

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**FORMALIZAÇÃO DA REDE DE PETRI CANAL/AGÊNCIA PARA PROJETO DE  
EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS**

**Dissertação submetida à**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**para a obtenção do grau de**

**MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**HENRI CARLO BELAN**

**Florianópolis, abril de 2007.**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**FORMALIZAÇÃO DA REDE DE PETRI CANAL/AGÊNCIA PARA PROJETO DE  
EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS**

**HENRI CARLO BELAN**

**Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de**

**MESTRE EM ENGENHARIA**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA**

**sendo aprovada em sua forma final.**

---

**Prof. Victor Juliano De Negri, Dr. Eng.**

---

**Prof. José Eduardo Ribeiro Cury, Dr. d'Etat**

---

**Prof. Fernando Cabral, Ph.D. - Coordenador do Curso**

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. André Ogliari, Dr.Eng. – UFSC - Presidente**

---

**Prof. Eduardo Alves Portela Santos, Dr. Eng. – PUC/PR**

---

**Prof. Max Hering de Queiroz, Dr. Eng. – UFSC**

---

**Prof. Rômulo Silva de Oliveira, Dr. Eng. – UFSC**

**Aos meus pais Gilmar e Alzira,  
aos meus irmãos Helder e Helen  
e à minha namorada Diane.**

## **HOMENAGEM PÓSTUMA**

Aproveito para prestar minha homenagem a uma pessoa muito importante para mim, o meu avô Arlindo Belan, que infelizmente pelas circunstâncias da vida, não está mais presente para compartilhar mais esta conquista.

Obrigado meu avô querido por todo amor, carinho e dedicação que você sempre demonstrou ao longo dos seus 82 anos.

Certamente, o desenvolvimento deste trabalho somente se concretizou devido à educação transmitida de geração em geração.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente e acima de tudo agradeço à Deus.

Agradeço aos meus orientadores, Prof. Victor J. De Negri e Prof. José Eduardo R. Cury, por acreditarem e apoiarem a realização deste estudo. Seus conselhos e observações foram de suma importância para a concretização do trabalho.

À UFSC, PosMec e ao LASHIP por mais esta oportunidade de crescimento dentro de um ambiente rico em conhecimento e cultura.

Ao CNPq pela bolsa-auxílio.

À Reivax por disponibilizar as informações necessárias para o estudo de caso.

Aos colegas da pós-graduação e do LASHIP pela amizade e companheirismo.

Aos companheiros de república que foram a minha família neste período de estudo, em especial ao Szpak.

Aos meus familiares pelo apoio indescritível.

À todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Por fim e não menos importante à Diane pelo seu amor e carinho.

## SUMÁRIO

Lista de figuras.....	viii
Simbologias e abreviaturas.....	xi
Resumo.....	xiii
Abstract.....	xiv
1. Introdução.....	1
2. Projeto de sistemas automáticos.....	4
2.1 Perspectiva industrial sobre os novos métodos.....	5
2.2 Conceituação e modelagem de sistemas.....	7
2.3 Projeto de sistemas para automação.....	10
2.3.1 Projeto empregando a descrição funcional segundo a escola Alemã.....	12
2.3.2 Projeto empregando a descrição funcional segundo a VDI2860.....	15
2.3.3 Projeto empregando a árvore de funções e meios.....	17
2.3.4 Projeto empregando o modelo <i>SADT/IDEF0</i> .....	19
2.3.5 Projeto empregando a RdP C/A.....	21
2.3.6 Projeto empregando o método PFS/MFG.....	27
2.4 Redes de Petri.....	30
3. Modelo formal para a rede de Petri canal/agência.....	35
3.1 Estrutura geral de um sistema automático.....	35
3.2 Método de projeto utilizando a rede C/A.....	38
3.3 Formalização da RdP C/A.....	42
3.3.1 Exemplo de uma central hidrelétrica.....	44
3.3.2 Representação de conjuntos por seqüência binária.....	47
3.4 Formalização da RdP C/A hierárquica.....	48
3.4.1 Refinamento da rede C/A da central hidrelétrica.....	51
3.5 Conclusões.....	58
4. Métodos de análise e síntese de redes C/A.....	60
4.1 Análise das propriedades da rede C/A.....	61
4.1.1 Coerência estrutural.....	62
4.1.1.1 Mapeamento dos elementos limites.....	62
4.1.1.2 Mapeamento dos elementos limites, para redes hierárquicas.....	65
4.1.1.3 Análise estrutural.....	66
4.1.2 Coerência de fluxo de recursos.....	68
4.1.2.1 Coerência de fluxo de recursos para redes hierárquicas.....	71
4.1.3 Dependência entre recursos.....	75
4.2 Condensação da RdP C/A.....	77
4.3 Compatibilidade entre redes C/A.....	82
4.4 Conclusões.....	84

5. Estudo de caso .....	87
5.1 Central hidrelétrica Passo do Inferno.....	88
5.2 Modelagem em rede C/A .....	89
5.3 Formalização das redes C/A.....	97
5.4 Análise .....	98
5.4.1 Análise das propriedades da rede inicial - $N_0$ (Figura 5.7).....	99
5.4.2 Análise das propriedades do sistema distribuidor – $N_{11}$ (Figura 5.8).....	102
5.5 Modelos específicos .....	108
5.6 Composição da RdP C/A .....	112
5.7 Compatibilidade entre redes C/A .....	115
6. Conclusões .....	117
Referências bibliográficas.....	120
A. Tabela de símbolos matemáticos .....	123
B. Grafo de fluxo de recursos .....	127
C. Redes C/A referentes à PCH Passo do Inferno .....	130
D. Modelos matemáticos equivalentes às redes C/A.....	136
E. Circuito hidráulico da UPH e rede C/A equivalente .....	151

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Fases do processo de projeto (adaptada de De Negri, 1996).....	11
Figura 2.2. Descrição funcional orientada ao fluxo segundo a escola alemã de projeto de produto (Umeda e Tomiyama, 1997).....	13
Figura 2.3. Estrutura de funções para um sistema destinado a “lavar roupas” (Forcellini, 2005).....	14
Figura 2.4. Símbolos para as funções de manipulação e montagem (VDI, 1990 <i>apud</i> Santos, 2003). .....	15
Figura 2.5. Exemplo de refinamento funcional segundo a VDI 2860 (VDI, 1990). ...	16
Figura 2.6. Exemplo de processo de refinamento funcional segundo a VDI 2860 (1990). .....	16
Figura 2.7. a) Árvore de funções e meios, b) Estrutura de funções e c) Estrutura de meios (Shakeri, 1998 <i>apud</i> Santos, 2003). .....	18
Figura 2.8. Árvore de funções e meios para uma máquina automática de fazer chá (Tjalve, 1979).....	18
Figura 2.9. a) Visão básica dos elementos e b) Esquema de detalhamento de funções do <i>IDEF0</i> . .....	20
Figura 2.10. <i>IDEF0</i> de um sistema de controle de tráfego aéreo. ....	21
Figura 2.11. Elementos básicos da rede de Petri canal/agência.....	22
Figura 2.12. Exemplos de configurações da rede C/A (De Negri e Santos, 2007)...	23
Figura 2.13. Proposta de simbologia para indicação de canal oculto.....	24
Figura 2.14. Mecanismo de refinamento e condensação de RdP C/A (De Negri, 1996).....	25
Figura 2.15. Metodologia <i>PFS/MFG</i> para o projeto de controladores de SEDs (Miyagi, 1996).....	28
Figura 2.16. Secagem e empacotamento de açúcar. a) esquema, b) <i>PFS</i> . (Villani, 2004) e c) rede C/A equivalente.....	29
Figura 2.17. Exemplo de modelagem em rede de Petri. ....	32
Figura 3.1. Representação de um sistema automático (adaptado de Souto, 2002). 36	
Figura 3.2. Nova representação para o sistema de atuação e de medição. ....	37
Figura 3.3. Projeto conceitual para sistemas automáticos (adaptado de De Negri e Santos, 2007). .....	40
Figura 3.4. Corte transversal de uma turbina Pelton de dois jatos (PAES e DE NEGRI, 2002). .....	44
Figura 3.5. RdP C/A de uma turbina tipo Pelton.....	45
Figura 3.6. Árvore de refinamentos. ....	49
Figura 3.7. Exemplo de como utilizar a nomenclatura SADT/IDF0 na RdP C/A. ....	50

Figura 3.8. RdP C/A que representa o refinamento do sistema de alimentação ( $N_1$ ). .....	52
Figura 3.9. Refinamento do canal de passagem de água entre o sistema de alimentação e o rotor/gerador ( $N_2$ ). .....	52
Figura 3.10. Refinamento do rotor/gerador ( $N_3$ ). .....	53
Figura 3.11. Exemplo hipotético com base na Figura 3.6. .....	57
Figura 4.1. Exemplo em RdP C/A. .....	61
Figura 4.2. Mapeamento dos elementos limites, quando $C_{ex} \neq \{\}$ . .....	65
Figura 4.3. Mapeamento dos elementos limites, quando $A_{ex} \neq \{\}$ . .....	65
Figura 4.4. Incoerências estruturais. a) situações modeladas, b) situações desejadas. .....	66
Figura 4.5. Incoerências estruturais que são detectadas com a construção do modelo a partir do modelo matemático. a) situações modeladas, b) situações desejadas... .....	67
Figura 4.6. Grafo de fluxo de recursos. .....	70
Figura 4.7. a) 'a1' considerada como de consumo, b) 'a1' considerada como de suprimento. .....	73
Figura 4.8. a) 'a1' suprimento de 'r1' e 'a2' consumo de 'r1', b) recurso 'r1' interno. .....	74
Figura 4.9. Condição que não é detectada pelas análises desta seção e da 4.1.1 . a) Condição desejada, b) Condição modelada. .....	74
Figura 4.10. Grafo de fluxo de recursos, independente do recurso. .....	76
Figura 4.11. Processo de condensação segundo o propósito de integração entre as equipes. .....	78
Figura 4.12. Composição de um canal (linha tracejada está errada). .....	78
Figura 4.13. Composição de uma agência (linha tracejada está errada). .....	79
Figura 4.14. Reordenar as matrizes $\kappa_{pre}$ e $\kappa_{post}$ .....	80
Figura 4.15. Operação 'OU' entre todas as colunas das agências internas. .....	80
Figura 4.16. Elementos de uma rede condensada. .....	81
Figura 4.17. Modelo condensado da rede da Figura 4.1. .....	81
Figura 4.18. Informações que os canais de entrada e/ou saída devem conter. .....	83
Figura 4.19. No processo de refinamento, os canais de fronteira são duplicados. ... .....	84
Figura 5.1. Turbina Francis disposta verticalmente (Littler, 1996 <i>apud</i> Paes, 2001). .....	89
Figura 5.2. Estabelecimento de um modelo funcional/estrutural global para o sistema - 1. .....	90
Figura 5.3. Estabelecimento de um modelo funcional/estrutural global para o sistema - 2. .....	90
Figura 5.4. Estabelecimento de um modelo funcional/estrutural global para o sistema - 3. .....	91

Figura 5.5. Estabelecimento de um modelo funcional/estrutural global para o sistema	
- 4.....	91
Figura 5.6. Refinamento do grupo gerador.....	92
Figura 5.7. Rede inicial - $N_0$ .....	94
Figura 5.8. Refinamento do sistema distribuidor - $N_{11}$ (a3 na Figura 5.7). ....	95
Figura 5.9. Refinamento do RTVX100 - $N_{14}$ (a2 na Figura 5.7).....	96
Figura 5.10. Árvore de refinamentos para as redes C/A da central hidrelétrica Passo do Inferno.....	97
Figura 5.11. Mapeamento dos canais limites de $N_0$ .....	99
Figura 5.12. Mapeamento das agências limites de $N_0$ .....	100
Figura 5.13. Grafos de fluxo de recursos para a rede inicial ( $N_0$ ). ....	101
Figura 5.14. Etapas três, quatro e cinco do processo de análise de coerência de fluxo de recursos. ....	102
Figura 5.15. Mapeamento dos canais limites de $N_{11}$ .....	103
Figura 5.16. Mapeamento das agências limites de $N_{11}$ .....	103
Figura 5.17. Grafos de fluxo de recursos para o sistema distribuidor ( $N_{11}$ ). ....	104
Figura 5.18. Etapa três do processo de análise de coerência de fluxo de recursos. ....	105
Figura 5.19. Etapa quatro do processo de análise de coerência de fluxo de recursos. ....	105
Figura 5.20. Etapas cinco do processo de análise de coerência de fluxo de recursos. ....	106
Figura 5.21. Grafos de fluxo de recursos, independente do recurso, para o sistema distribuidor ( $N_{11}$ ). ....	107
Figura 5.22. Parte do circuito hidráulico da central hidrelétrica.....	109
Figura 5.23. Redes C/A equivalentes às regiões selecionadas no circuito hidráulico. a) Região 1 e b) 2.....	110
Figura 5.24. Partes do circuito elétrico da central hidrelétrica (Reivax, 2003a).....	111
Figura 5.25. RdP C/A equivalente às regiões selecionadas no circuito elétrico. a) Região 1, b) 2 e c) 3.....	112
Figura 5.26. Composição da matriz $\kappa_{pre}$ da rede condensada.....	113
Figura 5.27. Composição da matriz $\kappa_{post}$ da rede condensada.....	114
Figura 5.28. a) Rede condensada para os sistemas hidráulicos e b) de software. ....	114
Figura 5.29. Verificação da compatibilidade entre redes C/A.....	115

**SIMBOLOGIAS E ABREVIATURAS**

$A$	Conjunto finito das agências
$a$	Agência
$A_{ex}$	Conjunto finito das agências externas
Ag	Água
$b$	Dimensão do conjunto $E_{re}$
$C$	Conjunto finito dos canais
$c$	Canal
$C_{ex}$	Conjunto finito dos canais externos
CLP	Controlador lógico programável
CPU	Unidade central de processamento ( <i>central processing unit</i> )
$E$	Energia (classe de recursos)
$E_{re}$	Conjunto finito dos recursos
Ec	Energia de controle
EE	Energia elétrica
EH	Energia hidráulica
EM	Energia mecânica
EP	Energia pneumática
Eut	Energia utilizável
FTA	<i>Fault tree analysis</i>
Freq.	Frequência
$I$	Informação (classe de recursos)
IDEF	<i>Integrated definitions methods</i>
IDEF0	Método de modelagem funcional ( <i>function modeling method</i> )
Inf	Informação
$K_{post}$	Matriz de incidência posterior
$K_{pre}$	Matriz de incidência anterior
Laship	Laboratório de sistemas hidráulicos e pneumáticos
$M$	Matéria (classe de recursos)
$m$	Dimensão do conjunto $A$
MFG	<i>Mark flow graph</i>
$N$	RdP C/A (nôdupla)
$n$	Dimensão do conjunto $C$
Nedip	Núcleo de desenvolvimento integrado de produtos
$N_f$	Conjunto finito da família de redes C/A refinadas

Oleo	Óleo
$p$	Dimensão do conjunto $C_{ex}$
PCH	Pequena central hidrelétrica
PFS	<i>Production flow schema</i>
$q$	Dimensão do conjunto $A_{ex}$
QFD	<i>Quality function deployment</i>
$r$	Recurso
$R_{ca}$	Refinamento de redes C/A (tripla)
RdP C/A	Rede de Petri canal/agência
Rede C/A	Rede de Petri canal/agência
Rot.	Rotação
RTVX100	Regulador integrado de tensão e velocidade
$s$	Dimensão do conjunto $N_f$
SA	Sistema de atuação
SADT	<i>Structured Analysis and Design Technique</i>
SFC	<i>Sequential Function Charts</i>
SM	Sistema de medição
TQM	<i>Total Quality Management</i>
UPH	Unidade de potência hidráulica
$VCK_{post}$	Vetor coluna referente à $K_{post}$
$VCK_{pre}$	Vetor coluna referente à $K_{pre}$
$VRes$	Vetor coluna resultante
$VCLK_{post}$	Vetor linha referente à $K_{post}$
$VCLK_{pre}$	Vetor linha referente à $K_{pre}$
$VLRes$	Vetor linha resultante
$\delta$	Função de <i>refinamento</i>
$\lambda_{ca}$	Função que associa um subconjunto de $E_{re}$ a cada canal e cada agência.
$\lambda_{re}$	Função que mapeia os recursos a uma determinada classe

## RESUMO

Esta dissertação apresenta uma proposta de formalização para a estrutura da rede de Petri Canal/Agência (rede C/A ou RdP C/A). A rede C/A é um modelo funcional e estrutural usado principalmente na fase de projeto conceitual de sistemas técnicos, particularmente em sistemas automáticos. Trata-se de uma ferramenta útil para situações onde existe a necessidade de um modelo capaz de integrar e otimizar os diferentes aspectos inerentes ao projeto, adaptando-se às várias tecnologias e possibilitando uma efetiva interação entre as equipes envolvidas.

Graficamente a RdP C/A é um grafo direcionado bipartido, composto por dois elementos básicos: unidades ativas, representadas por retângulos e unidades passivas representadas por círculos, conectados por arcos direcionados que representam o fluxo de recursos. O formalismo proposto consiste em gerar um modelo matemático equivalente à estrutura do modelo gráfico, baseado na teoria de conjuntos, funções e matrizes, similarmente ao tratamento dado as redes de Petri marcadas.

Com o formalismo inserido à RdP C/A se torna possível a elaboração de métodos matemáticos de análise e síntese da rede. Neste trabalho de mestrado serão expostos os procedimentos de análise de coerência estrutural, de fluxo de recursos e dependência, como também os procedimentos de condensação e análise de compatibilidade entre redes C/A. Procedimentos estes que, apesar de ainda não comporem um software, podem ser utilizados como guia para a criação de uma ferramenta computacional capaz de executar todas as rotinas matemáticas automaticamente.

A fim de validar a teoria inserida nesta dissertação, todos os conceitos teóricos são aplicados ao projeto de um regulador de velocidade para a central hidrelétrica Passo do Inferno, que utiliza uma turbina do tipo Francis e tem potência nominal igual a 1.665 kVA.

Os métodos de análise e a rede C/A, agora formal, são aplicados sobre a central hidrelétrica a fim de obter um modelo geral coerente, baseado em uma hierarquia de redes C/A, capaz de representar o sistema como um todo. O detalhamento, utilizando diagramas específicos, fica restrito à unidade de potência hidráulica e aos sistemas hidráulicos que atuam na regulação da velocidade.

## ABSTRACT

This study presents a proposal of formalization for the Channel/Instance Petri net structure (C/I net). The C/I net is a functional and structural model used mainly in the conceptual design phase of technical systems, particularly in automatic systems. Therefore it is a useful tool for situations where there exists the need of a model capable to integrate and to optimize different aspects inherent to design, so that it adapts itself to several technologies and make possible an effective interaction among the involved staff.

Graphically C/I net is a bipartite directed graph, composed by two basic elements: active units represented by rectangles and passive units represented by circles, connected by directed edges representing the resource flow. The proposed formalism consists in generating mathematical model equivalent to the graphic model structure, based on the theory of sets, functions and matrixes, similar to the marked Petri nets.

With the formalism inserted in the C/I net, the elaboration of mathematical methods of analysis and synthesis of the net becomes possible. In this master's degree work, the procedures of analysis of structural coherence, of flow of resources and dependence, will be exposed as well as the condensation procedures and compatibility verification among C/I nets. These Procedures can be used like guide for the creation of a computational tool capable to execute all the mathematical routines automatically.

In order to validate the works described in this dissertation, all of the theoretical concepts are applied in the project of a speed regulator for the hydraulic power plant *Passo do Inferno*, which uses a Francis turbine with 1.665 kVA of nominal power.

The analysis methods and C/I net, now formal, are applied to the hydraulic power plant in order to obtain a coherent general model, based on a hierarchy of C/I nets, capable to represent the system as a whole. The refinements, using specific diagrams, are restricted to the hydraulic potency unit and the hydraulic systems that act in the speed regulator.

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

O crescimento tecnológico tem implicado um maior volume de problemas técnicos a serem solucionados e a necessidade de interação entre diferentes áreas de conhecimento. Devido à diversidade de competências requeridas na atividade de projeto de produtos e sistemas industriais, raramente esta é realizada por um único indivíduo, sendo freqüentemente necessária a criação de uma equipe de trabalho de formação diversificada para realizar um projeto com sucesso.

De fato, à medida que aumenta a complexidade dos sistemas, seja pelas dimensões, pelo número de tecnologias envolvidas ou pelo desempenho exigido, a equipe de projeto poderá envolver especialistas em informática, programação, hidráulica, pneumática, instrumentação, eletrônica, dentre outras, sendo que cada um destes está acostumado a conceitos, diagramas e terminologias próprias. Conseqüentemente, a dificuldade de se obter uma representação global e um entendimento claro por todos os membros da equipe de projeto traz a tona dificuldades de organização e comunicação.

Para efetuar o projeto de sistemas automatizados e minimizar os problemas citados, De Negri e Santos (2007) destacam que um dos requisitos fundamentais é estabelecer uma sistemática, que preveja a utilização de diagramas compreensíveis a todos os integrantes da equipe de projeto, durante a maior parte do tempo de desenvolvimento. Esta dissertação, por meio da formalização da estrutura da rede de Petri Canal/Agência (rede C/A ou RdP C/A), tem a intenção de encorajar o uso da rede como modelo central. Logo, este trabalho defende a utilização da rede como meio para estabelecer os vínculos entre os diagramas técnicos específicos e promover a comunicação entre especialistas de diversas áreas.

Nas bibliografias que tratam das técnicas de modelagem funcional expostas nesta dissertação, inclusive a RdP C/A não formal, não é observado a existência de métodos matemáticos que auxiliem na verificação da coerência do modelo. Desta forma, o que motivou este estudo de mestrado foi acreditar que esta ausência de procedimentos matemáticos seja conseqüência do fato que os modelos não são formalizados matematicamente, apesar de serem baseados em regras teóricas de utilização, refinamento e condensação. Esta crença se apóia em comentários já comprovados sobre a rede de Petri ordinária, entre os quais, cita-se que a representação formal tem como finalidade evitar a ambigüidade no entendimento da rede (Jensen, 1996) e facilitar a prova de teoremas e a verificação automática via computador (Cardoso e Valette, 1997).

Assim, o objetivo principal deste trabalho é expor uma proposta para a formalização da estrutura da rede C/A, baseada na teoria de conjuntos, funções e matrizes. Pretende-se ainda destacar que o formalismo inserido à estrutura da rede C/A torna possível a criação de

métodos matemáticos, que podem tanto auxiliar a análise da estrutura da rede, quanto facilitar a comunicação entre as equipes envolvidas com a tarefa de projeto.

Apesar das redes C/A serem uma extensão das redes de Petri ordinárias, as propriedades das redes e as técnicas de verificação não são equivalentes. Isto se deve principalmente porque os modelos representam perspectivas diferentes do sistema: a rede de Petri ordinária é um modelo comportamental e a RdP C/A um funcional e estrutural. Todavia a idéia básica de se formalizar a rede por  $n$ -uplas e realizar os procedimentos de análise a partir das matrizes de incidência anterior e posterior é assimilado da rede comportamental, sendo proposta a formalização da estrutura da rede C/A por uma  $n$ -nupla e da hierarquia entre redes por triplas.

Com o intuito de comprovar que a formalização da estrutura do modelo possibilita a criação de métodos matemáticos capazes de analisar a coerência deste, são propostos três procedimentos de análise das propriedades da rede C/A, os quais visam à coerência estrutural, de fluxo de recursos e de dependência entre recursos. Estes métodos de análise, apesar de informais, apresentam-se como um diferencial para a utilização da rede C/A, frente aos outros modelos que não apresentam nenhum método de verificação.

Também são descritos outros dois métodos matemáticos que são aplicados à RdP C/A, os quais atuam na facilitação da comunicação entre o pessoal envolvido com a tarefa de projeto. Estes são os processos de condensação e de análise da compatibilidade entre redes.

A fim de delimitar e definir os propósitos da utilização da RdP C/A formal e dos métodos matemáticos, buscando dar uma idéia mais clara das possibilidades de aplicação da rede C/A para o projeto de equipamentos industriais, estes são inseridos nas diretrizes de projeto de sistemas automáticos proposta inicialmente por De Negri (1996) e, posteriormente complementada por Santos (2003). Este último formula um novo modelo de projeto conceitual, procurando abordar a execução dos projetos da parte física e de controle de forma simultânea, com o intuito de obter a concepção do novo sistema de maneira integrada. Para tanto, Santos (2003) apresenta uma proposta de descrição funcional, estrutural e comportamental utilizando redes C/A (De Negri, 1996) associada a uma abordagem de modelagem e controle de sistemas a eventos discretos (SEDs) baseado em autômatos e, desta forma, insere na atividade de projeto ferramentas formais de modelagem e síntese de controladores (Ramadge e Wonham, 1989), (Queiroz e Cury, 2002).

Nos últimos anos, vêm sendo realizados dentro do Laship (Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos), estudos inseridos nesta linha de pesquisa. A intenção disto é estabelecer métodos para o projeto de sistemas automáticos, visto que segundo afirmam De Negri e Santos (2007), ainda não há uma metodologia de projeto consolidada para sistemas desta natureza. Ressalta-se que o Laship procura trabalhar em concordância com o Nedip

(Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos), que atua na metodologia de projeto de sistemas técnicos.

Por fim as técnicas sugeridas são aplicadas sobre um estudo de caso a fim de avaliar a eficiência e real utilidade dos métodos propostos por este estudo. Como estudo de caso, optou-se pela modelagem da pequena central hidrelétrica denominada Passo do Inferno, a qual utiliza uma turbina do tipo Francis e tem potência nominal igual a 1.665 kVA. Esta escolha levou em conta as características de dimensão e multidisciplinaridade do sistema, fatos estes que classificam a tarefa de projeto como de médio a grande porte, tornando possível e atraente a utilização de um modelo central que facilite o entendimento do sistema e a comunicação entre equipes de projeto. Os dados sobre esta central hidrelétrica foram disponibilizados pela Reivax, empresa que atua em parceria com o Laship.

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

O segundo capítulo faz um estudo sobre a perspectiva industrial sobre os novos métodos de projeto desenvolvidos pela área acadêmica. Segue-se com uma contextualização dos conceitos, modelos e técnicas de projeto, os quais estão diretamente relacionados com os assuntos tratados por esta dissertação, sendo apresentados também os aspectos gráficos sobre a RdP C/A.

No terceiro capítulo a estrutura de um sistema automático, sugerida por De Negri (1996), e a metodologia de projeto proposta por Santos (2003) são adaptadas para suportar a rede C/A formal e os procedimentos matemáticos. Este capítulo também expõe a proposta de formalização desenvolvida por esta pesquisa de mestrado, sendo descrita a formalização da estrutura da rede C/A por uma n-úpla e de redes C/A hierárquicas por triplas.

No quarto são apresentados os métodos de análise e síntese aplicados à rede C/A, sendo três voltados para a análise das propriedades da rede (análise de coerência estrutural, fluxo de recurso e dependência entre recursos) e dois para o auxílio na comunicação entre o pessoal envolvido com o projeto (condensação e compatibilidade entre redes).

O quinto descreve o estudo de caso, que consiste na modelagem do regulador de velocidade da central hidrelétrica Passo do Inferno, sendo exposto com o objetivo de validar os conceitos propostos pelos dois capítulos anteriores. O processo de projeto segue a metodologia apresentada no terceiro capítulo.

O sexto e último capítulo discute os resultados obtidos e faz sugestões para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### PROJETO DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS

A inexistência de consenso sobre como efetuar o projeto de sistemas automáticos é percebida pelos profissionais da área prática, os quais tendem a não adotar os métodos e ferramentas desenvolvidas pela área acadêmica (Eder, 1998; Frost, 1999 e Maffin, 1998). Cita-se, por exemplo, a falta de informação com relação aos reais impactos que os modelos e técnicas, desenvolvidos pelas instituições de ensino, provocam à prática de projeto (Rohatynski, 2001) e a existência de muitos modelos, não sendo claro qual é melhor para um problema em específico (Pulm e Lindemann, 2001).

Com o objetivo de amenizar as restrições impostas pela indústria e tendo em vista a gama de modelos existentes, foram selecionados e descritos brevemente os que se acredita que sejam os de conhecimento mais difundido, pelo menos no meio acadêmico (seção 2.3 ). Os modelos escolhidos apresentam similaridades com a rede C/A, seja quanto à aplicabilidade ou estrutura, tornando possível assim uma comparação entre os mesmos quanto à aplicabilidade, semelhanças, vantagens e desvantagens de cada um.

Tendo em vista que uma técnica de modelagem normalmente está vinculada a uma metodologia de projeto, os modelos serão expostos em conjunto com a metodologia de projeto que os utiliza. Desta forma, sob uma perspectiva funcional, são descritos os sistemas empregando a descrição funcional segundo a escola alemã (Pahl e Beitz, 1988) e segundo a norma VDI 2860 (1990), e mais os projetos empregando à árvore de funções e meios (Hubka e Eder, 1988) e (Buur, 1990), o modelo SADT/IDEF0 (IDEF, 2006) e o método PFS/MFG (Miyagi, 1997).

Realiza-se também uma descrição prévia sobre a rede C/A conforme discutida por Reisig (1985), Heuser (1990) e De Negri (1996), os quais apontam esta como um modelo capaz de representar as perspectivas funcionais e estruturais de um sistema, sendo indicada principalmente para a fase de projeto conceitual de sistemas técnicos e automáticos. Com os estudos propostos por esta dissertação, acrescenta-se à rede C/A a possibilidade de ser apresentada como uma representação matemática, ao contrário de só diagramática.

Conclui-se a descrição dos modelos equivalentes com a apresentação da rede de Petri comportamental (Cardoso e Valette, 1997); (Peterson, 1981) e (Jensen, 1996), que apesar de não ter uma aplicação equivalente à rede C/A e aos demais modelos citados anteriormente, é importante para a compreensão da proposta de formalização para a RdP C/A, visto que são equivalentes quanto à estrutura (seção 2.4 ).

Desta forma, para contextualizar o que será tratado neste trabalho de mestrado, este capítulo apresenta alguns aspectos fundamentais relacionados ao projeto de sistemas, em especial os automáticos. Primeiramente, discute-se sobre a utilização, pela indústria, dos métodos de projeto desenvolvidos pela academia, com o intuito de identificar o que os en-

engenheiros de projeto esperam como resultados de pesquisa para que as técnicas sejam efetivamente utilizadas. Segue-se com uma introdução dos conceitos e termos técnicos que serão utilizados no decorrer dessa dissertação. Por fim são expostos alguns modelos que apresentam similaridades à rede de Petri canal/agência, seja pela finalidade ou estrutura.

## 2.1 Perspectiva industrial sobre os novos métodos

Esta seção relata a percepção de alguns autores (Eder, 1998; Frost, 1999; Maffin, 1998; Pulm e Lindemann, 2001 e Rohatynski, 2001), os quais estão interessados em observar se as metodologias e modelos, sugeridos pela área acadêmica, estão sendo aplicados na atividade de projeto dentro da indústria. De modo geral, todos os autores destacaram a tendência generalizada, por parte dos profissionais da área industrial, em **não aceitar** as ferramentas sugeridas pelos pesquisadores e, por conseguinte, tentam encontrar explicações para o que acontece. Por fim, fazem sugestões para melhorar a forma de ensino e pesquisa, com a finalidade de encontrar meios para encorajar as indústrias a fazerem uso mais conciso e sistemático das técnicas de projeto.

Tendo em vista as vantagens da utilização de métodos e ferramentas de projeto, como as descritas na seção 2.3 e 2.4 a seguir, Frost (1999) e Eder (1998) se surpreendem com o fato de que a indústria não aceite e até não conheça essas novas tecnologias propostas pelos cientistas de projeto. Já para Maffin (1998), o que acontece não é tão surpreendente, dado que a aceitação de novos paradigmas normalmente é um processo árduo.

Rohatynski (2001) relata que existem poucas informações disponíveis para analisar o impacto que os modelos desenvolvidos pelos cientistas acarretam à prática de projeto. O que se pode perceber é que existem pesquisas na área acadêmica, mas o desenvolvimento das técnicas de projeto não está impressionando as indústrias, as quais por sua vez alegam que as publicações dos pesquisadores têm pouca influência na engenharia real.

Rohatynski (2001) e Eder (1998) indicam que somente a minoria aplica métodos de projeto e manufatura como *TQM*, *QFD* e *FTA*, sendo que a aplicação é normalmente executada parcialmente ou com simplificações em relação ao método original e mesmo assim a companhia considera essas tecnologias como sendo as “melhores” disponíveis. Também falam que a maioria das indústrias utiliza seus próprios métodos, desenvolvidos com base na experiência da equipe responsável pelo plano de projeto, sendo que em alguns casos há uma documentação e no restante o processo é totalmente empírico. Maffin (1998) diz que isso possivelmente acontece porque muitas atividades de projeto utilizam conceitos predefinidos, os quais podem ser requisitos e características internas e/ou externas, como tempo, especificações e componentes.

Em especial muitos projetistas têm muita habilidade em fazer projeto e conseguem ser melhores que os métodos teóricos e na maioria das vezes eles têm a sua própria linguagem de projeto, que por sua vez pode não ser compatível com a linguagem padrão.

A principal crítica por parte dos projetistas é que existe falta de tempo, disponibilizada por parte da gerência, para que haja a possibilidade de correção e aperfeiçoamento no uso dos métodos (Rohatynski, 2001). Outros motivos apresentados pela equipe de projeto para a não alteração da forma com que se vem fazendo o projeto dentro da indústria é a possível incompatibilidade de equipamentos, re-treinamento do pessoal, risco de erro na forma de usar, percepções (justificadas ou não), abrir mão de experiência adquirida, resistência à mudança e quebrar a rotina já instalada e aprovada na prática (Frost, 1998).

Segundo Eder (1998) as técnicas recomendadas pelos cientistas da área de projeto são formulados a um nível muito geral e abstrato, o que torna necessária a adaptação para problemas individuais, companhia, economia e escala de tempo, como os objetivos industriais são resultados práticos e rápidos, isto se reforça como ponto desfavorável (Frost, 1998). Outro ponto desfavorável à inclusão de aspectos abstratos às metodologias é que as mesmas normalmente requerem muita informação, as quais podem ser inviáveis (difíceis ou custosas para coletar ou gerar).

O que se nota é que o entendimento da importância e benefício da utilização das técnicas não é evidente. Existem muitos modelos diferentes e ainda não está claro qual é o melhor para cada problema ou o correto para ser usado como padrão geral (Pulm e Lindemann, 2001). Logo, os projetistas não aplicam os métodos modernos de projetos ou porque não os conhecem ou porque não há o objetivo de aprender, o que acontece quando os profissionais experientes estão fixados à rotina, enquanto que os novatos não têm experiência e não estão preparados para projetar (Rohatynski, 2001).

Usualmente, companhias e projetistas implementam todo o método de uma só vez, e normalmente acreditam que a novidade não é suficientemente boa, por exemplo, quando o novo método não é coerente com o projeto tradicional, e assim desencorajam e rejeitam o método acreditando que a inovação não é muito útil na prática. O que é indicado é que se faça à adoção do método gradualmente, com isso o sucesso é alcançado e a experiência aumenta (Eder, 1998).

Frost (1999) acredita que para conseguir entrar no meio industrial é recomendado que os cientistas tenham uma visão mais prática do que teórica e enfatiza a exposição de exemplos bem sucedidos e de tabelas de comparações, as quais mostram como e por que a metodologia é melhor, sempre sobre o foco específico da área que se deseja cobrir.

Segundo Maffin (1998), para utilizar práticas que dêem resultado não é necessário somente estar ciente das características do contexto de projeto, mas é necessário entender a implicação de uma boa prática. Isto não implica necessariamente o uso de novos modelos por si só, nem a exclusão do desenvolvimento de novos modelos. O objetivo é estender o entendimento atual de processo de projeto, requerendo que os pesquisadores contemplem modelos voltados mais para interpretação do que pura descrição.

Por fim, Eder (1998) e Rohatynski (2001) enfatizam que é necessário levar em conta as capacidades e habilidades humanas por parte da equipe de projeto, assim como consideram essencial que alguém dentro da empresa apresente entusiasmo e faça o direcionamento do processo, para a aceitação. Nessa linha de pesquisa Frankenberger e Badke-Schaub (1998) tentam entender como as características pessoais e do grupo de trabalho podem influenciar a tarefa de projeto.

## 2.2 Conceituação e modelagem de sistemas

Nesta seção são apresentados conceitos fundamentais sobre sistemas e modelos, os quais servirão de base para as seções subseqüentes.

Para o contexto da área tecnológica, é apropriada a definição apresentada em Hubka e Eder (1988, pg. 244), a qual estabelece que: "**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 definidas entre os elementos e para com seu ambiente. É possível que um sistema possa conter elementos isolados (ex. elementos com nenhuma relação com outros), ou grupos isolados de elementos (ex. 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. Assim sendo, os sistemas são hierárquicos".

Paes e De Negri (2002) acrescentam que os sistemas, principalmente os estudados nas áreas de automação e controle, mecatrônica e engenharia de software, normalmente podem ser decompostos em diversos subsistemas inter-relacionados que, por sua vez, possuem seus próprios subsistemas e assim sucessivamente até alcançar componentes considerados elementares. Estruturas deste tipo estabelecem interações de difícil previsão, exigindo o estudo de partes isoladas a fim de estabelecer o comportamento global com maior segurança. Tais sistemas são caracterizados como complexos no sentido que o todo é mais que a soma das partes, ou seja, dadas as propriedades das partes e as leis de suas interações, não é trivial inferir sobre as propriedades do todo.

Um **sistema mecatrônico**, característica da maioria dos **equipamentos industriais** dos dias de hoje, é entendido como sendo um sistema que une várias disciplinas e tecnologias, tais como mecânica, hidráulica, pneumática, elétrica, eletrônica e informação. Estes sistemas buscam promover uma melhor comunicação entre os especialistas e a adoção de soluções inovadoras para os diversos problemas de projeto.

Segundo Salminen e Verho (1991) *apud* De Negri (1997), "uma aplicação típica de mecatrônica possui um alto grau de automação, um sistema de controle incorporado e alto desempenho", deste modo, entende-se que os sistemas mecatrônicos também podem ser considerados como **sistemas automáticos**. Considera-se também que o nível de automa-

tismo de um equipamento é correspondente ao grau de independência deste com o ambiente externo, podendo envolver desde o controle de apenas uma variável até a supervisão e controle de todo o processo.

A fim de facilitar a análise ou o projeto de sistemas, faz-se uso de abstrações, que por sua vez são descrições simplificadas que enfatizam certos detalhes ou propriedades e suprimem outros. Complementarmente, uma abstração pode ser vista como o resultado da aplicação de uma ou mais perspectivas ao sistema ou parte dele, de modo que a teoria fornecida pelas perspectivas seja utilizada para criar **modelos** daquelas porções do sistema incluídas na abstração (Hoover et al, 1991 *apud* De Negri, 1996).

A modelagem de sistemas, em especial os sistemas mecatrônicos e software orientados a objetos, é realizada basicamente sobre três perspectivas denominadas **de estrutural, funcional e comportamental**, sendo que a junção destes três tipos de modelos deve fornecer a descrição completa do sistema (Hubka e Eder, 1988). Para compreender estas perspectivas De Negri (2004) as define como:

- **Perspectiva funcional** – responde a pergunta: **O que?** o sistema faz. Estabelece de forma inequívoca a função de cada componente no sistema e qual é a inter-relação entre estas funções. Para esta definição, entende-se como **função** de um sistema o efeito que ele provoca sobre o ambiente externo (Chandrasekaran e Josephson, 2000);
- **Perspectiva estrutural** – responde a pergunta: **Onde?** as funções são implementadas. Representa o conjunto de elementos em um sistema e as relações que os conectam uns aos outros, que podem indicar conexões físicas, de comunicação ou relações hierárquicas. A **estrutura** mostra que o sistema é formado por uma rede de elementos com certo arranjo interno, ordem, organização, constituição, construção, etc.;
- **Perspectiva comportamental** – responde a pergunta: **Como? e Quando?** as funções são executadas. Informa quando e como as funções de um sistema serão executadas. As características de modelos comportamentais dependem do tipo de sinal de entrada e saída envolvido na execução da função do sistema, sendo divididos em: modelos a estado contínuo e a estado discreto.

Os modelos também podem ser classificados **segundo a representação**. A existência de diferentes formas de representação objetiva que, à medida que o projetista sabe o que um diagrama ou uma equação pode descrever, a atividade de manutenção ou projeto de uma estação de trabalho ou um equipamento isoladamente seja realizada com maior clareza e exatidão. Para De Negri (2004) os modelos podem ser classificados segundo a representação como icônico, analógico, simbólico ou matemático, diagramático ou esquemático e em linguagem natural. Nesta dissertação são utilizadas as seguintes representações:

- **Modelo simbólico ou matemático:** São modelos que empregam a lógica e a matemática para representar, de forma abstrata, as características essenciais dos componentes do sistema e têm seu relacionamento descrito por meio de uma expressão matemática. Modelos com estas características serão utilizados para representar a rede C/A formalmente, tendo como base a teoria de conjuntos, funções e matrizes;
- **Modelo diagramático ou esquemático:** Composto de um conjunto de linhas e símbolos gráficos que representam características estruturais, comportamentais ou funcionais do sistema real. Os modelos gráficos da RdP C/A gráfica são exemplos da utilização desta representação;
- **Modelo em linguagem natural:** Descrição utilizando linguagem natural para descrever características do sistema. As introduções sobre os exemplos tratados nesta dissertação são realizadas segundo esta representação.

