.

HEYLIGHEN, Francis. **Epistemology**, 1993. Disponível em: <<http://pespmc1.vub.ac.be/EPISTEMI.html>>. Acesso em: 10 set. 2013.

HOLZMANN, Gerard J. The model checker SPIN. **IEEE Transactions on software engineering** **23**, [S.l.], n. 5, p. 279-295, 1997.

HONG, T.; TESSMANN, Richard. **Computerized design analysis of machine tool hydraulic system dynamics**, 1998. Disponível em: <http://www.vmc.com.tw/web-pdf/ht_7.pdf>. Acesso em: 11 out. 2013.

IGEI, Percy J.; GARCIA, José I.; MIYAGI, Paulo, E.; CUGNASCA, Carlos E. **Modelagem de redes de controle Lonworks em edifícios**

inteligentes. In: CIBIM, 2007, [S.l.]. Anais do 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica, 2007.

IMAGINE S.A. **Amesim: a brief technical overview** . Roanne, 2000. Disponível em:
<http://nupet.daelt.ct.utfpr.edu.br/_ontomos/paginas/Artigos/technical_overview.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2013.

KANESHIRO, Percy; VILLANI, Emilia; MIYAGI, Paulo. **Modeling of fire protection systems in intelligent buildings.** In: COBEM, 2005, Ouro Preto. Proceedings of the 18th International Congress of Mechanical Engineering On. [S.l.]: ABCM.

KATOEN, Joost-Pieter. **Concepts, algorithms, and tools for model checking.** Alemanha: IMMD, 1999.

KŘENA, Bohuslav; VOJNAR, Tomáš. Automated formal analysis and verification: an overview. **International Journal of General Systems** 42, [S.l.], n. 4, p. 335-365, 2013.

LAM, William K. **Hardware Design Verification: Simulation and Formal Method-Based Approaches (Prentice Hall Modern Semiconductor Design Series).** USA: Prentice Hall PTR, 2005.

LINSINGEN, Irlan von. **Fundamentos de Sistemas Hidraulicos.** Florianópolis: Editora da UFSC, 2008.

MAGREE, Jeff. **Behavioral analysis of software architectures using LTSA.** In: SOFTWARE ENGINEERING, 1999, [S.l.]. Proceedings of the 1999 International Conference on. [S.l.]: IEEE, 1999. p. 634-637.

MIYAGI, Paulo E. **Controle Programável.** São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1996.

MIYAGI, Paulo E.; KAGOHARA, Myrna Y.; JUNQUEIRA, Fabricio; RIASCOS, Luis Alberto M. **Metodologia PFS/MFG para a automação balanceada de sistemas de produção enxuta.** In: SBAI, 1999, [S.l.]. Anais do 4º Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 1999.

MIYAGI, Marisa M.; MIYAGI, Paulo E.; KISIL, Marcos. Modelagem e análise de serviços de saúde baseados em Redes de Petri interpretadas. **Revista Produção 11**, [S.l.], n. 2, p. 23-39, 2001.

MUNSON, Bruce R; YOUNG, Donald F.; OKIISHI, Theodore H. **Fundamentos de mecânica de fluidos**. México D.F.: Editora Limusa, 1999.

MUNEMASSA, Wilson; MIYAGI, Paulo E. Modelagem e análise quantitativa de sistemas de manufatura por redes GSPN. **SBA Controle & Automação 8**, [S.l.], n. 1, 1997.

MURATA, Tadao. Petri nets: Properties, analysis and applications. **Proceedings of IEEE 77**, [S.l.], n. 4, p. 541-580, 1989.

NAKASHIMA, Yusei; BABA, Tomio. **OHCS: hydraulic circuit design assistant**. In: FIRST ANNUAL CONFERENCE ON INNOVATIVE APPLICATIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 1989, [S.l.]. p. 225-236. 1989

PAHL, Gerard; BEITZ, Wolfgang. **Engineering Design: A Systematic Approach**. Berlin: Springer Science+ Business Media Deutschland GmbH, 2007.

PORCIÚNCULA, Gilson S. **Metodologia para análise de confiabilidade no projeto de sistemas automáticos**. 2009. 153p Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

REISIG, Wolfgang. **A primer in Petri Net design**. Berlin: Springer-Verlag, 1992

SAMANTA, Bimal; SARKAR, Bijan. Application of Petri nets for systems modelling and analysis. **OPSEARCH 49**, [S.l.], n. 4, p. 334-347, 2012.

SANTOS, Eduardo A. P.. **Contribuições ao projeto conceitual de sistemas de manipulação e montagem automatizados**. 2003. 193f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Departamento de

Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

SANGHAVI, Alok. **What is formal verification?**, 2010. Disponível em:

<http://www.eetasia.com/STATIC/PDF/201005/EEOL_2010MAY21_EDA_TA_01.pdf?SOURCES=DOWNLOAD>. Acesso em: 05 dez. 2013.

SILVA, Jonny C. **Expert Systems Prototype for Hydraulic System Design Focusing on Concurrent Engineering Aspects**. 1998. 185f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

STEIN, Benno. **Supporting Hydraulic Circuit Design by Efficiently Solving the Model Synthesis Problem**. In: INTERNATIONAL ICSC SYMPOSIUM ON ENGINEERING OF INTELLIGENT SYSTEMS (EIS 98), 1998, [S.l.]. p. 1274-1280.

TAKEDA, Hideaki; YOSHIOKA, Masaharu; TOMIYAMA, Tetsuo; SHIMOMURA, Yoshiki. **Analysis of design processes by function, behavior and structure**, 1994. Disponível em: <<http://www-kasm.nii.ac.jp/papers/takeda/95/DPW-paper.pdf>>. Acesso em: 16 jan. 2014.

UMEDA, Yasushi; TAKEDA, Hideaki; TOMIYAMA, Tetsuo; YOSHIKAWA, Hiroyuki. Function, behaviour, and structure. **Applications of artificial intelligence in engineering 1**, [S.l.], p. 177-194, 1990.

VINADE, Cesar A. **Sistematização do processo de projeto para confiabilidade e manutenibilidade aplicado a sistemas hidráulicos e implementação de um sistema especialista**. 2003. 217 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

WANG, Jiacun. **Petri nets for dynamic event-driven system modeling**. Handbook of Dynamic System Modeling, p. 1-17, 2007.