Alguns modelos funcionais, inclusive a rede C/A, classificam os recursos como sendo energia, matéria ou informação, para tanto se faz necessário introduzi-los conceitualmente. Com o intuito de dar continuidade aos trabalhos já realizados sobre a RdP C/A, as definições que são aceitas por esta dissertação são as mesmas sugeridas por De Negri (1996 e 1997), as quais seguem:

- **Energia:** segundo Macfarlane (1964 *apud* De Negri, 1996), “A energia associada a um estado de um objeto [sistema] físico é uma medida de sua capacidade de produzir mudanças em seus próprios estados ou nos estados de outros objetos [sistemas] físicos”. Já com relação à primeira lei da termodinâmica (Van Wylen e Sonntag, 1970 *apud* De Negri, 1996) a variação da energia em um sistema decorre da transferência de calor e/ou trabalho, observáveis em suas portas físicas, ou seja, através dos canais de interligação destes. Concretamente, a energia e, em particular, a potência (como variação de energia no tempo) são completamente determinadas pelas variáveis genéricas: momento, deslocamento, esforço e fluxo, sendo que nos domínios energéticos específicos assumem designações comuns como força, velocidade, pressão, corrente, etc.
- **Matéria ou Material:** é caracterizada por suas propriedades físicas, químicas, elétricas, magnéticas, metalúrgicas, etc., propriedades estas decorrentes não só das substâncias básicas que a compõe, mas também do tipo de processo aplicado para a sua obtenção (Chestnut, 1966 *apud* De Negri, 1996). Como exemplos, podem-se citar a forma, dimensões, rugosidade, condutividade, ductilidade etc., além das propriedades termodinâmicas como temperatura, pressão, massa e volume específicos, massa e volume totais.

- **Informação:** Segundo Finkelstein (1977 *apud* De Negri, 1996) “informação consiste do símbolo juntamente com a relação que este porta para com o referente”, ou seja, decorre do significado (extensivo e intencional) atribuído pelo homem para determinado símbolo. Para o caso de instrumentos técnicos, como transdutores, condicionadores de sinais e controladores, não se evidencia imediatamente a manipulação de símbolos, mas sim a manipulação de sinais. Assim sendo, os sinais são variáveis físicas observáveis, cujo estado ou parâmetros de variação com o tempo correspondem aos símbolos que portam informação.

Ainda seguindo as definições de De Negri (1996), as variáveis que caracterizam a energia e as propriedades da matéria são designadas genericamente de **atributos** em conformidade com a utilização em orientação por objetos (Rumbaugh et al, 1991 *apud* De Negri, 1996) e no projeto mecatrônico (Malmqvist, 1994 *apud* De Negri, 1996). Tem-se assim que o estado de um recurso energético ou material corresponde aos valores, qualitativos ou quantitativos, assumidos por seus atributos em determinado instante. Do mesmo modo, um recurso de informação, que pode englobar um ou mais símbolos, tem seu estado definido pelo valor assumido por estes símbolos.

### 2.3 Projeto de sistemas para automação

Segundo De Negri e Santos (2007), ainda não há uma proposta concreta para o modelo do processo de projeto de sistemas automáticos, sendo empregada uma subdivisão segundo fases do processo de projeto de produtos industriais, influenciada fortemente pela escola alemã que está representada em Pahl e Beitz (1988). Dentre as diversas instituições e profissionais que se dedicam atualmente ao estudo das metodologias de projeto de produto e sistemas técnicos, destaca-se o Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (NeDIP) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Observa-se que as metodologias de projeto, seja para sistemas técnicos ou software, dividem-se em fases com o objetivo de alcançar resultados específicos, começando pelo levantamento das informações necessárias ao desenvolvimento do projeto, passando pela elaboração de um conceito sobre o objeto alvo e terminando com uma documentação clara do que deverá ser o produto final do esforço de concepção. Os modelos existentes convergem para um modelo dito consensual, compreendido das fases de projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado (Ferreira, 1997) que, por sua vez, são compostas de etapas de desenvolvimento sistematizadas que conduzem a resultados intermediários tais como especificação, estrutura funcional, leiaute preliminar, documentação detalhada, entre outros (Figura 2.1).

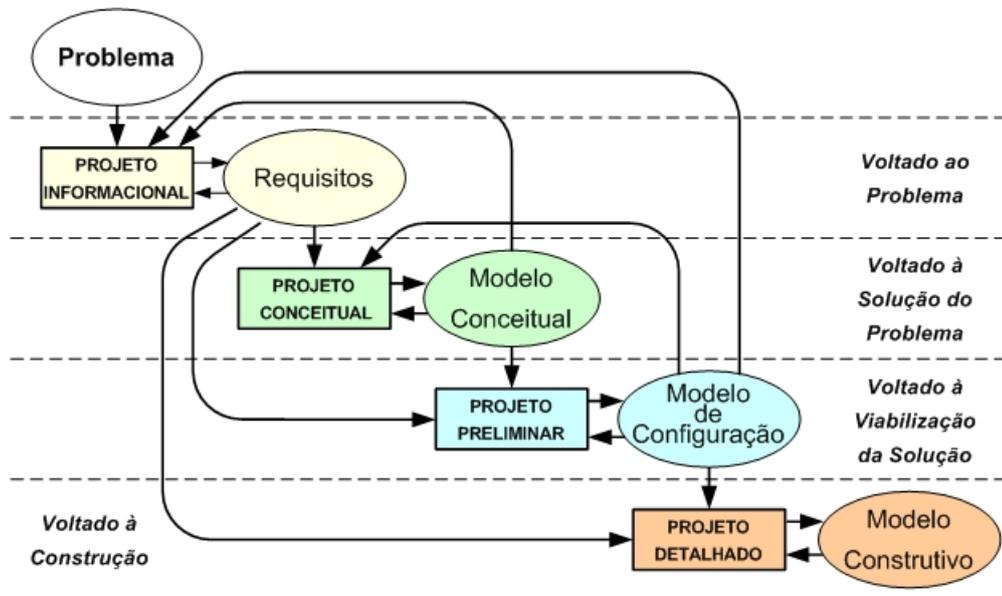


Figura 2.1. Fases do processo de projeto (adaptada de De Negri, 1996).

O projeto conceitual é visto como a fase mais importante do processo de projeto, uma vez que é nesta que as especificações de projeto caminham paulatinamente para uma concepção de solução. Em outras palavras, o projeto conceitual segue após a determinação das especificações de projeto da fase informacional e busca identificar um ou mais princípios de solução que atendam a todas as necessidades especificadas. Dentre as concepções geradas a partir da combinação dos princípios de solução, uma é escolhida para ser trabalhada na fase de projeto preliminar.

Tradicionalmente a fase conceitual pode ser subdividida em descrição funcional e síntese de soluções, sendo que a atividade de descrição funcional é fundamental no processo de projeto, procedimento este que tem como base a decomposição<sup>1</sup> funcional, a qual por sua vez consiste na divisão de uma função em sub-funções de menor complexidade. No início da atividade de descrição funcional, o problema é descrito em termos da função principal, ou funções principais do produto, a qual deve ser detectada analisando-se os requisitos funcionais presentes na especificação de projeto. A função total representa o problema de projeto e é refinada em sub-funções ou sub-problemas mais simples, para os quais se buscam soluções. O processo de descrição funcional segue até a identificação de princípios de solução para cada uma das sub-funções da estrutura obtida.

Segundo Santos (2003) há um consenso entre os pesquisadores da importância da descrição funcional, formando o elo entre os requisitos impostos pelo usuário de determinado produto ou sistema e o processo de projeto deste. Por conseguinte, o entendimento das diversas abordagens que tratam da descrição funcional tem sido objeto de análise intensa no meio acadêmico e será discutida nesta seção, no entanto, dando maior foco aos modelos

<sup>1</sup> Neste trabalho admite-se que os termos decomposição e refinamento apresentam significado idêntico, sendo que o mesmo vale para o processo contrário, ou seja, composição e condensação.

utilizados na decomposição funcional, os quais apresentam funcionalidades similares ao modelo central desta dissertação que é a rede C/A.

### 2.3.1 Projeto empregando a descrição funcional segundo a escola Alemã

Nesta seção é apresentada a descrição funcional segundo a escola Alemã, a qual defende a execução do projeto conceitual sob uma perspectiva abstrata. Segundo os autores, esse tipo de modelagem aumenta a chance de se encontrar melhores princípios de solução, logo que o projetista é encorajado a pensar livremente, não se fixando à projetos e princípios de solução bem conhecidos (Pahl e Wallace *apud* Chakrabarti, 2002).

Pahl e Beitz (1988), principais representantes da metodologia apresentada nesta seção, definem função como sendo a relação entre entradas e saídas de um sistema cuja proposta é executar uma tarefa. Back (1983), semelhantemente assume que uma função é a relação entre causas e efeitos das grandezas de entrada e saída de um sistema.

A descrição funcional de acordo com o conceito de função descrito acima está inserida na metodologia de projeto proposta pela escola alemã, a qual a constrói baseada em funções que convertem ou canalizam matéria, energia ou informação.

A representação funcional é iniciada a partir de uma **função global**, que por sua vez é determinada através dos requisitos de projeto, elaborados na fase informacional. A abstração do problema é realizada decompondo a função total em parciais até o ponto em que seja possível identificar as operações elementares do sistema, resultando na elaboração de um modelo de **estrutura de funções** de baixa complexidade interligadas por fluxos de energia, matéria e informação. O projetista deve em seguida buscar princípios de solução que venham a desempenhar cada uma das funções elementares da estrutura elaborada (Figura 2.2).

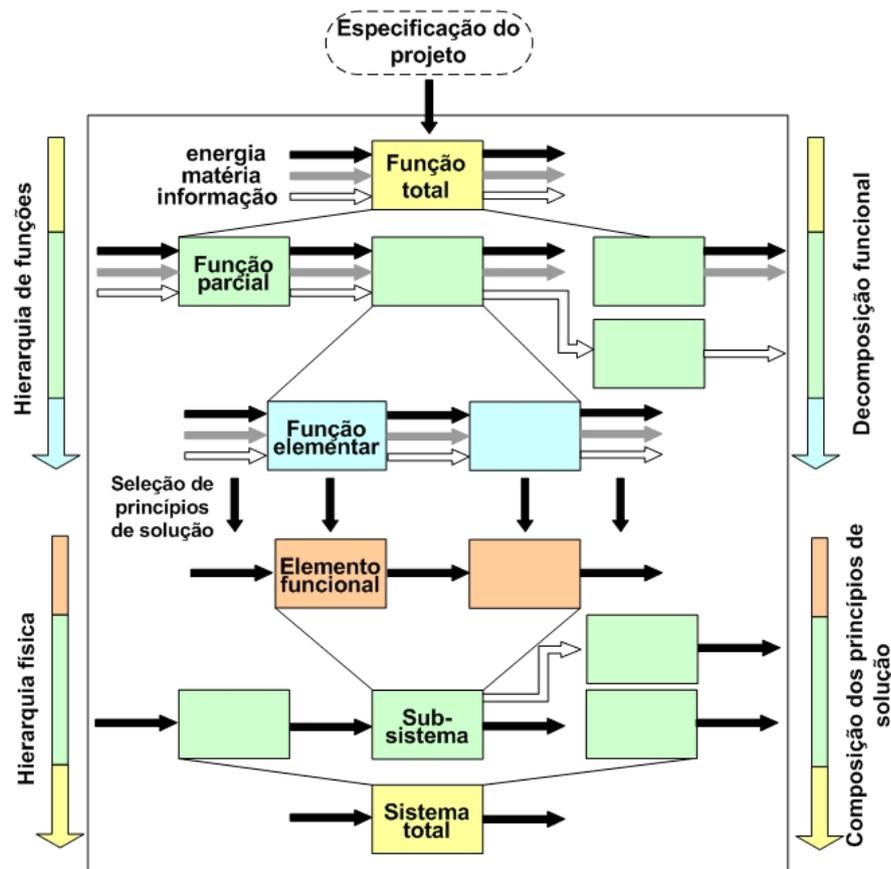


Figura 2.2. Descrição funcional orientada ao fluxo segundo a escola alemã de projeto de produto (Umeda e Tomiyama, 1997).

Segundo Ferreira (1997), as estruturas de funções elaboradas entre o modelo de função total e de estrutura de funções elementares são denominadas estruturas de funções parciais. A estrutura de operações básicas se distingue da estrutura de funções elementares somente pela omissão da definição das entradas e saídas. Desta forma, define-se nas operações básicas o que é transformado, quanto ao tipo e não à quantidade.

Ferreira (1997) enfatiza que ao se trabalhar com operações básicas padronizadas se tem como vantagem a possibilidade de utilização de catálogos para a busca de princípios de solução, sendo possível à criação de um banco dados computacional de princípios de solução.

A primeira crítica a este modelo é apontada por Umeda e Tomiyama (1997), os quais relatam uma limitação para descrever funções que não transformam nada, como uma função de fixação, que fixa algum objeto para que este não se mova durante um processo de manufatura, ou ainda uma função de guia linear, que guia um objeto em uma linha reta.

Maffin (1998) e Ogliari (1999) apontam que não é simples tratar com funções em um nível muito abstrato, dificultando o processo de translação ou transformação dos requisitos do usuário em funções que convertem ou canalizam matéria, energia ou informação.

Santos (2003) aponta que a decomposição funcional de determinados sistemas pode não ser trivial, visto que o desmembramento a um nível de detalhamento da ordem de fun-

ções e operações elementares incorporaria conjuntos fechados muito complexos. Por exemplo, uma função “obtenção de vácuo” pode ser desempenhada por um sistema comercialmente disponível, não sendo interessante explicitar a decomposição desse subsistema.

A Figura 2.3, extraída de Forcellini (2005), exemplifica o projeto de um dispositivo destinado a “lavar roupas”. De acordo com o ponto de vista do autor, o fluxo principal expressa a transformação sobre as ‘roupas sujas’ até as ‘roupas limpas’, ou seja, o modelo mostra os diversos estados assumidos pela roupa.

Em princípio, o projetista deve dar uma interpretação funcional apenas, ou seja, como causas e efeitos. Entretanto, como a solução real possui portas, pode haver uma associação da disposição dos arcos direcionados presentes no diagrama, com as portas físicas do sistema. Neste caso específico, tem-se que tanto as entradas (ex. água limpa, sabão e roupas sujas) quanto às saídas (ex. roupas limpas e água suja) podem dar a idéia de que os recursos são originados ou colocados em locais diferentes, mais que uma representação de mudança de estado.

Com respeito ao fluxo principal, o projetista pode compreender que as saídas das funções parciais representam novos locais para a roupa, no entanto, sabe-se que é possível executar todas as operações sobre a roupa mantendo a mesma no mesmo local. Desta forma o modelo pode se mostrar ambíguo em relação ao fluxo de matéria, dependendo da interpretação do diagrama funcional por parte do projetista.

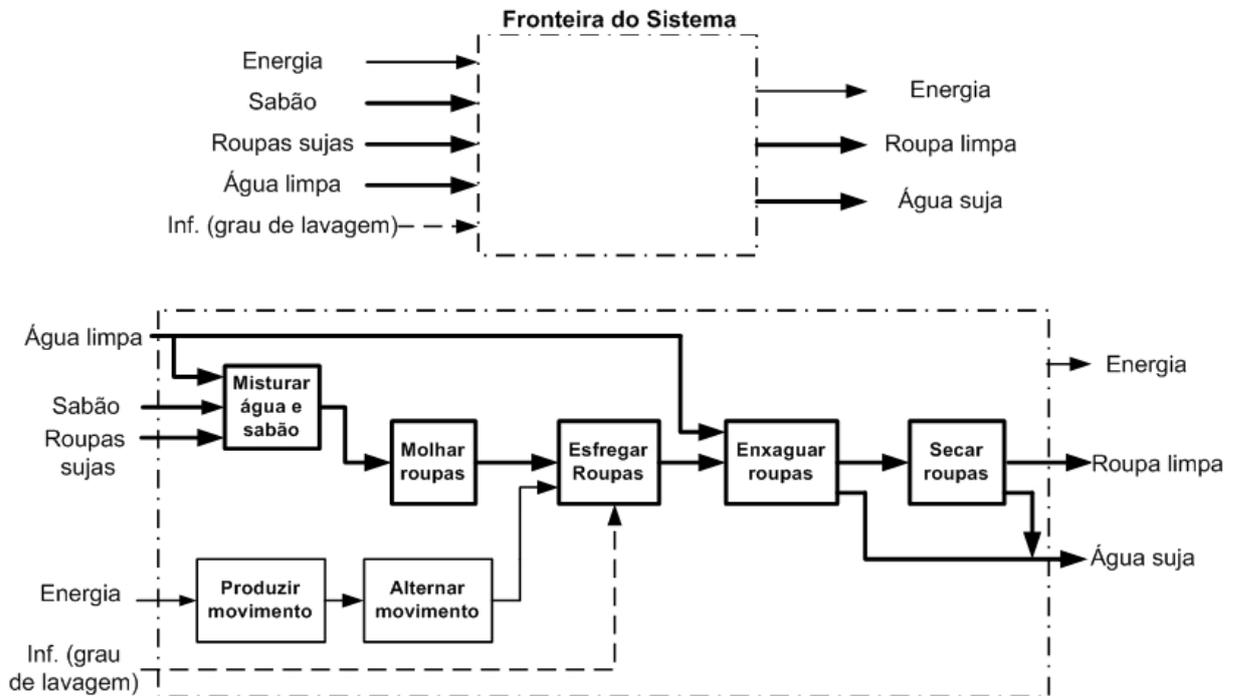


Figura 2.3. Estrutura de funções para um sistema destinado a “lavar roupas” (Forcellini, 2005).

## 2.3.2 Projeto empregando a descrição funcional segundo a VDI2860

A norma VDI 2860 (VDI, 1990) tem como objetivo a inequívoca classificação, delimitação e definição da operação e de suas funções parciais. A norma, que segue as orientações gerais estabelecidas pela escola alemã de projeto, propõe um padrão de representação por símbolos, o qual abrange um conjunto de operações básicas padronizadas para sistemas de manipulação e montagem. A norma identifica a possibilidade de descrição das tarefas através de uma seqüência de símbolos, como sendo a principal vantagem da representação simbólica.

A Figura 2.4 mostra alguns dos símbolos adotados pela norma VDI 2860 (1990) e seus significados, os quais são: 1. Manipular (símbolo básico); 2. Armazenar ordenadamente; 3. Armazenar desordenadamente; 4. Armazenar semi-ordenadamente; 5. Ramificar; 6. Unir; 7. Fixar; 8. Liberar; 9. Fixar (sem ação de força); 10. Girar; 11. Rodar; 12. Distribuir (n peças); 13. Posicionar; 14. Deslocar; 15. Selecionar; 16. Despachar em frente; 17. Guiar (mantendo a orientação da peça); 18. Testar; 19. Processar (símbolo básico); 20. Modificar forma; 21. Tratar (modificar propriedades do material); 22. Juntar (montar); 23. Modificar superfície; 24. Testar (símbolo básico).

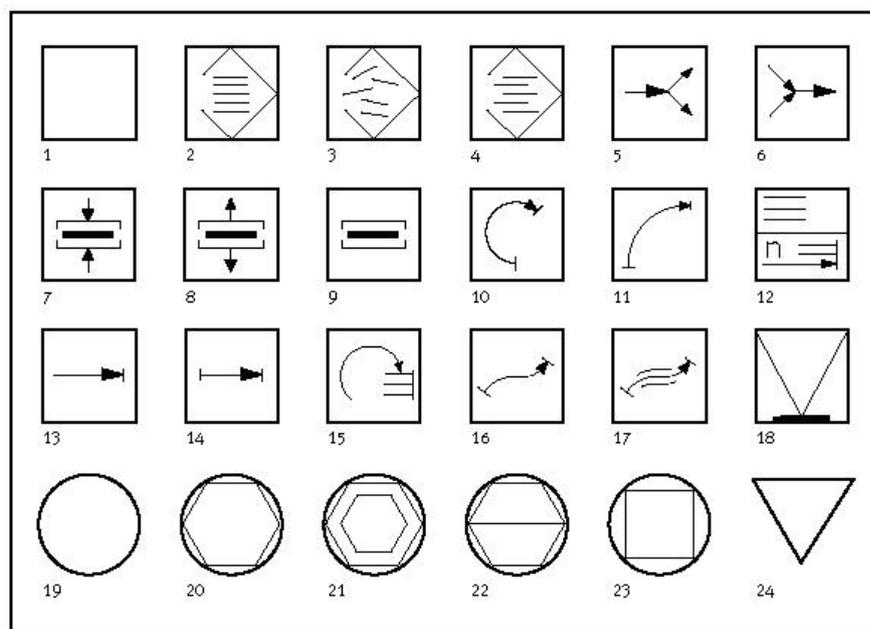


Figura 2.4. Símbolos para as funções de manipulação e montagem (VDI, 1990 *apud* Santos, 2003).

A norma VDI 2860 também apresenta regras de refinamento funcional, segundo as quais, dada uma determinada função, é possível obter uma estrutura funcional similar com funções mais elementares (de acordo com a classificação da norma). Um exemplo deste processo é apresentado na Figura 2.5 onde a função 'selecionar' é refinada em quatro outras funções, sendo que, segundo o refinamento, para realizar a função 'selecionar' é necessário que sejam executadas as quatro funções que estão na base da estrutura.

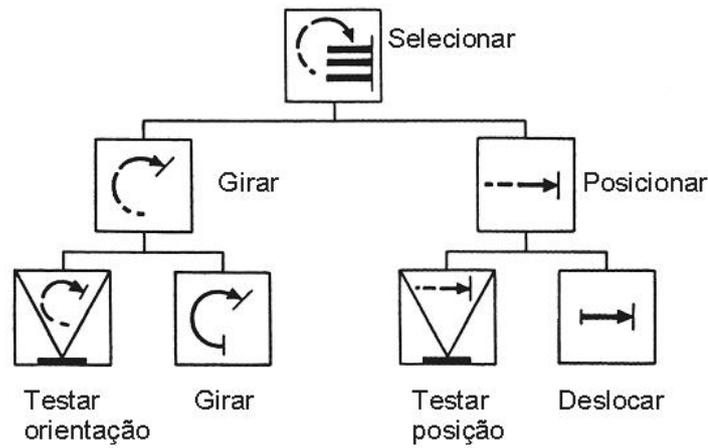
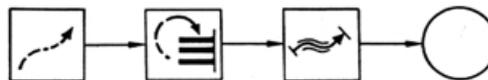


Figura 2.5. Exemplo de refinamento funcional segundo a VDI 2860 (VDI, 1990).

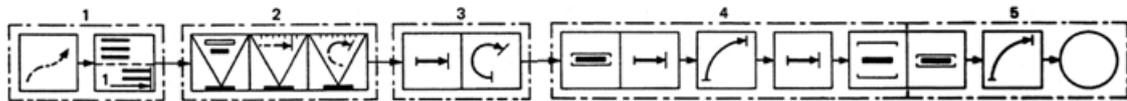
A Figura 2.6 ilustra uma descrição funcional segundo a norma citada. A partir da definição do problema, dado inicialmente através de uma estrutura funcional abstrata (com menor número de símbolos e menor detalhamento), pode-se chegar à estrutura funcional e, em seguida, ao mecanismo que atende as especificações de projeto.

**Especificação:** ordenamento e alimentação de peças

Transportar → Ordenar → Guiar → Processar



**Estrutura funcional obtida com respectivo sistema físico**



1(Transportar → Distribuir) → 2(Testa identidade → Testar posição → Testar orientação) → 3(Deslocar → Girar) → 4(Fixar → Deslocar → Rodar → Deslocar → Soltar) → 5(Fixar → Rodar → Processar)

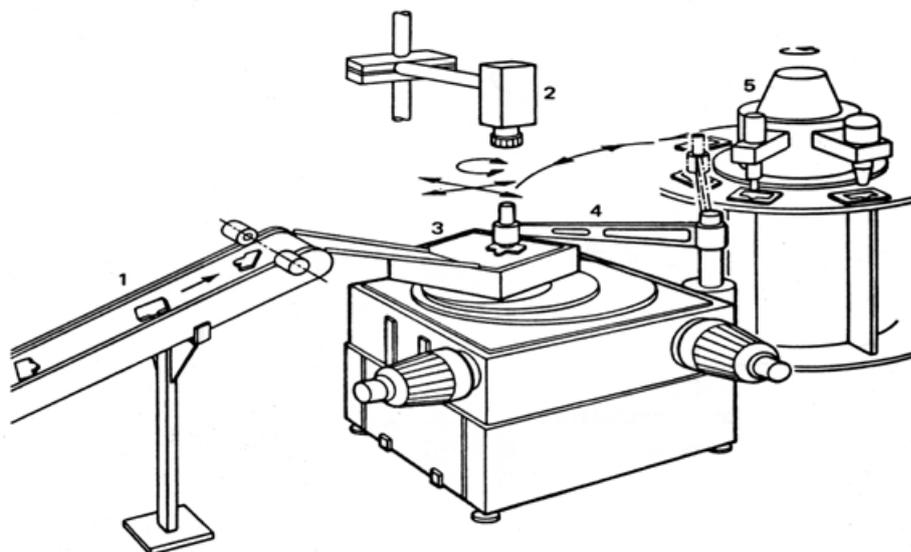


Figura 2.6. Exemplo de processo de refinamento funcional segundo a VDI 2860 (1990).

Observa-se que na estrutura funcional da Figura 2.6, os símbolos desenhados sem a seta de conexão representam operações executadas ao mesmo tempo, enquanto que a linha pontilhada representa o conjunto de funções associado a um princípio de solução<sup>2</sup>.

De acordo com a Figura 2.6 pode-se observar que a norma VDI 2860 (1990) segue as orientações gerais estabelecidas pela descrição funcional segundo a escola alemã de projeto, logo os problemas de interpretação são similares aos citados na seção 2.3.1 .

Santos (2003) cita que a utilização da norma VDI 2860 parece ser mais eficiente se apresentada em conjunto com a visão estrutural do sistema concebido, o que justifica o fato de a norma ser mais utilizada como ferramenta de análise funcional de sistemas já existentes do que para projetos de novos equipamentos.

De Negri e Santos (2007) ressaltam que mesmo que o diagrama obtido pela norma VDI 2860 (1990) inclua a interpretação relacionada à seqüência de operação, continua sendo necessário expressar este comportamento por meio de diagrama de conotação efetivamente comportamental, visando promover a implementação do controlador. A mesma necessidade é observada na descrição funcional da seção 2.3.1 .

### 2.3.3 Projeto empregando a árvore de funções e meios

Segundo Buur (1990), o modelo mais aceito para representar a lei da causalidade vertical (Tjalve, 1979) é a árvore de funções e meios, acrescentando que trata de uma importante ferramenta para síntese funcional de produtos e que a mesma pode ser aplicada a todos os sistemas técnicos, incluindo mecatrônicos.

A árvore consiste de uma estrutura hierárquica composta de níveis alternados entre funções e opções de meios para realizar tais funções, sendo possível a decomposição desta em estrutura de funções e estrutura de mecanismos (Figura 2.7).

---

<sup>2</sup> Os princípios de solução são soluções na forma de sistemas físicos que, por meio de certos comportamentos, realizam as funções do sistema técnico (Roozenburg e Eekels, 1995 *apud* Ferreira 1997).

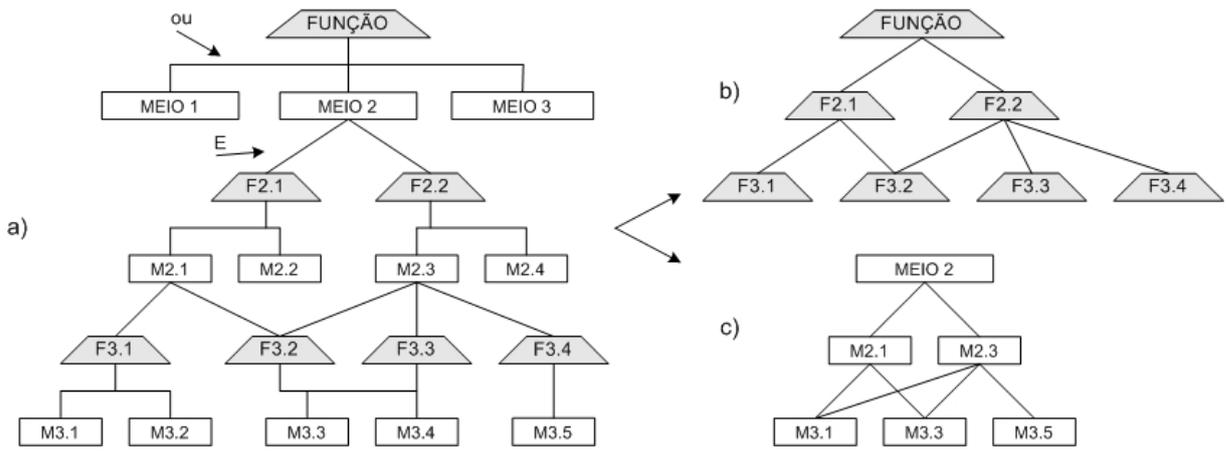


Figura 2.7. a) Árvore de funções e meios, b) Estrutura de funções e c) Estrutura de meios (Shakeri, 1998 *apud* Santos, 2003).

Hubka e Eder (1988) reforçam que a conexão entre o grau de abstração e o grau de complexidade é um aspecto importante. Segundo tais autores, o tarefa de refinar uma função em funções parciais, as quais têm um menor grau de complexidade, é somente possível e sensato quando um grau de abstração concreto for obtido, conforme pode ser observado no exemplo da Figura 2.8.

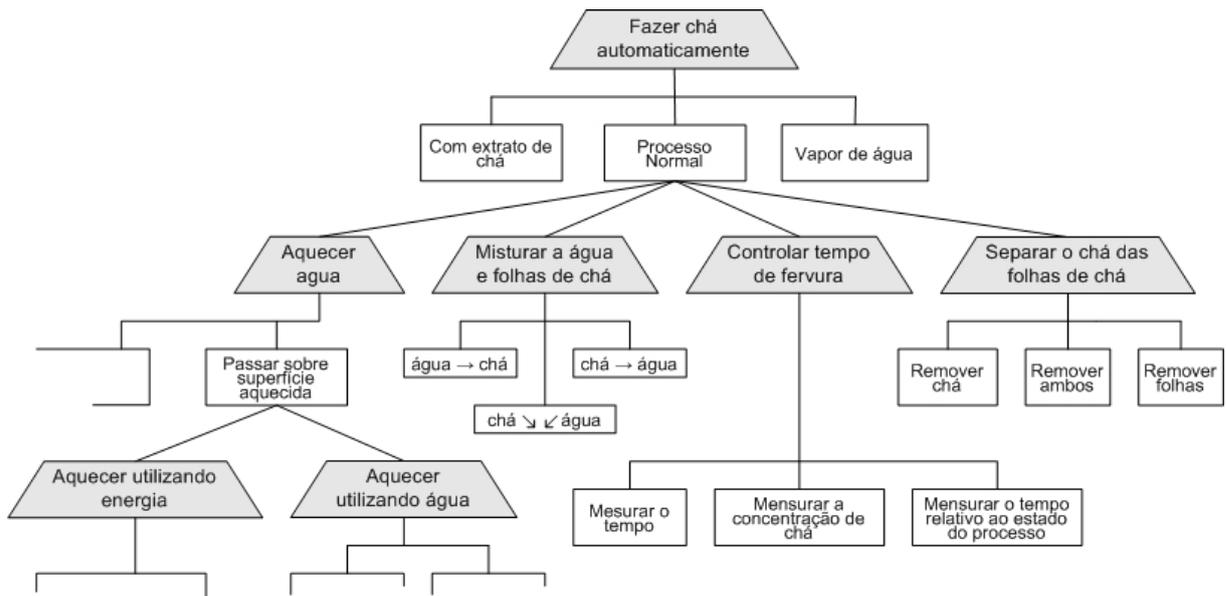


Figura 2.8. Árvore de funções e meios para uma máquina automática de fazer chá (Tjalve, 1979).

Buur (1990), seguindo a tendência de utilização de modelos suplementares para as abordagens voltadas a descrição funcional de sistemas mecatrônicos, propõe complementar a árvore de funções e meios com modelos que explicitem os estados e transições do sistema. Em outras palavras, o autor sugere a modelagem da variação da estrutura funcional, influenciada pelo estado momentâneo do sistema através de máquinas de estados finitos, justificando que um sistema mecatrônico opera em diferentes estados e que a função é dependente do estado do sistema.

Shakeri (1998 *apud* Santos, 2003), por sua vez, critica a proposta de Buur (1990) e diz que embora a utilização de diagramas de transição de estados junto com funções de transformação auxilie a descrição do comportamento lógico do sistema mecatrônico, essa abordagem é insuficiente para descrever todos os aspectos comportamentais do sistema. Logo, defende a utilização de diversos modelos, como diagramas de classes e seqüência, em complemento a árvore de funções e meios para representar as perspectivas estruturais e comportamentais do sistema.

Segundo Santos (2003) tanto na abordagem proposta por Buur (1990) quanto por Shakeri, para projeto de sistemas mecatrônicos, há um consenso em concordar com a lei da causalidade vertical formulada por Tjalve (1979) assim como no emprego de **funções propostas**. Conforme em Hubka e Eder (1988), os sistemas técnicos realizam, exercendo seus efeitos, a transformação dos operandos (matéria, energia e informação) através de processos. Dentro desta visão, uma máquina não é em si um processo técnico, ela exerce os efeitos necessários para o processo acontecer. Os efeitos criados pela máquina são definidos por Hansen e Andreasen (*apud* Chakrabarti, 2002) como funções propostas.

#### 2.3.4 Projeto empregando o modelo *SADT/IDEF0*

*Structured Analysis and Design Technique (SADT)* é uma ferramenta padrão usada em projeto de sistemas de manufatura integrada por computador, incluindo sistemas de manufatura flexível. *SADT* não precisa de nenhuma ferramenta de suporte específica, sendo que vários softwares que implementam a metodologia *SADT* têm sido desenvolvidos. Um deles, segundo Santarek e Buseif (1998), é conhecido como *Design/IDEF0* e implementa o método *IDEF0* (FIPS PUBS 183, 1993), (IDEF, 2006).

Devido ao escopo desta dissertação, dentre a família *IDEF (Integrated DEFINitions methods)*, destaca-se o método de modelagem funcional (*IDEF0*), o qual é um método de projeto, derivado da linguagem gráfica *SADT*, desenvolvido pela força aérea americana e utilizado para modelar decisões, ações e atividades de uma organização ou sistema.

Lee et al (2004) apontam que o modelo funcional *IDEF0* tem sido largamente utilizado por profissionais devido aos méritos de poder ser usado para definir primeiramente os requisitos e especificar funções e, posteriormente, projetar a implementação que atende a estes requisitos e executa estas funções. Os autores desta publicação acrescentam que o *IDEF0* também pode ser usado para analisar as funções que o sistema executa e documentar os recursos físicos para que a função seja realizada.

A representação gráfica do modelo *IDEF0* apresenta como componentes principais os blocos de função e arcos direcionados. O bloco de função modela o que acontece na função projetada. As setas carregam dados ou objetos relacionados à função a ser executada. Arcos que entram pelo lado esquerdo do bloco são entradas, estas são transformadas ou consumidas pela função para gerar as saídas, as quais por sua vez são indicadas no

lado direito do bloco. As setas que entram por cima do bloco compõem as informações de controle e indicam a condição requerida para a função produzir a saída correta. Os arcos direcionados que apontam para cima identificam os recursos físicos necessários para a execução da função (Figura 2.9 - a). Cada bloco de função é decomposto hierarquicamente até que haja detalhes suficientes para a compreensão do propósito do projetista (Figura 2.9 - b).

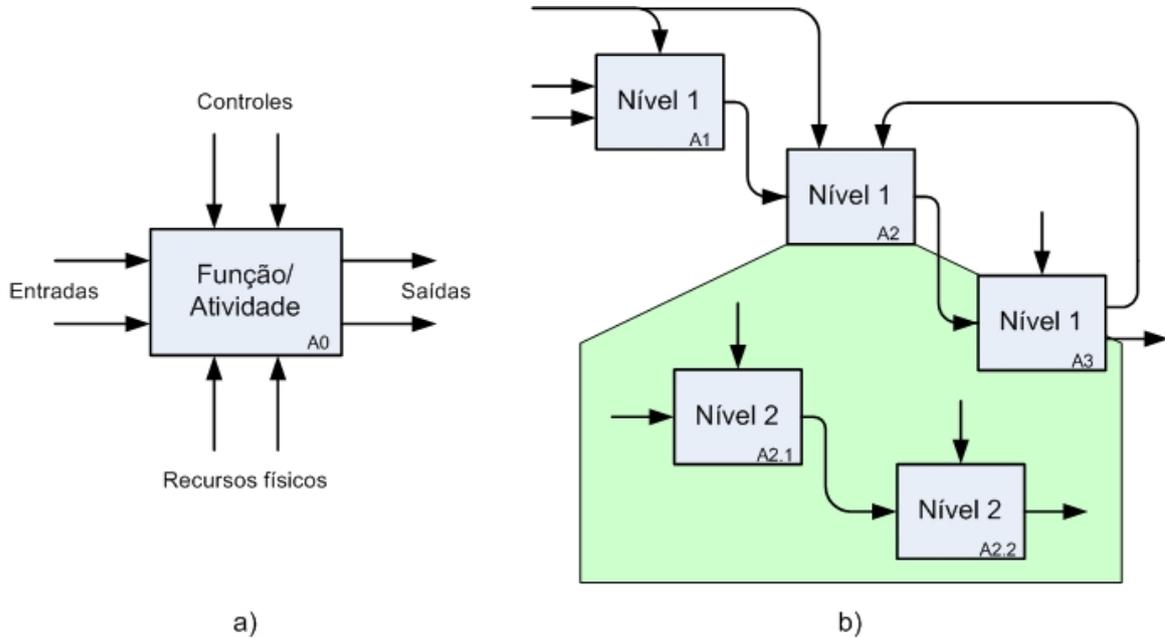
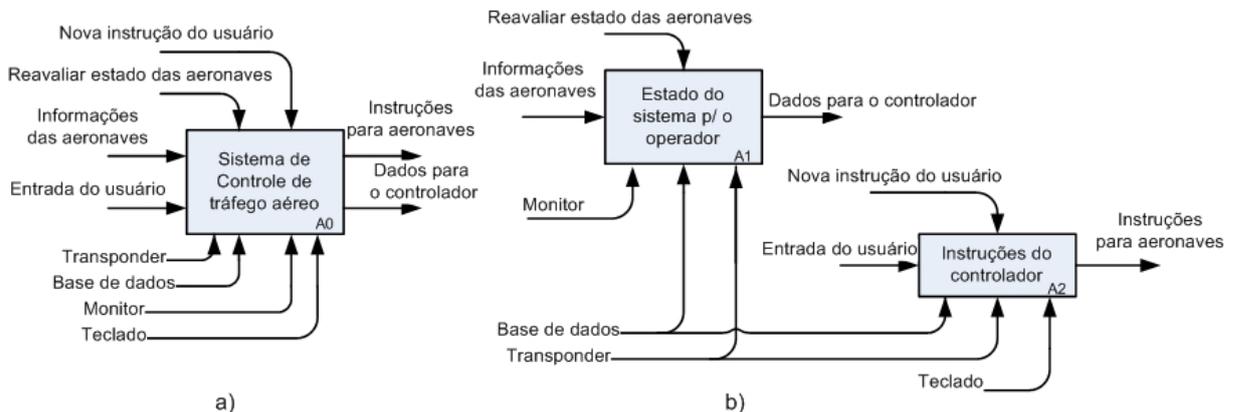


Figura 2.9. a) Visão básica dos elementos e b) Esquema de detalhamento de funções do IDEF0.

A Figura 2.10 mostra um exemplo parcial de um sistema de controle de tráfego aéreo, modelado em IDEF0. O exemplo apresenta em três níveis de refinamento, sendo que no nível mais alto (Figura 2.10 - a) o bloco de função representa a função total do sistema e contém todos os arcos direcionados que se relacionam com o ambiente externo. A Figura 2.10 - b expõe o primeiro nível de refinamento. Neste nível de refinamento pode ser observado que uma determinada sub-função não necessita de todas as entradas, sinais de controle e recursos físicos, mostrados no nível de refinamento superior. Por fim a Figura 2.10 - c modela a decomposição do bloco de função 'A2', caracterizando o terceiro nível de refinamento.



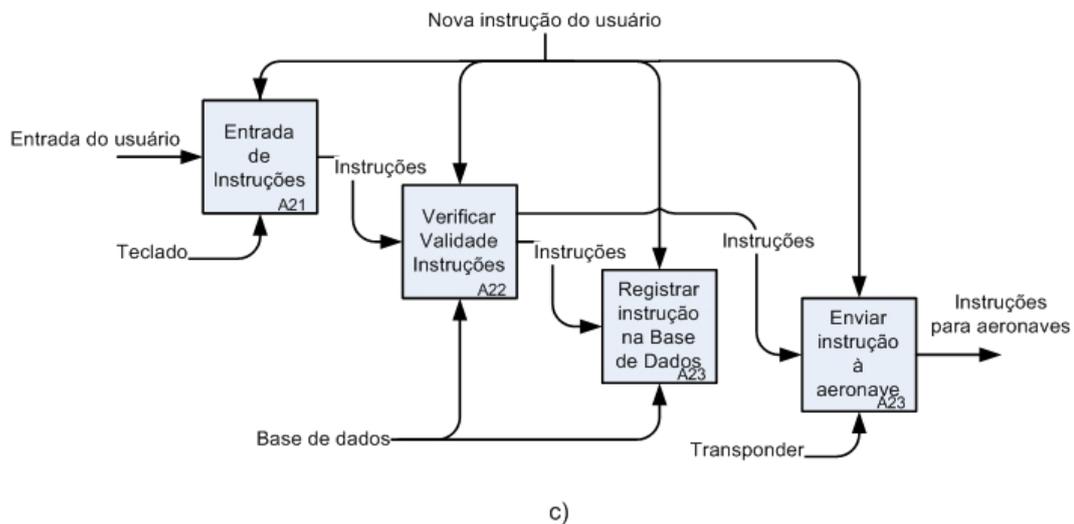


Figura 2.10. IDEF0 de um sistema de controle de tráfego aéreo.

Santarek e Buseif (1998) propõem um conjunto de regras de transformação, que possibilitam a geração automática da lógica de controle, em redes de Petri, diretamente das especificações de projeto do sistema, as quais são consideradas em alto nível e desenvolvidas com o uso da metodologia *SADT*, auxiliada pelo software *Design/IDEF0*. Ressalta-se que os procedimentos de transformação sugeridos por Santarek e Buseif (1998) são voltados para sistemas de manufatura automatizados.

Lee et al (2004) confirmam que o método de Santarek e Buseif (1998) é capaz de transformar o modelo *SADT* em redes de Petri, preservando as propriedades qualitativas do modelo, como: k-limitado, vivo e conservativo (Cardoso e Valette, 1997). No entanto, também colocam que o procedimento de transformação proposto não é definido formalmente nem considera a situação de recursos compartilhados.

A fim de incluir o compartilhamento de recursos, Lee et al (2004) propõem a construção da rede de Petri a partir dos modelos *IDEF0* e *IDEF3* (IDEF, 2006), sendo que o método *IDEF3 (Process Description Capture method)* é utilizado para expressar relações de causa-efeito entre processos.

### 2.3.5 Projeto empregando a RdP C/A

Esta seção apresenta os aspectos gerais sobre a rede de Petri canal/agência segundo o modelo utilizado atualmente, acrescentando a este a simbologia de canal oculto e a possibilidade de discriminação dos recursos. Os conceitos discutidos aqui continuam valendo para a proposta de formalização sugerida no Capítulo 3.

A rede de Petri canal/agência (RdP C/A ou simplesmente rede C/A), discutida em Reisig (1985), Heuser (1990) e De Negri (1996), é uma representação diagramática composta de dois elementos básicos: as **unidades ativas**, representadas por retângulos e as **unidades passivas**, representadas por meio de círculos, sendo estes dois elementos conectados por meio de arcos direcionados que representam o fluxo de recursos (Figura 2.11).

A simbologia para **canal oculto** (Figura 2.11) é uma das propostas desta dissertação e tem a finalidade de indicar que um determinado recurso é requerido, consumido, dissipado ou armazenado pela agência, como pode ser observado na Figura 2.13.

Elementos básicos			
Símbolo	Nome genérico	Perspectiva funcional	Perspectiva estrutural
	Unidade ativa	Atividade (função)	Agência
	Unidade passiva	Recurso	Canal
Arcos direcionados (Interconexão dos elementos)			
Símbolo	Tipo de recurso		Simbologia para canal oculto
	Fluxo de informação		 Canal de informação
	Fluxo de energia		 Canal de energia
	Fluxo de matéria		 Canal de matéria
	Fluxo de energia e matéria		 Canal de energia e matéria

Figura 2.11. Elementos básicos da rede de Petri canal/agência.

Segundo De Negri (1996), pode-se atribuir uma conotação tanto funcional quanto estrutural ao modelo criado. Segundo a perspectiva funcional, as unidades passivas correspondem a um local onde se visualiza os recursos que fluem através do sistema, ou seja, a energia, a matéria e a informação ou suas formas de manifestação, tais como eletricidade, peças, ferramentas, sinais, dados, etc. Por sua vez, as unidades ativas são designadas atividades, correspondendo às operações aplicadas sobre os recursos, tais como: bombeamento, montagem, transporte, processamento, etc.

Sob uma perspectiva estrutural, as unidades passivas são designadas canais, indicando aqueles componentes do sistema que dão suporte para que os recursos possam fluir sem causar modificação no estado destes. Como exemplos, citam-se tubulações, eixos, fios, depósitos, memórias, etc. Já os retângulos representam as agências, as quais correspondem aos “locais onde acontecem as atividades” (Heuser 1990), tais como bombas, componentes de máquinas, estações de trabalho, reatores químicos, objetos (software), entre outros.

É importante relatar que o direcionamento indicado pelos arcos que acoplam os elementos na rede C/A não tem significado sob o ponto de vista estrutural, pois neste caso eles representam a interligação existente, ou seja, o modo como o sistema é constituído. Conclui-se que segundo esta perspectiva, os arcos apenas indicam qual o componente passivo necessário para estabelecer a conexão entre os componentes ativos, entretanto funcionalmente, as setas indicam o sentido do fluxo de recursos. Nesta representação, a RdP C/A explicita a interligação física entre as máquinas ou dispositivos, como também indica os ca-

nais por onde flui a matéria, sendo uma representação semelhante ao *PFS – Production Flow Schema* (Miyagi, 1996).

Deve-se destacar que esta notação é desvinculada de qualquer área técnica, podendo ser aplicada sempre que for necessário descrever aspectos funcionais e estruturais. Heuser (1990) utiliza a RdP C/A na modelagem de banco de dados e estabelece uma equivalência com o diagrama de fluxo de dados (DFD), mostrando que a primeira é mais abstrata e independente das soluções adotadas, enquanto que o DFD impõe decisões sobre a forma de implementação do sistema em software. De forma similar, no âmbito do projeto de produtos, entende-se que é possível representar as estruturas de funções empregadas na fase de concepção por redes C/A, com a vantagem de forçar o projetista à identificação de recursos intermediários que obrigatoriamente irão existir (De Negri, 1996).

A regra fundamental para o uso desta notação é que a interconexão é somente permitida entre canais e agências, ou seja, numa rede C/A não pode haver dois canais ou duas agências diretamente ligados por meio de arcos. Conforme ilustrado na Figura 2.12 - a, um arco ligando um canal a uma agência implica que a atividade pode depender, mas não necessariamente depende do conteúdo do canal ou, em outras palavras, os recursos podem ser utilizados pela atividade. Por sua vez, um arco que liga uma agência a um canal indica que o conteúdo do canal pode ser alterado, mas não necessariamente o é, pela atividade, ou seja, o recurso pode ser produzido ou modificado pela atividade.

A interpretação do parágrafo superior é válida para qualquer configuração de rede C/A. Por exemplo, a Figura 2.12 - b mostra a possibilidade de múltiplos recursos serem consumidos e/ou produzidos por uma atividade ou múltiplas atividades consumirem ou produzirem um único recurso. Na Figura 2.12 - c é representada uma configuração particular que estabelece que a atividade usa temporariamente o recurso e libera-o novamente. Por fim, a Figura 2.12 - d mostra a interação entre fluxo de matéria (sentido horizontal) e fluxo de energia (sentido vertical), como no caso de uma peça que sofre uma transformação mecânica.

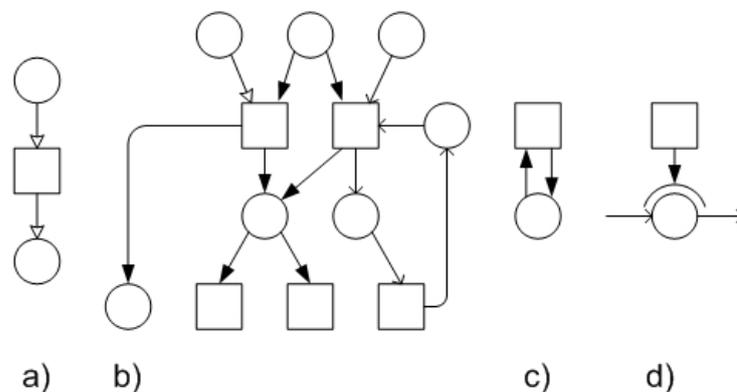


Figura 2.12. Exemplos de configurações da rede C/A (De Negri e Santos, 2007).

Nas redes C/As apresentadas na Figura 2.12 os arcos direcionados diferenciam os recursos que os percorrem, somente entre os três níveis básicos (informação, energia ou matéria), conforme a proposta de De Negri (1996). Nesta dissertação se insere uma possibilidade opcional de diferenciação de recursos, a qual consiste em acrescentar ao arco o “nome” do recurso que está sendo representado, possibilitando a discriminação de recursos da mesma classe. Pode-se, por exemplo, diferenciar dois recursos da classe matéria, fazendo “peça 1” e “peça 2”. Este artifício também tem como objetivo dar mais rigor ao processo de análise (Ver Capítulo 4).

Outra proposta quanto à modelagem em rede C/A é a utilização de um símbolo que indique a presença de um canal oculto (Figura 2.13). O canal oculto representa a existência de um canal cujo recurso, seja energia, informação ou matéria, é requerido, consumido, dissipado ou armazenado pela agência. Em outras palavras, a notação de canal oculto deve ser utilizada quando se deseja indicar que para um determinado recurso que percorre uma agência, somente é interessante a modelagem e consideração do canal de entrada, de modo que, para fins de projeto, o canal de saída é dispensável.

Outra justificativa é que segundo a proposta descrita no Capítulo 4, a análise deve ser realizada com base nos canais de suprimento e/ou consumo, sendo que uma agência limite (onde um determinado recurso entra e **não** sai ou vice-versa) é considerada como pertencente ao ambiente externo. Com a simbologia de canal oculto, garante-se que a agência pertence ao sistema sem poluir visualmente o modelo com mais um canal, que sob o ponto de vista de projeto, não é interessante.

O símbolo deve ser colocado dentro da agência e em contato com o arco incidente, ao qual se deseja indicar que o fluxo de recurso é requerido, consumido, dissipado ou armazenado pela agência (Figura 2.13).

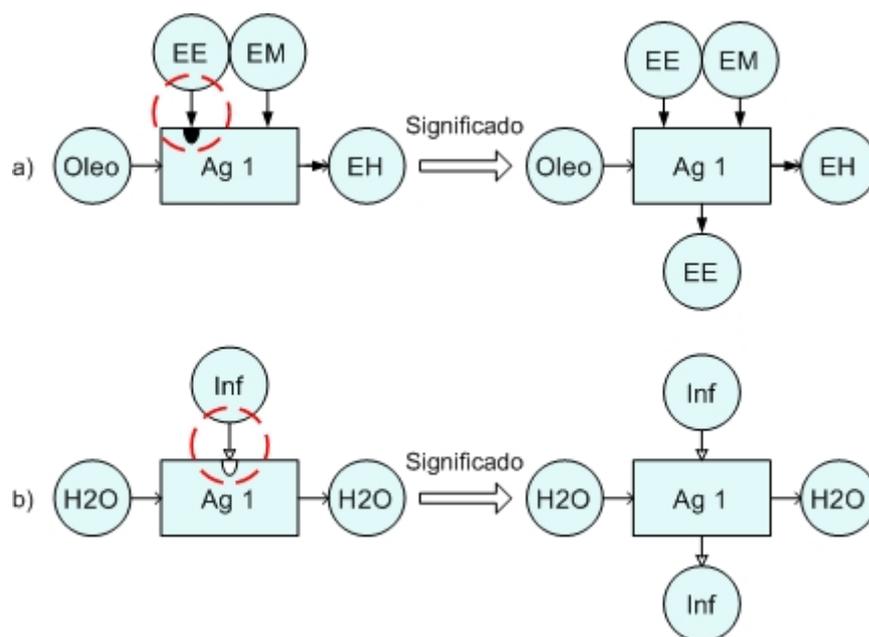


Figura 2.13. Proposta de simbologia para indicação de canal oculto.

Na Figura 2.13 – a, entende-se que no sistema a energia utilizada para conversão de ‘Oleo’ em energia hidráulica ‘EH’ é a energia mecânica ‘EM’, ou seja, a energia elétrica representada pelo canal ‘EE’ é de certa forma consumida e dissipada pela agência ‘Ag1’ como, por exemplo, utilizada para a alimentação de um circuito eletrônico. Na Figura 2.13 – b o canal de informação ‘Inf’ é requerido pela agência ‘Ag1’, possivelmente com a finalidade de controle.

O refinamento de um canal ou agência consiste no detalhamento destes, identificando-se novos canais e agências internas (Figura 2.14). Em direção oposta, canais e agências podem ser agrupados formando elementos condensados. A regra básica de só haver interligação entre canais e agências deve ser mantida, o que implica que a rede refinada ou condensada deverá resultar também numa rede. Ou seja, ao se refinar um canal, os elementos limítrofes da rede refinada também devem ser canais e, da mesma forma, os elementos limítrofes identificados no refinamento de uma agência também devem ser agências. Conclui-se assim que os arcos na rede condensada devem representar todas as direções dos arcos da rede refinada (De Negri, 1996). Ver também seção 4.2 .

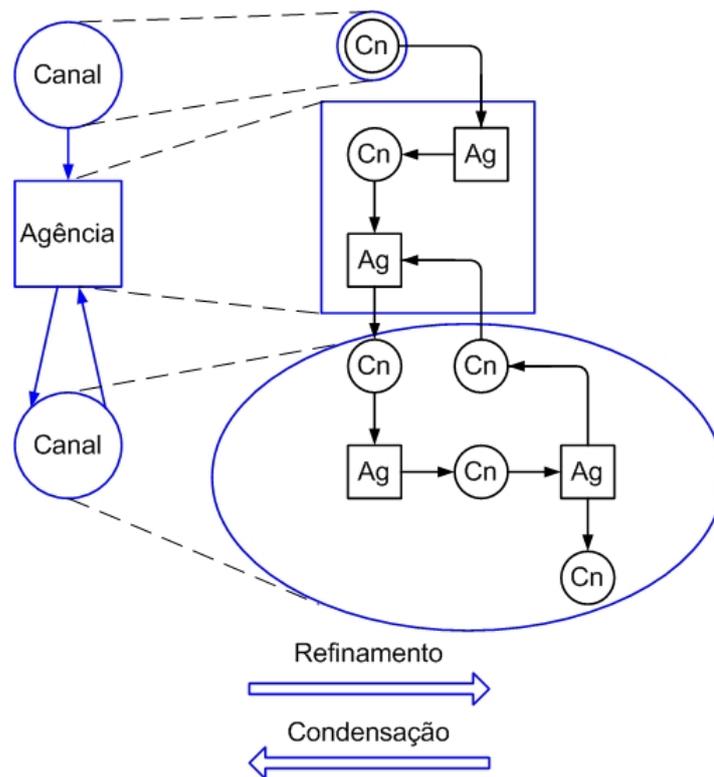


Figura 2.14. Mecanismo de refinamento e condensação de RdP C/A (De Negri, 1996).

De Negri (1996), principal defensor da utilização da rede C/A, ressalta que durante a fase de projeto, principalmente de sistemas automáticos, é necessária a comunicação entre especialistas de diferentes áreas e também a inter-relação das informações contidas em diferentes modelos, como diagrama de circuitos elétricos, desenhos técnicos, diagramas de fluxo de dados, etc. Sugere então a estruturação da descrição funcional do sistema em pro-

jeto em torno de um modelo central, o qual tem como objetivo armazenar as informações principais contidas nos diferentes modelos e também coordenar o uso e atualização destes.

De Negri (1996) utiliza como modelo central a RdP C/A, que é criada na fase de concepção para capturar os requisitos funcionais e, à medida que o projeto evolui, é refinada progressivamente assumindo uma perspectiva estrutural. Podem ser criados modelos funcionais e estruturais próprios a cada solução técnica escolhida e relaciona-los diretamente à rede C/A, como diagrama de circuitos e desenhos técnicos. Os aspectos comportamentais são modelados por meios apropriados como funções de transferência e diagrama de estados, mas devem estar vinculados a uma agência da RdP C/A.

De maneira geral, o uso da rede C/A como modelo central de descrição funcional, conforme proposto por De Negri (1996), decorre dos seguintes aspectos:

- Emprega elementos fundamentais (recursos e atividades ou canais e agências), possibilitando a descrição dual de perspectiva funcional e estrutural;
- Destaca os recursos energéticos, materiais e de informação (através dos canais), cujos atributos são a real necessidade de criarem-se sistemas técnicos;
- É totalmente dissociado de soluções de implementação ou fabricação;
- É uma versão mais básica do diagrama de fluxos de dados (DFD), utilizado na engenharia de software;
- Apesar de estar num nível bastante abstrato pode, por meio de refinamentos utilizando a mesma notação, dar origem a representações mais concretas, equivalendo-se à estrutura que será construída;
- Os canais e agências (elementos ativos e passivos) possibilitam a documentação de todos os componentes como válvulas, motores, objetos em programas assim como suas interligações (tubulações, eixos, fios, mensagens etc.).

Santos (2003) apóia a utilização da RdP C/A na fase de projeto conceitual e procura abordar a execução simultânea dos projetos da parte física e do controle de forma a obter uma concepção do novo sistema de maneira integrada. Para tanto, Santos (2003) apresenta uma proposta de descrição funcional, estrutural e comportamental utilizando rede C/A (De Negri, 1996) e modelos de sistemas a eventos discretos (SEDs) baseado em autômatos. Desta forma, o autor inseriu na atividade de projeto ferramentas formais de modelagem e síntese de controladores (Ramadge e Wonham, 1989), (Queiroz e Cury, 2002). Nesta mesma linha de atuação, Souto (2005) utiliza a metodologia proposta por Santos (2003) e estende os estudos realizados por Queiroz e Cury (2002) no sentido de comportar a comunicação com o ambiente externo.

De forma similar, Miyagi (1996) e Villani (2000) também sugerem métodos de se chegar ao controlador do sistema a partir de um modelo funcional, que neste caso é chamado de *PFS* e é similar a rede C/A. No entanto, diferentemente de Santos (2003), optam por modelos comportamentais baseados em rede de Petri, fato este que em conjunto com a

equivalência entre o *PFS* e a *RdP C/A*, permite supor que já exista uma técnica para se chegar à um controlador em redes de Petri, a partir da rede *C/A*.

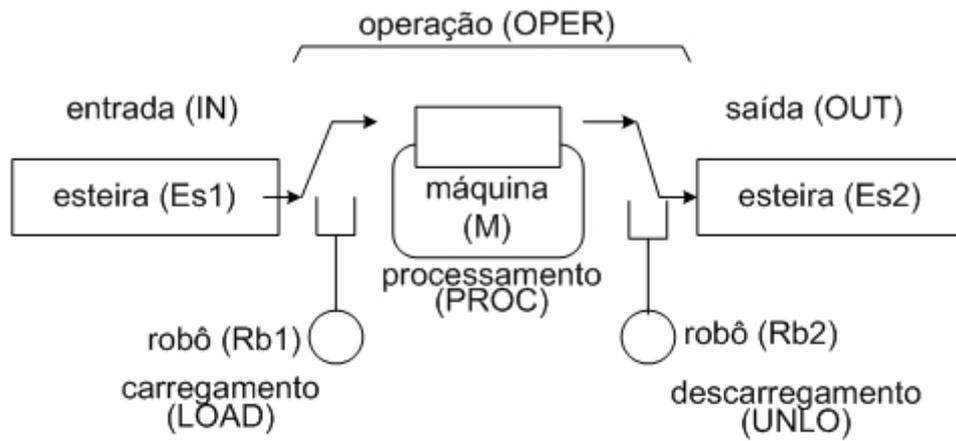
### 2.3.6 Projeto empregando o método *PFS/MFG*

Este método destina-se ao projeto do sistema de controle, em especial de sistemas de manufatura automatizados. Para alcançar o controlador, Miyagi (1996) faz uso de dois modelos gráficos: *Production Flow Schema (PFS)* e *Mark Flow Graph (MFG)*; os quais são baseados em redes de Petri. Segundo o autor, a representação do fluxo de controle por redes de Petri é recomendada, pois além da possibilidade de representação de processamentos paralelos, concorrentes e assíncronos, também existem versões de redes de Petri (*SFC*) que atualmente já são utilizadas como linguagem de programação de CLPs.

Primeiramente, um modelo conceitual é obtido usando a técnica de modelagem '*Production Flow Schema*' introduzida por Miyagi (1996), o qual é destinado a realizar a descrição funcional do sistema. Após, o *PFS* é refinado sucessivamente até chegar ao grafo denominado *MFG* que, por sua vez pode ser definido como uma rede de Petri Condição-Evento e modela a seqüência das operações e as conexões lógicas entre estas, ou seja, é a representação estruturada das funções de controle. Por fim, refinando-se o *MFG* se obtém a representação da linguagem do controlador.

Ressalta-se que o *MFG* é um modelo comportamental. Desta forma, assim como no caso das redes de Petri ordinárias (seção 2.4 ), o formalismo do modelo não se aplica às redes *C/A* ou *PFS*, pois estes últimos são modelos funcionais.

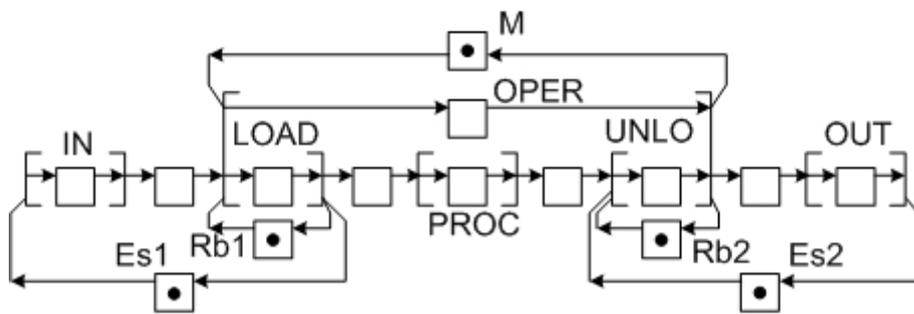
A Figura 2.15 mostra a abordagem *PFS/MFG* sugerida por Miyagi (1996), a qual expõe que a partir do modelo funcional da planta se gera o modelo funcional do sistema de controle, que por sua vez dá origem ao programa de controle (obtido nas etapas subseqüentes).



a) Exemplo de um sistema produtivo



b) PFS do sistema produtivo



c) MFG do sistema produtivo

Figura 2.15. Metodologia PFS/MFG para o projeto de controladores de SEDs (Miyagi, 1996).

Villani (2000) propõe a utilização dos conceitos introduzidos por Miyagi (1996) para sistemas híbridos, já que até então sua aplicação era restrita a sistemas a eventos discretos. Neste caso, diferentemente do PFS original, os arcos podem indicar fluxos de materiais tanto discretos como contínuos. O modelo gerado a partir do PFS continua sendo em redes de Petri, entretanto baseado em redes de Petri Lugar-Transição ao invés de Condição-Evento. De acordo com a proposta, a parte discreta é modelada usando redes de Petri Lugar-Transição e a parte contínua é modelada usando sistemas de equações diferenciais. A interface entre as duas é realizada pelas redes de Petri Predicado Transição Diferenciais (Villani e Miyagi, 2004).

Em defesa da utilização de um modelo funcional como PFS, Villani (2000) cita que o modelo além de proporcionar uma visão geral do processamento de materiais no sistema, esta modelagem é particularmente importante na medida em que evidencia possíveis dependências entre as entradas e saídas das diversas etapas de um processo, correspondentes às atividades do PFS.

De Negri e Santos (2007) reconhecem que o modelo *PFS* é equivalente à RdP C/A e, portanto, não apresenta o comportamento dinâmico de um sistema, visto que, distintamente das redes de Petri (*MFG*), não existe o conceito de marcação.

Apesar da equivalência entre os modelos RdP C/A e *PFS*, a metodologia utilizada para obter o controlador é diferente. De Negri e Santos (2007) esclarecem que enquanto na metodologia *PFS/MFG* o controlador é alcançado na forma de rede de Petri marcada, a metodologia apresentada na seção 3.2 prevê a síntese informal utilizando ‘*Sequential Flow Chart*’ e, mais recentemente em Santos (2003) e Souto (2005), a síntese formal através da Teoria de Controle Supervisório Modular Local (Queiroz e Cury, 2002).

A fim de exemplificar a equivalência entre a rede C/A e o *PFS*, a Figura 2.16 – a expõe parte de um processo de produção. Neste exemplo, o açúcar resultante de outro processo é enviado a um reservatório de açúcar, de onde segue para o secador, transportado através de esteiras. Do secador o açúcar é enviado ao empacotamento, onde é armazenado em sacos (Villani, 2004).

A Figura 2.16 – b expõe a modelagem em *PFS* e a Figura 2.16 – c a rede C/A equivalente, ambos relacionados ao exemplo da Figura 2.16 – a. Percebe-se que os dois modelos são praticamente idênticos, sendo que, os círculos no *PFS* se equivalem aos canais da rede C/A e os colchetes, por sua vez, às agências.

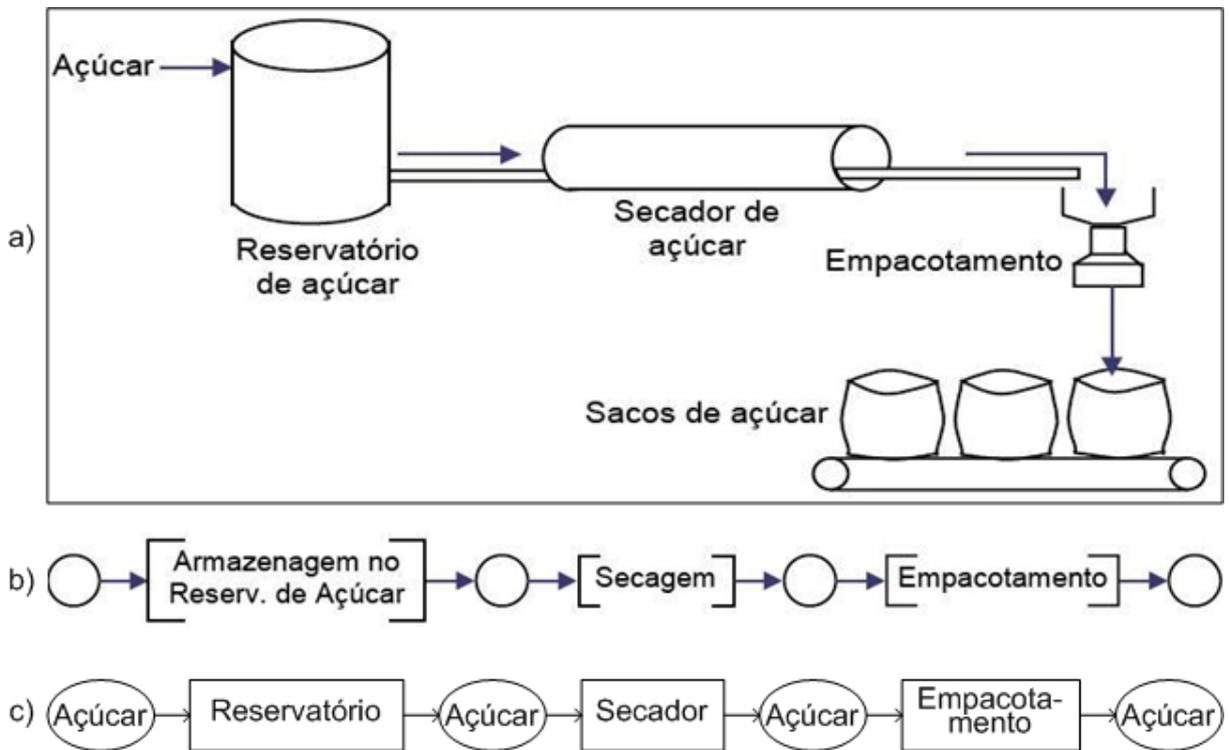


Figura 2.16. Secagem e empacotamento de açúcar. a) esquema, b) *PFS*. (Villani, 2004) e c) rede C/A equivalente.

## 2.4 Redes de Petri

Esta seção é destinada a introduzir conceitos técnicos que são utilizados em redes de Petri, visto que a rede C/A é uma ramificação deste tipo de rede.

Primeiramente, alguns conceitos sobre a teoria de grafos se fazem necessários. As definições abaixo são baseadas em Cardoso e Valette (1997) e Rosen (2003).

- **Grafo:** Um grafo ou grafo não ordenado  $G = (V, E)$  consiste em um conjunto  $V$  de vértices (ou nós) e um conjunto  $E$  de arcos, tal que cada arco  $e \in E$  é associado com um par não ordenado de nós;
- **Grafo direcionado:** Um grafo direcionado  $G = (V, E)$  consiste em um conjunto  $V$  de vértices (ou nós) e um conjunto  $E$  de arcos, de modo que cada arco  $e \in E$  é associado com um par ordenado de nós;
- **Grafo bipartido:** Um grafo é chamado de bipartido se o conjunto de vértices  $V$  puder ser dividido em dois conjuntos distintos  $V_1$  e  $V_2$ , de modo que todo arco pertencente ao grafo deve conectar um vértice em  $V_1$  e outro em  $V_2$ ;
- **Arco incidente:** Um arco (direcionado ou não) associado com um par de nós  $v$  e  $w$  é dito incidente em  $v$  e  $w$  e os nós são ditos adjacentes;
- **Arcos paralelos:** Os arcos são ditos paralelos se estão associados com os mesmos pares de vértices;
- **Vértice isolado:** Um vértice é dito isolado quando não existe nenhum arco incidente.

A rede de Petri é uma ferramenta gráfica e matemática, que se adapta bem a um grande número de aplicações em que as noções de eventos e de evoluções simultâneas são importantes. O modelo foi proposto por Carl Adam Petri (1961 *apud* Heuser, 1990), para modelar a comunicação entre autômatos, utilizados na época para representar sistemas a eventos discretos (SEDs). Desde então as redes de Petri vêm sendo utilizadas como objeto de estudo por vários autores, apresentando modificações a fim de atender a áreas distintas (Peterson, 1981), (Reisig, 1985), (Heuser, 1990), (De Negri, 1996), (Jensen, 1996), (Miyagi, 1996), (Cardoso e Valette, 1997), (Santarek e Buseif, 1997), (Villani, 2000) e (Lee et al, 2004).

Cardoso e Valette (1997) enumeram como sendo três os elementos básicos que permitem a definição de uma rede de Petri e acrescentam que os mesmos são polivalentes e podem ser interpretados livremente. Estes elementos são os seguintes:

- **Lugar:** é representado por um círculo e pode ser interpretado como uma condição, um estado parcial, uma espera, um procedimento, um conjunto de recursos, um estoque, uma posição geográfica num sistema de transporte, etc.

De modo geral, os lugares representam o estado do sistema e são considerados como elementos passivos;

- **Transição:** representada por uma barra ou retângulo é associada a um evento<sup>3</sup> que ocorre no sistema, como por exemplo, o acionamento de um botão, a detecção de que a temperatura foi alcançada e a detecção de presença de peças no magazine. Em geral representam elementos ativos;
- **Ficha:** representada por um ponto num lugar é um indicador de que a condição associada ao lugar é verificada. A Ficha pode representar um objeto (recurso ou peça) numa certa posição geográfica (num determinado estado), ou ainda uma estrutura de dados que se manipula. Por exemplo, se em lugar com o significado de “peças em espera” houvesse três fichas, indicaria que existem três peças em espera.

As fichas são as principais responsáveis pela perspectiva comportamental associada à rede de Petri, de forma que o estado do sistema é caracterizado pela repartição de fichas nos lugares da rede. Cada lugar de uma rede de Petri define uma marca, que pode ou não estar marcado, o que é representado graficamente pela presença ou ausência de uma ficha (•) no lugar. O conjunto de todos os lugares marcados de uma rede recebe a denominação de marcação da rede. A intenção é que cada marca modele um estado local do sistema, servindo como uma marcação da rede, de forma a modelar o estado global (Heuser, 1990).

A estrutura de uma rede de Petri ordinária, ou seja, desconsiderando a marcação, pode ser definida formalmente como uma quádrupla<sup>4</sup> (Peterson, 1981) e (Santarek e Buseif, 1997):

$$R = (P, T, I, O) \quad (2.1)$$

onde,

$P$  é o conjunto finito e não vazio de lugares, com dimensão  $n$ ;

$T$  é o conjunto finito e não vazio de transições, com dimensão  $m$ ;

$I : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$  é uma função que define a aplicação de entrada (lugares precedentes ou incidência anterior), com  $\mathbb{N}$  sendo o conjunto dos números naturais;

$O : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$  é uma função que define a aplicação de saída (lugares seguintes ou incidência posterior).

---

<sup>3</sup> Os eventos correspondem a sinais decorrentes do término de uma tarefa ou à mudança do estado de um dispositivo, caracterizando-se por serem abruptos e instantâneos (De Negri, 2004).

<sup>4</sup> Os conceitos matemáticos utilizados estão de acordo com a tabela de símbolos, apresentada no apêndice A.

A nomenclatura utilizada na definição da rede de Petri pode variar, no entanto a essência continua a mesma. Cardoso e Valette (1997) chamam  $I$  de  $Pre$  e  $O$  de  $Post$ . Já Zuberek e Bluemke (1996), e de certa forma Jensen (1996), substituem  $I$  e  $O$  por  $A$  e definem como sendo o conjunto de arcos direcionados, os quais conectam lugares a transições e transições a lugares, de forma que  $A \subseteq P \times T \cup T \times P$ .

A matriz de incidência anterior  $I_{n \times m}$  é obtida a partir dos elementos  $a_{ij} = I(p_i, t_j)$ , os quais indicam o peso do arco que liga o lugar de entrada  $p_i$  à transição  $t_j$ , de forma que o número de linhas é igual ao número de lugares e o número de colunas igual ao de transições. Da mesma forma a matriz de incidência posterior  $O_{n \times m}$  é obtida dos elementos  $b_{ij} = O(p_i, t_j)$ . Caso a rede seja binária o peso dos arcos só pode ser zero ou um (Figura 2.17).

A Figura 2.17 expõe uma rede de Petri não marcada e tem como objetivo principal exemplificar a construção das matrizes  $I$  e  $O$ , além de mostrar que estas podem ser formuladas independentemente da marcação da rede.

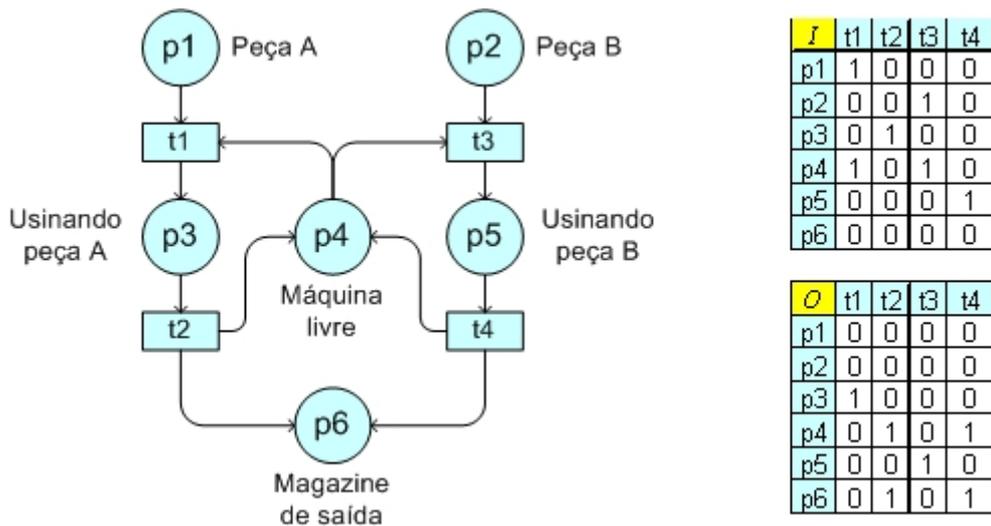


Figura 2.17. Exemplo de modelagem em rede de Petri.

Para a formalização da rede C/A, esta dissertação propõe uma técnica análoga à exposta para a rede de Petri ordinária não marcada, fazendo  $K_{pre}$  com o mesmo sentido de  $I$  e  $K_{post}$  igual a  $O$ , além de considerar  $C$  e  $A$  semelhantes, respectivamente, à definição de  $P$  e  $T$  (conforme pode ser visto no Capítulo 3). Desta forma, será formalizada apenas a estrutura da rede C/A, já que devido às características funcionais e estruturais associadas ao modelo, a mesma não apresenta marcação.

Uma rede de Petri marcada pode ser formalizada por uma 5-upla:  $R = (P, T, I, O, m)$ , com  $m$  sendo a marcação inicial. A marcação  $m$  representa a distribuição das fichas nos

lugares, sendo representada por um vetor coluna cuja dimensão é igual ao número de lugares da rede ( $n$ ).

Para o caso de uma rede marcada binária, uma transição  $t$  estaria sensibilizada por uma marcação  $m$  se todos os lugares de entrada de  $t$  tivessem pelo menos uma ficha indicada por  $m$  (todas as transições sensibilizadas por uma determinada marcação  $m$  podem ser disparadas). Quando uma transição é disparada, uma ficha é removida (simultaneamente) de cada lugar de entrada e uma ficha é adicionada a cada lugar de saída. Este processo determina uma nova marcação em uma rede e, por consequência, um novo conjunto de transições sensibilizadas. Para o caso de uma rede não binária, uma transição  $t$  estaria sensibilizada por uma marcação  $m$  se todos os lugares de entrada de  $t$  tivessem pelo menos o número de fichas igual ao peso do arco que liga o lugar à transição. No exemplo da Figura 2.17, a transição  $t_1$  estaria sensibilizada se houvesse uma ficha em  $p_1$  e outra em  $p_4$ .

As redes de Petri ordinárias apresentam métodos de análise que permitem obter as propriedades do modelo, sendo algumas dependentes da marcação inicial e outras não. Os métodos que analisam a rede com base na marcação inicial, destinam-se à obtenção das *boas propriedades* da rede, como: vivacidade, limitabilidade e reiniciabilidade. As propriedades relativas às redes de Petri ordinárias não marcadas (independem da marcação inicial) são derivadas diretamente da estrutura da rede e são definidas através dos componentes conservativos de lugar e dos componentes repetitivos estacionários. Com a associação do resultado da análise das propriedades estruturais com a marcação da rede, torna-se possível à obtenção de algumas informações adicionais sobre o comportamento dinâmico da rede de Petri (Cardoso e Valette, 1997).

Entre as aplicações de redes de Petri e suas ramificações, destaca-se o controle de sistemas de fabricação automatizada, cuja aplicação de redes de Petri efetuou-se sob a forma de *SFC* (*Sequential Function Charts*), segundo as normas IEC (1988, 1993), utilizado principalmente como modelo para a programação de controladores lógicos programáveis (CLPs).

Miyagi (1996) utiliza a técnica *PFS/MFG* para modelar sistemas, sendo que tanto o modelo *PFS*, quanto o *MFG* são variantes da rede de Petri. Entretanto, o primeiro não apresenta marcação e tem a finalidade de modelar o sistema sob uma perspectiva funcional, enquanto que o segundo é um modelo marcado e é usado para modelar o comportamento do sistema.

De maneira similar ao *PFS*, a rede *C/A* também é uma ramificação da rede de Petri, não apresenta marcação e está sendo utilizada por alguns autores como modelo funcional e estrutural (De Negri, 1996), (Santos, 2003) e (Souto, 2005). Até o momento, ao contrário das redes de Petri ordinárias e assim como todos os modelos funcionais expostos neste capítulo, é utilizada como um modelo sem um formalismo matemático auxiliar. O que se pretende

nesta dissertação é formalizar a rede C/A com a finalidade de possibilitar o desenvolvimento de técnicas de verificação da coerência do modelo (Capítulo 3 e 4).

Entre outras aplicações da rede de Petri, pode-se citar a avaliação de desempenho, análise e verificação formal em sistemas discretos, protocolos de comunicação, concepção de software em tempo real e/ou distribuído, sistemas de informação, sistemas de transporte e logística, gerenciamento de base de dados, interface homem-máquina e multimídia (Cardoso e Valette, 1997).

## **CAPÍTULO 3**

### **MODELO FORMAL PARA A REDE DE PETRI CANAL/AGÊNCIA**

Previamente à apresentação do formalismo propriamente dito, descreve-se a estrutura geral de um sistema automático, tendo por base que esta é a característica da maioria dos equipamentos industriais utilizados atualmente. A rede C/A que representa a estrutura geral de um sistema automático (Figura 3.1) é praticamente a mesma proposta por De Negri (1996), exceto pela inclusão da comunicação com o ambiente externo (Souto, 2005) e pequenas alterações na modelagem dos sistemas de atuação e de medição. As mudanças foram incorporadas ao modelo a fim de que o mesmo esteja de acordo com a formalização da RdP C/A.

Seguindo, contextualiza-se a inserção da rede C/A formal em uma metodologia de projeto, com o objetivo de esclarecer a aplicabilidade da rede para o projeto de novos equipamentos industriais, em especial aqueles que apresentam uma estrutura equivalente a de um sistema automático. A metodologia adotada para incorporar os conceitos sugeridos por esta dissertação é fruto dos resultados de pesquisa obtidos por De Negri (1996) e, recentemente, por Santos (2003).

A exposição do formalismo matemático proposto para a estrutura da rede de Petri canal/agência, começa a ser descrito a partir da seção 3.3, sendo que nesta é explicada a formalização de uma rede C/A por uma n-úpla e na seguinte (seção 3.4), formaliza-se as redes C/A hierárquicas por triplas.

#### **3.1 Estrutura geral de um sistema automático**

Como já mencionado previamente, a explicação para uma descrição mais detalhada da estrutura de sistemas automáticos é justificada pelo fato de que grande parte dos equipamentos industriais utilizados atualmente apresentam características de sistemas automáticos. Por exemplo, o fato de possuírem no mínimo uma função de controle, seja a estado discreto ou contínuo, que atua integrada ao processo físico. Outra justificativa é a necessidade de incorporação ao modelo de algumas alterações propostas para os sistemas de atuação e de medição, mudanças estas que são consequência da visão formal proposta para a rede C/A (Figura 3.1).