ZHANG, Wen J.; LIN, Yingzi; SINHA, Niraj. On the function-behavior-structure model for design. **Proceedings of the Canadian Engineering Education Association**, [S.l.], 2011.

APÊNDICE A – Modelos em rede de Petri dos circuitos de exemplo do Capítulo 7

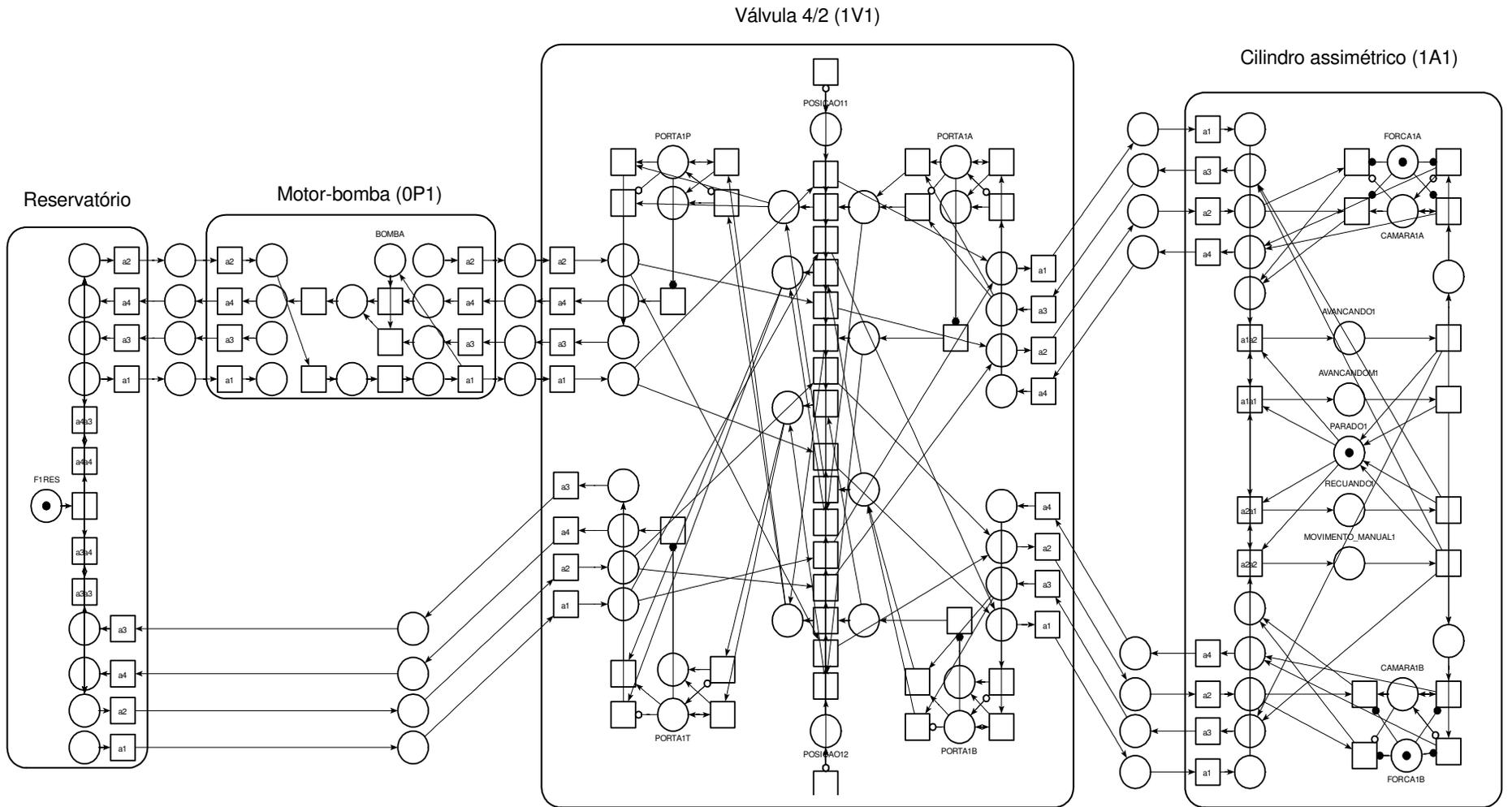


Figura A. 1– Modelo em rede de Petri do circuito 1.