O modelo apresentado na Figura 3.1 prevê a existência de uma entidade que trata do processamento de matéria e energia (Sistema Energia/Matéria (ene/mat)) e outra que trata do processamento de informação (Sistema de informação).

O 'sistema ene/mat' é caracterizado pelas máquinas, dispositivos e equipamentos que transformam ou processam energia e/ou matéria. Por sua vez, o 'sistema de informação' sintetiza os equipamentos que processam sinais e dados, por exemplo, computadores,

válvulas de processamento de sinais (válvulas ‘E’ e ‘OU’), controladores lógicos programáveis (CLPs), entre outros.

A comunicação entre estas entidades é realizada através de canais de fluxo de informações, os quais fazem parte dos ‘Sistemas de atuação e de medição’ que, por sua vez, são compostos pelos ‘Controladores Operacionais’ e ‘Sensores e Atuadores’.

A Figura 3.1 expõe que além da troca de informações entre o ‘sistema de informação’ e o ‘sistema Ene/mat’, há também o recebimento e fornecimento de energia, matéria e informação ao ambiente externo. Especificamente para informação, é modelada a proposta de Souto (2005) para a comunicação entre o ‘ambiente externo’ e o ‘sistema de informação’ (Interfaces Físicas e Lógicas), a qual conceitualmente se realiza na forma de comandos (Sistema de Pedidos) e que dependendo da condição do sistema podem ou não ser realizados. O pedido eventualmente está associado a uma resposta (Sistema de Respostas), indicando a possibilidade de acolhimento do comando.

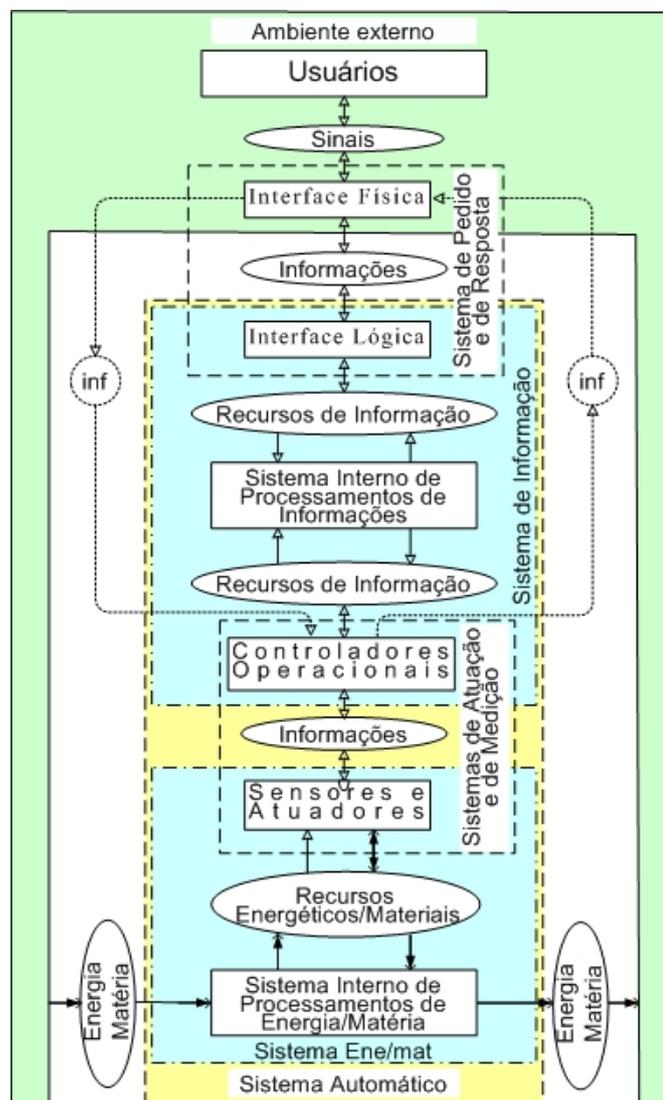


Figura 3.1. Representação de um sistema automático (adaptado de Souto, 2002).

Mantendo os conceitos teóricos utilizados por De Negri (1996), sugerem-se algumas mudanças na modelagem dos sistemas de atuação e de medição (Figura 3.2). A primeira alteração consiste em enfatizar que toda entidade física é provida de informação e que os ‘sistemas de medição’ são capazes de adquirir uma dada informação desta entidade. Estes conceitos são aceitáveis, pois segundo Finkelstein (1985 *apud* De Negri, 1996) sistemas nos quais predomina a manipulação de informação, denominados pelo autor de **máquinas de informação**, apresentam “artifícios cuja finalidade é **adquirir**, processar, armazenar, transmitir e fornecer informação. Assim definido, o conceito de máquinas de informação envolve toda a instrumentação incluindo, em particular, os sensores.”

Graficamente a alteração nos sistemas de medição consiste em caracterizar a seta que sai do canal ‘recursos energéticos/materiais’ e vai para as agências ‘SM ene/mat’ e ‘SAM ene/mat’ como de informação (seta vazada, segundo a Figura 2.11). Esta mudança se faz benéfica ao processo de análise descrito no Capítulo 4, pois com esta alteração, o canal ‘recursos energéticos/materiais’ passa a ser canal de entrada de informação e as agências ‘SM ene/mat’ e ‘SAM ene/mat’ deixam de pertencer ao ambiente externo (entende-se: ambiente externo ao sistema de medição). Segundo os procedimentos descritos no Capítulo 4, uma agência que seja caracterizada como de entrada ou de saída para algum recurso, obrigatoriamente pertence ao ambiente externo.

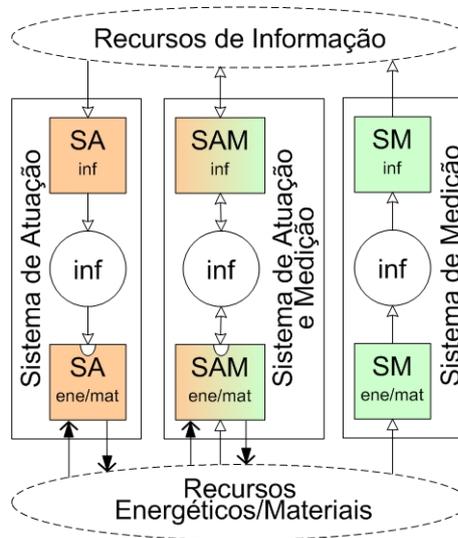


Figura 3.2. Nova representação para o sistema de atuação e de medição.

Outra alteração necessária é a adição do símbolo que indica canal oculto (Figura 2.11) às agências ‘SA ene/mat’ e ‘SAM ene/mat’ (Figura 3.2), sendo utilizado para representar a necessidade de informação, referente ao arco de informação que sai do canal ‘inf’. Com isso as agências ‘SA ene/mat’ e ‘SAM ene/mat’, igualmente ao caso anterior, deixa de pertencer ao ambiente externo (entende-se: ambiente externo ao sistema de atuação).

Esclarece-se que a modelagem referente ao ‘sistemas de atuação e de medição’ apresentadas pela Figura 3.1, apesar de um pouco diferente, representam o ‘sistema de me-

dição', 'sistema de atuação' e o 'sistema de medição e atuação' da Figura 3.2. De modo que as agências 'SM inf', 'SA inf' e 'SAM inf' (Figura 3.2) são processadas pelos 'controladores operacionais' (Figura 3.1) e as 'SM ene/mat', 'SA ene/mat' e 'SAM ene/mat' (Figura 3.2) compõem os 'sensores e atuadores' (Figura 3.1).

### 3.2 Método de projeto utilizando a rede C/A

Esta seção tem a finalidade de deixar claro ao leitor em qual parte do processo de projeto a rede C/A é aplicada. Segue-se uma estrutura que explica como as técnicas de auxílio à análise da coerência do modelo, sugeridas nesta dissertação, devem ser aplicadas e como podem ser integradas com outros modelos e ferramentas existentes.

De Negri e Santos (2007) afirmam que apesar de diversas publicações proporem orientações gerais para a modelagem do processo de projeto mecatrônico, percebe-se que ainda não há uma proposta concreta para o modelo do processo de projeto mecatrônico. Emprega-se uma subdivisão segundo as fases do processo de projeto de produtos industriais influenciada fortemente pela escola alemã que está representada em Pahl e Beitz (1988), a qual, por sua vez, já está academicamente consolidada, mas com ênfase aos sistemas mecânicos.

Santos (2003), no intuito de resolver esse problema e tomando como referência o modelo consensual estabelecido para projeto de sistemas técnicos, formulou um novo modelo para o processo de projeto conceitual, procurando abordar a execução simultânea dos projetos da parte física e do controle, de forma a obter uma concepção do novo sistema de maneira integrada. Para tanto, Santos (2003) apresenta uma proposta de descrição funcional, estrutural e comportamental utilizando rede C/A e uma abordagem de modelagem e controle de SEDs baseada em autômatos e, desta forma, insere na atividade de projeto ferramentas formais de modelagem e síntese de controladores (Ramadge e Wonham, 1989), (Queiroz e Cury, 2002).

Tendo como base o trabalho de Santos (2003), propõe-se a condução do projeto conceitual de sistemas automáticos conforme a Figura 3.3. De acordo com a proposta deste trabalho, deve-se entender que a rede C/A formal deve ser utilizada como sendo o modelo funcional/estrutural. Exceto quando se indica que se trata de modelos específicos.

O procedimento descrito pela Figura 3.3 difere, em três pontos em particular, da proposta apresentada por Santos (2003). Primeiro o modelo é adaptado para o projeto de sistemas automáticos, conforme em De Negri e Santos (2007), visto que Santos tratava mais especificamente de projeto de sistemas de manipulação e montagem automatizados. Segundo, sugere-se que a primeira atividade, que consiste no estabelecimento de um modelo global, seja realizada em paralelo com a definição de tecnologias de solução. Por consequência, esta execução em paralelo acrescenta à metodologia o passo destinado à escolha de uma tecnologia dentre as definidas (caixas com fundo ). Por fim, insere-se na Figura

3.3 os passos correspondentes à utilização da rede C/A formal em conjunto com as técnicas matemáticas descritas no Capítulo 4 (caixas com fundo ).

Nesta dissertação é utilizado o termo tecnologia de solução com a finalidade de classificar as possíveis opções, para solução do problema, que não dizem respeito a um equipamento propriamente dito. Por exemplo, a função de transportar um objeto pode ser realizada segundo várias tecnologias, como transporte aéreo, náutico ou terrestre. Desta forma, a diferença entre tecnologia e princípio de solução é que o segundo pode ser vinculado a um, ou mais, dispositivos que de certa forma estão disponíveis comercialmente. Por exemplo, a mesma situação descrita acima pode ser solucionada, sob uma perspectiva de princípio de solução, por uma catapulta, bóia de isopor ou esteira. Esclarece-se que ambos os termos são definidos como meios, segundo a árvore de funções e meios (Figura 2.7).

A primeira atividade, segundo a metodologia apresentada na Figura 3.3, consiste em realizar uma descrição funcional/estrutural do sistema como um todo, onde se objetiva tanto determinar os principais recursos que deverão entrar e sair no sistema quanto investigar as tecnologias que podem ser utilizadas no equipamento que esta sendo projetado. Esta é também a primeira atividade da fase de projeto conceitual, sendo realizada com base nas especificações de projeto, elaboradas na fase de projeto informacional.

A segunda atividade consiste em escolher quais tecnologias, dentre as definidas na atividade anterior, serão adotadas. Sendo assim, o resultado desta é a apresentação de um modelo funcional/estrutural geral do sistema segundo as tecnologias de solução selecionadas.

A atividade três é destinada à investigação de possíveis refinamentos na estrutura de funções do sistema, normalmente correlacionados a princípios de solução identificados pelo projetista. Este procedimento, assim como na primeira atividade, orienta-se pela visão da causalidade vertical definida por Tjalve (1979), ou seja, a decomposição de uma função particular em sub-funções só é possível quando um meio tenha sido escolhido para realizar a função.

O sistema deve ser refinado, de acordo com a atividade três, até o nível onde não se torna mais vantajoso trabalhar com um modelo integrador com as características da rede C/A. Em outras palavras, o sistema deve ser decomposto até assumir certa simplicidade, tal que, acredita-se ser mais fácil trabalhar, a partir de então, com um modelo específico (atividade 5 – coluna do meio). É importante salientar que este ponto, onde é determinado que o processo de refinamento utilizando a RdP C/A está concluído é dependente da experiência do projetista e da equipe envolvida no processo de projeto.

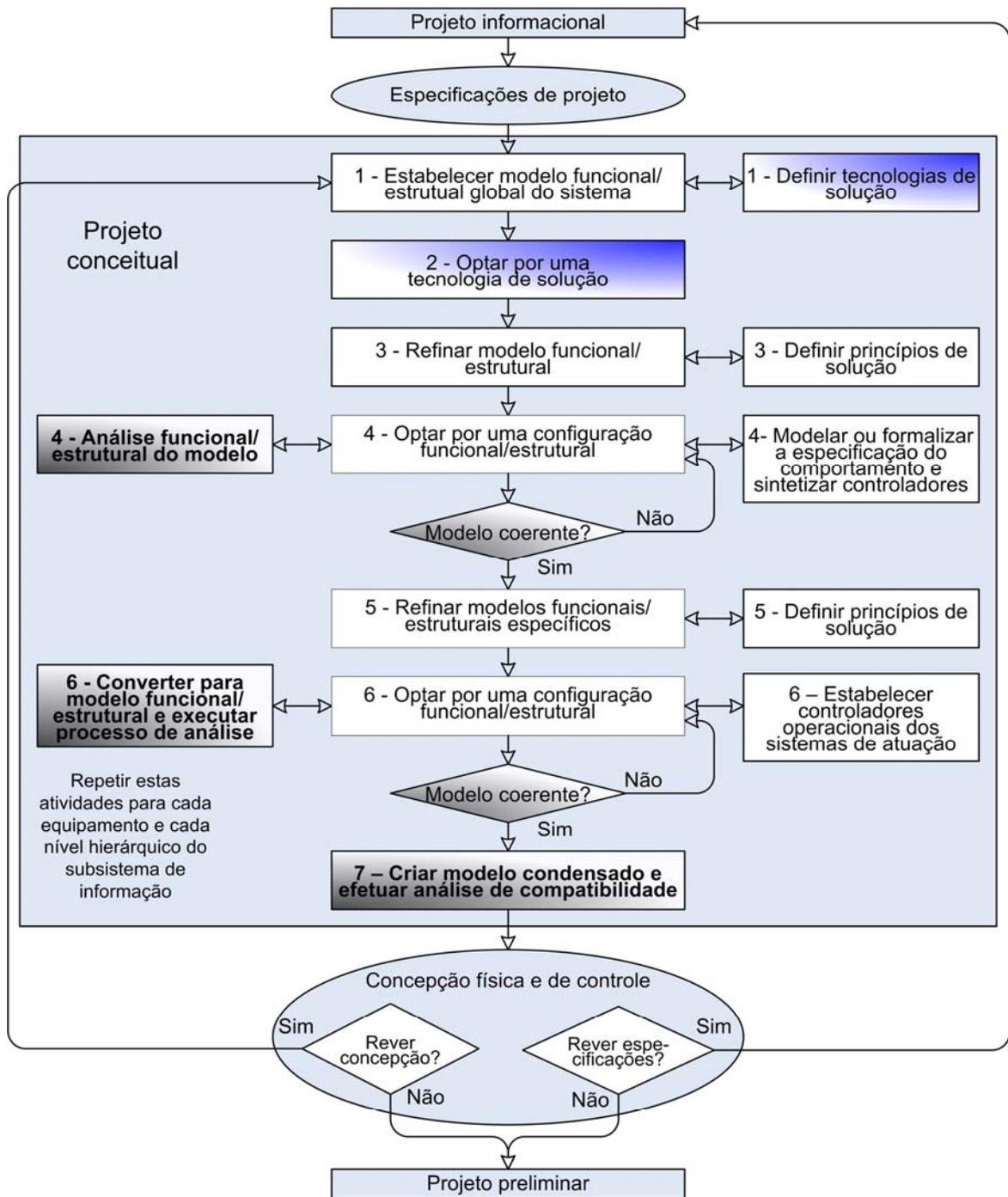


Figura 3.3. Projeto conceitual para sistemas automáticos (adaptado de De Negri e Santos, 2007).

A quarta atividade (coluna do meio na Figura 3.3) consiste na escolha dos princípios de solução que serão utilizados para desempenhar as funções modeladas, os quais devem ser selecionados com base nos princípios definidos pela atividade três (coluna da direita). A tarefa que diz respeito à aplicação dos procedimentos de análise (atividade 4 – coluna da esquerda), é executada sobre os modelos refinados e com princípios de solução selecionados (atividade 4 – coluna do meio). Esta tarefa (atividade 4 – coluna da esquerda) tem como finalidade a obtenção de redes C/A coerentes com as regras de utilização, segundo a capacidade de análise disponível (Capítulo 4). Por fim, com as redes C/A modeladas de forma coerente, parte-se para a formalização do comportamento (atividade 4 – coluna direita) em

um nível de abstração equivalente ao encontrado no modelo funcional/estrutural. De Negri e Santos (2007) salientam que devido ao grau de abstração, o modelo comportamental possivelmente será a eventos discretos, estabelecendo quando cada uma das funções já identificadas deverá ocorrer.

A atividade cinco é realizada a partir do modelo funcional/estrutural obtido na atividade anterior. Consiste em aplicar refinamentos utilizando modelos funcionais/estruturais específicos, que estejam de acordo com a tecnologia envolvida (coluna do meio). Estes modelos também podem estar vinculados à definição de princípios de solução (atividade 5 – coluna da direita).

Similarmente à atividade quatro, a sexta atividade tem a finalidade de expor a opção por uma configuração estrutural/funcional (coluna do meio), estabelecer modelo comportamental (coluna da direita) e realizar os procedimentos de análise (coluna da esquerda). No entanto, como o sistema, neste estágio, apresenta-se sob uma forma mais refinada é possível que se identifiquem comportamentos a estado contínuo, os quais darão origem a controladores contínuos. Outro detalhe é que, como se tratam de modelos específicos, estes devem ser convertidos para uma rede C/A equivalente a fim de possibilitar a execução dos procedimentos de análise. Acredita-se que o procedimento de conversão de um modelo funcional específico para uma rede C/A equivalente, somente será realizado na prática caso seja desenvolvida uma ferramenta automática de conversão via software, mesmo a rede apresentando uma equivalência direta com os modelos específicos.

As atividades quatro e seis (colunas do meio e da direita) refletem a proposta de Santos (2003), a qual sugere a realização do projeto funcional e estrutural em paralelo com o comportamental ou, em outras palavras, a realização da decomposição funcional simultaneamente à definição dos princípios de solução e, principalmente, à síntese dos controladores juntamente com a concepção do sistema.

A sétima e última atividade pertencente à fase de projeto conceitual sugere a geração de um modelo funcional/estrutural condensado, que represente o sistema como um todo, ou porção que esteja sob responsabilidade de uma equipe, evidenciando os canais de entrada e saída. Pode-se entender este modelo como sendo uma versão atualizada da rede C/A criada na primeira atividade. Conclui-se esta atividade com a análise de compatibilidade entre as redes condensadas (seção 4.2 ).

Os procedimentos descritos para a fase de projeto conceitual, modelados pela Figura 3.3, são repetidos enquanto houver níveis hierárquicos inferiores de processamento de informação ou de fluxo de matéria e/ou energia.

Por fim, para passar para a fase de projeto preliminar, deve-se verificar se a concepção é viável técnica e economicamente e também se o resultado atende às especificações de projeto, estabelecidas durante o projeto informacional.

Apesar dos procedimentos indicados na Figura 3.3 induzirem a um projeto 'top down', se existir a necessidade de incluir ao projeto partes do processo já existentes ou previamente determinadas, pode-se mesclar com uma ação 'bottom up', utilizando-se as características dos componentes já definidos como restrições de projeto.

Segundo um ponto de vista mais específico, a principal intenção da Figura 3.3 é alojar a RdP C/A formal (modelo funcional/estrutural), assim como seus métodos de análise, dentro de uma metodologia de projeto de sistemas automáticos (caixas com fundo ). Sob essa perspectiva, tem-se como sugestão a aplicação dos processos de análise em duas frentes distintas, referentes às atividades quatro e seis.

A execução do projeto conceitual utilizando como modelo integrador a rede C/A será apresentada no Capítulo 5.

### 3.3 Formalização da RdP C/A

A RdP C/A formal é definida matematicamente por uma n-úpla. Entretanto, deve-se esclarecer que assim como nas redes de Petri ordinárias, as alternativas gráfica e matemática se diferenciam apenas pela forma de representação, sendo em princípio, simples passar uma RdP C/A na forma de grafo para matemática e vice-versa.

A representação da RdP C/A, por uma n-úpla, baseia-se na teoria de conjuntos, funções e matrizes. Uma  $n$ -úpla é um grupo de ' $n$ ' elementos dispostos ordenadamente, sendo que para o caso da formalização da rede C/A, cada elemento representa um conjunto, uma função ou uma matriz. Esta representação tem como finalidade evitar a ambigüidade no entendimento da rede (Jensen, 1996) e facilitar a prova de teoremas e a verificação automática via computador (Cardoso e Valette, 1997).

O modelo gráfico, por sua vez, é caracterizado como sendo um grafo direcionado bipartido, e é utilizado normalmente para que o projetista tenha uma idéia global do sistema modelado e consiga fazer algumas verificações visualmente. Sob uma visão realista, o projetista, na sua atividade de projeto, modela os sistemas utilizando a rede C/A gráfica, de forma que as análises e verificações realizadas sobre o modelo matemático são, entre outras finalidades, úteis para avaliar a coerência da rede gráfica.

Uma RdP C/A pode ser definida pela seguinte n-úpla<sup>5</sup>:

$$\mathbf{N} = (C, A, C_{ex}, A_{ex}, E_{re}, \lambda_{re}, \lambda_{ca}, K_{pre}, K_{Post}) \quad (3.1)$$

---

<sup>5</sup> Os conceitos matemáticos utilizados para a formalização estão de acordo com a tabela de símbolos matemáticos, apresentada no apêndice A.

A explicação sobre os elementos que formam a n-úpla está acompanhada do exemplo (seção 3.3.1).

Onde,

- $C$  é o conjunto finito de canais, de dimensão  $n$ :

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\};$$

- $A$  é o conjunto finito de agências, de dimensão  $m$ :

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\};$$

- $C_{ex}$  é o conjunto finito de canais externos, de dimensão  $p$ :

$$C_{ex} = \{c_1, c_2, \dots, c_p\};$$

- Tal que:

$$C \cap C_{ex} = \emptyset;$$

- $A_{ex}$  é o conjunto finito de agências externas, de dimensão  $q$ :

$$A_{ex} = \{a_1, a_2, \dots, a_q\};$$

- Tal que:

$$A \cap A_{ex} = \emptyset;$$

- $E_{re}$  é o conjunto finito de recursos, de dimensão  $b$ :

$$E_{re} = \{r_1, r_2, \dots, r_b\};$$

- $\lambda_{re}$  é a função que mapeia os recursos a uma determinada classe. Logo, esta função tem a finalidade de associar aos recursos uma determinada classe, dentre energia ( $E$ ), matéria ( $M$ ) e informação ( $I$ ):

$$\lambda_{re} : P(E_{re}) \rightarrow \{E, M, I\};$$

- $\lambda_{ca}$  é a função que mapeia cada canal e cada agência a um subconjunto de  $E_{re}$ . Ou seja, são os recursos que podem percorrer este canal ou esta agência:

$$\lambda_{ca} : C \cup A \rightarrow P(E_{re});$$

- $K_{pre}$  é o mapeamento que define os canais de entrada de uma agência, segundo os recursos que o percorrem naquele sentido (canais precedentes ou incidência anterior):

$$K_{pre} : (C \cup C_{ex}) \times (A \cup A_{ex}) \rightarrow P(E_{re});$$

- $K_{post}$  é o mapeamento que define os canais de saída de uma agência, segundo os recursos que o percorrem naquele sentido (canais seguintes ou incidência posterior):

$$K_{post} : (C \cup C_{ex}) \times (A \cup A_{ex}) \rightarrow P(E_{re}).$$

### 3.3.1 Exemplo de uma central hidrelétrica

A fim de exemplificar o formalismo inserido na RdP C/A, é selecionado como exemplo o modelo de uma central hidrelétrica que utiliza turbinas do tipo Pelton.

Na Figura 3.4 é mostrada um corte transversal em uma turbina Pelton que dentre as duas classes de turbinas empregadas em centrais hidrelétricas (ação ou reação) é classificada como de ação. Nesta, a água atua sobre o rotor por meio de uma ou várias direções tangenciais, sendo que os bicos injetores (bocais) agem regulando o volume de água que incide sobre as pás (conchas) do rotor, controlando sua velocidade.

Este tipo de turbina possui também um defletor que intercepta o jato, desviando-o das pás, quando ocorre uma diminuição violenta na potência demandada pela rede de energia, além de um bocal de frenagem que faz incidir um jato nas costas das pás, no sentido contrário de rotação, quando se deseja frear a turbina rapidamente (Paes e De Negri, 2002).

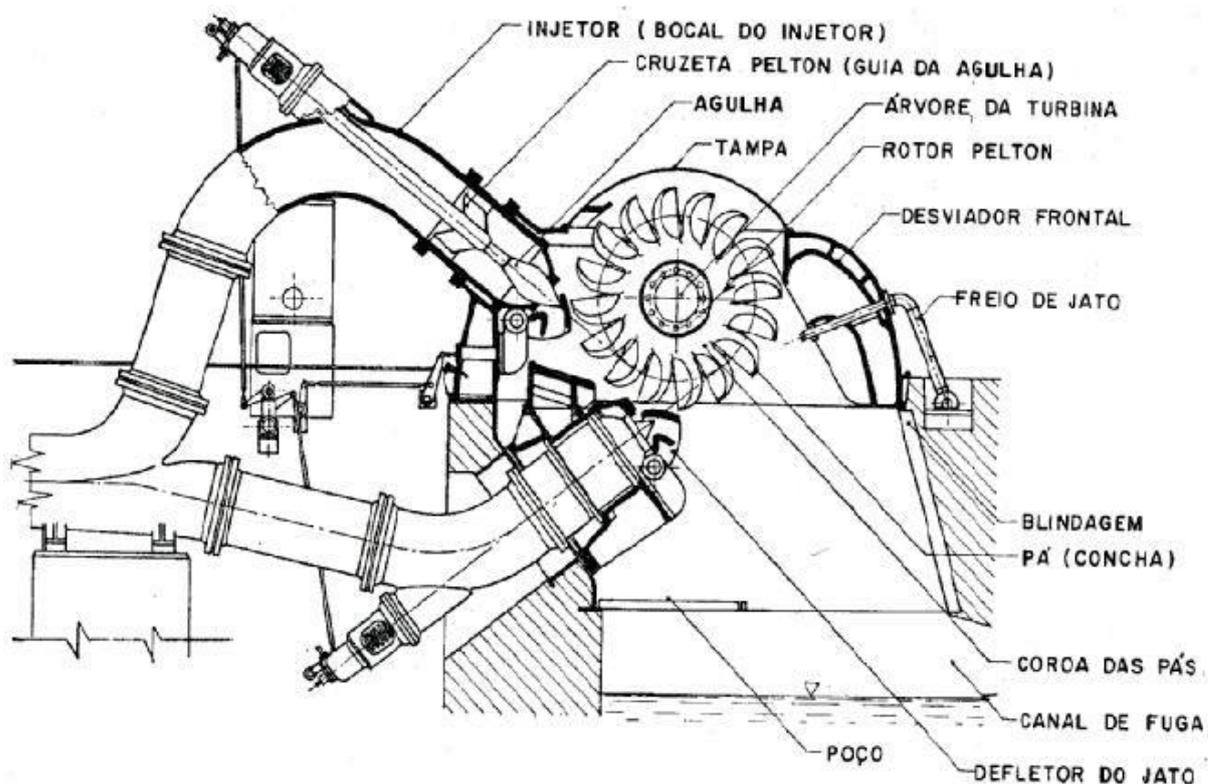


Figura 3.4. Corte transversal de uma turbina Pelton de dois jatos (PAES e DE NEGRI, 2002).

Por sua vez, o 'rotor', responsável por transformar a energia hidráulica contida na água em energia mecânica, é formado por certo número de pás com a forma de concha especial, dispostas na periferia de um disco que gira preso ao eixo. A pá possui um gume médio, que fica sobre o plano médio da roda, dividindo simetricamente o jato desviando-o lateralmente (Paes e De Negri, 2002). A rotação e o torque gerados no rotor são transmitidos para o 'gerador' que transforma a energia mecânica em elétrica.

A RdP C/A exposta na Figura 3.5 modela uma turbina do tipo Pelton de forma não muito detalhada. Nesta se tem o 'Sistema de Alimentação' representando a composição da

agulha, freio e defletor e o 'Rotor/Gerador', como o próprio nome sugere, representando o rotor e o gerador. Uma visão refinada do modelo é encontrada na seção 3.4 , a qual trata de redes C/As hierárquicas.

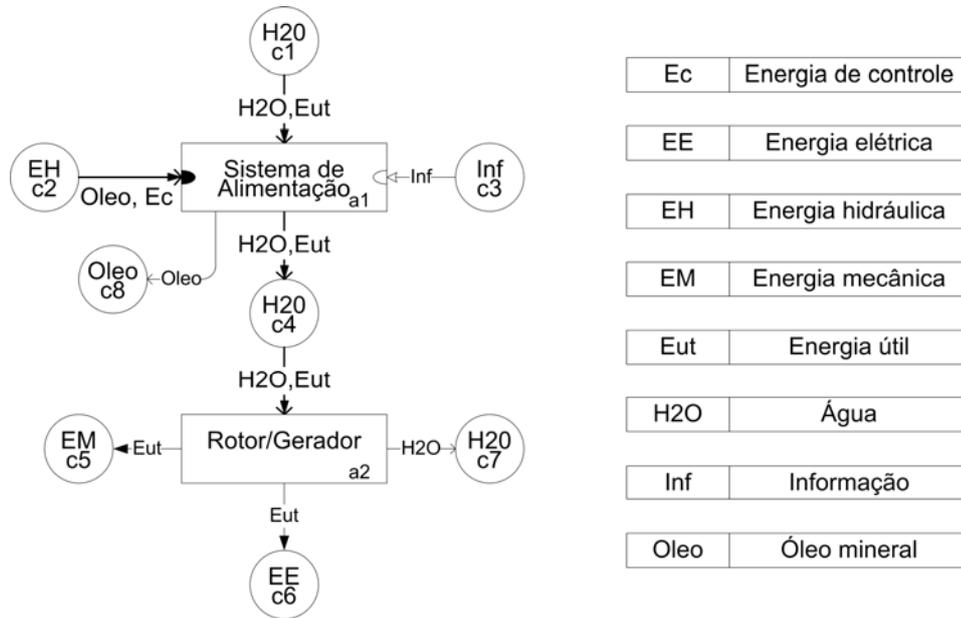


Figura 3.5. RdP C/A de uma turbina tipo Pelton.

A representação diagramática da Figura 3.5 pode ser transcrita para a forma matemática (nônupla) como segue:

- Conjunto finito de canais  $C = \{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, c_2 * a_1, c_3 * a_1\}$ , com  $n = 10$ , sendo que segundo a simbologia descrita na seção 2.3.5, os canais  $c_2 * a_1$  e  $c_3 * a_1$ <sup>6</sup> são ocultos;
- Conjunto finito das agências  $A = \{a_1, a_2\}$ , com  $m = 2$ ;
- Conjunto finito de canais externos  $C_{ex} = \{\}$ , com  $p = 0$ .

Este conjunto só não será vazio quando existirem canais, pertencentes a redes externas, ligando-se, por meio de arcos, às agências desta rede. Isto ocorre, normalmente, em situações onde o sistema é modelado por mais de uma rede (por exemplo, quando se faz uso de refinamentos);

- O conjunto finito de agências externas  $A_{ex} = \{\}$ , com  $q = 0$ .

Similarmente ao caso anterior, este conjunto só não será vazio quando existirem agências, pertencentes a redes externas, ligando-se, por meio de arcos, aos canais desta rede;

- Conjunto finito dos recursos  $E_{re} = \{H2O, Eut, Ec, Oleo, Inf\}$ , com  $b = 5$ . H2O é a água como fonte de matéria; Eut é considerada como sendo a energia útil

<sup>6</sup> A explicação de como nomear os canais ocultos é apresentada da seção 3.4 .

para o sistema, que neste caso pode estar na forma potencial, mecânica e elétrica;  $Ec$  é a energia de controle;  $Oleo$  é o óleo mineral considerado como matéria e  $Inf$  como informação.

Pode-se eventualmente fixar o conjunto dos recursos como sendo somente três (energia, matéria e informação), no entanto esta atitude pode prejudicar a análise da rede, dependendo da característica do sistema modelado. Neste caso, por exemplo, se fosse considerado a matéria como sendo um único tipo de recurso, ou seja, não fosse dividida em água ( $H2O$ ) e óleo ( $Oleo$ ) e o projetista esquecesse de considerar o canal  $c_8$ , a análise do modelo poderia indicar que o mesmo está correto já que existe um canal de entrada e um canal de saída de matéria. Entretanto, na realidade o modelo estaria incorreto visto que o óleo não sai pelo mesmo canal da água.

Caso ainda a energia não fosse diferenciada em útil ( $Eut$ ) e de controle ( $Ec$ ) e não fosse considerada a existência de um canal oculto ( $c_2 * a_1$ ), que representa a dissipação de energia, a análise apresentaria o modelo novamente como correto e entenderia que a energia hidráulica estaria sendo transformada em energia útil. O que é um erro, visto que neste caso a energia hidráulica tem a finalidade apenas de controle e não de potência. Os aspectos de como realizar a análise da RdP C/A serão discutidos no Capítulo 4.

- A função que associa aos recursos uma determinada classe é:

$$\lambda_{re}(\{H2O, Oleo\}) = M ;$$

$$\lambda_{re}(\{Eut, Ec\}) = E ;$$

$$\lambda_{re}(\{Inf\}) = I .$$

Como deve existir uma equivalência entre as formas gráfica e matemática de representação de uma RdP C/A, a função  $\lambda_{re}$  é necessária para que se possa identificar o símbolo utilizado como meio de ligação entre os vértices da rede. Por exemplo, para indicar que o recurso que está percorrendo um canal é informação, utiliza-se uma seta vazada (Figura 2.11).

- A função que associa a cada canal e agência um subconjunto de recursos é dada por:

$$\lambda_{ca}(c_1) = \lambda_{ca}(c_4) = \lambda_{ca}(a_2) = \{H2O, Eut\} ;$$

$$\lambda_{ca}(c_2) = \{Oleo, Ec\} ;$$

$$\lambda_{ca}(c_2 * a_1) = \{Ec\} ;$$

$$\lambda_{ca}(c_3) = \lambda_{ca}(c_3 * a_1) = \{Inf\} ;$$

$$\lambda_{ca}(c_5) = \lambda_{ca}(c_6) = \{Eut\} ;$$

$$\lambda_{ca}(c_7) = \{H2O\} ;$$

$$\lambda_{ca}(c_8) = \{Oleo\} ;$$

$$\lambda_{ca}(a_1) = \{H2O, Eut, En, Oleo, Inf\}.$$

A função  $\lambda_{ca}$  indica quais recursos podem passar por um determinado canal (ou agência). No entanto, um determinado recurso que pertença ao subconjunto de recursos, definido por  $\lambda_{re}$  de um canal (ou agência), não necessariamente o percorre.

- O mapeamento que define os canais precedentes:

<i>Kpre</i>	a1	a2
c1	{H2O, Eut}	∅
c2	{Oleo, Ec}	∅
c3	{Inf}	∅
c4	∅	{H2O, Eut}
c5	∅	∅
c6	∅	∅
c7	∅	∅
c8	∅	∅
c2*a1	∅	∅
c3*a1	∅	∅

- O mapeamento que define os canais posteriores:

<i>Kpost</i>	a1	a2
c1	∅	∅
c2	∅	∅
c3	∅	∅
c4	{H2O, Eut}	∅
c5	∅	{Eut}
c6	∅	{Eut}
c7	∅	{H2O}
c8	{Oleo}	∅
c2*a1	{Ec}	∅
c3*a1	{Inf}	∅

Os canais ocultos ( $c_2 * a_1$  e  $c_3 * a_1$ ) representados em  $\kappa_{pre}$  e  $\kappa_{post}$  merecem destaque, pois apesar de serem considerados como dispensáveis sob o ponto de vista de entendimento do modelo, são importantes para a tarefa de análise.

### 3.3.2 Representação de conjuntos por seqüência binária

Para representação computacional de conjuntos, será utilizado nesta dissertação o método indicado por Rosen (2003), que consiste em ordenar de forma arbitrária os elementos do conjunto e a partir desta ordem, representar os subconjuntos como uma seqüência binária (*string*) de comprimento igual ao número de elementos do conjunto. Quando o enésimo bit da seqüência é '1' quer dizer que o elemento correspondente está presente no subconjunto e quando '0', ausente.

Para o caso específico da formalização de RdP C/A a representação de conjuntos sob uma forma binária é aplicada às matrizes  $\kappa_{pre}$  e  $\kappa_{post}$ . Uma ordem para os elementos de  $E_{re}$  deve ser definida, preferencialmente igual à ordem a qual os mesmos aparecem no

conjunto finito de recursos ( $E_{re}$ ). Logo, no exemplo da turbina tipo Pelton, tem-se que a ordem dos elementos é  $E_{re} = \{H2O, Eut, Ec, Oleo, Inf\}$ . Por consequência, o equivalente binário das matrizes  $\kappa_{pre}$  e  $\kappa_{post}$  é:

<b>Kpre</b>	a1	a2
c1	<b>11000</b>	00000
c2	<b>00110</b>	00000
c3	<b>00001</b>	00000
c4	00000	<b>11000</b>
c5	00000	00000
c6	00000	00000
c7	00000	00000
c8	00000	00000
c2*a1	00000	00000
c3*a1	00000	00000

<b>Kpost</b>	a1	a2
c1	00000	00000
c2	00000	00000
c3	00000	00000
c4	<b>11000</b>	00000
c5	00000	<b>01000</b>
c6	00000	<b>01000</b>
c7	00000	<b>10000</b>
c8	<b>00010</b>	00000
c2*a1	<b>00100</b>	00000
c3*a1	<b>00001</b>	00000

Ressalta-se que a representação, das matrizes  $\kappa_{pre}$  e  $\kappa_{post}$ , por seqüências binárias é apenas uma sugestão, sendo utilizada com o intuito de facilitar os cálculos sobre estas. Desta forma, esta representação matricial binária **não** pertence ao formalismo matemático proposto para a rede C/A.

### 3.4 Formalização da RdP C/A hierárquica

O termo redes hierárquicas é comum para modelos voltados a SEDs, como redes de Petri, sendo normalmente utilizado para representar uma hierarquia entre redes, permitindo que o projetista construa grandes modelos através da combinação de modelos menores (Jensen, 1996). Sobre este aspecto, Jensen (1996) faz uma comparação entre a utilização de redes de Petri comportamentais hierárquicas com o projeto de um programa que utilizam módulos e sub-rotinas.

Sob a perspectiva de representação funcional e estrutural, a idéia básica por trás da utilização de redes C/A hierárquicas é a possibilidade de construir grandes modelos por meio de representações com diferentes níveis de abstração.

De forma concisa, o processo de refinamento de um canal ou de uma agência consiste no detalhamento destes, identificando-se novos canais e agências internas. Do mesmo modo, canais e agências podem ser agrupados formando elementos condensados, pelo processo de composição ou condensação (Figura 2.14).

A utilização de redes hierárquicas se torna necessária quando o sistema a ser modelado é complexo para ser compreendido e tratado eficientemente por um único modelo, ou seja, não é facilmente interpretável pela observação humana. Logo, torna-se atrativo um mecanismo de abstração, que simplifique as redes preservando as propriedades do modelo original.

Propõe-se a formalização das redes C/A hierárquicas por triplas, de forma que cada uma, fazendo uma analogia com uma árvore genealógica, seja capaz de representar mate-

maticamente uma rede mãe e suas respectivas redes filhas. Ou seja, para cada nova geração, gerada a partir de uma filha, é necessário definir uma outra tripla, que represente a nova mãe e suas respectivas filhas.

Segundo a árvore de refinamentos exposta na Figura 3.6, tem-se que  $N_0$  é a **rede inicial** que dá origem a todos os outros refinamentos e que a formalização completa desta árvore é composta por quatro triplas, sendo uma para cada região pontilhada. Desta forma, percebe-se que a formalização da hierarquia entre redes C/A parte de uma rede inicial, a qual é definida durante a atividade três ou quatro da Figura 3.3. Depois de definida a rede inicial, todas as redes pertencentes a níveis hierárquicos inferiores devem ser formalizadas, ou seja, devem ser expressas por uma n-úpla e estarem vinculadas à pelo menos uma tripla.

Ressalta-se que segundo o que é proposto, com exceção da rede inicial ( $N_0$ ), as redes que dão origem a refinamentos devem estar presentes em duas triplas, sendo formalizada em uma, como pertencente à família de refinamentos, e em outra, como rede de maior nível hierárquico. Por exemplo, o formalismo (n-úpla) da rede  $N_2$  deve pertencer tanto a tripla que expressa a família de refinamentos originados a partir de  $N_0$  (região pontilhada '1'), quanto a tripla que considera ela como rede de maior nível hierárquico (região pontilhada '2') (Figura 3.6).