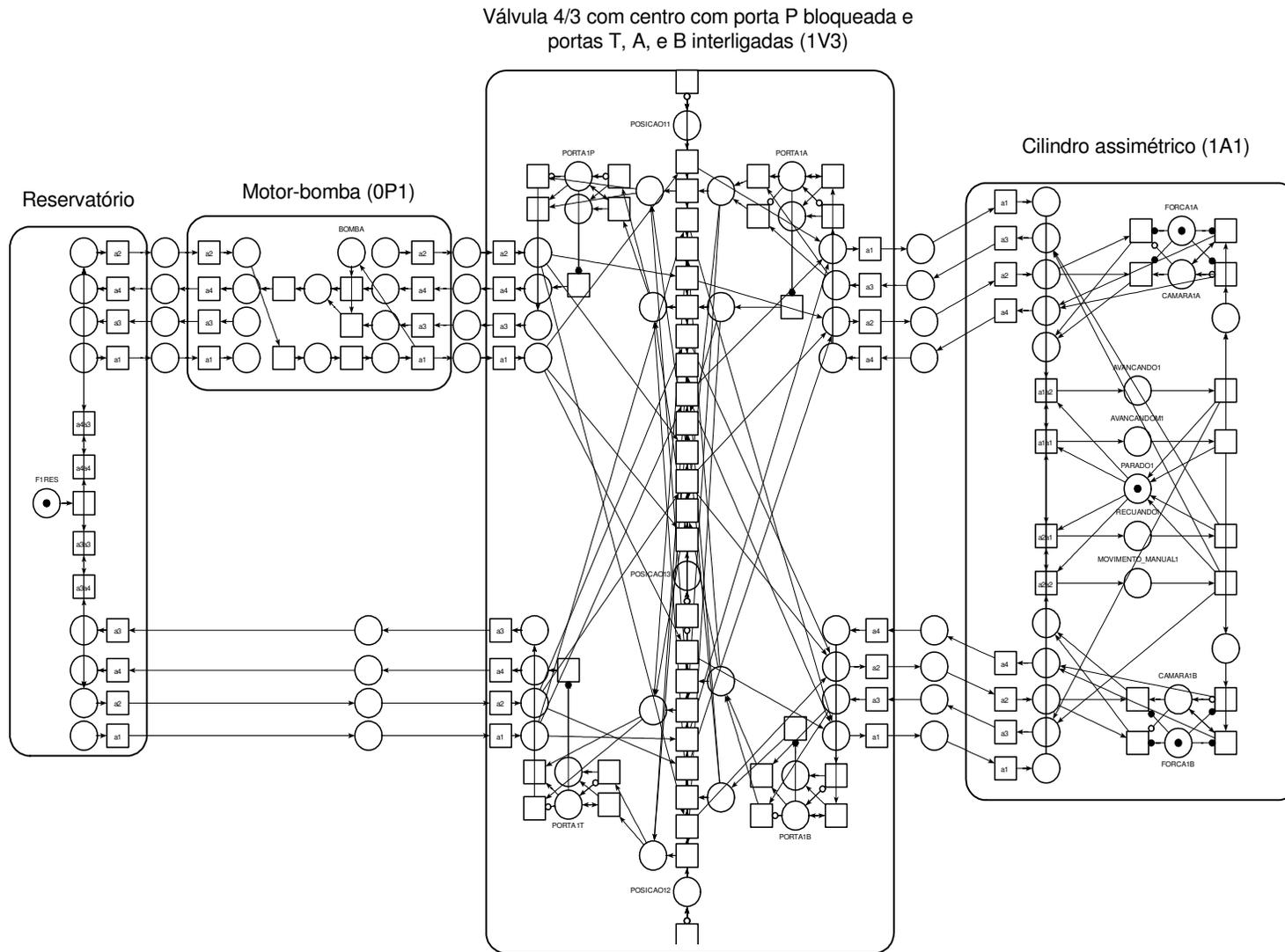


Figura A. 2– Modelo em rede de Petri do circuito 2.

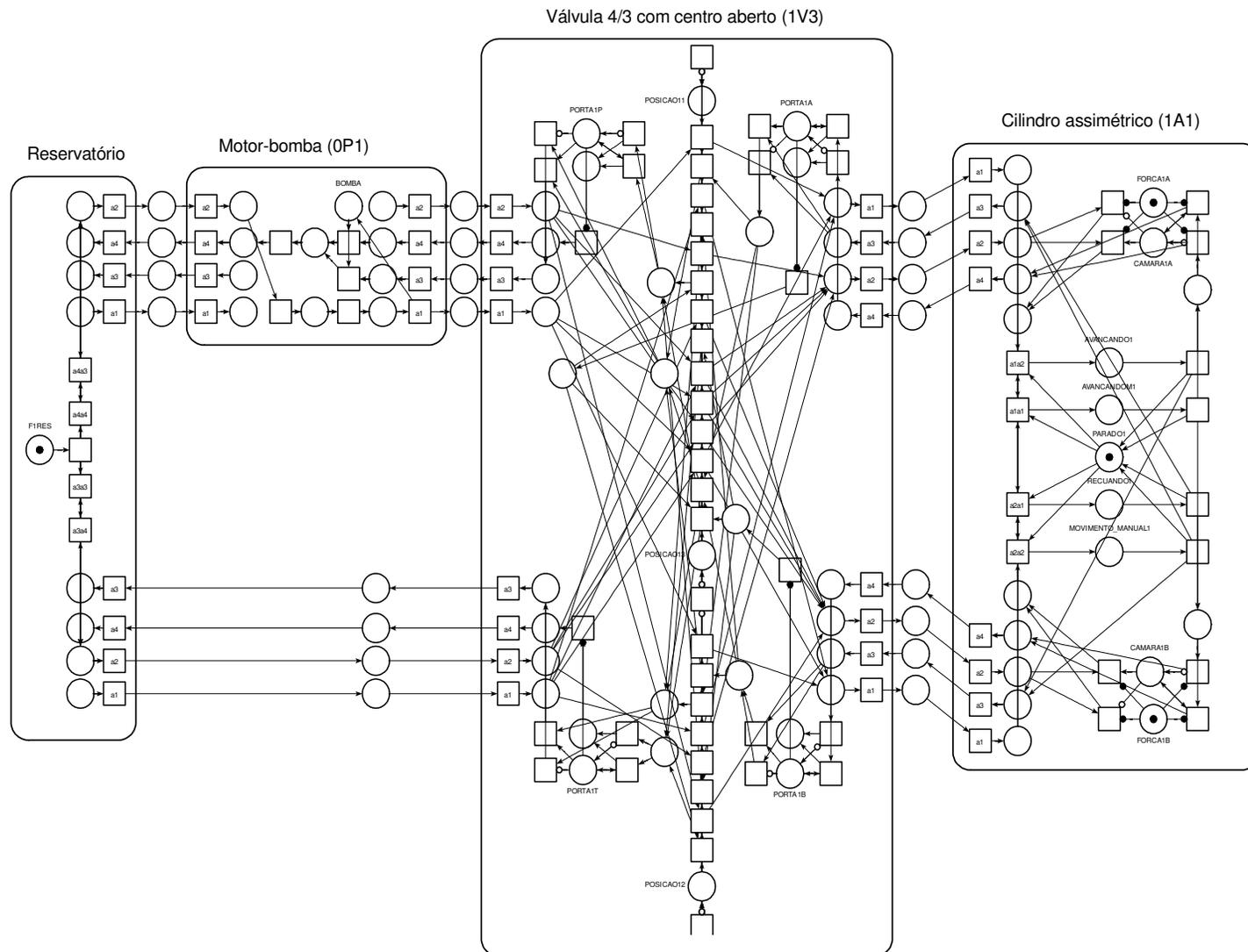


Figura A. 3– Modelo em rede de Petri do circuito 3.