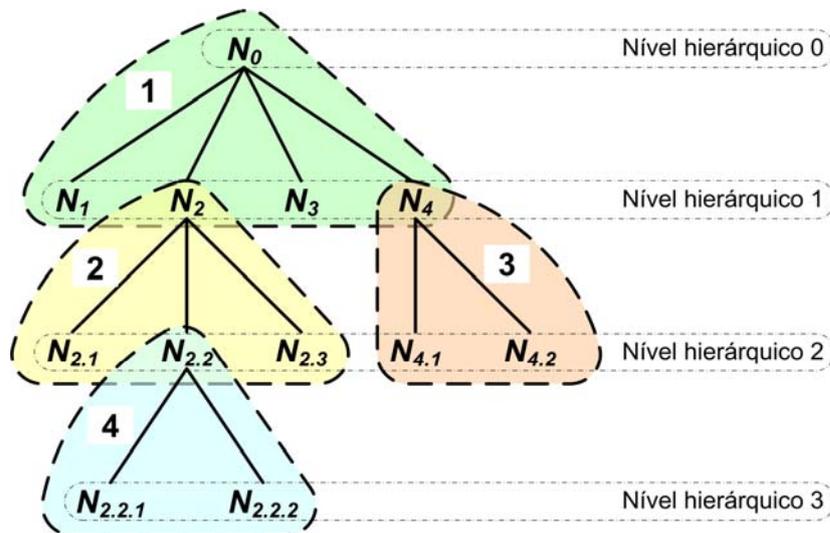


Figura 3.6. Árvore de refinamentos.

Para enumerar os canais e agências em redes hierárquicas é sugerido utilizar uma nomenclatura análoga à que é proposta pela técnica do modelo SADT/IDF0, o que torna o nome de cada agência e canal únicos no modelo (Figura 3.7).

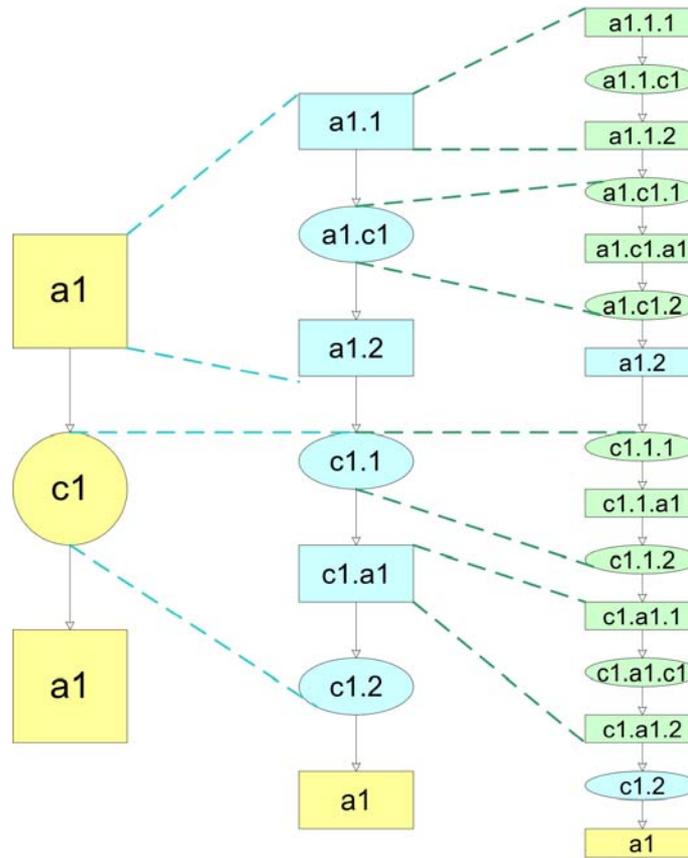


Figura 3.7. Exemplo de como utilizar a nomenclatura SADT/IDF0 na RdP C/A.

A proposta, segundo a Figura 3.7, consiste basicamente na utilização de uma nomenclatura composta por uma letra que define o tipo do vértice ('a' para agência ou 'c' para canal), seguida por uma numeração crescente e independente para cada tipo de vértice. A diferenciação hierárquica se dá pela utilização de um ponto separando a identificação da rede condensada da refinada. Ao se refinar um canal, a letra que define o tipo de vértice pode ser suprimida. Nos canais da rede refinada, por exemplo, faz-se 'c1.2' ao invés de 'c1.c2'. O mesmo vale para as agências.

Para a nomenclatura de canais ocultos, opta-se pela utilização de um asterisco separando o nome do canal de origem do nome da agência que contenha o canal oculto. No exemplo da Figura 3.5, a nomenclatura 'c2\*a1' é utilizada para o canal oculto que simboliza o consumo ou dissipação por 'a1' do recurso oriundo de 'c2'.

Retornando ao formalismo, tem-se que a descrição matemática de redes C/A hierárquicas podem ser representadas por triplas.

$$\mathfrak{R}_{ca0} = \{N_0, N_{f0}, \delta_0\} \tag{3.2}$$

onde:

- $N_0$  é a RdP C/A inicial ou de maior nível hierárquico:

$$N_0 = \{C_0, A_0, C_{ex0}, A_{ex0}, E_{re0}, \lambda_{re0}, \lambda_{ca0}, K_{pre0}, K_{post0}\};$$

- $N_{f_0}$  é o conjunto finito da família de redes C/A refinadas, de dimensão  $s$ :

$$N_{f_0} = \{N_1, N_2, \dots, N_s\},$$

sendo que cada rede  $N_i = \{C_i, A_i, C_{exi}, A_{exi}, E_{rei}, \lambda_{rei}, \lambda_{cai}, K_{prei}, K_{posti}\}$ ;

- Nenhuma das redes pode ter elementos em comum:

$$\forall N_1, N_2 \in N_{f_0} : [N_1 \neq N_2 \Rightarrow (C_1 \cup A_1) \cap (C_2 \cup A_2) = \emptyset];$$

- $\delta_0$  é uma função *de refinamento* que associa elementos de  $C_0$  (refinamento de um canal) e  $A_0$  (refinamento de uma agência) com as redes de  $N_{f_0}$ :

$$\delta_0 : C_0 \cup A_0 \rightarrow N_{f_0};$$

- Um mesmo canal não pode ser origem de dois refinamentos:

$$\forall c_1, c_2 \in C_0 : [c_1 \neq c_2 \Rightarrow \delta_0(c_1) \neq \delta_0(c_2)];$$

- Uma mesma agência não pode ser origem de dois refinamentos:

$$\forall a_1, a_2 \in A_0 : [a_1 \neq a_2 \Rightarrow \delta_0(a_1) \neq \delta_0(a_2)].$$

Os índices numéricos (*subscritos*) utilizados nos elementos de uma tripla, segundo a equação ( 3.2 ), devem ser equivalentes ao índice numérico da rede C/A que deu origem aos refinamentos. Ou seja, a definição acima considera a rede de primeiro nível hierárquico (nível 0) como rede mãe. Desta forma, a tripla que representaria a região pontilhada '4' (Figura 3.6) seria igual a  $\mathfrak{R}_{ca2.2} = \{N_{2.2}, N_{f2.2}, \delta_{2.2}\}$ , tendo  $N_{f2.2} = \{N_{2.2.1}, N_{2.2.2}\}$ .

### 3.4.1 Refinamento da rede C/A da central hidrelétrica

Como exemplo de uma RdP C/A hierárquica, dá-se continuidade ao exemplo da turbina tipo Pelton, cujo modelo condensado está exposto na Figura 3.5. Primeiramente serão apresentados os modelos gráficos e em seguida formalismo matemático equivalente.

A Figura 3.8 é a RdP C/A que modela o refinamento da agência 'a1' (Figura 3.5), ou seja, é a decomposição do 'sistema de alimentação' nos sistemas de agulha, freio e defletor. Esta rede refinada é nomeada de  $N_1$ .

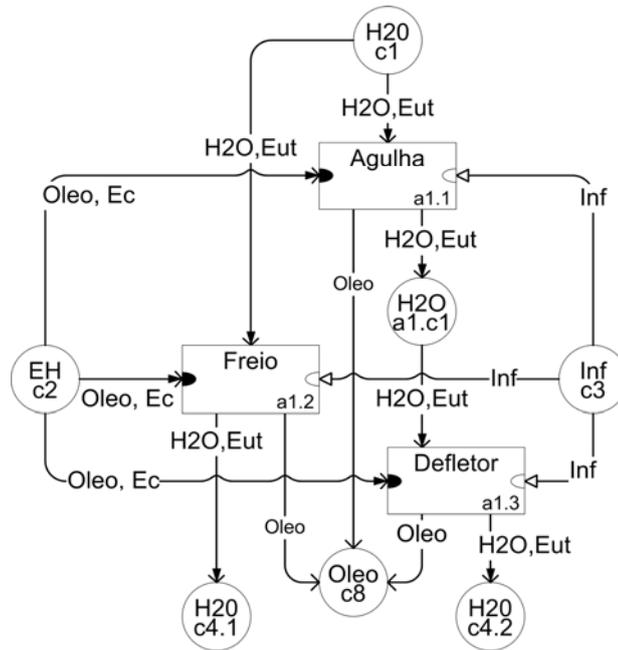


Figura 3.8. RdP C/A que representa o refinamento do sistema de alimentação ( $N_1$ ).

Com a decomposição do ‘sistema de alimentação’ surge a necessidade de subdividir o canal ‘c4’ em dois canais de passagem de água, logo que a água que sai do freio não passa pelo mesmo canal que a do defletor (Figura 3.9). A esta rede refinada é dado o nome de  $N_2$ .

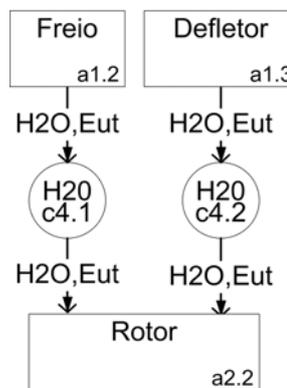


Figura 3.9. Refinamento do canal de passagem de água entre o sistema de alimentação e o rotor/gerador ( $N_2$ ).

A agência composta pelo rotor e gerador (‘a2’ na Figura 3.5) também é refinada a fim de detalhar o sistema, dando origem a rede refinada  $N_3$ . Nesta figura, o canal ‘c5’ representa a energia mecânica contida no mancal e poderia ser representado por um canal oculto, entretanto para manter a correspondente com a Figura 3.5 o mesmo foi conservado.

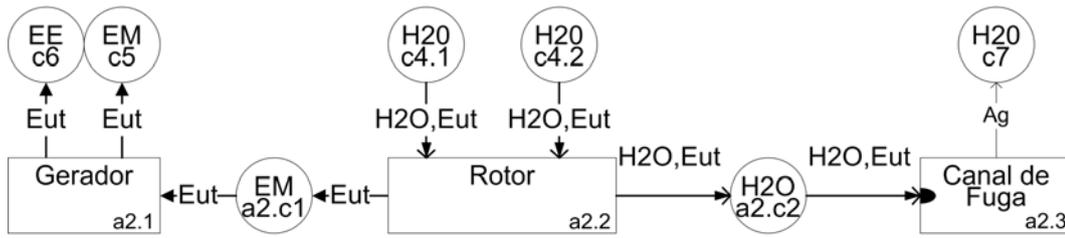


Figura 3.10. Refinamento do rotor/gerador ( $N_3$ ).

A RdP C/A hierárquica que modela a turbina do tipo Pelton pode ser definida por uma tripla segundo a equação ( 3.2 ), conforme segue:

- A rede inicial  $N_0$  é a própria RdP C/A modelada pela Figura 3.5 e definida na seção 3.3 segundo a equação ( 3.1 );
- O conjunto finito de famílias de RdP C/As refinadas  $N_{f0} = \{N_1, N_2, N_3\}$ ; sendo que:

○  $N_1 = \{C_1, A_1, C_{ex1}, A_{ex1}, E_{rel}, \lambda_{rel}, \lambda_{cal}, K_{pre1}, K_{post1}\}$ , com:

▪  $C_1 = \{a_1.c_1, c_2 * a_{1.1}, c_2 * a_{1.2}, c_2 * a_{1.3}, c_3 * a_{1.1}, c_2 * a_{1.2}, c_2 * a_{1.3}\};$

▪  $A_1 = \{a_{1.1}, a_{1.2}, a_{1.3}\};$

▪  $C_{ex1} = \{c_1, c_2, c_3, c_8, c_{4.1}, c_{4.2}\};$

▪  $A_{ex1} = \{\};$

▪  $E_{rel} = \{H2O, Eut, Ec, Oleo, Inf\};$

▪  $\lambda_{rel}(\{H2O, Oleo\}) = M,$

$\lambda_{rel}(\{Eut, Ec\}) = E,$

$\lambda_{rel}(\{Inf\}) = I;$

▪  $\lambda_{cal}(a_1.c_1) = \{H2O, Eut\},$

$\lambda_{cal}(c_2 * a_{1.1}) = \lambda_{cal}(c_2 * a_{1.2}) = \lambda_{cal}(c_2 * a_{1.3}) = \{Ec\},$

$\lambda_{cal}(c_3 * a_{1.1}) = \lambda_{cal}(c_3 * a_{1.2}) = \lambda_{cal}(c_3 * a_{1.3}) = \{Inf\},$

$\lambda_{cal}(a_{1.1}) = \lambda_{cal}(a_{1.2}) = \lambda_{cal}(a_{1.3}) = \{H2O, Eut, Ec, Oleo, Inf\};$

▪  $K_{pre1} =$

<i>Kpre1</i>	a1.1	a1.2	a1.3
a1.c1	∅	∅	{H2O, Eut}
c2*a1.1	∅	∅	∅
c2*a1.2	∅	∅	∅
c2*a1.3	∅	∅	∅
c3*a1.1	∅	∅	∅
c3*a1.2	∅	∅	∅
c3*a1.3	∅	∅	∅
c1	{H2O, Eut}	{H2O, Eut}	∅
c2	{Oleo, Ec}	{Oleo, Ec}	{Oleo, Ec}
c3	{Inf}	{Inf}	{Inf}
c8	∅	∅	∅
c4.1	∅	∅	∅
c4.2	∅	∅	∅

<i>Kpre1</i>	a1.1	a1.2	a1.3
a1.c1	00000	00000	<b>11000</b>
c2*a1.1	00000	00000	00000
c2*a1.2	00000	00000	00000
c2*a1.3	00000	00000	00000
c3*a1.1	00000	00000	00000
c3*a1.2	00000	00000	00000
c3*a1.3	00000	00000	00000
c1	<b>01100</b>	<b>01100</b>	00000
c2	<b>00110</b>	<b>00110</b>	<b>00110</b>
c3	<b>00001</b>	<b>00001</b>	<b>00001</b>
c8	00000	00000	00000
c4.1	00000	00000	00000
c4.2	00000	00000	00000

▪  $K_{post1} =$

<i>Kpost1</i>	a1.1	a1.2	a1.3
a1.c1	{H2O, Eut}	∅	∅
c2*a1.1	{Ec}	∅	∅
c2*a1.2	∅	{Ec}	∅
c2*a1.3	∅	∅	{Ec}
c3*a1.1	{Inf}	∅	∅
c3*a1.2	∅	{Inf}	∅
c3*a1.3	∅	∅	{Inf}
c1	∅	∅	∅
c2	∅	∅	∅
c3	∅	∅	∅
c8	{Oleo}	{Oleo}	{Oleo}
c4.1	∅	{H2O, Eut}	∅
c4.2	∅	∅	{H2O, Eut}

<i>Kpost1</i>	a1.1	a1.2	a1.3
a1.c1	<b>11000</b>	00000	00000
c2*a1.1	<b>00100</b>	00000	00000
c2*a1.2	00000	<b>00100</b>	00000
c2*a1.3	00000	00000	<b>00100</b>
c3*a1.1	<b>00001</b>	00000	00000
c3*a1.2	00000	<b>00001</b>	00000
c3*a1.3	00000	00000	<b>00001</b>
c1	00000	00000	00000
c2	00000	00000	00000
c3	00000	00000	00000
c8	<b>00010</b>	<b>00010</b>	<b>00010</b>
c4.1	00000	<b>11000</b>	00000
c4.2	00000	00000	<b>11000</b>

○  $N_2 = \{C_2, A_2, C_{ex2}, A_{ex2}, E_{re2}, \lambda_{re2}, \lambda_{ca2}, K_{pre2}, K_{post2}\}$ , com:

- $C_2 = \{c_{4.1}, c_{4.2}\};$
- $A_2 = \{ \};$
- $C_{ex2} = \{ \};$
- $A_{ex2} = \{a_{1.2}, a_{1.3}, a_{2.2}\}$
- $E_{re2} = \{H2O, Eut\};$
- $\lambda_{re2}(\{H2O\}) = M,$   
 $\lambda_{re2}(\{Eut\}) = E;$
- $\lambda_{ca2}(c_{4.1}) = \lambda_{ca2}(c_{4.2}) = \{H2O, Eut\};$
- $K_{pre2} =$

<i>Kpre2</i>	a1.2	a1.3	a2.2
c4.1	∅	∅	{H2O, Eut}
c4.2	∅	∅	{H2O, Eut}

<i>Kpre2</i>	a1.2	a1.3	a2.2
c4.1	00	00	<b>11</b>
c4.2	00	00	<b>11</b>

▪  $K_{post2} =$

<b>Kpost2</b>	a1.2	a1.3	a2.2
c4.1	{H2O, Eut}	∅	∅
c4.2	∅	{H2O, Eut}	∅

 $\equiv$ 

<b>Kpost2</b>	a1.2	a1.3	a2.2
c4.1	<b>11</b>	00	00
c4.2	00	<b>11</b>	00

○  $N_3 = \{C_3, A_3, C_{ex3}, A_{ex3}, E_{re3}, \lambda_{re3}, \lambda_{ca3}, K_{pre3}, K_{post3}\}$ , com:

▪  $C_3 = \{a_2.c_1, a_2.c_2, a_2.c_2 * a_2.c_3\}$ ;

▪  $A_3 = \{a_2.1, a_2.2, a_2.3\}$ ;

▪  $C_{ex3} = \{c_5, c_6, c_7, c_4.1, c_4.2\}$ ;

▪  $A_{ex3} = \{\}$ ;

▪  $E_{re3} = \{H2O, Eut\}$ ;

▪  $\lambda_{re3}(\{H2O\}) = M$ ,

$\lambda_{re3}(\{Eut\}) = E$ ;

▪  $\lambda_{ca3}(a_2.c_1) = \lambda_{ca3}(a_2.1) = \lambda_{ca3}(a_2.c_2 * a_2.c_3) = \{Eut\}$ ,

$\lambda_{ca3}(a_2.c_2) = \lambda_{ca3}(a_2.2) = \lambda_{ca3}(a_2.3) = \{H2O, Eut\}$ ;

▪  $K_{pre3} =$

<b>Kpre3</b>	a2.1	a2.2	a2.3
a2.c1	{Eut}	∅	∅
a2.c2	∅	∅	{H2O, Eut}
a2.c2*a2.3	∅	∅	∅
c5	∅	∅	∅
c6	∅	∅	∅
c7	∅	∅	∅
c4.1	∅	{H2O, Eut}	∅
c4.2	∅	{H2O, Eut}	∅

 $\equiv$ 

<b>Kpre3</b>	a2.1	a2.2	a2.3
a2.c1	<b>10</b>	00	00
a2.c2	00	00	<b>11</b>
a2.c2*a2.3	00	00	00
c5	00	00	00
c6	00	00	00
c7	00	00	00
c4.1	00	<b>11</b>	00
c4.2	00	<b>11</b>	00

▪  $K_{post3} =$

<b>Kpost3</b>	a2.1	a2.2	a2.3
a2.c1	∅	{Eut}	∅
a2.c2	∅	{H2O, Eut}	∅
a2.c2*a2.3	∅	∅	{Eut}
c5	{Eut}	∅	∅
c6	{Eut}	∅	∅
c7	∅	∅	{H2O}
c4.1	∅	∅	∅
c4.2	∅	∅	∅

 $\equiv$ 

<b>Kpost3</b>	a2.1	a2.2	a2.3
a2.c1	00	<b>01</b>	00
a2.c2	00	<b>11</b>	00
a2.c2*a2.3	00	00	<b>01</b>
c5	<b>01</b>	00	00
c6	<b>01</b>	00	00
c7	00	00	<b>10</b>
c4.1	00	00	00
c4.2	00	00	00

Observe que, ao contrário do que acontece na rede inicial ( $N_0$ ), os conjuntos  $C_{exi}$  e  $A_{exi}$  referentes às redes pertencentes a  $N_{f0}$  são, ora um ora outro, não-vazios, característica esta que evidencia que a RdP C/A pertence a um refinamento. Nas redes C/A pertencen-

tes à  $N_{f_0}$ , os canais e agências que compõem os conjuntos  $C_{exi}$  e  $A_{exi}$  podem pertencer à rede inicial ( $C_0$  e  $A_0$ ), quando estes elementos não deram origem a nenhum refinamento ( $\delta_0(c_x) = \text{indefinido}$  e  $\delta_0(a_x) = \text{indefinido}$ ), ou às outras redes refinadas ( $C_i$  e  $A_i$ ) pertencentes a  $N_{f_0}$ , quando os elementos pertencentes à rede inicial deram origem a refinamentos ( $\delta_0(c_x) = N_i$  e  $\delta_0(a_x) = N_i$ ).

- A função de refinamento  $\delta_0$ :

$C_0 \cup A_0$	$\delta_0$
c1	Indefinido
c2	Indefinido
c3	Indefinido
c4	$N_2$
c5	Indefinido
c6	Indefinido
c7	Indefinido
c8	Indefinido
a1	$N_1$
a2	$N_3$

Segundo a tabela acima, elaborada para facilitar o entendimento da função  $\delta_0$ , tem-se que os únicos vértices refinados são  $c4$ ,  $a1$  e  $a2$  e estão associados, respectivamente, às redes refinadas  $N_2, N_1$  e  $N_3$ . Ressalta-se que, segundo a definição de  $\delta$ , somente os elementos pertencentes à rede ( $C$  e  $A$ ) podem ser refinados, o que significa que elementos pertencentes aos conjuntos  $C_{ex}$  e  $A_{ex}$  só podem ser refinados a partir da rede (nôdupla) que os definem.

Levando-se em conta a metodologia apresentada na Figura 3.3, acredita-se que a conversão das redes C/A gráficas em modelos matemáticos equivalentes, baseados nas equações ( 3.1 ) e ( 3.2 ), somente seja realizada após todos os modelos gráficos terem sido criados. Desta forma, os conceitos apresentados até aqui são suficientes para que a conversão seja executada de forma correta.

Entretanto o formalismo proposto nesta dissertação implica cuidados que devem ser tomados para que os modelos matemáticos possam representar corretamente as redes gráficas. Logo, conceitos a respeito do processo de refinamento devem ser esclarecidos, mais especificamente com relação aos elementos que irão compor os conjuntos de canais e agências externas.

Como visto no exemplo exposto nesta seção e já mencionado anteriormente, os elementos externos de uma rede refinada ( $C_{exi}$  e  $A_{exi}$ ) podem pertencer tanto à rede inicial ( $N_0$ ), quando estes não são refinados, quanto às outras redes definidas por  $N_{f_0}$ . Ao estender este conceito para o caso de vários níveis hierárquicos, tem-se que os elementos exter-

nos ( $C_{exi}$  e  $A_{exi}$ ) utilizados por uma rede são de nível igual ou superior aos elementos definidos pela rede ( $C_i$  e  $A_i$ ). Sempre que possível deve-se utilizar elementos de mesmo nível hierárquico, ou seja, só se devem utilizar os elementos externos definidos por redes de níveis hierárquicos superiores, quando estes não são refinados. Assim sendo, o refinamento de um vértice definido por uma rede pertencente ao nível 1, pode gerar alterações nos conjuntos  $C_{ex}$  e  $A_{ex}$  das redes que pertencem ao mesmo nível hierárquico da rede refinada (2) e nas de nível inferior (3, 4,...).

A fim de esclarecer as alterações acarretadas pelo surgimento de um novo refinamento, faz-se uso da Figura 3.11, a qual apresenta a rede C/A  $N_4$ , algumas funções de refinamento e está de acordo com a árvore de refinamentos exposta na Figura 3.6.

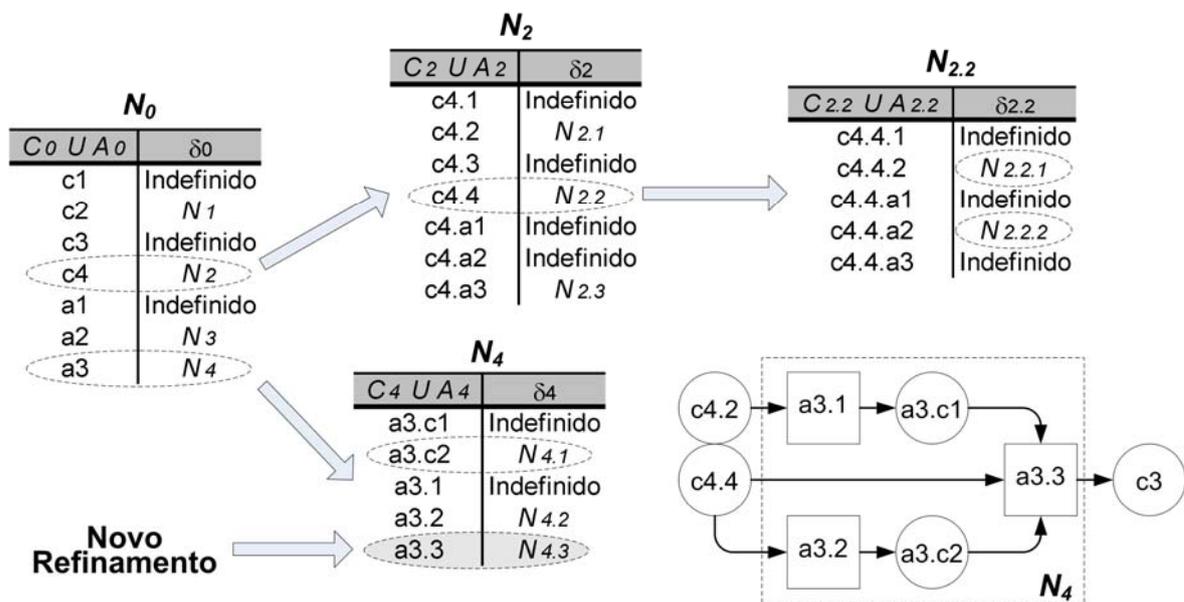


Figura 3.11. Exemplo hipotético com base na Figura 3.6.

Por exemplo, ao se supor o surgimento de um novo refinamento ( $N_{4.3}$ ), todas as redes de mesmo nível da rede refinada (2) e inferiores (3) podem ser influenciadas. Neste mesmo contexto, ao se gerar a rede  $N_{4.3}$ , os canais que teoricamente comporão o conjunto de canais externos ( $C_{ex4.3}$ ) são os que estão diretamente ligados ao elemento que deu origem ao refinamento ( $a3.3$ ), os quais podem ser descobertos graficamente, observando os elementos que estão em contato com 'a3.3' através de arcos direcionados, ou matematicamente, quando  $\{c \in C_{ex4} \cup C_4 : \kappa_{pre4}(c, a_{3.3}) \neq \emptyset\}$  e/ou  $\{c \in C_{ex4} \cup C_4 : \kappa_{post4}(c, a_{3.3}) \neq \emptyset\}$ . Logo, para esta suposição, tem-se 'c3', 'c4.4', 'a3.c1' e 'a3.c2' como possíveis candidatos ao conjunto  $C_{ex4.3}$ .

Entretanto, para que estes elementos (c3, c4.4, a3.c1 ou a3.c2) sejam efetivamente formalizados por  $C_{ex4 \cdot 3}$  é necessário que nenhum deles seja origem outro refinamento. Condição que, segundo a Figura 3.6 e Figura 3.11, **não** é verificada, visto que:

- ‘c4.4’ pertence à rede  $N_2$  (Figura 3.11) e esta rede apresenta três refinamentos, sendo que  $N_{2 \cdot 2}$  apresenta mais dois outros refinamentos (Figura 3.6). O que implica nas seguintes alterações:
  - Ao invés de ‘c4.4’,  $C_{ex4 \cdot 3}$  deve conter elementos de  $C_{2 \cdot 2}$ ;
  - Ao invés de ‘a3.3’,  $A_{ex2 \cdot 2}$  deve conter elementos de  $A_{4 \cdot 3}$ ;
  - Ao invés de ‘a3.3’,  $A_{ex2 \cdot 2 \cdot 1}$  e/ou  $A_{ex2 \cdot 2 \cdot 2}$  deve(m) conter elementos de  $A_{4 \cdot 3}$ .
- ‘a3.c2’ pertencente à  $N_4$  é refinado e dá origem a rede  $N_{4 \cdot 1}$  (Figura 3.11). Logo as seguintes alterações são necessárias:
  - Ao invés de ‘a3.c2’,  $C_{ex4 \cdot 3}$  deve conter elementos de  $C_{4 \cdot 1}$ ;
  - Ao invés de ‘a3.3’,  $A_{ex4 \cdot 1}$  deve conter elementos de  $A_{4 \cdot 3}$ .

Vale lembrar que qualquer mudança no conjunto dos canais ou agências, sejam externos ou não, causam alterações nas matrizes  $\kappa_{pre}$  e  $\kappa_{post}$  da rede.

### 3.5 Conclusões.

Este capítulo iniciou com a descrição da estrutura geral de um sistema automático (seção 3.1), visto que essa é a característica da maioria dos equipamentos industriais utilizados atualmente. A estrutura apresentada na Figura 3.1 está de acordo com definições de De Negri (1996), incluindo as modificações relacionadas à modelagem da comunicação com o ambiente externo, propostas por Souto (2005), e as alterações relacionadas a esta dissertação. Como contribuições deste trabalho, foram sugeridas alterações na forma de modelagem dos sistemas de atuação e de medição, as quais são conseqüências da visão formal associada à rede C/A.

A fim de contextualizar a proposta de formalização (seções 3.3 e 3.4) e os métodos de análise e síntese da rede C/A (Capítulo 4), estes foram inseridos na metodologia de projeto para sistemas automáticos proposta por Santos (2003), que tem como principal característica a abordagem simultânea dos projetos da parte física e do controle. Ressalta-se que a metodologia adotada segue as orientações de De Negri (1996) e tende a se ajustar às metodologias de projeto de produto e sistemas técnicos, sugeridas pelo NeDIP.

Como incremento à metodologia para o projeto conceitual de sistemas automáticos apresentada por Santos (2003) (Figura 3.3), esta dissertação propõe, primeiramente, uma diferenciação entre tecnologia e princípio de solução. A primeira é utilizada para classificar

as possíveis opções, para solução do problema, que não dizem respeito a um equipamento propriamente dito e princípio de solução, por sua vez, para classificar soluções que estão de certa forma disponíveis no mercado. Outra contribuição se refere aos procedimentos matemáticos de análise das propriedades da rede, as quais são executadas em duas ocasiões diferentes, sendo uma na quarta e outra na sexta atividade (Figura 3.3 – coluna da esquerda). Para finalizar a lista de propostas, cita-se o processo de síntese de redes condensadas e a análise de compatibilidade entre redes, sugeridos para a sétima atividade (Figura 3.3).

Os assuntos tratados até a seção 3.2 deste capítulo, em conjunto com os modelos discutidos na seção 2.3, objetivam amenizar as restrições impostas pela área prática quanto à utilização de novas técnicas de projeto, visto que Pulm e Lindemann (2001) destacam como sendo um empecilho, a dificuldade em definir qual é o melhor modelo, dentre os vários que existem, para um problema em específico (seção 2.1). Com esta bagagem conceitual, pretende-se enfatizar as vantagens da utilização da rede C/A, frente a outros modelos que apresentam aplicabilidade semelhante, reforçando a sugestão desta como modelo central para o projeto de equipamentos industriais com características automáticas.

Na seção 3.3 foi descrita a formalização da rede C/A por uma n-úpla, com o intuito de gerar um modelo matemático equivalente ao modelo gráfico e possibilitar a criação de métodos de análise e síntese da rede, os quais serão descritos no Capítulo 4. Para facilitar o tratamento matemático da rede via computador, sugeriu-se uma representação binária para as matrizes  $K_{pre}$  e  $K_{post}$ .

A formalização de redes C/A hierárquicas foi descrita na seção 3.4, sendo proposta a formalização destas por triplas, de forma que cada tripla seja capaz de representar uma rede mãe e suas respectivas redes filhas. Ainda sob a perspectiva de redes hierárquicas, definiu-se que os elementos que compõem o conjunto das agências e canais externos ( $C_{ex}$  e  $A_{ex}$ ) devem ser de nível igual ou superior aos elementos definidos pela rede ( $C$  e  $A$ ).

Sugeriu-se também uma nomenclatura para os canais e agências, a qual consiste basicamente na utilização de uma letra que define o tipo do vértice, seguida por uma numeração crescente e independente para cada tipo de vértice. A diferenciação hierárquica é caracterizada pela utilização de um ponto separando a identificação da rede mãe da filha.

Todos os conceitos referentes à formalização da rede C/A, hierárquica ou não, foram aplicados sobre um modelo resumido, em rede C/A, de uma central hidrelétrica que utiliza turbinas tipo Pelton. O principal objetivo do exemplo foi mostrar como deve ser realizada a conversão de uma rede gráfica para a matemática.

## CAPÍTULO 4

### MÉTODOS DE ANÁLISE E SÍNTESE DE REDES C/A

As técnicas de modelagem funcional, apresentadas no Capítulo 2, são algumas das mais difundidas no meio acadêmico. Entretanto em nenhuma destas é observado a existência de algum método matemático que auxilie na verificação da coerência da estrutura do modelo. Possivelmente a falta de uma ferramenta matemática de análise esteja atrelada ao fato de que os modelos expostos não apresentam um formalismo baseado em funções matemáticas, apesar de serem baseados em regras teóricas de utilização, refinamento e condensação.

A ausência de uma ferramenta de análise, de preferência computacional, capaz de verificar a coerência da estrutura de um modelo, exige que o projetista realize a verificação manualmente segundo os seus conhecimentos. Isto faz com que a confiabilidade do modelo esteja altamente vinculada à experiência e capacidade do projetista em modelar.

Diante deste quadro, apresenta-se neste capítulo os procedimentos de análise das propriedades da rede C/A, buscando a coerência estrutural, de fluxo de recursos e de dependência entre recursos do modelo. Também serão apresentados os procedimentos de condensação e análise de compatibilidade entre redes, os quais auxiliam o projetista no processo de projeto.

Desta forma, nesta seção serão apresentados os métodos capazes de analisar as seguintes propriedades da RdP C/A:

- Coerência estrutural: tem a finalidade de verificar se o modelo está correto estruturalmente, ou em outras palavras, se não existe nenhuma ligação canal/canal ou agência/agência e se os arcos estão coerentes com a classe dos recursos que o percorrem;
- Coerência de fluxo de recursos: tem como objetivo verificar se os recursos que percorrem a rede apresentam um fluxo coerente, ou seja, todo recurso que entra no sistema modelado, deve poder sair e vice e versa;
- Dependência entre recursos: verifica-se a dependência dos canais de saída para com os de entrada.

De acordo com a metodologia apresentada na seção 3.2, os métodos de análise são aplicados em duas frentes sobre a RdP C/A. A primeira quando o projeto está no início da fase conceitual (atividade 4 na Figura 3.3<sup>7</sup>), na qual o projetista está trabalhando na decomposição funcional e estrutural do equipamento a ser projetado. A segunda quando a descrição funcional e estrutural está em fase de conclusão (atividade 6 na Figura 3.3), ou seja,

---

<sup>7</sup> Todos os procedimentos descritos neste capítulo que fazem referência à Figura 3.3, referem-se especificamente às atividades expostas na coluna da esquerda.

quando é realizada a conversão de um modelo funcional específico em uma RdP C/A, por exemplo, a tradução de circuitos hidráulicos para redes C/A.

Nesta seção também são apresentados outros dois procedimentos, os quais são úteis para a tarefa de projeto e têm a finalidade de facilitar a comunicação entre as equipes envolvidas. São estes:

- Condensação da rede C/A: destina-se a síntese de modelos condensados, dando origem a uma rede reduzida composta por uma única agência e seus respectivos canais de entrada e saída (atividade 7 na Figura 3.3);
- Compatibilidade entre redes C/A: tem como objetivo facilitar a integração entre as equipes de projeto, verificando se o que uma equipe fornece/espera está de acordo com o que a outra equipe espera/fornece. Considerando que cada equipe gere uma rede condensada e que esta represente a porção do projeto sob responsabilidade, este método analisa a compatibilidade entre tais redes condensadas (atividade 7 na Figura 3.3).

A fim de contemplar mais situações do que era possível com o exemplo da turbina tipo Pelton (Capítulo 3), é utilizada neste capítulo a rede C/A da Figura 4.1.

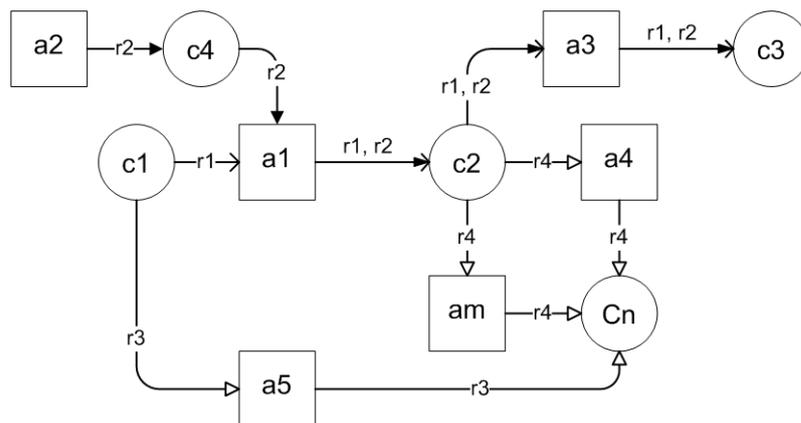


Figura 4.1. Exemplo em RdP C/A.

De acordo com a estrutura deste capítulo, primeiramente serão discutidos os procedimentos de análise das propriedades da rede C/A, ou seja, análise da coerência estrutural, de fluxo de recursos e dependência entre recursos. Na seqüência será mostrado o processo de síntese de redes condensadas e por fim, a análise de compatibilidade entre redes.

#### 4.1 Análise das propriedades da rede C/A

Apesar das redes C/A serem uma extensão das redes de Petri ordinárias, as propriedades que são verificadas nas redes de Petri comportamentais, assim como as técnicas de verificação, não se aplicam às redes C/A. Isto se deve principalmente ao fato de que os modelos representam perspectivas diferentes do sistema: a rede de Petri ordinária é um modelo comportamental, sendo utilizada para modelar o comportamento do sistema, en-

quanto que a rede C/A é um modelo funcional e estrutural. No entanto, o conceito básico de se realizar a análise a partir das matrizes de incidência anterior e posterior (para a RdP C/A:  $\kappa_{pre}$  e  $\kappa_{post}$ , respectivamente) é herdado da rede ordinária.

#### 4.1.1 Coerência estrutural

Entende-se que uma rede C/A possui coerência segundo a estrutura, caso não exista nenhuma ligação canal/canal ou agência/agência, como também que os recursos nomeados sobre os arcos estejam de acordo com o padrão de seta do arco (Figura 2.11).

Além do objetivo base de se obter um modelo coerente quanto à estrutura, este procedimento de análise também se destina a gerar lista com os canais e agências de suprimento e/ou consumo de recursos, a qual é pré-requisito para os outros processos de análise das propriedades da rede.

Sendo assim, a primeira etapa da análise estrutural consiste em mapear quais são os elementos de suprimento e/ou consumo de recursos de uma rede C/A ou, em outras palavras, descobrir quais são os canais e agências que fornecem e/ou consomem os recursos que fluem pela RdP C/A. Estes elementos de suprimento e/ou consumo de recursos são definidos como **elementos limites**, pois representam de certa forma os limites iniciais e/ou finais para o fluxo dos recursos.

##### 4.1.1.1 Mapeamento dos elementos limites.

O mapeamento dos elementos limites para uma rede **sem refinamento** é realizado segundo as seguintes quatro etapas:

1. Para cada linha de  $\kappa_{pre}$  e  $\kappa_{post}$ , aplicar a operação 'OU' (Apêndice A) entre as colunas de uma mesma linha. Obtendo-se dois vetores coluna, um referente à matriz  $\kappa_{pre}$  ( $VCKpre$ ) e outro à  $\kappa_{post}$  ( $VCKpost$ ). As dimensões dos vetores devem ser iguais ao número de canais da rede ( $n$ ), sendo que cada elemento é uma 'string' de comprimento igual ao número de recursos da rede ( $b$ ).

$K_{pre}$	a1	a2	a3	a4	a5	...	am		$VCK_{pre}$
c1	1000	0000	0000	0000	0010	...	0000	V	1 0 1 0
c2	0000	0000	1100	0001	0000	...	0001	V	1 1 0 1
c3	0000	0000	0000	0000	0000	...	0000	V	0 0 0 0
c4	0100	0000	0000	0000	0000	...	0000	V	0 1 0 0
...	...	...	...	...	...	...	...	V	...
cn	0000	0000	0000	0000	0000	...	0000	V	0 0 0 0

$K_{post}$	a1	a2	a3	a4	a5	...	am		$VCK_{post}$
c1	0000	0000	0000	0000	0000	...	0000	V	0 0 0 0
c2	1100	0000	0000	0000	0000	...	0000	V	1 1 0 0
c3	0000	0000	1100	0000	0000	...	0000	V	1 1 0 0
c4	0000	0100	0000	0000	0000	...	0000	V	0 1 0 0
...	...	...	...	...	...	...	...	V	...
cn	0000	0000	0000	0001	0010	...	0001	V	0 0 1 1

2. Mapear os canais limites: Para encontrar quais são os canais de suprimento e/ou consumo, subtrai-se *bit a bit* o vetor  $VCK_{pre}$  de  $VCK_{post}$ . O resultado é um vetor coluna ( $VCR_{es} = VCK_{pre} - VCK_{post}$ ). Para cada bit de uma 'string' de um elemento de  $VCR_{es}$  referente a um canal, tem-se que:

- o Se o bit for igual a '-1' então este é um **canal de consumo** para este recurso;
- o Se o bit for igual a '0', então este canal **não é percorrido**<sup>8</sup> por este recurso ou é um **canal interno**;
- o Se o bit for igual a '1', então este é um **canal de suprimento** para este recurso.

	$VCK_{pre}$	-	$VCK_{post}$	=	$VCR_{es}$
c1	1 0 1 0		0 0 0 0		1 0 1 0
c2	1 1 0 1		1 1 0 0		0 0 0 1
c3	0 0 0 0		1 1 0 0		-1 -1 0 0
c4	0 1 0 0		0 1 0 0		0 0 0 0
...	...		...		...
cn	0 0 0 0		0 0 1 1		0 0 -1 -1

Supondo  $E_{re} = \{r_1, r_2, r_3, r_4\}$ , tem-se para o exemplo da Figura 4.1 que:

- o c1: suprimento de  $r_1$  e  $r_3$ ;
- o c2: suprimento de  $r_4$ ;
- o c3: consumo de  $r_1$  e  $r_2$ ;
- o c4: canal interno;
- o  $c_n$ : consumo de  $r_3$  e  $r_4$ .

3. Para cada coluna de  $\kappa_{pre}$  e  $\kappa_{post}$ , aplicar a operação 'OU' entre as linhas de uma mesma coluna. Obtendo-se dois vetores linha, um referente à matriz

<sup>8</sup> Entende-se que o vocabulário 'percorrido' significa que um determina recurso entra e sai do elemento.

$\kappa_{pre}$  ( $VLKpre$ ) e outro à  $\kappa_{post}$  ( $VLKpost$ ). A dimensão dos vetores deve ser igual ao número de agências da rede ( $m$ ), sendo que cada elemento é uma 'string' de comprimento igual ao número de recursos da rede ( $b$ ).

$Kpre$	a1	a2	a3	a4	a5	...	am
c1	<b>1000</b>	0000	0000	0000	<b>0010</b>	...	0000
c2	0000	0000	<b>1100</b>	<b>0001</b>	0000	...	<b>0001</b>
c3	0000	0000	0000	0000	0000	...	0000
c4	<b>0100</b>	0000	0000	0000	0000	...	0000
...	...	...	...	...	...	...	...
cn	0000	0000	0000	0000	0000	...	0000
	V	V	V	V	V	V	V
$VLKpre$	1100	0000	1100	0001	0010	...	0001

$Kpost$	a1	a2	a3	a4	a5	...	am
c1	0000	0000	0000	0000	0000	...	0000
c2	<b>1100</b>	0000	0000	0000	0000	...	0000
c3	0000	0000	<b>1100</b>	0000	0000	...	0000
c4	0000	<b>0100</b>	0000	0000	0000	...	0000
...	...	...	...	...	...	...	...
cn	0000	0000	0000	<b>0001</b>	<b>0010</b>	...	<b>0001</b>
	V	V	V	V	V	V	V
$VLKpost$	1100	0100	1100	0001	0010	...	0001

4. Mapear as agências limites: Para encontrar quais são as agências de suprimento e consumo, faz-se a subtração *bit a bit* do vetor  $VLKpre$  do vetor  $VLKpost$ . O resultado é um vetor coluna ( $VLRes=VLKpre-VLKpost$ ). Para cada bit de uma 'string' de um elemento de  $VLRes$  referente a uma agência, tem-se que:

- o Se o bit for igual a '-1' então esta é uma **agência de suprimento** para este recurso;
- o Se o bit for igual a '0', então esta agência **não é percorrida** por este recurso ou é uma **agência interna**;
- o Se o bit for igual a '1', então esta é uma **agência de consumo** para este recurso.

	a1	a2	a3	a4	a5	...	am
$VLKpre$	1100	0000	1100	0001	0010	...	0001
	-						
$VLKpost$	1100	0100	1100	0001	0010	...	0001
	=						
$VLRes$	0000	0-100	0000	0000	0000	...	0000

Supondo  $E_{re} = \{r_1, r_2, r_3, r_4\}$ , tem-se para o mesmo exemplo que:

- o a2: agência de suprimento de  $r_2$ ;
- o a1, a3, a4, a5 e  $a_m$ : agências internas.

4.1.1.2 Mapeamento dos elementos limites, para redes hierárquicas.

Percebe-se que o procedimento apresentado para mapear os elementos limites não faz referência ao conjunto dos canais e agências externas, isto porque em uma rede sem refinamento tais conjuntos tendem a ser vazios.

Entretanto, quando se trata de uma rede refinada, os conjuntos  $C_{ex}$  e  $A_{ex}$  são normalmente, ora um ora outro, não vazios. Nestes casos, todos os elementos pertencentes ao conjunto de canais (ou agências) externos devem ser considerados como de suprimento e/ou consumo, visto que quando um elemento é refinado os elementos que farão parte dos conjuntos  $C_{ex}$  e  $A_{ex}$  deste refinamento são incorporados à rede justamente porque compõem à fronteira desta com as outras.

Sendo assim, a Figura 4.2 mostra através de uma subtração *bit a bit* como deve ser feito o mapeamento dos elementos limites quando  $C_{ex} \neq \{\}$ . Tem-se que a classificação dos canais externos como de suprimento e/ou consumo é realizada diretamente através dos vetores  $VCKpre$  e  $CVKpost$ .

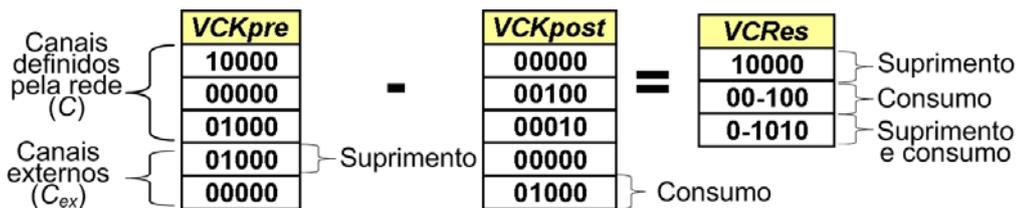


Figura 4.2. Mapeamento dos elementos limites, quando  $C_{ex} \neq \{\}$ .

A Figura 4.3, por sua vez, mostra como deve ser feito o mapeamento dos elementos limites quando  $A_{ex} \neq \{\}$ . Similarmente, tem-se que a classificação das agências externas como de suprimento e/ou consumo é realizada diretamente através dos vetores  $VLKpre$  e  $CLKpost$ .

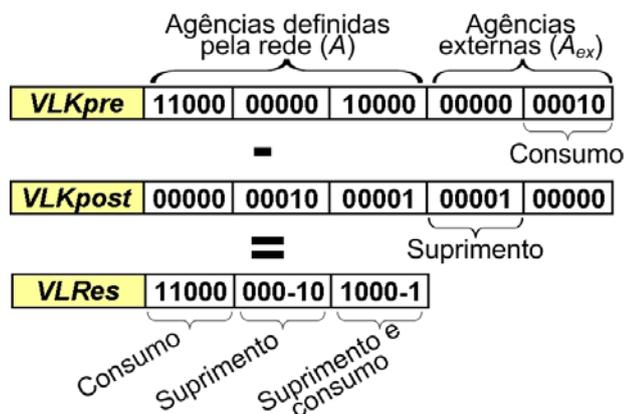


Figura 4.3. Mapeamento dos elementos limites, quando  $A_{ex} \neq \{\}$ .

O procedimento para o mapeamento dos elementos limites, seja para redes hierárquicas ou não, resulta em uma listagem com os elementos de suprimento e/ou consumo de recursos, a qual é obtida com base nas matrizes  $\kappa_{pre}$  e  $\kappa_{post}$  e pode não estar coerente com o que se deseja modelar.

Duas são as causas que fazem com que o mapeamento dos elementos limites não seja equivalente com o que o projetista esteja esperando:

- O processo de mapeamento define que um elemento é percorrido por um dado recurso (logo, o elemento não está na lista), quando na verdade o elemento deveria ser classificado como de suprimento e consumo deste recurso. Nestes casos o projetista deve incluir manualmente o elemento de suprimento e consumo à lista. O processo de mapeamento é incapaz de detectar estes tipos incoerências, visto que o resultado da operação de subtração *bit a bit* resultaria em zero;
- A rede gráfica contém erros e estes foram repassados para as matrizes. Para estes casos, a seção seguinte mostra como detectá-los e esclarece que estes erros podem ser de caráter estrutural.

#### 4.1.1.3 Análise estrutural

Tendo em vista que em um processo de projeto, o projetista consegue identificar e/ou indicar facilmente quais são os elementos limites do sistema, propõe-se que para analisar a coerência estrutural do modelo seja feita uma comparação entre os elementos limites indicados pelo projetista e os encontrados segundo o processo de varredura exposto na seção anterior (4.1.1 ).

A Figura 4.4 mostra alguns exemplos de incoerências estruturais que podem ser detectadas através da comparação entre o mapeamento dos elementos limites e os elementos indicados pelo projetista, sendo que a Figura 4.4 - (a) não condiz com o que se deseja modelar (Figura 4.4 - b).

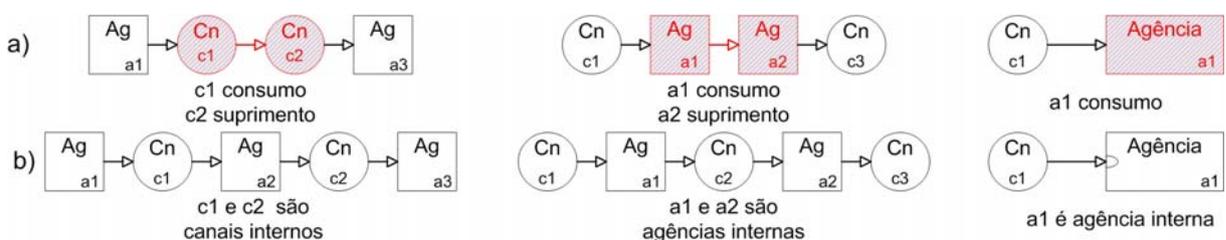


Figura 4.4. Incoerências estruturais. a) situações modeladas, b) situações desejadas.

Entretanto, conforme a Figura 4.5, existem situações em que a simples comparação, entre os vértices limites indicados pelo projetista e os encontrados pelo processo de mapeamento (seção 4.1.1.1 ), não é capaz de detectar as incoerências estruturais contidas no modelo. Nestes tipos de erros (Figura 4.5) é possível que o mesmo seja encontrado durante

a construção das matrizes  $\kappa_{pre}$  e  $\kappa_{post}$ , visto que não é possível arbitrar valores para os campos das matrizes que correspondam aos arcos incoerentes, ou a ligação passa despercebida e as matrizes desconsideram a existência dos arcos que ligam canal-canal e agência-agência. Logo, nos casos expostos na Figura 4.5 – (a), o erro pode ser detectado durante o processo de construção das matrizes ou o modelo matemático gerado desconsidera os trajetos que deveriam passar pelos elementos ‘c4’ e ‘a4’ (Figura 4.5 – b), sem perceber que os mesmos não foram inseridos à rede C/A.

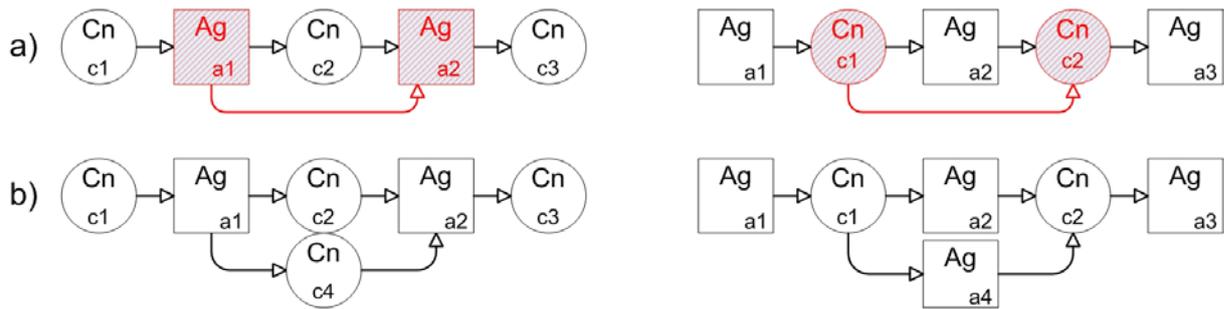


Figura 4.5. Incoerências estruturais que são detectadas com a construção do modelo a partir do modelo matemático. a) situações modeladas, b) situações desejadas.

Como alternativa a detecção de incoerências com estas características (Figura 4.5), indica-se a construção de um modelo gráfico a partir do modelo matemático e realizar a comparação entre estes, uma vez que o modelo matemático, gerado a partir de um modelo gráfico com erros, é correto quanto à estrutura, pois não formaliza arcos incoerentes.

Assim como nos casos expostos na Figura 4.5, esta dissertação não traz nenhuma técnica de que analise se os recursos nomeados sobre os arcos estejam de acordo com o padrão de seta do arco, se não pelo processo de comparação entre a rede modelada e a gerada a partir do formalismo matemático.

É importante ressaltar que as verificações realizadas nesta seção podem ser descartadas caso seja utilizado algum software que apresente meios de bloqueio aplicados diretamente à modelagem. Pois se o software tem a capacidade de bloquear a ligação de um canal com outro ou de uma agência com outra, o projetista fica impossibilitado de cometer estes erros e, por consequência, descarta-se a necessidade de verificação. O mesmo vale no caso de o software só permitir que um arco receba o nome de um determinado recurso, caso este seja compatível com o formato da seta que está sendo nomeada.

No entanto, como ainda não se tem notícia de algum software específico para modelagem em rede C/A, os conceitos tratados nesta seção auxiliam na detecção de incoerências estruturais e podem servir de base teórica para construção de uma ferramenta computacional.

De qualquer forma, o resultado esperado para o processo de análise de coerência estrutural é uma rede coerente quanto à estrutura e uma relação com os elementos limites, estando estes últimos de acordo com o que o projetista deseja modelar.

#### 4.1.2 Coerência de fluxo de recursos

A análise de coerência de fluxo de recursos tem como objetivo verificar se os recursos que percorrem a rede C/A apresentam um fluxo coerente, em outras palavras, significa dizer que o modelo, de certa forma, obedece à lei de conservação das massas proposta por Lavoisier em 1789, a qual estabelece que “nada se perde, nada se cria, tudo se transforma”. Adaptando para o caso de projeto de sistemas mecatrônicos, o que se deseja verificar é se um determinado recurso que entra no sistema tem condições de ser retirado ou, no caso contrário, se para um canal de consumo existe algum canal de suprimento de onde este recurso tenha se originado.

Como em uma rede C/A os canais representam o meio físico de entrada e saída de recursos (seção 2.3.5 ) e que um sistema interage com os outros através de seus canais de entrada e saída, define-se que quando um elemento limite não for um canal, ou seja, for uma agência (de suprimento e/ou consumo) esta pertence ao ambiente externo (exceto quando a agência é refinada). Os objetivos de se classificar uma agência como pertencente ao ambiente externo são em primeiro lugar, de criar regras que possibilitem a execução dos procedimentos de análise e em segundo, deixar claro que as agências que não pertencem ao sistema não estão sob análise, segundo os procedimentos descritos neste capítulo.

Desta forma, tendo em vista que uma rede representa um sistema ou parte dele, uma agência não pode pertencer ao sistema (representado pela rede) e ao ambiente externo. Isto implica que caso uma agência seja modelada como fonte de um ou mais recursos (agência de suprimento), esta não pode ser percorrida por outros recursos (exceto quando é refinada). O mesmo vale no caso contrário, se uma unidade ativa consome um ou mais recursos (agência de consumo), esta não pode ser percorrida por outros recursos (exceto quando é refinada). Observe que as regras impostas neste parágrafo não restringem que uma agência de suprimento não possa ser também de consumo.

Quando uma agência é refinada, esta pode pertencer ao sistema mesmo sendo classificada como de suprimento e/ou de consumo de algum recurso. Isto porque a identificação da agência como de suprimento ou de consumo, o que teoricamente a classificaria como pertencente ao ambiente externo, pode ser mascarada pelo refinamento, de forma que o elemento que supre ou consome o recurso pode não ser a agência em si, mas sim um canal definido pela rede refinada a partir desta.

Logo, para o caso de redes hierárquicas é possível que um canal de suprimento seja representado por uma rede e o de consumo por outra, desde que sejam seguidas algumas regras, conforme será explicado mais a frente (seção 4.1.2.1 ). Anteriormente à explicação para o caso de redes hierárquicas, será exposto o procedimento de análise para uma rede simples, sem hierarquia.

Como ponto de partida para a análise da coerência de fluxo de recursos, considera-se que o mapeamento dos elementos limites já tenha sido realizado e que estes correspondam aos que realmente se deseja projetar (seção 4.1.1 ).

Dando seqüência ao exemplo da Figura 4.1 e mantendo a suposição de  $E_{re} = \{r_1, r_2, r_3, r_4\}$ , tem-se que:

- o c1: suprimento de  $r_1$  e  $r_3$ ;
- o c2: suprimento de  $r_4$ ;
- o c3: consumo de  $r_1$  e  $r_2$ ;
- o c4: canal interno;
- o  $c_n$ : consumo de  $r_3$  e  $r_4$ ;
- o a2: agência de suprimento de  $r_2$ .

De posse dos dados acima seguem os passos para obter um modelo coerente com relação ao fluxo de recursos.

1. Acrescentar à categoria de canais de suprimento os canais que saem das agências de suprimento, pois como descrito anteriormente, a análise se fará com base nos canais.

Neste exemplo 'a2' é a única agência limite. Para encontrar os canais que saem desta agência é utilizada a matriz  $\kappa_{post}$ , pois é a matriz de incidência posterior que indica quais são os canais que saem das agências.

$\kappa_{post}$	a1	a2	a3	a4	a5	...	am
c1	0000	0000	0000	0000	0000	...	0000
c2	1100	0000	0000	0000	0000	...	0000
c3	0000	0000	1100	0000	0000	...	0000
c4	0000	0100	0000	0000	0000	...	0000
...	...	...	...	...	...	...	...
$c_n$	0000	0000	0000	0001	0010	...	0001

Logo, percebe-se que o canal 'c4' é o único canal que sai de 'a2', de forma que 'c4' deve ser acrescentado à lista dos canais de suprimento. Ou seja:

- o c4: suprimento de  $r_3$ .

Caso houvesse alguma agência limite que fosse classificada como de consumo, o processo para encontrar os canais de consumo se daria da mesma forma, no entanto, utilizar-se-ia a matriz  $\kappa_{pre}$ .

2. Para cada canal de suprimento, constrói-se um grafo de fluxo de recursos para cada recurso de entrada (O apêndice B apresenta o método para construção do grafo de fluxo de recursos).

O modelo estará coerente caso todo vértice do grafo seja capaz de chegar a um canal de consumo, condição que é verificada através do processo descrito na quarta etapa.

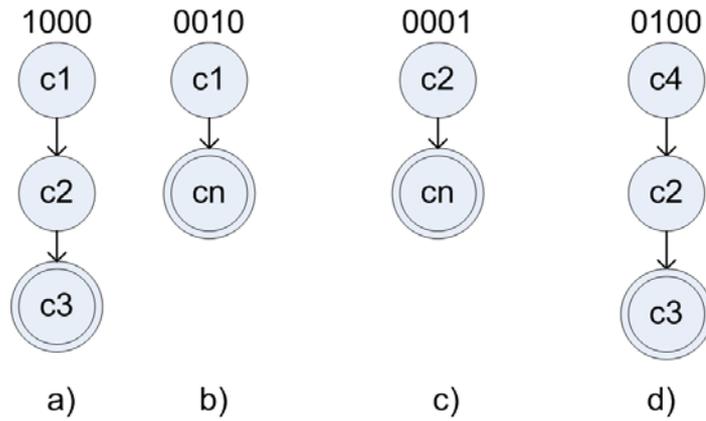


Figura 4.6. Grafo de fluxo de recursos.

Observa-se que o canal 'c1', por ser canal de suprimento de dois recursos, gera dois grafos de fluxo de recursos (Figura 4.6 - a e b), sendo um para cada recurso.

O grafo de fluxo de recursos garante que para que uma rede esteja coerente com relação ao fluxo de um determinado recurso, não basta existir um canal de suprimento e outro de consumo. É necessário que o recurso que entra possa chegar ao canal de consumo, em outras palavras, deve existir algum caminho ligando o canal de suprimento ao de consumo.

3. Mapear a relação dos consumidores para com os fornecedores. Esse mapeamento pode ser expresso por uma matriz de dependência conforme segue:

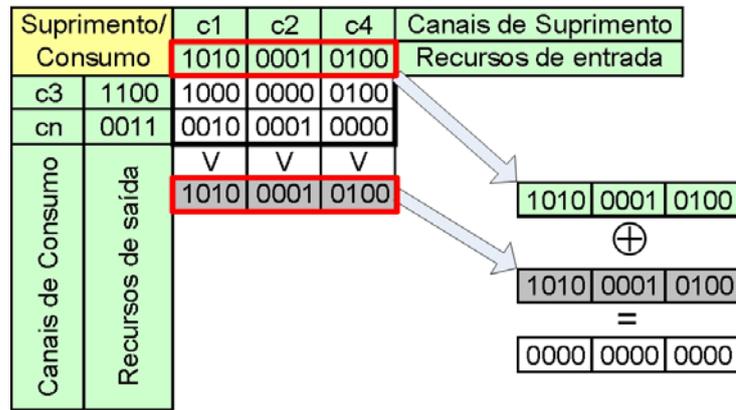
Suprimento/ Consumo		c1	c2	c4	Canais de Suprimento
		1010	0001	0100	Recursos de entrada
c3	1100	1000	0000	0100	
cn	0011	0010	0001	0000	
Canais de Consumo	Recursos de saída				

A matriz é gerada com base no resultado dos grafos de fluxo de recurso. Por exemplo, o elemento '10000' (linha 1 e coluna 1) corresponde ao grafo da Figura 4.6 – a.

Segundo a tabela, compreende-se que os recursos que entram pelo canal de suprimento 'c1' ('1010' –  $r_1$  e  $r_3$ ), saem por 'c3' ('1000' –  $r_1$ ) e 'cn' ('0010' –  $r_3$ ). Em sentido contrário, tem-se que os recursos que saem pelo canal de consumo 'c3' ('1100' –  $r_1$  e  $r_2$ ), entram por 'c1' ('1000' –  $r_1$ ) e 'c4' ('0100' –  $r_2$ ).

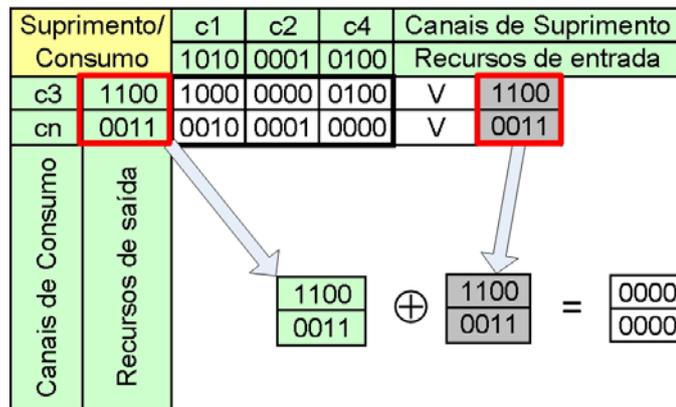
4. Analisar a coerência de fluxo de recursos. A análise é realizada a partir da tabela gerada na terceira etapa e consiste em verificar a condição de que todos os vértices superiores dos grafos de fluxo de recurso (suprimento) podem chegar a pelo menos um canal de consumo. Para isso faz-se uma operação

'OU exclusivo' (Apêndice A) entre o resultado de uma operação 'OU' entre todas as linhas da matriz e a linha que representa os recursos de entrada.



Para que o modelo esteja correto com relação ao fluxo de recursos o resultado da operação 'OU exclusivo' deve ser zero para todos os elementos.

5. Também deve ser verificada a condição inversa, se todos os canais de consumo apresentam algum canal de suprimento. O processo é semelhante ao apresentado no passo anterior, fazendo-se uma operação 'OU exclusivo' entre o resultado da uma operação 'OU' entre todas as colunas da matriz e a coluna que representa os recursos de saída.



Igualmente a etapa anterior, para que o modelo esteja correto com relação ao fluxo de recursos o resultado da operação 'OU exclusivo' deve ser zero para todos os elementos.

#### 4.1.2.1 Coerência de fluxo de recursos para redes hierárquicas

Ao estender os conceitos discutidos na seção anterior para o caso de redes hierárquicas, tem-se que o objetivo de se ter ao menos um canal de consumo para cada canal de suprimento e vice-versa para que a rede seja coerente, pode ser alcançado através de uma análise que abranja mais de um nível hierárquico. De forma que um determinado recurso possa ter seu canal de suprimento representado por uma rede e o de consumo por outra, sem a necessidade se quer que estas duas redes estejam no mesmo nível hierárquico.

Primeiramente será descrito o caso relacionado às agências que apesar de serem consideradas como de suprimento e/ou consumo, não pertencem ao ambiente externo. Nestes casos, como na Figura 4.7 e Figura 4.8, para que a rede seja considerada coerente é necessário que a agência em questão seja origem de um refinamento e que o refinamento contenha um canal que represente a classificação da agência. Por exemplo, se uma agência é considerada como sendo de suprimento para um recurso 'r1' e não pertence ao ambiente externo, porque é percorrida por um recurso 'r2', então esta agência deve ser *mãe* de uma rede refinada e a rede filha deve conter ao menos um canal que seja classificado como de suprimento para 'r1'. Conforme segue:

- Figura 4.7 – a/b: 'a1' é considerada como suprimento/consumo do recurso 'r1', mas não pertence ao ambiente externo porque é percorrida por 'r2'. A rede estará coerente se as seguintes condições:
  - Se 'c1' não for origem de refinamento ( $\delta(c1) = \textit{indefinido}$ ), ( $\delta(a1) = N_y = \{C_y, A_y, C_{exy}, A_{exy}, E_{rey}, \lambda_{rey}, \lambda_{cay}, K_{prey}, K_{posty}\}$ ):
    - Então a rede refinada a partir de 'a1' deve conter ao menos 1 canal ( $c_n$ ) que seja consumo/suprimento de 'r1'. Este canal deve ser ligado à 'c1' por pelo menos um caminho, ou seja:
      - a. Para Figura 4.7 – a: Deve ser possível criar um grafo de fluxo de recursos de 'c1' até um canal ' $c_n$ ' classificado como de consumo de 'r1'. Este canal deve ser definido pelo conjunto dos canais da rede refinada ( $c_n \in C_y$ );
      - b. Para Figura 4.7 – b: Deve ser possível criar um grafo de fluxo de recursos de um canal ' $c_n$ ' ( $c_n \in C_y$ ), definido como suprimento de 'r1', até 'c1'.
    - Ou, algum elemento da rede refinada deve ser novamente refinado e esta nova rede, de nível inferior a rede refinada, deve apresentar um canal com tais características.
  - Se 'c1' for um elemento refinado ( $\delta(c1) = N_i$ ), ( $\delta(a1) = N_y$ ):
    - As condições acima devem ser satisfeitas para todos os canais definidos pelo refinamento de 'c1' que atendam as seguintes condições:
      - a. Para Figura 4.7 – a: sejam precedentes à rede  $N_y$ .  

$$\{c \in C_i \mid \exists a \in A_y \text{ tal que } Kpre(c,a) \neq \emptyset\};$$

b. Para Figura 4.7 – b: sejam posteriores à  $N_y$ .

$$\{c \in C_i \mid \exists a \in A_y \text{ tal que } K_{post}(c, a) \neq \emptyset\}.$$

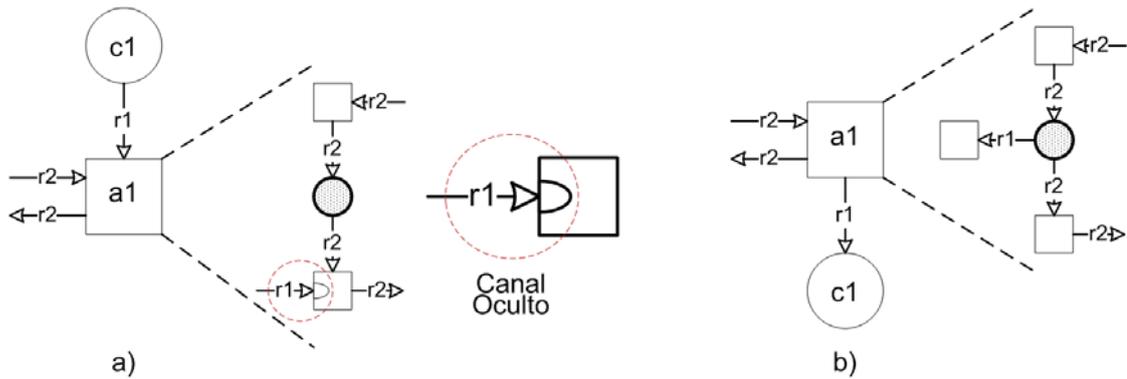


Figura 4.7. a) 'a1' considerada como de consumo, b) 'a1' considerada como de suprimento.

As redes a e b (Figura 4.8) são uma combinação das situações tratadas na Figura 4.7 – a e b. Entretanto as condições para que estas redes sejam consideradas coerentes podem variar, dependendo das características dos elementos refinados em 'a1' e 'a2', como também dos de 'c1', caso este seja refinado. As situações possíveis são as seguintes:

- Se 'c1' não for origem de refinamento ( $\delta(c1) = \textit{indefinido}$ ):
  - Se o refinamento de 'a1' apresentar algum canal de suprimento para o recurso 'r1', então o refinamento de 'a2' deve apresentar ao menos um canal de consumo para o recurso 'r1' (Figura 4.8 - a). Nesta situação, 'a1' é similar à Figura 4.7 – b e 'a2' à Figura 4.7 – a;
  - Se o refinamento de 'a1' não apresentar nenhum canal de suprimento para o recurso 'r1', então o refinamento de 'a2' não deve conter nenhum canal de consumo para este recurso (Figura 4.8 - b). Neste caso o recurso 'r1' é considerado com interno.
- Se 'c1' for um elemento refinado ( $\delta(c1) = N_i$ ):
  - Se o refinamento de 'c1' apresentar algum canal de consumo para o recurso 'r1', então o refinamento de 'a1' deve apresentar ao menos um canal de suprimento e 'a2' ao menos um canal de consumo para este recurso;
  - Se o refinamento de 'c1' apresentar algum canal de suprimento para o recurso 'r1', então o refinamento de 'a2' deve apresentar ao menos um canal de consumo, sendo que 'a1' pode ou não apresentar canais de suprimento para este recurso;

- Se o refinamento de 'c1' não apresentar nenhum canal de suprimento nem de consumo, então ficam valendo as situações para o caso de 'c1' não refinado.

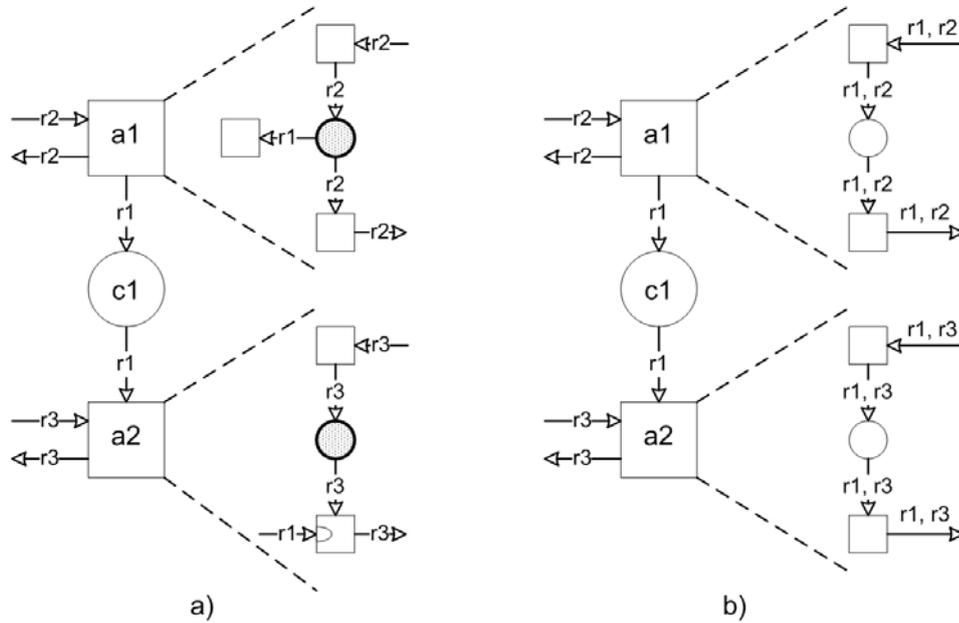


Figura 4.8. a) 'a1' suprimento de 'r1' e 'a2' consumo de 'r1', b) recurso 'r1' interno.

O resultado da análise de coerência de fluxo de recursos, seja para redes hierárquicas ou não, apenas garante que o fluxo de recursos dentro da rede C/A é coerente, ou seja, todo recurso que entra no sistema deve poder sair e todo recurso que sai tem que entrar. Entretanto, algumas situações não são possíveis de serem detectadas, nem por este método de análise, nem pelo método apresentado na seção 4.1.1. Por exemplo, na Figura 4.9, a não modelagem do arco que liga 'a1' a 'c4' não será detectado. Visto que ambos os modelos (Figura 4.9 – a e b) estão corretos quanto à estrutura e quanto ao fluxo de recursos.

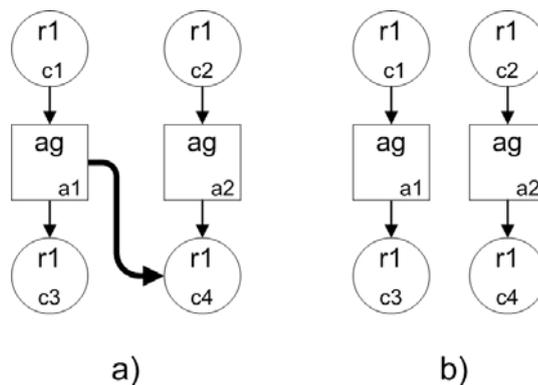


Figura 4.9. Condição que não é detectada pelas análises desta seção e da 4.1.1. a) Condição desejada, b) Condição modelada.

Pode-se dizer que exemplos como o exposto na Figura 4.9 são confusos quanto à natureza do erro, podendo ser consequência tanto de erros de projeto como de modelagem, o que dificulta a detecção. Para tanto, a análise de dependência entre recursos, que será

apresentada na seção seguinte, tem como uma das finalidades auxiliar o projetista na detecção deste tipo de erro.

#### 4.1.3 Dependência entre recursos

A análise de dependência entre recursos de uma RdP C/A tem o objetivo de mapear a relação de dependência dos canais de consumo para com os de suprimento, sendo esta relação independente do recurso, ou seja, um recurso da classe matéria pode depender de uma informação.

Sugere-se que os resultados da análise de dependência entre recursos sejam fornecidos em forma de uma tabela que correlacione os canais de suprimento com os de consumo. No entanto, independente da maneira como o resultado é exposto, as informações obtidas têm a finalidade de auxiliar o projetista na detecção de incoerências no modelo, que porventura não foram detectadas pelos processos de análise estrutural e de fluxo de recursos. Por exemplo, caso um determinado canal represente uma saída controlada, deve-se supor que este mesmo canal dependa de algum canal de suprimento que forneça algum tipo de informação de controle. Assim, caso segundo a tabela de dependência, esta saída controlada não dependa de nenhum canal de informação, algum erro pode ter sido cometido.

Outra aplicação desta técnica de análise é utilizar a tabela de dependência juntamente com o modelo condensado, pois assim o projetista terá informações sobre a rede refinada que não podem ser inferidas diretamente observando o modelo condensado.

Assim como na análise de fluxo de recursos, o procedimento de análise de dependência entre recursos considera que já tenham sido obtidos os elementos limites da rede e que os mesmos estejam coerentes com o sistema que se deseja modelar. Deste modo, seguindo o exemplo da Figura 4.1 e supondo  $E_{re} = \{r_1, r_2, r_3, r_4\}$ , tem-se que:

- c1: suprimento de  $r_1$  e  $r_3$ ;
- c2: suprimento de  $r_4$ ;
- c3: consumo de  $r_1$  e  $r_2$ ;
- c4: canal interno;
- $c_n$ : consumo de  $r_3$  e  $r_4$ ;
- a2: agência de suprimento de  $r_2$ .

O processo de análise de dependência é realizado segundo as seguintes três etapas:

1. Esta primeira etapa é exatamente igual à primeira da análise de coerência de fluxo de recursos (seção 4.1.2), a qual consiste em acrescentar à categoria de canais de suprimento e consumo os canais diretamente ligados às agências limites. Logo, conforme descrito na primeira etapa da seção 4.1.2, tem-se que:
  - c4: suprimento de  $r_3$ .

- Para cada canal de suprimento, constrói-se um grafo de fluxo de recursos, independente do recurso (Apêndice B).

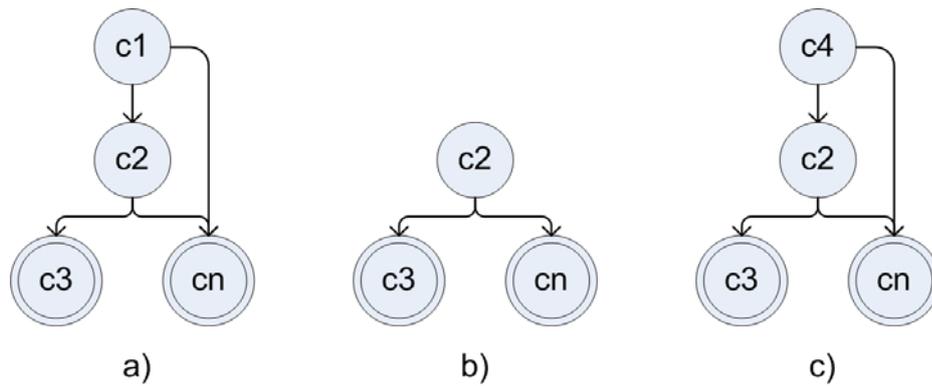


Figura 4.10. Grafo de fluxo de recursos, independente do recurso.

Deve ser observado que o grafo de fluxo de recursos desta etapa (Figura 4.10) é diferente do exposto na Figura 4.6, pois neste caso a construção do grafo é independente do recurso, o que significa que, por exemplo, matéria pode depender de energia. Desta forma, a construção do grafo é simplificada, pois ao se chegar a um canal que já tenha sido explorado, o grafo não se altera. Por exemplo, na Figura 4.10 o grafo a partir do canal ‘c2’ é idêntico para ‘a’, ‘b’ e ‘c’.

- Mapear a relação dos canais de consumo para com os de suprimento.

Suprimento/ Consumo	c1	c2	c4	Canais de Suprimento
c3	1	1	1	
cn	1	1	1	
Canais de Consumo				

Para o exemplo proposto os canais de consumo dependem de todos os de suprimento e os de suprimento influenciam todos os de consumo.

A construção desta tabela difere da construção da tabela exposta na terceira etapa da seção 4.1.2 na questão dos recursos, pois esta, por ser independente dos recursos, não necessita de uma ‘string’ binária para discriminá-los, bastando uma numeração ‘1’ para depende e ‘0’ para não depende.

A análise de dependência entre recursos em adição à estrutural e à de fluxo de recursos, encerram-se os processos de análise das propriedades da rede C/A, tratados nesta dissertação. As próximas seções deste capítulo não têm o objetivo realizar correções no modelo, mas sim apresentar outras formas de expor a rede C/A, a fim de facilitar a comunicação entre equipes envolvidas no processo de projeto.

## 4.2 Condensação da RdP C/A

A condensação de uma parte ou de toda a rede se torna necessária sempre que se deseje uma visão mais global do sistema. Uma perspectiva não tão detalhada é interessante quando se deseja obter um entendimento rápido e básico do sistema. A rede condensada pode ser utilizada, por exemplo, como meio de comunicação entre grupos distintos que estejam envolvidos com o mesmo projeto, ou, entre membros da equipe de projeto e o setor administrativo da empresa.

Pode-se dizer que segundo as finalidades deste processo de síntese, este está focado mais nas características estruturais do que na perspectiva funcional da rede C/A. Desta forma, a visão de recursos ou o fluxo deste não é tão importante quanto os conceitos de fronteiras físicas entre os sistemas.

Desta forma, será utilizado o termo **elementos de entrada e/ou saída** para se definir as fronteiras entre os sistemas, de maneira que o sentido de entrada e saída esteja vinculado mais com a questão de responsabilidade de fornecimento de recursos do que com propósitos de análise de coerência destes. De forma semelhante, será utilizado o termo **elemento interno**, para defini-lo como pertencente ao sistema que se deseja condensar, estando assim o conceito de interno desvinculado de qualquer aspecto de diz respeito ao fluxo de recursos.

Cita-se como sendo a maior aplicação desta proposta, a representação de uma RdP C/A, a principio refinada, por uma rede C/A composta por uma única agência e seus respectivos canais de entrada e saída.