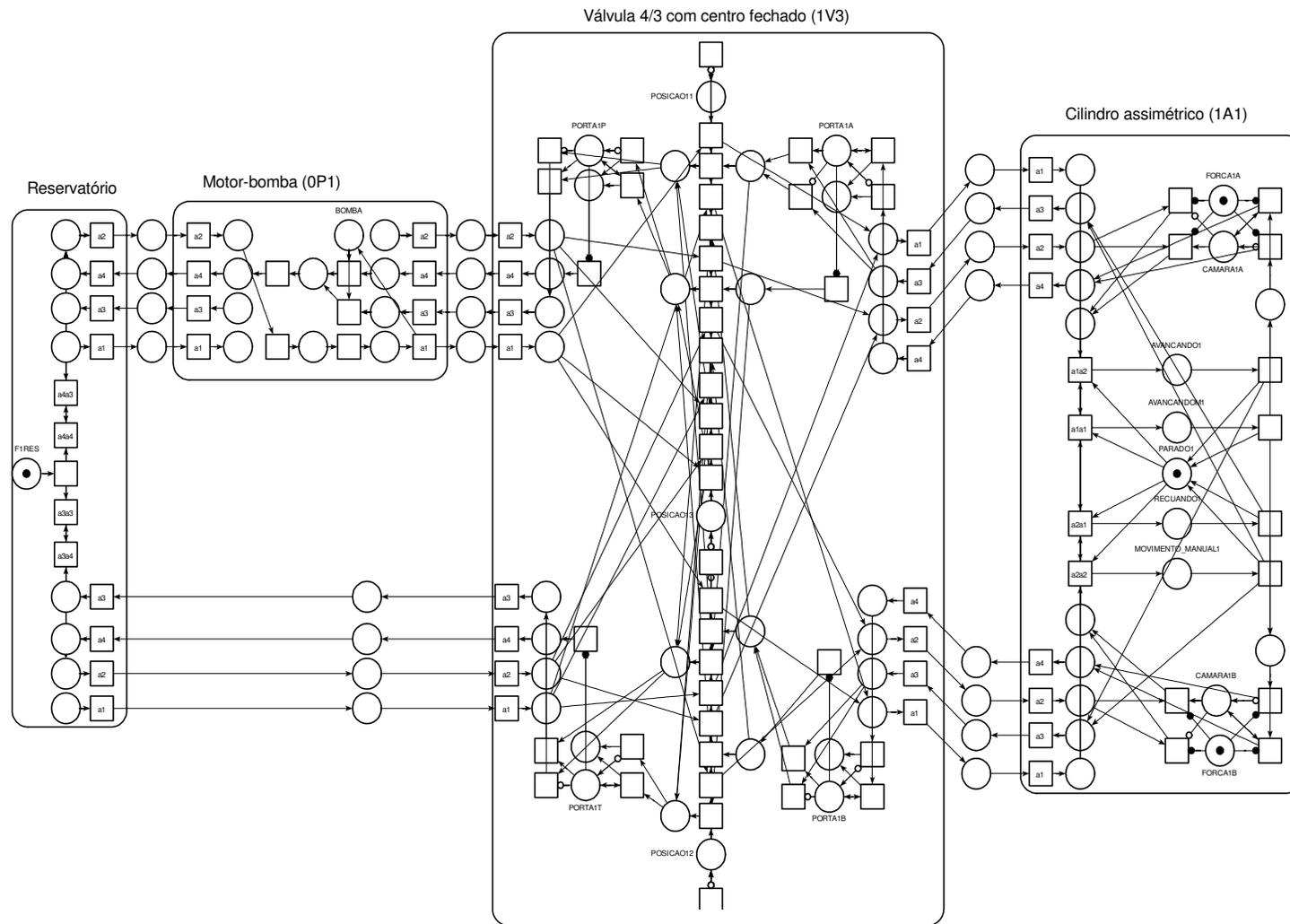


Figura A. 4– Modelo em rede de Petri do circuito 4.

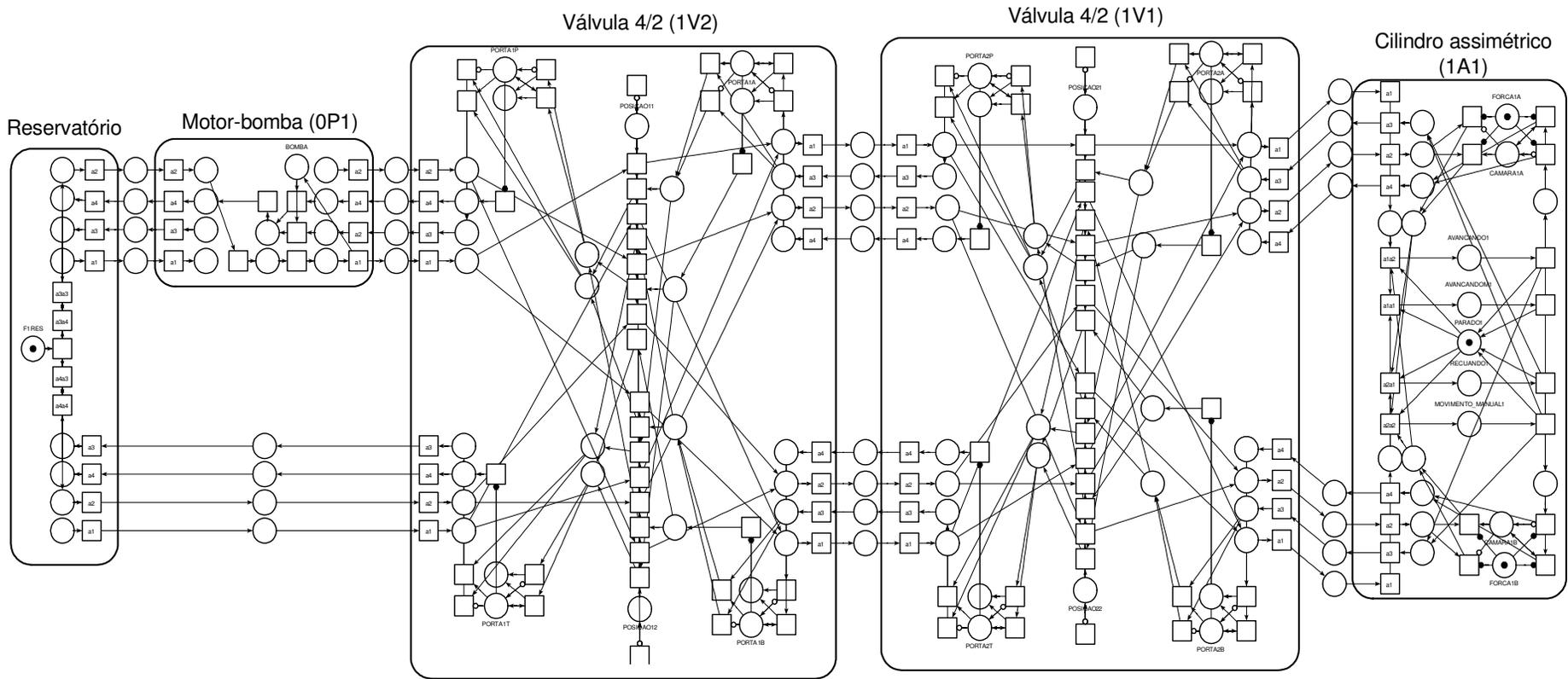


Figura A. 5– Modelo em rede de Petri do circuito 5.

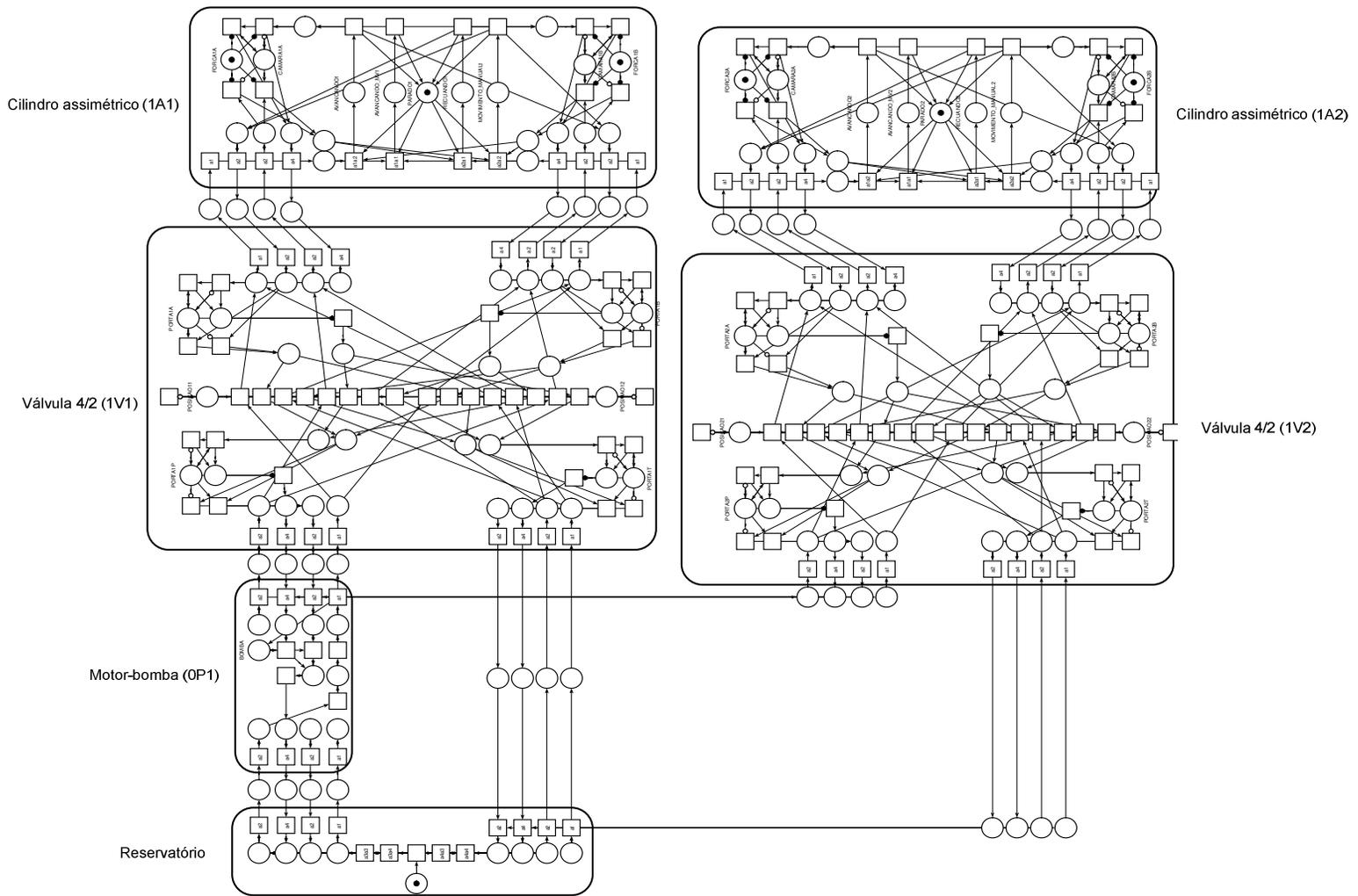


Figura A. 6– Modelo em rede de Petri do circuito 6.

APÊNDICE B – Verificação no programa TINA dos circuitos de exemplo do Capítulo 7

Quadro B. 1- Propriedade para a verificação do fluxo de matéria e energia do circuito 2.

<i>Verificação do fluxo de matéria e energia</i>
Propriedade 1
Não é possível atingir a situação em que a válvula 1V3 está na posição central (POSICAO13) e o atuador 1A1 tenha livre movimento (MOVIMENTO_MANUAL1) simultaneamente.
Especificação em LTL
$\neg F (POSICAO13 \wedge MOVIMENTO_MANUAL1)$
Verificação no programa TINA
<pre> -(<>(POSICAO13 /\ MOVIMENTO_MANUAL1)); FALSE state 0: FORCA1A FORCA1B PARADO1 p1 -t24 ... (preserving T)-> state 491: FORCA1A FORCA1B MOVIMENTO_MANUAL1 PORTA1P POSICAO13 p5 -t160 ... (preserving MOVIMENTO_MANUAL1 /\ POSICAO13)-> state 504: FORCA1A FORCA1B PARADO1 PORTA1P POSICAO13 p15 p5 p8 [accepting all] 0.000s </pre>

Quadro B. 2- Propriedade para a verificação da pressão do circuito 2.