Por exemplo, uma equipe responsável pelo projeto hidráulico pode ao final da fase de projeto conceitual, ou em qualquer ponto que julgue necessário, criar um modelo condensado que represente todo o sistema sob responsabilidade da equipe. Este modelo teria a finalidade de facilitar a comunicação, simplificando e documentando a exposição dos requisitos que a equipe fornece e espera receber dos outros grupos envolvidos com o projeto. Os recursos referentes aos canais de entrada são esperados pela equipe e os representados pelos canais de saída são disponibilizados às outras equipes (Figura 4.11).

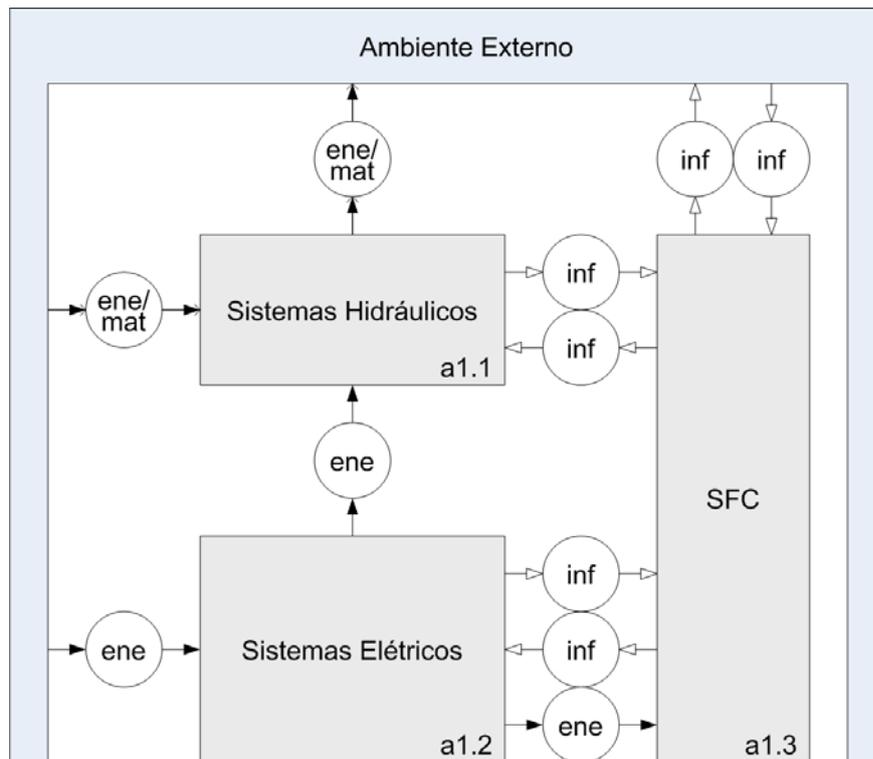


Figura 4.11. Processo de condensação segundo o propósito de integração entre as equipes.

A utilização do modelo condensado em conjunto com a matriz de dependência, obtida através do processo análise de dependência entre recursos (terceira etapa da seção 4.1.3 ), possibilita que, mesmo com uma rede simplificada, seja possível obter informações referentes ao modelo refinado. A tabela de dependência permite saber, por exemplo, quais entradas exercem influência sobre uma determinada saída.

Para que seja mantida a regra básica de que não é permitida ligações do tipo canal-canal e agência-agência, seguem as diretrizes para o processo de condensação:

- Condensação de um canal: Se a condensação for de um canal, então todas as conexões incidentes nas agências internas ao canal condensado, devem ser incidentes a canais internos, ou seja, permanecer dentro do canal condensado (Figura 4.12).

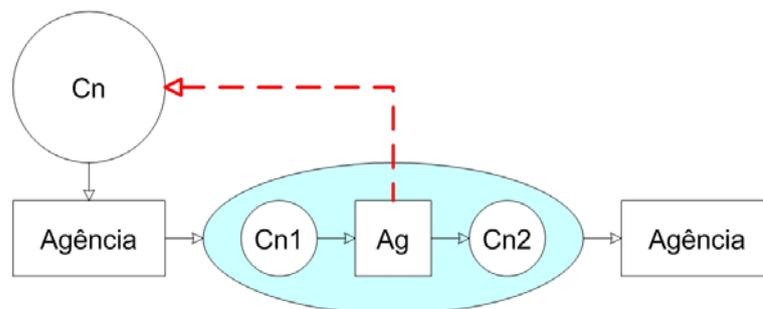


Figura 4.12. Composição de um canal (linha tracejada está errada).

- Composição de uma agência: Se a condensação for de uma agência, então todas as conexões incidentes nos canais internos à agência condensada, de-

vem ser incidentes a agências internas, ou seja, estar dentro da agência condensada (Figura 4.13).

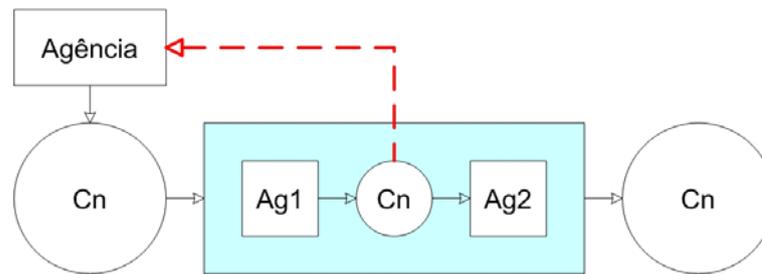


Figura 4.13. Composição de uma agência (linha tracejada está errada).

As regras expostas acima valem para qualquer processo de condensação, seja parcial ou total. No entanto, de acordo com o propósito de integração da comunicação entre as equipes envolvidas com o projeto, o processo de condensação consiste em compor todos os canais e agências internas em uma única agência que represente o sistema.

Este processo de síntese parte do princípio que os elementos de fronteira (entrada e/ou saída) do sistema já estão definidos, lembrando que os elementos de entrada e/ou saída são a fronteira entre a parte do sistema que se deseja condensar e o restante do sistema (agora considerados como pertencentes ao ambiente externo).

Os elementos de fronteira podem ser definidos manualmente ou adaptados da relação dos elementos de suprimento e/ou consumo (seção 4.1.1), isto é possível porque os elementos de fronteira são um subconjunto dos elementos limites. Para que seja possível utilizar a lista de elementos limites obtida na seção 4.1.1, deve-se retirar da lista os elementos que foram classificados como de suprimento e/ou consumo de um recurso, mesmo sendo internos para outro recurso (isto significa que os elementos retirados da lista, devem ser internos à parte do sistema que será condensada).

O processo de composição é alcançado segundo os seguintes passos:

1. A primeira etapa consiste em reorganizar as matrizes  $\kappa_{pre}$  e  $\kappa_{post}$  conforme a Figura 4.14. A ordem com que os canais e agências são colocados nas matrizes (Figura 4.14) tem por fim facilitar o entendimento e a realização do processo de condensação.

$K_{pre}$		Agências									
		Entrada			Saída			Internas			
Canais	Entrada	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
		xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
		xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
	Saída	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
		xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
		xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
	Internos	000	000	000	000	000	000	xxx	xxx	xxx	xxx
		000	000	000	000	000	000	xxx	xxx	xxx	xxx
		000	000	000	000	000	000	xxx	xxx	xxx	xxx
000		000	000	000	000	000	xxx	xxx	xxx	xxx	

$K_{post}$		Agências									
		Entrada			Saída			Internas			
Canais	Entrada	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
		xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
		xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
	Saída	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
		xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
		xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
	Internos	000	000	000	000	000	000	xxx	xxx	xxx	xxx
		000	000	000	000	000	000	xxx	xxx	xxx	xxx
		000	000	000	000	000	000	xxx	xxx	xxx	xxx
000		000	000	000	000	000	xxx	xxx	xxx	xxx	

Figura 4.14. Reordenar as matrizes  $K_{pre}$  e  $K_{post}$ .

Na Figura 4.14, os campos referentes aos canais e agências internas são os elementos que serão condensados e darão origem à agência que representa o sistema. Os campos das matrizes preenchidos com '000' indicam que os mesmos devem ser necessariamente zero, pois com isso se garante que os canais internos à agência condensada não apresentem ligações com o ambiente externo. Já os marcados com 'xxx' indicam que podem assumir qualquer valor.

- Esta etapa destina-se à geração das matrizes,  $K_{pre}$  e  $K_{post}$ , correspondentes à rede condensada. Primeiramente todas as linhas referentes aos canais internos são eliminadas, uma vez que não serão mostrados no modelo condensado. Depois é realizada uma operação 'OU' entre todas as colunas das agências internas, a fim de gerar uma única agência, que represente o sistema condensado, e suas ligações com os canais de entrada e saída. Segue a solução para o exemplo da Figura 4.1;

$K_{pre}$	a2	a1	a3	a4	a5	am
c1	0000	<b>1000</b>	0000	0000	<b>0010</b>	0000
c2	0000	0000	<b>1100</b>	<b>0001</b>	0000	<b>0001</b>
c4	0000	<b>0100</b>	0000	0000	0000	0000
c3	0000	0000	0000	0000	0000	0000
cn	0000	0000	0000	0000	0000	0000

$K_{pre}$	a2	Sistema
c1	0000	<b>1010</b>
c2	0000	<b>1101</b>
c4	0000	<b>0100</b>
c3	0000	0000
cn	0000	0000

$K_{post}$	a2	a1	a3	a4	a5	am
c1	0000	0000	0000	0000	0000	0000
c2	0000	<b>1100</b>	0000	0000	0000	0000
c4	<b>0100</b>	0000	0000	0000	0000	0000
c3	0000	0000	<b>1100</b>	0000	0000	0000
cn	0000	0000	0000	<b>0001</b>	<b>0010</b>	<b>0001</b>

$K_{post}$	a2	Sistema
c1	0000	0000
c2	0000	<b>1100</b>
c4	<b>0100</b>	0000
c3	0000	<b>1100</b>
cn	0000	<b>0011</b>

Figura 4.15. Operação 'OU' entre todas as colunas das agências internas.

- A última etapa, para finalizar o processo de condensação de uma rede, consiste em gerar a rede C/A gráfica a partir das matrizes obtidas na etapa pas-

sada. Segundo os objetivos de condensação, a RdP C/A deve possuir somente (Figura 4.16):

- Canais de entrada;
- Canais de saída;
- Uma agência condensada representando o sistema;
- Agências de fronteira integradas ao ambiente externo.

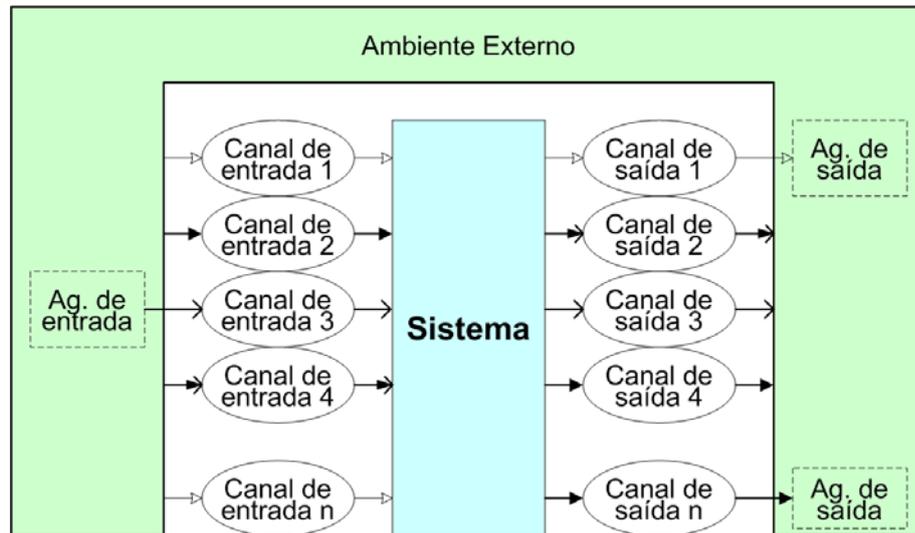


Figura 4.16. Elementos de uma rede condensada.

Para o caso do exemplo da Figura 4.1, o modelo gráfico (Figura 4.17) é gerado a partir das matrizes expostas na Figura 4.15.

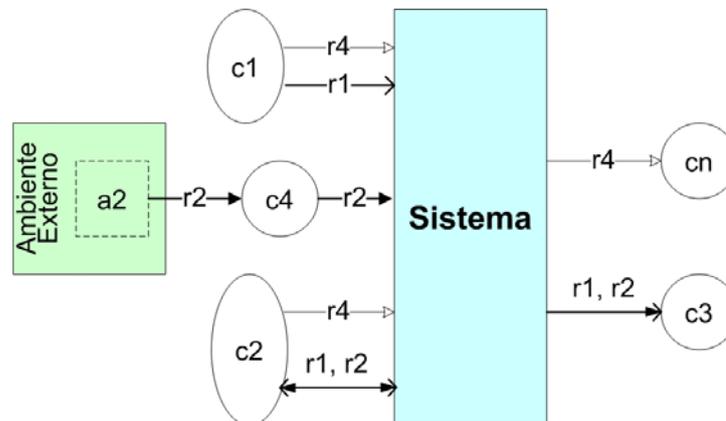


Figura 4.17. Modelo condensado da rede da Figura 4.1.

O processo para condensação de um canal é similar, no entanto, contrário ao exposto acima. A reorganização das matrizes pode ser efetuada da mesma maneira. No entanto, os campos a serem eliminados são os referentes às agências internas, sendo que os canais internos, desta vez, sofrerão a operação 'OU' entre linhas, a fim de formar um único canal que represente o sistema condensado.

Como dito anteriormente, uma das finalidades da condensação de uma rede C/A é utilizá-la para facilitar a comunicação entre as equipes envolvidas com um determinado projeto. Com a mesma finalidade e com sugestão de aplicação sobre a rede condensada, a seção seguinte define quais informações um canal de fronteira deve conter para que o mesmo possa ser diferenciado e caracterizado frente aos outros.

### 4.3 Compatibilidade entre redes C/A

Ao contrário do que foi apresentado nas outras seções deste capítulo, o que se discute nesta tem uma característica mais conceitual do que a exposição de um procedimento. Consiste basicamente em recomendações quanto às informações que os canais de entrada ou saída devem conter para que seja possível realizar a análise de compatibilidade.

Sendo assim, são apresentados os conceitos relacionados à análise de compatibilidade entre duas redes condensadas, com o intuito de garantir que a parte do sistema desenvolvida por uma equipe se encaixe no que outra equipe de projeto está esperando. Sob um ponto de vista prático, o objetivo da análise da compatibilidade entre redes é evitar que em projetos que envolvam mais que uma equipe, os recursos esperados/fornecidos por uma não sejam compatíveis com os fornecidos/esperados por outra. Logo, pretende-se evitar erros como, por exemplo, se uma equipe 'x' espera que uma equipe 'y' a forneça um canal de tensão com 24 V, o qual será utilizado para alimentação de um transdutor, a equipe 'y' não pode fornecer uma tensão diferente, como 220 V.

Para verificar a compatibilidade entre redes C/A, devem-se definir quais informações um canal deve possuir e como estas são apresentadas, sendo que tais informações podem ser documentadas segundo um padrão definido pela empresa ou seguir uma norma nacional ou internacional (ex.: ISO).

Sugere-se que um canal de entrada e/ou saída contenha:

- **Nome genérico:** que pode ser igual em mais de um canal e esteja vinculado a um significado de fácil entendimento, por exemplo, tensão, corrente, *string binária*, nível do óleo, peças tipo B, energia hidráulica, entre outros.
- **Nome específico:** que o diferencia dos outros e o localiza no projeto, utilizando, por exemplo, uma nomenclatura similar a sugerida na seção 3.4 ;
- **Propriedades e atributos:** devem ser expressas de forma padronizada e devem ser suficientes para caracterizar a forma física do canal e os recursos que o percorrem, por exemplo: 220 V, 0 a 4 mA, 8 bits, 2 fios, conector banana 2 mm, entre outros.
- **Equipe Origem/Destino:** estas informações são importantes para que seja possível detectar quais são as equipes que fornecem/consomem os recursos que percorrem os canais de entrada e/ou saída. Esta informação normalmente está implícita na estrutura da rede.

A Figura 4.18 expõe as regiões dos sistemas que devem ser esclarecidas pelas informações contidas nos canais de entrada e/ou saída. Logo, segundo a figura, um canal deve conter um nome genérico (EH, Oleo e Inf), um nome específico (c1, c2 e c3), as equipes de destino e origem (Sistema 1 e 2) e as propriedades físicas dos canais (bitola do fio ou duto, conectores, rosca do conector, local de encaixe, cor e rigidez) e atributos do recurso (pressão, vazão, tensão, corrente e potência).

A forma com que as informações referentes aos canais são expostas pode variar dependendo da norma de documentação adotada pela empresa, podendo ser expostas completamente no canal ou de forma conjunta no canal e em uma lista ou tabela.

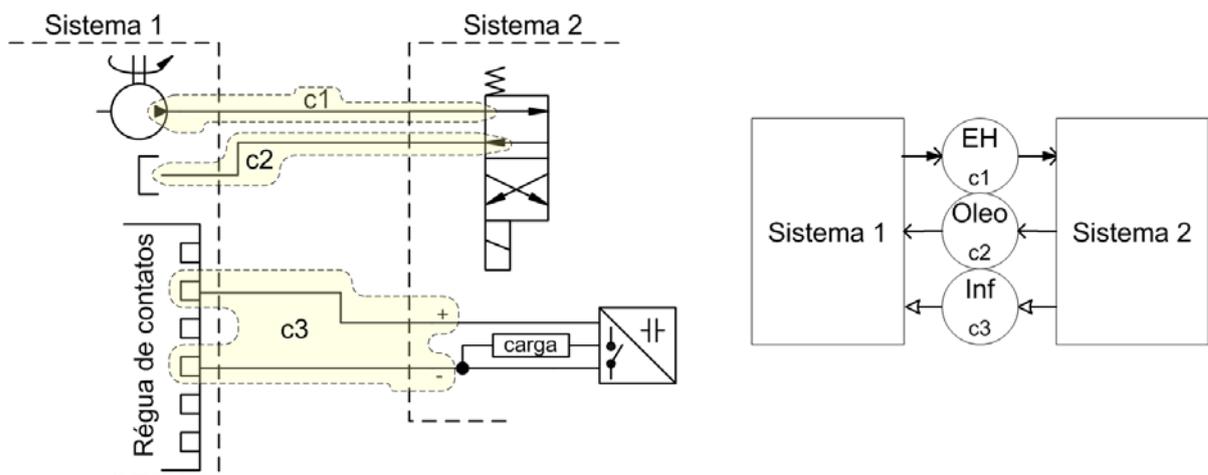


Figura 4.18. Informações que os canais de entrada e/ou saída devem conter.

Definido quais e como as informações estarão vinculadas aos canais de entrada e/ou saída, inicia-se o processo de verificação de compatibilidade entre duas redes condensadas, o qual consiste em realizar uma varredura sobre os canais de fronteira das duas redes e comparar as propriedades dos que apresentam nomes específicos equivalentes. Para que as redes sejam consideradas compatíveis é necessário que todos os canais com nomes específicos equivalentes apresentem as mesmas propriedades e atributos.

Segundo a proposta de refinamento apresentada na seção 3.4, é possível que duas redes distintas (considerando  $C \cup A \cup C_{ex} \cup A_{ex}$ ) tenham elementos com o mesmo nome específico, pois ao se refinar um elemento os vértices em contato direto com este são levados juntos e considerados pela rede refinada como elementos externos ( $C_{ex}$  ou  $A_{ex}$ ) (Figura 4.19).

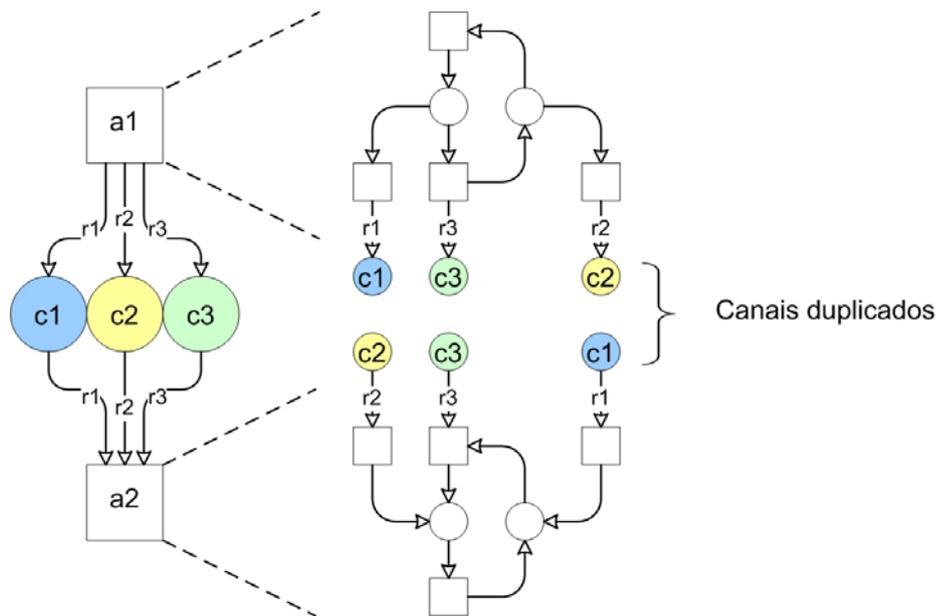


Figura 4.19. No processo de refinamento, os canais de fronteira são duplicados.

Relembrando que a análise de compatibilidade é sugerida para redes condensadas, as quais apresentam uma agência representando o sistema e respectivos canais de entrada e/ou saída, tem-se que todos os canais pertencentes aos conjuntos  $C$  e  $C_{ex}$  devem participar do processo de varredura. Desta forma, quando um canal (ou agência) de uma rede tiver o mesmo nome específico que um canal da outra, estes são equivalentes e devem apresentar as mesmas propriedades e atributos.

Com esta seção, que aconselha quais informações um canal de entrada e/ou saída deve conter a fim de possibilitar a análise de compatibilidade entre duas redes, encerram-se a descrição dos procedimentos matemáticos propostos para a rede C/A formal. Para um melhor entendimento das técnicas descritas neste capítulo, sugere-se a leitura do estudo de caso exposto no capítulo seguinte.

#### 4.4 Conclusões

O objetivo principal deste capítulo foi apresentar os métodos de análise e síntese de redes C/A, para assim comprovar que o formalismo proposto no Capítulo 3 possibilita a criação de procedimentos matemáticos para o tratamento do modelo. Buscou-se também com a proposta destes métodos, sistematizar o processo de análise das propriedades da rede, evitando que a coerência desta esteja vinculada somente à habilidade do projetista.

A seção 4.1 descreveu os métodos de análise das propriedades da rede C/A, os quais visam à coerência estrutural, de fluxo de recursos e de dependência entre recursos do modelo. Segundo a metodologia de projeto conceitual adotada (seção 3.2), estes métodos de análise são aplicados em duas frentes sobre a RdP C/A, sendo uma na quarta atividade e outra na sexta (Figura 3.3).

A análise de coerência estrutural (seção 4.1.1 ) tem como objetivo verificar se a rede não apresenta nenhuma ligação canal/canal ou agência/agência e se os arcos estão coerentes com a classe dos recursos que o percorrem. O método consiste em gerar uma lista com os canais e agências de suprimento e/ou consumo de recursos e compará-la com os elementos limites indicados pelo projetista. Uma alternativa complementar sugere gerar uma rede gráfica a partir do modelo matemático e confrontá-la com a rede gráfica sob análise. Desta forma, os resultados esperados para este processo de análise são: um modelo estruturalmente correto e uma relação com os elementos limites da rede.

A análise de coerência de fluxo de recursos, descrita na seção 4.1.2 , tem a finalidade de conferir se todo recurso que entra no sistema é capaz de sair e vice-versa. O método parte do princípio que a relação dos elementos limites já esteja disponível e que estes correspondam ao que realmente se deseja projetar (seção 4.1.1 ). Este procedimento é realizado com base nos canais, visto que estes representam os meios físicos por onde os recursos entram e saem do sistema, consistindo na criação de um grafo de fluxo de recursos (Apêndice B) para cada recurso de cada canal de suprimento. As informações dos grafos são sintetizadas em uma matriz e a partir desta, executa-se a análise da coerência do fluxo dos recursos. Caso seja verificado que todo recurso que entra através dos canais de suprimento pode chegar a pelo menos um canal de consumo e em sentido inverso, se todo recurso que sai pelos canais de consumo é fornecido por pelo menos um canal de suprimento, então a rede é considerada coerente com relação ao fluxo de recursos.

O método de análise de dependência entre recursos (seção 4.1.3 ), tem como objetivo auxiliar o projetista na identificação de incoerências que não são detectadas pelos processos anteriores (seções 4.1.1 e 4.1.2 ). O procedimento consiste em gerar um grafo de fluxo de recursos (apêndice B) para cada canal de suprimento. De forma semelhante à etapa passada, as informações dos grafos são convertidas em uma matriz, de forma a permitir que o projetista faça inferências sobre as relações de dependência entre os recursos dos canais de suprimento e de consumo.

Foram apresentados também neste capítulo outros dois métodos, sendo um para síntese de redes condensadas e outro para análise da compatibilidade entre redes. Estes métodos, ao contrário dos destinados à análise das propriedades da rede, têm a finalidade de auxiliar o projetista na atividade de projeto, atuando na facilitação da comunicação entre o pessoal envolvido. Nestes métodos, pode-se dizer que a perspectiva estrutural da rede é evidenciada mais que a funcional, sendo utilizado termos como elementos de entrada e saída e elementos internos, mais com o intuito de definir as fronteiras entre os sistemas do que para identificar o fluxo de recursos.

O método de condensação de redes C/A (seção 4.2 ), destina-se como o próprio nome sugere, à síntese de redes condensadas, as quais são úteis quando se deseja um entendimento rápido e superficial do sistema. Os procedimentos descritos para este método

explicam como efetuar a condensação sem infringir as regras básicas de construção de redes C/A (seção 2.3.5 ). Cita-se como a principal aplicação deste processo síntese, a condensação total de uma rede C/A, resultando em uma rede composta por uma agência, que representa o sistema, e seus respectivos canais de entrada e saída.

A análise de compatibilidade entre redes C/A (seção 4.3 ), último método proposto por esta dissertação, consiste basicamente em recomendações quanto às informações que um canal de entrada e/ou saída deve conter para seja possível discriminá-lo frente aos outros. Neste sentido, o método sugere que um canal de fronteira tenha um nome genérico, um específico, propriedades, atributos e equipes de origem e destino bem definidos. Como em um refinamento os elementos de fronteira são duplicados (seção 3.4 ), para que duas redes sejam compatíveis, basta verificar se os canais que apresentam nomes específicos equivalentes têm as mesmas propriedades e atributos.

Tendo em vista que os métodos apresentados são custosos quanto ao tempo, principalmente para o caso das propriedades estruturais, reforça-se a necessidade de um software que realize a análise e síntese de forma automática. Desta forma, os conceitos discutidos neste capítulo, apesar de ainda não comporem um software, podem ser utilizados como guia para a construção do mesmo, visto que foi definido o que e como os procedimentos devem ser executados pela ferramenta computacional.

Tendo em vista também que os métodos apresentados não foram testados exaustivamente (cobertura adequada), nem foram expostos a algum teorema que prove sua eficácia, considera-se que os métodos descritos são necessários, mas não suficientes, para garantir que o modelo gráfico está correto quanto ao que se deseja representar.

## CAPÍTULO 5

### ESTUDO DE CASO

Este capítulo tem a finalidade de avaliar os conceitos introduzidos nos dois capítulos anteriores, os quais dizem respeito à formalização da estrutura e métodos de análise e síntese da rede C/A. As técnicas sugeridas serão aplicadas sobre o modelo de uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH<sup>9</sup>) a fim de avaliar a eficiência e real utilidade dos métodos, para por fim, validar os assuntos tratados nesta dissertação.

Como exemplo para o estudo de caso, optou-se pela modelagem da PCH Passo do Inferno. A escolha foi apoiada tanto na disponibilidade de informações, quanto nas dimensões e características multitecnológicas do sistema, fatos estes que classificam a tarefa de projeto como de médio a grande porte. Desta forma, torna-se possível e atraente a utilização de um modelo central que facilite o entendimento do sistema e a comunicação entre equipes de projeto.

A necessidade em alcançar elevados níveis de qualificação e padronização fez com que as PCHs seguissem as tendências das empresas dos setores industriais e de serviços, passando a considerar a automação de seus processos como algo imprescindível. No caso da central hidrelétrica Passo do Inferno, o processo de automação do regulador de velocidade foi projetado e executado pela Reivax Automação e Controle<sup>10</sup>. Esta empresa tem parcerias com o Laship e disponibilizou informações suficientes para uma modelagem mais detalhada dos sistemas hidráulicos que atuam na regulação de velocidade, incluindo transdutores e a unidade de potência hidráulica.

Este capítulo está estruturado de acordo com a seqüência de atividades sugerida pela metodologia exposta na Figura 3.3. A seção 5.1 faz uma introdução contextual sobre a central hidrelétrica Passo do Inferno, com o intuito de auxiliar à compreensão da exposição dos métodos de análise das propriedades (seção 4.1 ), síntese de redes condensadas (seção 4.2 ) e análise da compatibilidade entre redes (seção 4.3 ). Estes métodos são aplicados sobre a central hidrelétrica, a fim de gerar um modelo geral coerente, capaz de representar todos os subsistemas de uma PCH típica. Os detalhamentos ficam restritos à unidade de potência hidráulica e aos sistemas hidráulicos que atuam na regulação da velocidade.

---

<sup>9</sup> Para julgamento no Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE, está em vigor a Portaria nº 136 limitando a PCH somente pela potência em 30 MW (Filho et al., 1998 *apud* Paes, 2001).

<sup>10</sup> <<http://www.reivax.com.br/>>

### 5.1 Central hidrelétrica Passo do Inferno

A Usina do Passo do Inferno foi a primeira hidrelétrica projetada e construída pela Comissão Estadual de Energia Elétrica (CEEE), tendo iniciado sua operação em Setembro de 1948. Foi também, a primeira Usina a ser automatizada pela CEEE, em Janeiro de 1992. A central hidrelétrica está localizada no município de São Francisco de Paula/RS e aproveita o potencial do Rio Santa Cruz, através de uma barragem de alvenaria de pedra com perfil Creager, com 5,00 m de altura e 74,00 m de comprimento. Quanto à origem, a turbina é de fabricação sueca (KMW) e o alternador canadense (GE) (Wikipédia, 2007). Segue a ficha técnica da PCH.

<b>PCH Passo do Inferno - CEEE</b>			
<i>Dados da turbina</i>			
Turbina tipo:	Francis (Horizontal)	Vazão de projeto:	4,5 m <sup>3</sup> /s
Potência:	1786 Hp	Número de pás móveis:	14
Rotação:	600 rpm/60 Hz		
Queda bruta:	40,0 m		
<i>Dados do Gerador</i>			
Potência:	1.665 kVA	Corrente nominal campo:	2,5 A
Corrente:	231 A	Fator de potência:	0,8
Tensão de saída:	4,16 kVCA	TP's:	4200/120 VCA
Tensão campo nominal:	125 VCC	TC's:	300/5 A
<i>Dados da Excitatriz (Rotativa)</i>			
Tensão máxima de saída:	125 VCC	Potência:	18 kW
Corrente máxima de saída:	144 A	Corrente campo nominal:	2,5 A
Tensão campo nominal:	17 VCC		
<i>Outros dados</i>			
Transformador de excitação:	500 VA	4160/65 VCA	
Serviço auxiliar CA:	127/220 VCA	60 Hz	
Serviço auxiliar CC:	24 VCC		

Para que se tenha um entendimento mais claro sobre os modelos que serão apresentados neste capítulo, esta seção, além de expor as características técnicas e geográficas da central Passo do Inferno, faz uma pequena introdução sobre os conceitos que tangem uma turbina do tipo Francis.

Dentre as duas classes de turbinas hidráulicas, ação e reação, empregadas em centrais hidrelétricas, a turbina Francis pertence à primeira, sendo que nesta a água chega ao rotor radialmente. A turbina pode ser montada na vertical ou horizontal e o que diferencia entre tais disposições são os tipos de apoios solicitados por cada uma das montagens (Paes e De Negri, 2002).

A Figura 5.1 mostra uma turbina Francis disposta verticalmente e evidencia as dimensões do 'caracol', 'anel distribuidor' e 'rotor'. Esta figura também facilita o entendimento do funcionamento do 'servomotor', o qual age no 'anel distribuidor' através da guia de ope-

ração. O anel, por sua vez, está ligado às 'pás guias' que conduz a água em direção às pás do rotor, fazendo-o girar.

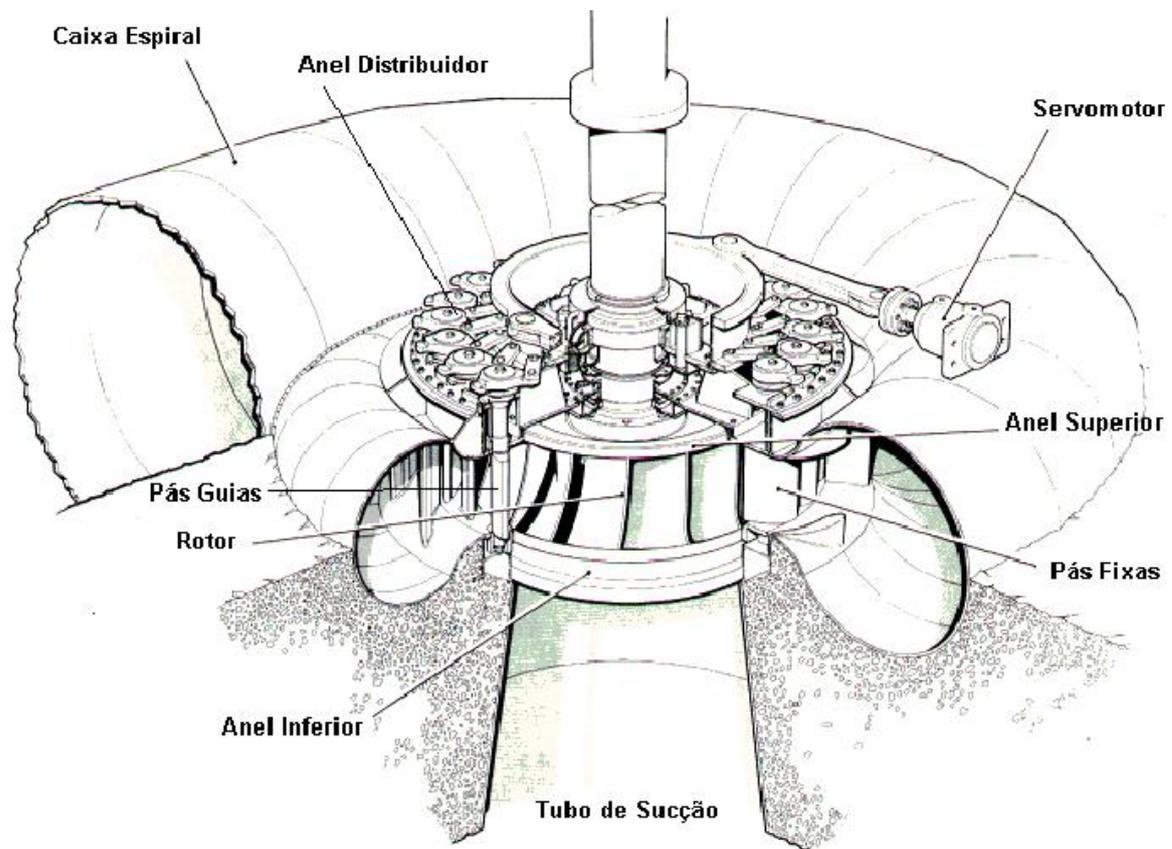


Figura 5.1. Turbina Francis disposta verticalmente (Littler, 1996 *apud* Paes, 2001).

A função do caracol (*caixa espira* - Figura 5.1) é conduzir radialmente a água, oriunda da barragem, através de sua seção transversal variável (*caixa espiral*). A seção é inicialmente maior e vai reduzindo conforme se aproxima ao rotor, com isto aumenta a energia cinética da água e por conseqüência do rotor, que por fim é transformada em energia mecânica na turbina.

O tubo de sucção, localizado na saída da turbina, apresenta uma seção transversal significativamente maior que a de entrada, cuja finalidade é evitar a dissipação de energia no momento em que a água sai da turbina, de modo que a eficiência da mesma seja maximizada, chegando a 94-95% segundo Macintyre (1983 *apud* Paes, 2001).

## 5.2 Modelagem em rede C/A

De acordo com a metodologia adotada (Figura 3.3), inicialmente será apresentada a modelagem referente às primeiras atividades do processo de projeto de um novo equipamento (atividades 1 e 2 da Figura 3.3), as quais sugerem o estabelecimento de um modelo funcional/estrutural global do sistema com base na seleção de uma tecnologia de solução dentre as possíveis. Vale ressaltar que os modelos apresentados nesta seção para exempli-

ficar tais atividades iniciais são de caráter ilustrativo, já que independente das tecnologias de solução enumeradas, será escolhida a que já é utilizada pela central.

O primeiro passo consiste em representar o objetivo global do sistema por um ou mais canais, os quais representam a disponibilidade do recurso desejado e devem ser modelados com base nas especificações de projeto. Os canais são complementados com os meios capazes de gerá-los, ou seja, modelam-se as agências, as quais representam as tecnologias utilizadas para disponibilizar o recurso.

Uma vez que as agências tenham sido modeladas e ligadas aos canais, torna-se possível definir uma série de alternativas de solução (retângulos com bordas arredondadas), de forma que a decisão por uma tecnologia de solução dentre as definidas (retângulos duplos com bordas arredondadas), possibilita a decomposição do modelo, incluindo a este, novos canais e agências.

Neste exemplo, o objetivo global é representado na Figura 5.2 por um único canal (c1), o qual modela a necessidade de energia elétrica (EE). Este é complementado pela agência 'a1', que indica que o recurso pode ser obtido por um gerador, o qual por sua vez, pode ser projetado segundo diferentes tecnologias, como: combustão, eólica, nuclear e hidrelétrica.

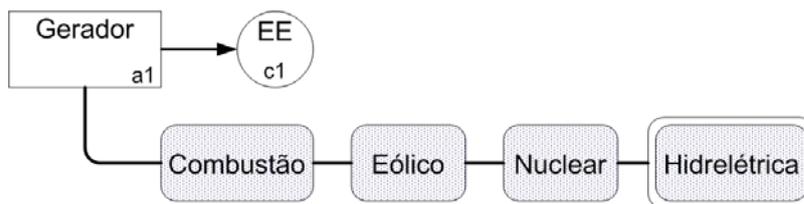


Figura 5.2. Estabelecimento de um modelo funcional/estrutural global para o sistema - 1.

A opção por hidrelétrica, gera dois novos canais (c2 e c3 – água). A Figura 5.3 modela estes canais e dá continuidade ao processo de projeto, indicando que a energia contida na água pode ser captada através de ondas ou barragem.

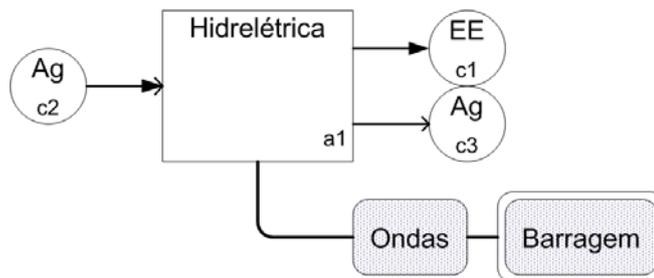


Figura 5.3. Estabelecimento de um modelo funcional/estrutural global para o sistema – 2.

A Figura 5.4 expõe a possibilidade de refinamento do modelo devido à escolha por barragem, a decomposição inclui a rede C/A mais um canal (c4) e uma agência (a2). A figura também expõe alguns tipos de turbinas possíveis de serem utilizadas (Francis, Kaplan e Pelton).

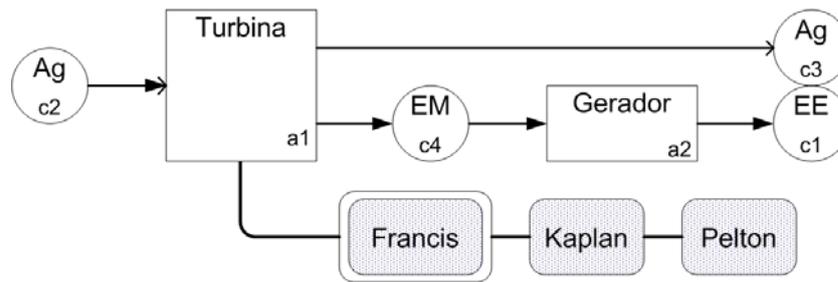


Figura 5.4. Estabelecimento de um modelo funcional/estrutural global para o sistema – 3.

Observe que a partir deste ponto a distinção entre tecnologia e princípio de solução não é clara, visto que os tipos de turbinas podem tanto ser considerados como tecnologia quanto princípio (seção 3.2 ). Logo, os próximos refinamentos, com exceção dos elementos originados por essa escolha (Figura 5.5), são referentes à atividade 3 da Figura 3.3, a qual propõe o refinamento do modelo em paralelo com a definição de princípios de solução.