<i>Verificação da pressão</i>
Propriedade 1
Para todos os casos, se o atuador 1A1 tem livre movimento (MOVIMENTO_MANUAL1) então é certo que finalmente somente serão pressurizadas a porta P (PORTA1P) da válvula 1V3 e as portas e câmaras restantes não deverão estar pressurizadas e (PORTA1A, PORTA1B, PORTA1T, CAMARA1A, CAMARA1B).
Especificação em LTL
$G(MOVIMENTO_MANUAL1 \Rightarrow F(PORTA1P \wedge \neg PORTA1A \wedge \neg PORTA1B \wedge \neg PORTA1T \wedge \neg CAMARA1B \wedge \neg CAMARA1A))$
Verificação no programa TINA
<pre> [] (MOVIMENTO_MANUAL1 => <> (PORTA1P /\ -PORTA1A /\ - PORTA1B /\ -PORTA1T /\ -CAMARA1B /\ -CAMARA1A)); TRUE 0.016s </pre>

Quadro B. 3- Propriedade para a verificação do fluxo de matéria e energia do circuito 3.

<i>Verificação do fluxo de matéria e energia</i>
Propriedade 1
Não é possível atingir a situação em que a válvula 1V3 está na posição central (POSICAO13) e o atuador 1A1 tenha livre movimento (MOVIMENTO_MANUAL1).
Especificação em LTL
$\neg F (POSICAO13 \wedge MOVIMENTO_MANUAL1)$
Verificação no programa TINA
<pre> -<>(POSICAO13 /\ MOVIMENTO_MANUAL1)); FALSE state 0: FIRES FORCA1A FORCA1B PARADO1 -t24 ... (preserving T)-> state 442: BOMBA FORCA1A FORCA1B MOVIMENTO_MANUAL1 PORTA1B PORTA1P POSICAO13 -t160 ... (preserving MOVIMENTO_MANUAL1 /\ POSICAO13)-> state 458: BOMBA FORCA1A FORCA1B PARADO1 PORTA1B PORTA1P POSICAO13 p15 p8 [accepting all] 0.000s </pre>

Quadro B. 4- Propriedade para a verificação da pressão do circuito 3.

<i>Verificação da pressão</i>
Propriedade 1
Para todos os casos, se o atuador 1A1 tem livre movimento (MOVIMENTO_MANUAL1) então é certo que finalmente nenhuma porta ou câmara estará pressurizada (PORTA1P, PORTA1A, PORTA1B, PORTA1T, CAMARA1A, CAMARA1B).
Especificação em LTL
$G(MOVIMENTO_MANUAL1 \Rightarrow F (\neg PORTA1P \wedge \neg PORTA1A \wedge \neg PORTA1B \wedge \neg PORTA1T \wedge \neg CAMARA1B \wedge \neg CAMARA1A))$
Verificação no programa TINA
<pre> [] (MOVIMENTO_MANUAL1 => <> (-PORTA1P /\ -PORTA1A /\ - PORTA1B /\ -PORTA1T /\ -CAMARA1B /\ -CAMARA1A)); TRUE 0.016s </pre>

Quadro B. 5- Primeira propriedade para a verificação do fluxo de matéria e energia do circuito 4.

Verificação do fluxo de matéria e energia
Propriedade 1
Não é possível atingir a situação em que a válvula 1V3 está na posição central (POSICAO13) e o atuador 1A1 está parado (PARADO1).
Especificação em LTL
$\neg F (POSICAO13 \wedge PARADO1)$
Verificação no programa TINA
<pre> -<(<>(POSICAO13 /\ PARADO1)); FALSE state 0: F1RES FORCA1A FORCA1B PARADO1 -t24 ... (preserving T)-> state 270: CAMARA1A FORCA1A FORCA1B PARADO1 PORTA1A PORTA1P POSICAO13*2 p104 p5 -t32 ... (preserving PARADO1 /\ POSICAO13)-> state 271: C5 CAMARA1A FORCA1A FORCA1B PARADO1 PORTA1A PORTA1P POSICAO13*2 p5 [accepting all] 0.016s </pre>

Quadro B. 6- Primeira propriedade para a verificação da pressão do circuito 4.

Verificação da pressão
Propriedade 1
Para todos os casos, se a câmara A do atuador 1A1 (CAMARA1A) e as portas P e A da válvula 1V3 (PORTA1P e PORTA1A) estão pressurizadas e a câmara B do atuador 1A1 (CAMARA1B) e as portas T e B da válvula 1V3 (PORTA1T e PORTA1B) estão despressurizadas e é selecionada a posição central da válvula (POSICAO13) então é certo que finalmente será mantida esta situação.
Especificação em LTL
$G((CAMARA1A \wedge PORTA1P \wedge PORTA1A \wedge \neg CAMARA1B \wedge \neg PORTA1T \wedge \neg PORTA1B \wedge POSICAO13) \Rightarrow F (CAMARA1A \wedge PORTA1P \wedge PORTA1A \wedge \neg CAMARA1B \wedge \neg PORTA1T \wedge \neg PORTA1B))$
Verificação no programa TINA
<pre> []((CAMARA1A /\ PORTA1P /\ PORTA1A /\ -CAMARA1B /\ -PORTA1T /\ -PORTA1B /\ POSICAO13) => <>(CAMARA1A /\ PORTA1P /\ PORTA1A /\ -CAMARA1B /\ -PORTA1T /\ -PORTA1B)); TRUE 0.000s </pre>

Quadro B. 7– Primeira e segunda propriedade para a verificação do fluxo de matéria e energia do circuito 5.

<i>Verificação do fluxo de matéria e energia</i>
Propriedade 1
Não é possível atingir a situação em que a válvula 1V1 está na posição paralela (POSICAO11), a válvula 1V2 está também na posição paralela (POSICAO21) e o atuador está avançando (AVANCANDO) simultaneamente.
Especificação em LTL
$\neg (F (POSICAO11 \wedge POSICAO21 \wedge AVANCANDO1))$
Verificação no programa TINA
<pre> -<<>(POSICAO11 /\ POSICAO21 /\ AVANCANDO1)); FALSE state 0: F1RES F2RES FORCA1B PARADO1 p333 -t28 ... (preserving T)-> state 3317: AVANCANDO1 CAMARA1A FORCA1B PORTA1A PORTA1P PORTA2A PORTA2P POSICAO11*2 POSICAO21*2 p33 p333 -t315 ... (preserving POSICAO11 /\ POSICAO21 /\ AVANCANDO1)- > state 5751: CAMARA1A FORCA1B PARADO1 PORTA1A PORTA1P PORTA2A PORTA2P POSICAO11*2 POSICAO21*2 p276 p329 p33 p333 [accepting all] 0.031s </pre>
Propriedade 2
Não é possível atingir a situação em que a válvula 1V1 está na posição cruzada (POSICAO12), a válvula 1V2 está na posição cruzada (POSICAO22) e o atuador está avançando (AVANCANDO) simultaneamente.
Especificação em LTL
$\neg (F (POSICAO12 \wedge POSICAO22 \wedge AVANCANDO1))$
Verificação no programa TINA
<pre> -<<>(POSICAO12 /\ POSICAO22 /\ AVANCANDO1)); FALSE state 0: F1RES F2RES FORCA1B PARADO1 p333 -t28 ... (preserving T)-> state 2479: AVANCANDO1 CAMARA1A FORCA1B PORTA1A PORTA1P PORTA2A PORTA2P POSICAO12*2 POSICAO22*2 p33 p333 -t315 ... (preserving POSICAO12 /\ POSICAO22 /\ AVANCANDO1)- > state 7159: CAMARA1A FORCA1B PARADO1 PORTA1A PORTA1P PORTA2A PORTA2P POSICAO12*2 POSICAO22*2 p276 p329 p33 p333 [accepting all] 0.016s </pre>

Quadro B. 8– Terceira e quarta propriedade para a verificação do fluxo de matéria e energia do circuito 5.

Verificação do fluxo de matéria e energia
Propriedade 3
Não é possível atingir a situação em que a válvula 1V1 está na posição paralela (POSICAO11), a válvula 1V2 está na posição cruzada (POSICAO22) e o atuador está recuando (RECUANDO1) simultaneamente.
Especificação em LTL
$\neg (F (POSICAO11 \wedge POSICAO22 \wedge RECUANDO1))$
Verificação no programa TINA
<pre> -<>(POSICAO11 /\ POSICAO22 /\ RECUANDO1)); FALSE state 0: F1RES F2RES FORCA1B PARADO1 p333 -t28 ... (preserving T)-> state 862: CAMARA1B FORCA1B PORTA1B PORTA1P PORTA2B PORTA2T POSICAO11*2 POSICAO22*2 RECUANDO1 p33 p333 -t316 ... (preserving POSICAO11 /\ POSICAO22 /\ RECUANDO1)-> state 1819: CAMARA1B FORCA1B PARADO1 PORTA1B PORTA1P PORTA2B PORTA2T POSICAO11*2 POSICAO22*2 p275 p33 p330 p333 [accepting all] 0.031s </pre>
Propriedade 4
Não é possível atingir a situação em que a válvula 1V1 está na posição cruzada (POSICAO12), a válvula 1V2 está na posição paralela (POSICAO21) e o atuador está recuando (RECUANDO1) simultaneamente.
Especificação em LTL
$\neg (F (POSICAO12 \wedge POSICAO21 \wedge RECUANDO1))$
Verificação no programa TINA
<pre> -<>(POSICAO12 /\ POSICAO21 /\ RECUANDO1)); FALSE state 0: F1RES F2RES FORCA1B PARADO1 p333 -t28 ... (preserving T)-> state 3495: CAMARA1B FORCA1B PORTA1B PORTA1P PORTA2B PORTA2T POSICAO12*2 POSICAO21*2 RECUANDO1 p33 p333 -t316 ... (preserving POSICAO12 /\ POSICAO21 /\ RECUANDO1)-> state 4468: CAMARA1B FORCA1B PARADO1 PORTA1B PORTA1P PORTA2B PORTA2T POSICAO12*2 POSICAO21*2 p275 p33 p330 p333 [accepting all] 0.047s </pre>

Quadro B. 9– Propriedades para a verificação da pressão do circuito 5.

Verificação da pressão
Propriedade 1
Para todos os casos, se o atuador 1A1 está avançando (AVANCANDO1), então é certo que finalmente serão pressurizadas a câmara A do atuador 1A1 (CAMARA1A), as portas P e A da válvula 1V1 e 1V2 (PORTA1P, PORTA1A, PORTA2P, PORTA2A) ou serão pressurizadas a câmara A do atuador 1A1 (CAMARA1A), as portas P e B da válvula 1V1 (PORTA1P, PORTA1B) e as portas T e A da válvula 1V2 (PORTA2T, PORTA2A).
Especificação em LTL
$G(AVANCANDO1 \Rightarrow F ((CAMARA1A \wedge PORTA1A \wedge PORTA1P \wedge PORTA2A \wedge PORTA2P) \vee (CAMARA1A \wedge PORTA1P \wedge PORTA1B \wedge PORTA2T \wedge PORTA2A)))$
Verificação no programa TINA
[] (AVANCANDO => <> ((CAMARA1A /\ PORTA1A /\ PORTA1P /\ PORTA2A /\ PORTA2P) \/ (CAMARA1A /\ PORTA1P /\ PORTA1B /\ PORTA2T /\ PORTA2A))); TRUE 0.078s
Propriedade 2
Para todos os casos, se o atuador 1A1 está recuando (RECUANDO1), então é certo que finalmente serão pressurizadas a câmara B do atuador 1A1 (CAMARA1B), as portas P e A da válvula 1V1 (PORTA1P, PORTA1A) e as portas P e B da válvula 1V2 (PORTA2P, PORTA2B) ou serão pressurizadas a câmara B do atuador 1A1 (CAMARA1B), as portas P e B da válvula 1V1 (PORTA1P, PORTA1B) e as portas T e B da válvula 1V2 (PORTA2T, PORTA2B).
Especificação em LTL
$G((RECUANDO1 \wedge POSICAO11 \wedge POSICAO22) \Rightarrow F ((CAMARA1B \wedge PORTA1P \wedge PORTA1A \wedge PORTA2P \wedge PORTA2B) \vee (CAMARA1B \wedge PORTA1P \wedge PORTA1B \wedge PORTA2T \wedge PORTA2B)))$
Verificação no programa TINA
[] (RECUANDO => <> ((CAMARA1B /\ PORTA1P /\ PORTA1A /\ PORTA2P /\ PORTA2B) \/ (CAMARA1B /\ PORTA1P /\ PORTA1B /\ PORTA2T /\ PORTA2B))); TRUE 0.078s

Quadro B. 10– Primeira e segunda propriedade para a verificação do fluxo de matéria e energia do circuito 6.

<i>Verificação do fluxo de matéria e energia</i>
Propriedade 1
Não é possível atingir a situação em que a válvula 1V1 está na posição paralela (POSICAO11) e o atuador 1A1 está avançando (AVANCANDO1) simultaneamente.
Especificação em LTL
$\neg(F(POSICAO11 \wedge AVANCANDO1))$
Verificação no programa TINA
<pre> -<>(POSICAO11 /\ AVANCANDO1)); FALSE state 0: F1RES FORCA1A FORCA1B FORCA2A FORCA2B PARADO1 PARADO2 -t22 ... (preserving T)-> state 331: AVANCANDO1 BOMBA CAMARA1A CAMARA2B FORCA1A FORCA1B FORCA2A FORCA2B PARADO2 PORTA1A PORTA1P PORTA2B PORTA2P POSICAO11*2 POSICAO22*4 p311 p339 -t310 ... (preserving POSICAO11 /\ AVANCANDO1)-> state 583: AVANCANDO1 BOMBA CAMARA1A CAMARA2B FORCA1A FORCA1B FORCA2A FORCA2B PARADO2 PORTA1A PORTA1P PORTA2B PORTA2P POSICAO11*2 POSICAO22*4 p294 p339 [accepting all] 0.016s </pre>
Propriedade 2
Não é possível atingir a situação em que a válvula 1V2 está na posição paralela (POSICAO21) e o atuador 1A2 está avançando (AVANCANDO2) simultaneamente.
Especificação em LTL
$\neg(F(POSICAO21 \wedge AVANCANDO2))$
Verificação no programa TINA
<pre> -<>(POSICAO21 /\ AVANCANDO2)); FALSE state 0: F1RES FORCA1A FORCA1B FORCA2A FORCA2B PARADO1 PARADO2 -t22 ... (preserving T)-> state 73360: AVANCANDO2 BOMBA CAMARA1A CAMARA2A FORCA1A FORCA1B FORCA2A FORCA2B PARADO1 PORTA1A PORTA1P PORTA2A PORTA2P POSICAO11*4 POSICAO21*2 p239 p44 -t317 ... (preserving POSICAO21 /\ AVANCANDO2)-> state 73361: BOMBA CAMARA1A CAMARA2A FORCA1A FORCA1B FORCA2A FORCA2B PARADO1 PARADO2 PORTA1A PORTA1P PORTA2A PORTA2P POSICAO11*4 POSICAO21*2 p239 p277 p330 p44 [accepting all] 0.375s </pre>

Quadro B. 11– Terceira propriedade para a verificação do fluxo de matéria e energia do circuito 6.

<i>Verificação do fluxo de matéria e energia</i>
Propriedade 3
Não é possível atingir a situação em que a válvula 1V2 está na posição paralela (POSICAO21) e o atuador 1A2 está avançando (AVANCANDO2) e a válvula 1V1 está na posição cruzada (POSICAO12) e o atuador 1A1 está recuando (RECUANDO1) simultaneamente.
Especificação em LTL
$\neg(F(POSICAO21 \wedge AVANCANDO2 \wedge POSICAO12 \wedge RECUANDO1))$
Verificação no programa TINA
<pre> -<>(POSICAO21 /\ AVANCANDO2 /\ POSICAO12 /\ RECUANDO1)); FALSE state 0: F1RES FORCA1A FORCA1B FORCA2A FORCA2B PARADO1 PARADO2 -t22 ... (preserving T)-> state 98105: AVANCANDO2 BOMBA CAMARA1B CAMARA2A FORCA1A FORCA1B FORCA2A FORCA2B PORTA1B PORTA1P PORTA2A PORTA2P POSICAO12*2 POSICAO21*2 RECUANDO1 -t317 ... (preserving POSICAO12 /\ POSICAO21 /\ RECUANDO1 /\ AVANCANDO2)-> state 98200: BOMBA CAMARA1B CAMARA2A FORCA1A FORCA1B FORCA2A FORCA2B PARADO2 PORTA1B PORTA1P PORTA2A PORTA2P POSICAO12*2 POSICAO21*2 RECUANDO1 p277 p330 [accepting all] 0.453s </pre>

Quadro B. 12– Propriedades para a verificação da pressão do circuito 6.

Verificação da pressão
Propriedade 1
Para todos os casos, se o atuador 1A1 está avançando (AVANCANDO1) então é certo que finalmente serão pressurizadas a câmara A do atuador 1A1(CAMARA1A), as portas P e A da válvula 1V1 (PORTA1P e PORTA1A).
Especificação em LTL
$G(AVANCANDO1 \Rightarrow F(CAMARA1A \wedge PORTA1P \wedge PORTA1A))$
Verificação no programa TINA
[] (AVANCANDO1 => <> (CAMARA1A /\ PORTA1P /\ PORTA1A)); TRUE 1.516s
Propriedade 2
Para todos os casos, se o atuador 1A2 está recuando (RECUANDO2) então é certo que finalmente serão pressurizadas a câmara B do atuador 1A2 (CAMARA2B), as portas P e B da válvula 1V2 (PORTA2P e PORTA2B)
Especificação em LTL
$G(RECUANDO2 \Rightarrow F(CAMARA2B \wedge PORTA2P \wedge PORTA2B))$
Verificação no programa TINA
[] (RECUANDO2 => <> (CAMARA2B /\ PORTA2P /\ PORTA2B)); TRUE 2.219s
Propriedade 3
Para todos os casos, se o atuador 1A2 está recuando (RECUANDO2) e o atuador 1A1 está avançando (AVANCANDO1), então é certo que finalmente serão pressurizadas a câmara B do atuador 1A2 (CAMARA2B) e as portas P e B da válvula 1V2 (PORTA2P e PORTA2B) e a câmara A do atuador 1A1(CAMARA1A), as portas P e A da válvula 1V1 (PORTA1P e PORTA1A).
Especificação em LTL
$G((RECUANDO2 \wedge AVANCANDO1) \Rightarrow F(CAMARA2B \wedge PORTA2P \wedge PORTA2B \wedge CAMARA1A \wedge PORTA1A \wedge PORTA1P))$
Verificação no programa TINA
[] ((RECUANDO2 /\ AVANCANDO1) => <> (CAMARA2B /\ PORTA2P /\ PORTA2B /\ CAMARA1A /\ PORTA1A /\ PORTA1P)); TRUE 2.766s