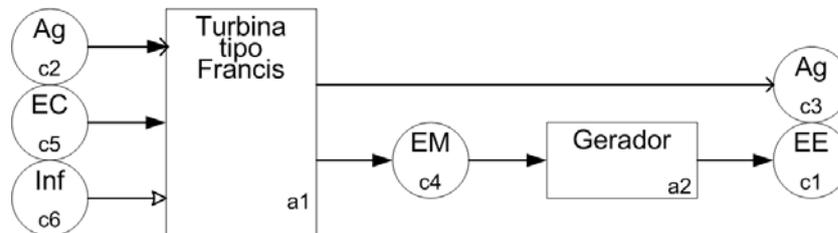


Figura 5.5. Estabelecimento de um modelo funcional/estrutural global para o sistema – 4.

A evolução da Figura 5.5 para a Figura 5.6 é marcada por mais de uma mudança. Primeiro é representado o refinamento da turbina (a1 em Figura 5.5), a qual é decomposta em sete novos elementos (internos ao pontilhado - Figura 5.6).

Posteriormente são inseridos os sistemas, até então desconsiderados, referentes ao fornecimento de potência para sistema distribuidor (a6) e controladores de velocidade e tensão (a7 e a8, respectivamente). Estes novos sistemas estão ligados a princípios de solução, dentre os quais é optado por uma unidade de potência hidráulica para controle de velocidade e pelo RTVX100 como regulador de velocidade e tensão (Figura 5.6).

Com o propósito de discriminar os recursos da classe energia, começa-se a colocar os nomes dos recursos nos arcos. Com isto se garante que a energia aplicada pela unidade potência hidráulica no sistema distribuidor não é utilizada como fonte de energia para a geração de energia elétrica (Figura 5.6). Segue a listagem dos recursos:

- Ag: água como matéria;
- Eut: energia utilizável;
- Ec: energia de controle;
- Inf: informação.

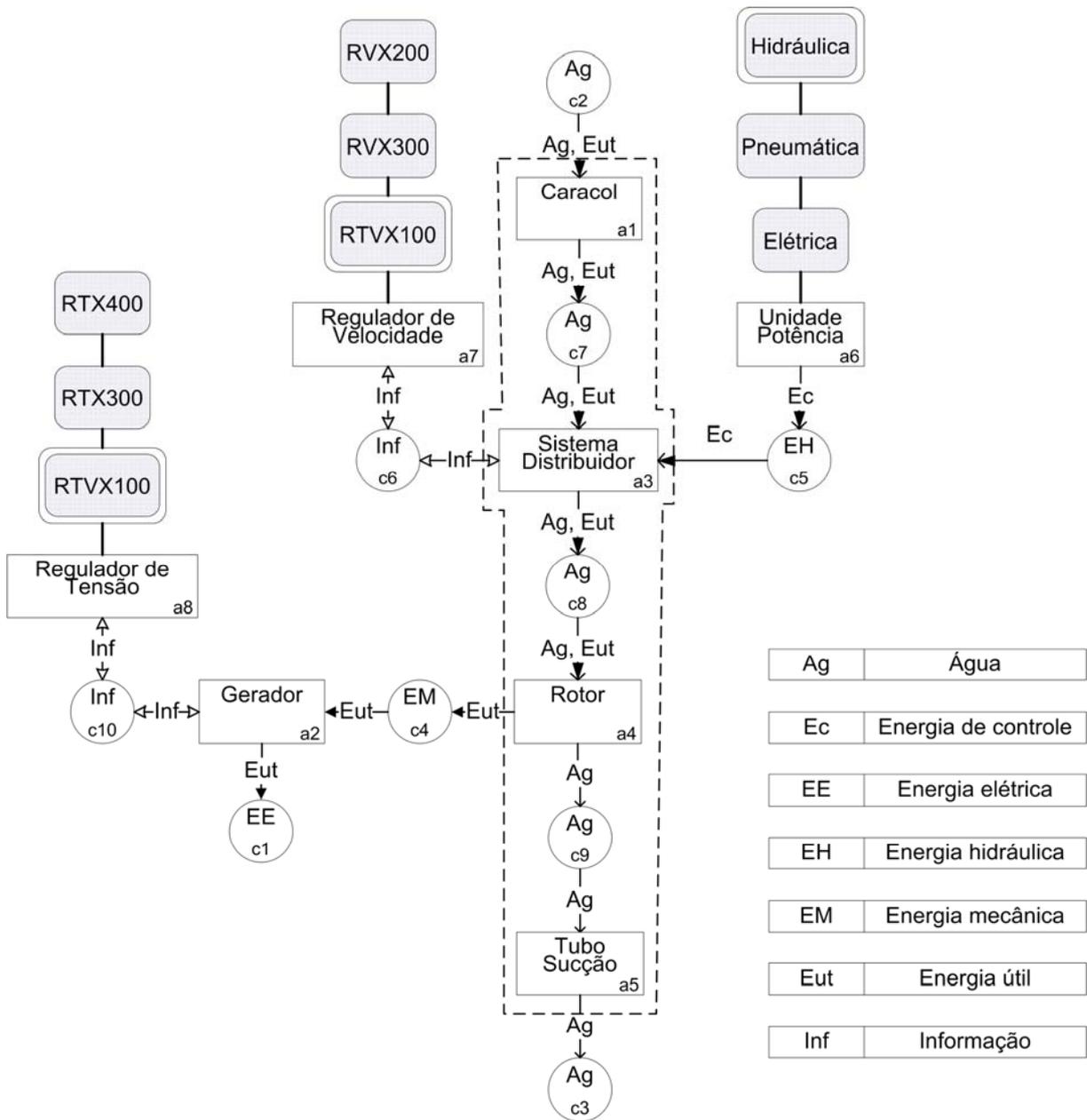


Figura 5.6. Refinamento do grupo gerador.

Optou-se pela não discriminação dos recursos da classe informação, decisão tomada com a finalidade de simplificar as matrizes, visto que com a ausência de um software as mesmas têm que ser preenchidas manualmente. Entretanto, mesmo com tal simplificação o objetivo de validação dos estudos continua sendo atendido, já que todos os conceitos discutidos são aplicados ao exemplo.

Uma discriminação entre os recursos da classe informação se torna mais vantajosa quando se deseja representar sistemas que processam informação, como protocolos de comunicação e redes de computadores. Para o caso da central hidrelétrica é atribuída maior ênfase, por opção, aos sistemas que processam energia e matéria.

A próxima rede C/A (Figura 5.7) é definida como sendo a rede inicial, o que significa que, segundo o formalismo proposto para redes hierárquicas (seção 3.4), esta é a primeira

a ser formalizada ( $N_0$ ) e dará origem a todos os outros refinamentos. O processo de decomposição, após a definição da rede inicial, continua praticamente o mesmo, ou seja, definição de princípios de solução para as agências, seleção de um dentre eles e modelagem dos novos canais e agências que são consequência da escolha. Entretanto, a definição de uma rede inicial implica em iniciar a formalização matemática, de forma que, ao contrário do que era feito antes, os refinamentos futuros necessariamente originam novas redes, as quais graficamente podem ser representadas juntas, mas matematicamente pertencem a redes distintas.

A rede inicial é importante, em um primeiro momento, para aqueles não familiarizados com a área, pois através desta se pode ter uma visão geral do sistema, sem a necessidade de enfatizar detalhes. Pode-se utilizá-la também para visualizar, rapidamente, as ligações entre os subsistemas e assim inferir, por exemplo, sobre a região afetada por uma decisão em particular.

Dando seqüência ao processo de refinamento, a rede C/A, representada pela Figura 5.7 e definida como rede inicial, é, primeiramente, consequência da seleção dos princípios de solução definidos através da Figura 5.6 (RTVX100 e UPH), segundo os quais são fixadas as agências 'a6' e 'a7' e os canais 'c5', 'c6' e 'c10'. Já os outros elementos (de 'c11' a 'c23' e a8) acrescentados ao modelo são consequência de refinamentos posteriores, ou seja, são canais ou agências que foram esquecidos em primeira instância, mas descobertos após uma visão mais detalhada do sistema.

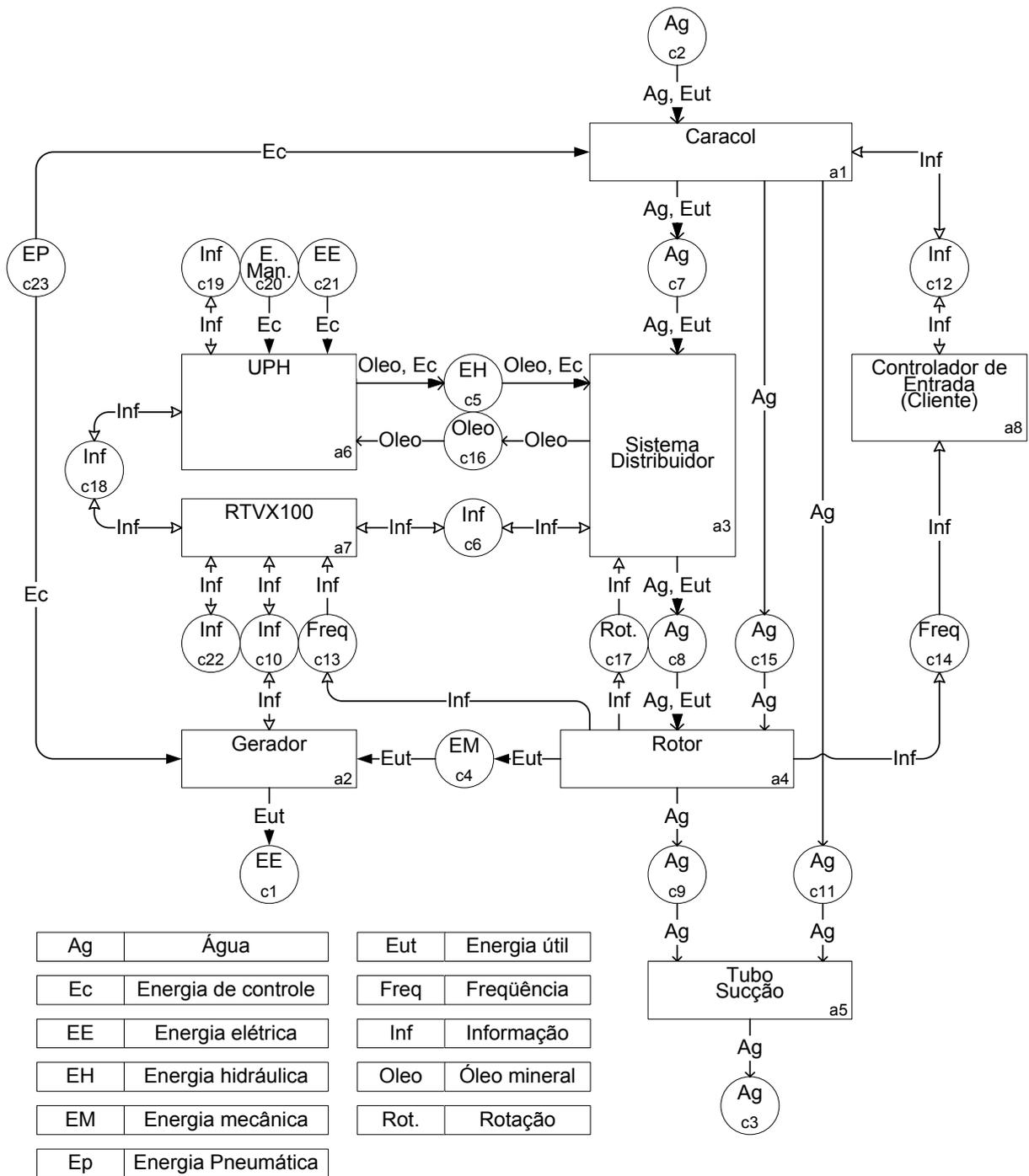


Figura 5.7. Rede inicial -  $N_0$ .

Na Figura 5.8, os elementos dentro do tracejado representam os elementos que são definidos pela rede refinada ( $C$  e  $A$ ). Neste exemplo a rede representa o refinamento do sistema distribuidor. Os vértices fora do tracejado representam os elementos externos ( $C_{ex}$  e  $A_{ex}$ ) e devem ser considerados na construção das matrizes  $K_{pre}$  e  $K_{post}$ .

Desta forma, a Figura 5.8 expõe o refinamento do sistema distribuidor (a3 na Figura 5.7), o qual tem a finalidade de controlar a potência transferida da água ao rotor, e consequentemente a potência gerada pela turbina. O controle é realizado através de um conjunto

de pás móveis (a3.4 na Figura 5.8), as quais são orientadas pelo regulador de velocidade por meio de um atuador hidráulico (servomotor). Com a alteração do ângulo de entrada em relação às pás do rotor, consegue-se direcionar a água que chega através do caracol, com intuito de diminuir perdas.

A rede C/A (Figura 5.8) é composta pelos subsistemas do regulador de velocidade (a3.1), sobrevelocidade (a3.2), parada (a3.7), servomotor (a3.3), transdutores (a3.5 e a3.6) e anel e pás (a3.4), os quais podem ser visualizados também no circuito hidráulico da Figura 5.22.

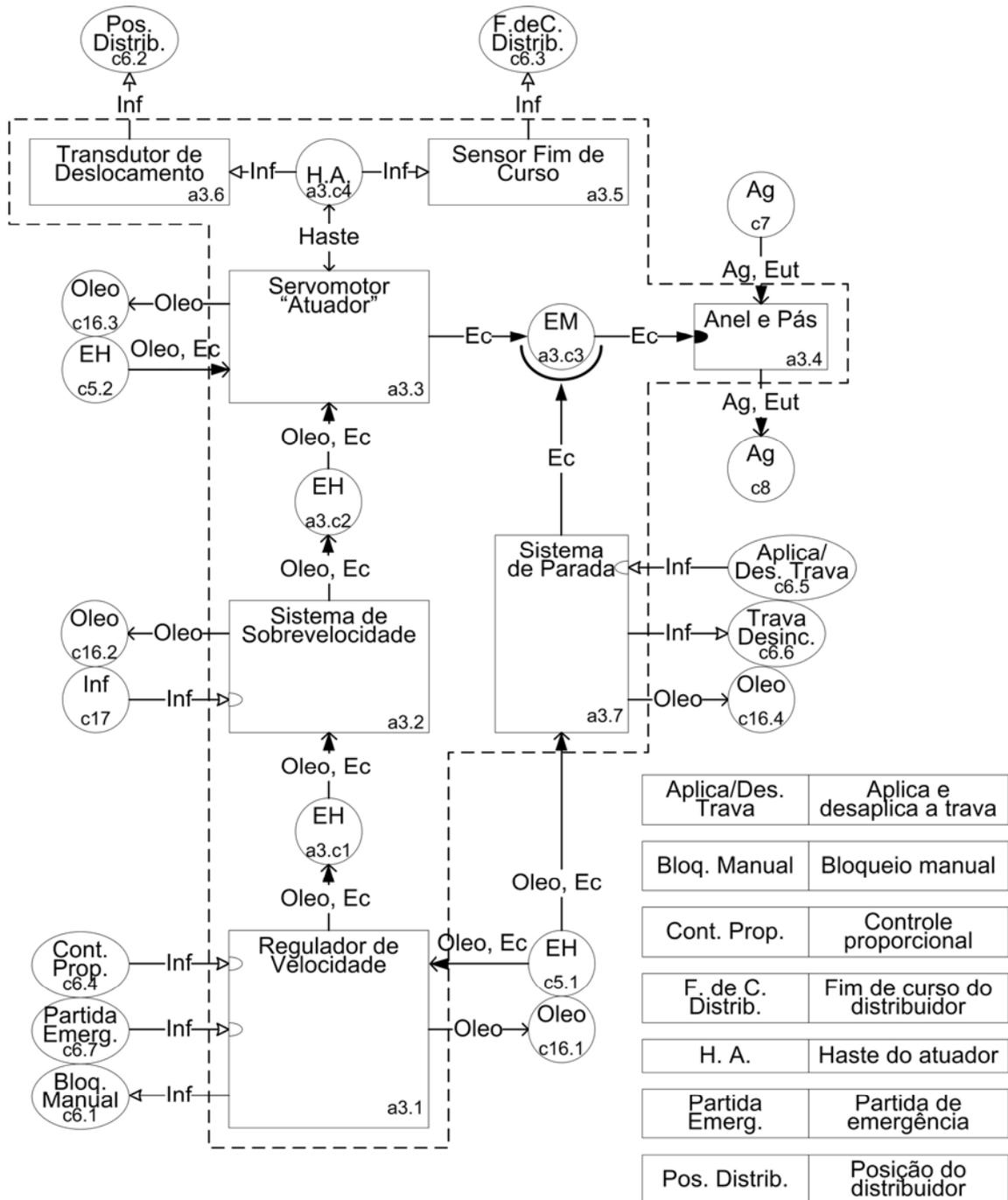


Figura 5.8. Refinamento do sistema distribuidor -  $N_{11}$  (a3 na Figura 5.7).

O Regulador Integrado de Tensão e Velocidade RTVX100 (a7 na Figura 5.7) é segundo a REIVAX Automação e Controle, uma solução integrada para regulação de velocidade e controle de excitação de geradores/turbinas. Nesta dissertação, só será modelada a parte relacionada ao controle de velocidade, cujo refinamento é mostrado na Figura 5.9.

O refinamento do regulador de velocidade (Figura 5.9) evidencia, entre outros aspectos, como o usuário pode interagir com o equipamento, podendo ser através do painel frontal (a7.2) ou simples leitura do estado do sistema pelos sinalizadores locais (a7.4). A rede permite saber também quais sinais, seja leitura ou comando, estão ligados diretamente às entradas e saídas da CPU (a7.1), quais são condicionados (a7.5 e a7.7) e quais são processados através de circuitos elétricos (a7.6) baseados em relês.

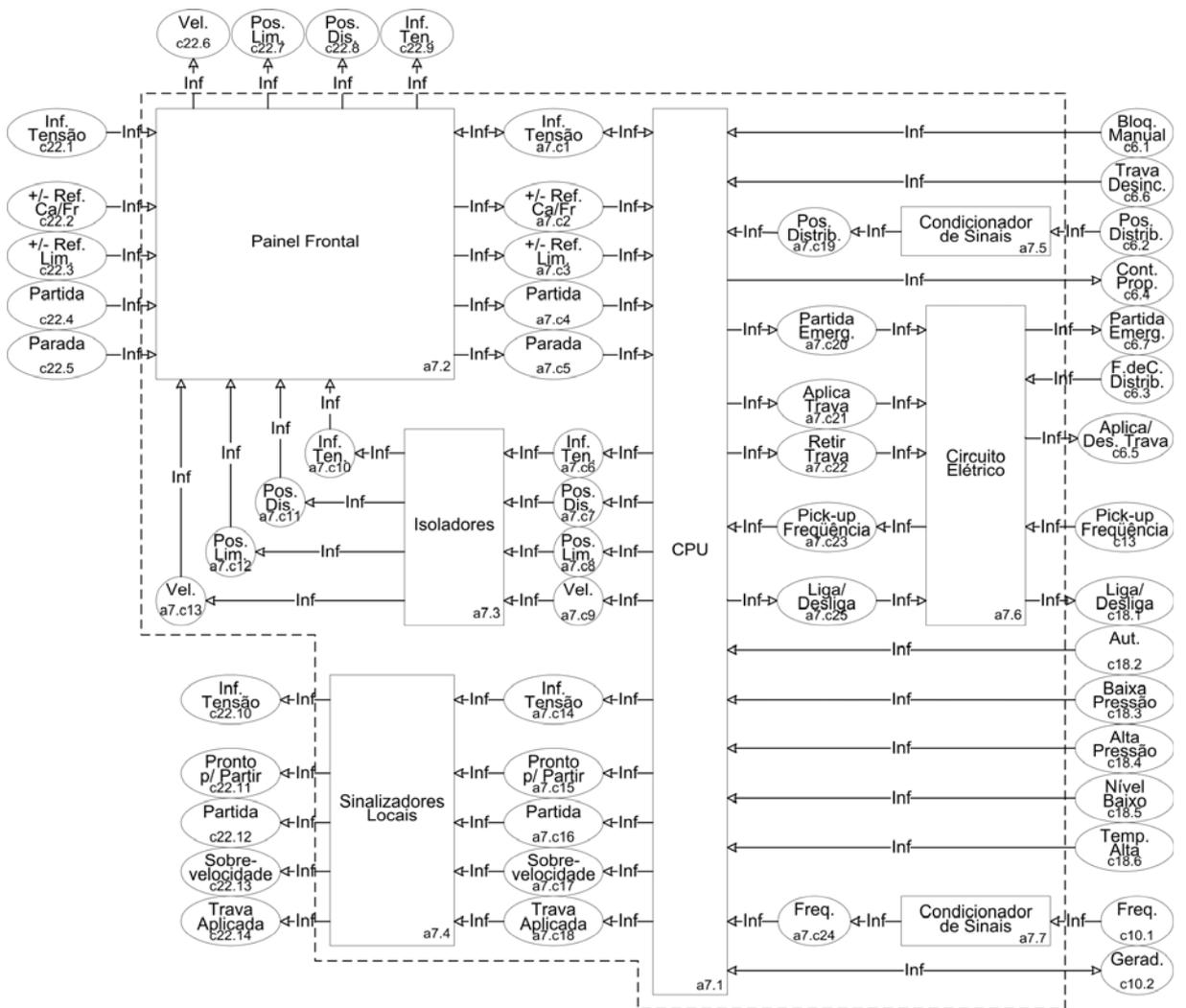


Figura 5.9. Refinamento do RTVX100 -  $N_{14}$  (a2 na Figura 5.7).

A representação do regulador de velocidade, ou de qualquer outro sistema com características multitecnológicas, por redes C/A, tem como principal objetivo facilitar a compreensão da estrutura do sistema e a função de cada equipamento. Desta forma, acredita-se que o entendimento do sistema se torna mais rápido, se comparado com os casos em que

só se têm disponíveis os modelos específicos, como circuitos elétricos, hidráulicos ou linguagem de programação, principalmente para aqueles que não são especialistas na área.

Segundo a proposta de formalização (seção 3.4), o refinamento do sistema deve partir da rede inicial e pode ser repetido, teoricamente, de maneira indefinida, dependendo do grau de detalhamento desejado. Sendo assim, o processo de decomposição segue até o ponto onde o projetista opte por interromper a representação do sistema por Rede C/A, acreditando ser mais vantajoso utilizar diagramas específicos. Logo, existirá uma relação de compromisso e sensatez por parte do projetista, sendo ele quem deve estabelecer as fronteiras.

Com o intuito de deixar mais leve a leitura desta dissertação, entretanto sem prejuízos a exposição das informações, alguns refinamentos foram expostos no apêndice C.

### 5.3 Formalização das redes C/A

Após a modelagem do sistema até o ponto definido pelo projetista como conveniente, a metodologia adotada (Figura 3.3) sugere a aplicação dos métodos de análise das propriedades da rede C/A, a fim de avaliar se os modelos estão coerentes (atividade 4 – coluna da esquerda). Entretanto, para que a análise, segundo os métodos apresentados no Capítulo 4, seja possível é necessário converter as redes gráficas em modelos matemáticos equivalentes (Capítulo 3).

Considerando que as redes C/A apresentadas neste capítulo e no apêndice C seguem um processo de refinamento, as mesmas são consideradas como redes hierárquicas e devem ser formalizadas por um conjunto de triplas. Mais especificamente, com a construção da árvore de refinamentos (Figura 5.10), observa-se que a hierarquia pode ser modelada por duas triplas, uma representando a rede inicial e seus refinamentos diretos (região pontilhada 1 =  $R_{ca0}$ ) e outra que considera o rotor (Fig. 9 – apêndice C) como a rede de maior nível hierárquico ( $N_{12}$ ) e seus respectivos descendentes (região pontilhada 2 =  $R_{ca12}$ ).

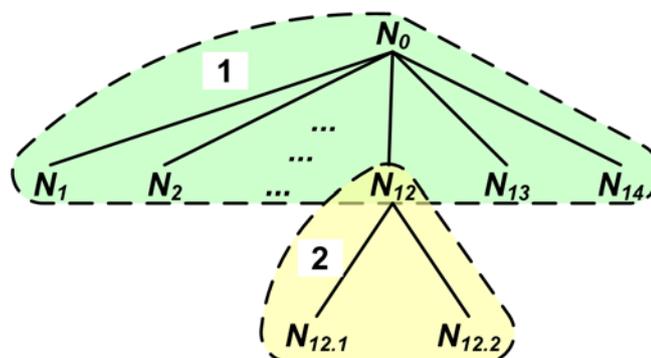


Figura 5.10. Árvore de refinamentos para as redes C/A da central hidrelétrica Passo do Inferno.

Tendo em vista que os modelos matemáticos são equivalentes às redes C/A gráficas e que o procedimento de conversão está descrito no Capítulo 3, os mesmos não serão apresentados no contexto desta dissertação, estando expostos no apêndice D.

A tabela abaixo serve de guia para compreender como os modelos estão distribuídos nesta dissertação.

MODELO GRÁFICO			MODELO MATEMÁTICO	
Nome	Figura	Local	Nome	Local
Rede inicial	Figura 5.7	Seção 5.2	$N_0$	Apêndice D
Ref. caracol	Fig. 7	Apêndice C	$N_9$	Apêndice D
Ref. do grupo gerador	Fig. 8	Apêndice C	$N_{10}$	Apêndice D
Ref. do sistema distribuidor	Figura 5.8	Seção 5.2	$N_{11}$	Apêndice D
Ref. do rotor	Fig. 9	Apêndice C	$N_{12}$	Apêndice D
Ref. da UPH	Fig. 12	Apêndice E	$N_{13}$	Apêndice D
Ref. do RTVX100	Figura 5.9	Seção 5.2	$N_{14}$	Apêndice D
Ref. do mancal 'a4.2'	Fig. 10 – (a)	Apêndice C	$N_{12.1}$	Apêndice D
Ref. do mancal 'a4.3'	Fig. 10 – (b)	Apêndice C	$N_{12.2}$	Apêndice D

As redes não expressas na tabela ( $N_1$  a  $N_8$ ) se referem ao refinamento dos canais e estão expostas graficamente no terceiro apêndice (C), entretanto sem o formalismo matemático equivalente.

#### 5.4 Análise

De acordo com a proposta para a abordagem do problema (início deste capítulo), a central hidrelétrica foi modelada por completo sob uma visão não muito refinada, cujos modelos estão expostos na seção 5.2 e no apêndice C. A partir desta seção, será dado ênfase aos sistemas que compõem o regulador de velocidade, de forma que, o processo de análise das propriedades da rede será executado sobre as redes inicial ( $N_0$  - Figura 5.7) e sistema distribuidor ( $N_{11}$  - Figura 5.8), o qual atua diretamente no controle de velocidade.

Os procedimentos de análise, conforme exposto no Capítulo 4, são executados sobre as matrizes  $\kappa_{pre}$  e  $\kappa_{post}$  binárias (seção 3.3), sendo que para construir as seqüências de *bits* que compõem os campos das matrizes, optou-se por ordená-los segundo a ordem com que os recursos são listados no conjunto  $E_{re}$  (Apêndice D).

5.4.1 Análise das propriedades da rede inicial -  $N_0$  (Figura 5.7).

Dando início ao processo de análise das propriedades da rede  $N_0$ , relembra-se que o primeiro método consiste em realizar a análise de coerência estrutural da rede, procedimento este que inicia com o mapeamento dos elementos limites e é composto por quatro etapas (seção 4.1.1.1).

**Mapeamento dos canais de suprimento e/ou consumo** – primeira e segunda etapa da análise estrutural.

A Figura 5.11 expõe o resultado da primeira ( $VLK_{pre}$  e  $VLK_{post}$ ) e segunda ( $VLRes$ ) etapas, os quais foram executados sobre as matrizes  $\kappa_{pre0}$  e  $\kappa_{post0}$  (Apêndice D) na forma binária, com base na seqüência  $E_{re0} = \{Ag, Oleo, Eut, Ec, Inf\}$ . Desta forma, a Figura 5.11 mostra que o mapeamento dos canais limites encontrou quatro canais de suprimento (c2, c20, c21 e c23) e dois de consumo (c1 e c3).

	<b>VLK<sub>pre</sub></b>	<b>VLK<sub>post</sub></b>	<b>VLRes</b>	
c1	00000	00100	<b>00-100</b>	Consumo de Eut
c2	10100	00000	<b>10100</b>	Suprimento de Ag e Eut
c3	00000	10000	<b>-10000</b>	Consumo de Ag
c4	00100	00100	00000	
c5	01010	01010	00000	
c6	00001	00001	00000	
c7	10100	10100	00000	
c8	10100	10100	00000	
c9	10000	10000	00000	
c10	00001	00001	00000	
c11	10000	10000	00000	
c12	00001	00001	00000	
c13	00001	00001	00000	
c14	00001	00001	00000	
c15	10000	10000	00000	
c16	01000	01000	00000	
c17	00001	00001	00000	
c18	00001	00001	00000	
c19	00001	00001	00000	
c20	00010	00000	<b>00010</b>	Suprimento de Ec
c21	00010	00000	<b>00010</b>	Suprimento de Ec
c22	00001	00001	00000	
c23	00010	00000	<b>00010</b>	Suprimento de Ec
<b><math>E_{re0} = \{Ag, Oleo, Eut, Ec, Inf\}</math></b>				

Figura 5.11. Mapeamento dos canais limites de  $N_0$ .

**Mapeamento das agências de suprimento e/ou consumo** – terceira e quarta etapa da análise estrutural.

A Figura 5.12, por sua vez, expõe os resultados obtidos com a execução das últimas duas etapas do processo de mapeamento dos elementos limites, as quais são responsáveis pelo mapeamento das agências. Segundo esta figura, existe três agências de consumo (a1, a2 e a3) e uma de suprimento (a4).

Observa-se que nenhuma das agências, classificadas como de suprimento ou consumo, pertence ao ambiente externo, já que todas são percorridas por outros recursos que não o que permitiu tal classificação (Figura 5.12). Por exemplo, 'a2' é mapeada como sendo uma agência de consumo de 'Ec' ('00010' – Energia de controle), mesmo sendo percorrida pelos recursos 'Eut' e 'Inf' ('00101' – Energia útil e Informação).

	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8
<b>VLKpre</b>	10111	00111	11111	10100	10000	01011	00001	00001
<b>VLKpost</b>	10101	00101	11101	10101	10000	01011	00001	00001
<b>VLRes</b>	<b>00010</b>	<b>00010</b>	<b>00010</b>	<b>0000-1</b>	00000	00000	00000	00000

Consumo de Ec

Consumo de Ec

Consumo de Ec

Suprimento de Inf

$E_{re0} = \{Ag, Oleo, Eut, Ec, Inf\}$

Figura 5.12. Mapeamento das agências limites de  $N_0$ .

O próximo passo no processo de análise de coerência estrutural (seção 4.1.1.3 ), consiste em efetuar uma comparação entre os elementos de fronteira mapeados e os que se deseja modelar, sendo que conclusão desta checagem é que todos os canais listados (suprimento ou consumo) são coerentes com o que se deseja. Entretanto, existem outros dois canais (c19 e c22 - Figura 5.7) que apesar de serem mapeados são canais de suprimento e consumo de informação, sendo responsáveis pela interface entre o usuário e a UPH (c19) e o RTVX (c22). A inclusão dos canais 'c19' e 'c22' à lista dos de suprimento e consumo pode ser feita diretamente, com base na intenção do projetista, ou utilizar o artifício de discriminação dos recursos, como por exemplo, ao invés de 'inf' para a troca de informações, utilizar 'comando' e 'leitura'. De qualquer forma, este fato não torna a rede incoerente quanto à estrutura, já que não foi quebrada nenhuma regra de modelagem.

Quanto à comparação das agências, tem-se que o resultado do mapeamento está coerente com o que se deseja projetar. Entretanto, relembra-se que estas agências limites, por não pertencerem ao ambiente externo, devem ser refinadas e este refinamento deve conter algum canal que represente a classificação da agência, conforme será esclarecido na próxima etapa de análise.

**Construção dos grafos de fluxo de recursos** – segunda etapa da análise de coerência de fluxo de recursos.

Após o modelo estar coerente quanto à estrutura, passa-se para a etapa de análise da coerência de fluxo de recursos, a qual é composta por cinco etapas (seção 4.1.2). Desta forma, tem-se que os grafos de fluxo de recursos expostos na Figura 5.13 (construídos segundo os procedimentos apresentados no apêndice B), referem-se à segunda etapa do método, sendo um grafo para cada recurso de canal de suprimento.

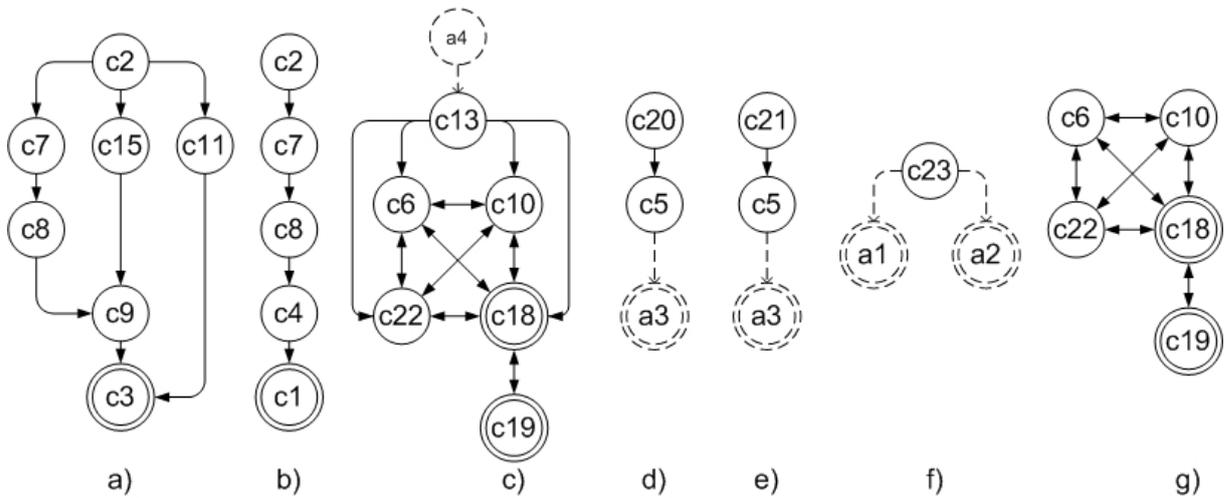


Figura 5.13. Grafos de fluxo de recursos para a rede inicial ( $N_0$ ).

Esclarecendo que os círculos tracejados indicam que os canais de suprimento ou consumo não são os que estão escritos diretamente no círculo, até porque os nomes são de agências, mas sim os que são modelados e definidos pela rede refinada a partir destas. Logo, sintetizando as informações contidas na Figura 5.13, tem-se que:

Grafo	Canal de suprimento	Recurso	Canais de Consumo
a	c2	água	c3
b	c2	energia utilizável	c1
c	$\{P(C) \mid C \supset \delta(a4)\}$	informação	c18 e c19
d	c20	energia de controle	$\{P(C) \mid C \supset \delta(a3)\}$
e	c21	energia de controle	$\{P(C) \mid C \supset \delta(a3)\}$
f	c23	energia de controle	$\{P(C) \mid C \supset \delta(a1)\}$ e $\{P(C) \mid C \supset \delta(a2)\}$
g	c18 e c19	informação	c18 e c19

Tal que,  $\delta(a1) = N_9$ ,  $\delta(a2) = N_{10}$ ,  $\delta(a3) = N_{11}$  e  $\delta(a4) = N_{12}$  (Apêndice D), referindo-se respectivamente aos refinamentos do caracol (Fig. 7 – apêndice C), gerador (Fig. 8 – apêndice C), sistema distribuidor (Figura 5.8) e rotor (Fig. 9 – apêndice C).

**Analisando os resultados dos grafos** – terceira, quarta e quinta etapa da análise de coerência de fluxo de recursos.

Dando seqüência ao processo de análise, a próxima etapa (terceira) consiste em gerar uma tabela de dependência que represente os grafos de fluxo de recursos (Figura 5.13).

Esta tabela servirá de base para a realização da análise que verifica se para cada canal de suprimento existe ao menos um de consumo (quarta etapa) e se para cada de consumo existe ao menos um de suprimento (quinta etapa) (Figura 5.14).

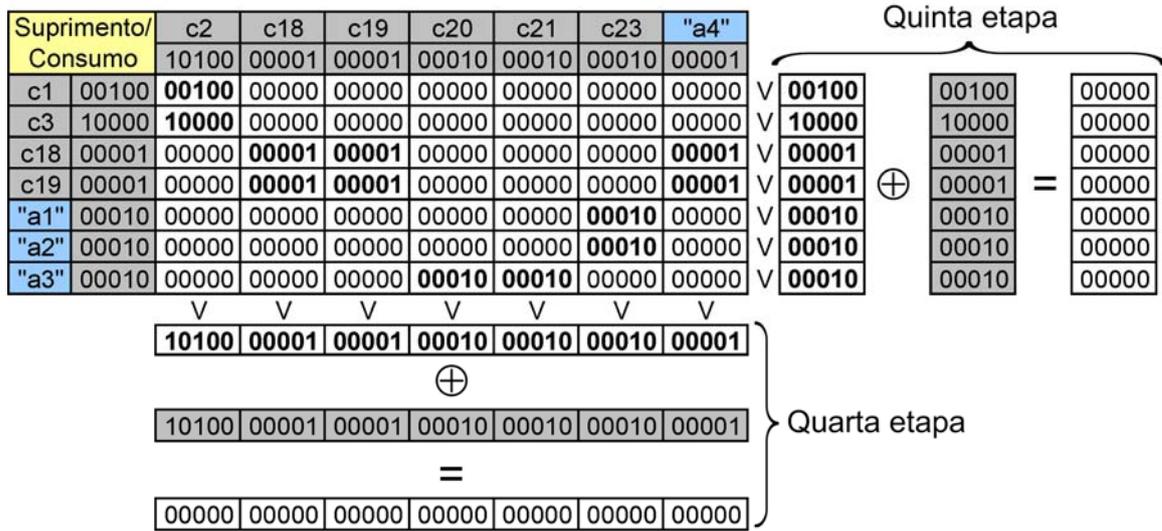


Figura 5.14. Etapas três, quatro e cinco do processo de análise de coerência de fluxo de recursos.

Como o resultado das operações 'OU exclusivo', efetuadas nas etapas quatro e cinco, foram vetores nulos (Figura 5.14), a rede inicial está coerente quanto ao fluxo de recursos.

A tarefa de projeto que tem a função de analisar a dependência entre recursos dos elementos de consumo para com os de suprimento (seção 4.1.3), não será aplicada sobre a rede inicial, sendo descrita somente para o refinamento do sistema distribuidor, visto que esta atividade é mais viável para modelos que apresentam um maior grau de refinamento.

5.4.2 Análise das propriedades do sistema distribuidor –  $N_{11}$  (Figura 5.8).

Como já visto antes, a primeira etapa, consiste em mapear os elementos de suprimento e/ou consumo, procedimento este que será realizado sobre as matrizes  $\kappa_{pre11}$  e  $\kappa_{post11}$  na forma binária, com base na seqüência  $E_{re11} = \{Ag, Oleo, Haste, Eut, Ec, Inf\}$  (Apêndice D). As matrizes são referentes à rede  $N_{11}$ , a qual representa o modelo matemático do refinamento do sistema distribuidor, cujo modelo gráfico está exposto na Figura 5.8.

**Mapeamento dos canais de suprimento e/ou consumo** – primeira e segunda etapa da análise estrutural.

A Figura 5.15 mostra o resultado das duas primeiras etapas, as quais são responsáveis pelo mapeamento dos canais limites (seção 4.1.1.1). Como os canais externos ( $C_{ex11}$ ) são necessariamente de suprimento e/ou consumo, estes são definidos como de tal direta-

mente dos vetores  $VCK_{pre}$  e  $VCK_{post}$ . Os canais definidos pela rede ( $C_{11}$ ) são avaliados com base no resultado da segunda etapa ( $VLRes$ ), a qual finaliza o mapeamento dos canais limites. Para esta rede, têm-se oito canais de suprimento (a3.c4, c7, c17, c5.1, c5.2, c6.4, c6.5 e c6.7) e quatorze de consumo (a3.c3\*a3.4, c6.4\*a3.1, c6.5\*a3.7, c6.7\*a3.1, c17\*a3.2, c8, c6.1, c6.2, c6.3, c6.6, c16.1, c16.2, c16.3 e c16.4).

		$VCK_{pre}$		$VCK_{post}$		$VCR_{es}$	
Canais definidos pela rede ( $C_{11}$ )	a3.c1	010010		010010		000000	
	a3.c2	010010		010010		000000	
	a3.c3	000010		000010		000000	
	a3.c4	001001		001000		<b>000001</b>	S: Inf
	a3.c3*a3.4	000000		000010		<b>0000-10</b>	C: Ec
	c6.4*a3.1	000000		000001		<b>00000-1</b>	C: Inf
	c6.5*a3.7	000000		000001		<b>00000-1</b>	C: Inf
	c6.7*a3.1	000000		000001		<b>00000-1</b>	C: Inf
Canais externos ( $C_{ex11}$ )	c17*a3.2	000000		000001		<b>00000-1</b>	C: Inf
	c7	<b>100100</b>	S: Ag, Eut	000000			
	c8	000000		<b>100100</b>	C: Ag, Eut		
	c17	<b>000001</b>	S: Inf	000000			
	c5.1	<b>010010</b>	S: Oleo, Ec	000000			
	c5.2	<b>010010</b>	S: Oleo, Ec	000000			
	c6.1	000000		<b>000001</b>	C: Inf		
	c6.2	000000		<b>000001</b>	C: Inf		
	c6.3	000000		<b>000001</b>	C: Inf		
	c6.4	<b>000001</b>	S: Inf	000000			
	c6.5	<b>000001</b>	S: Inf	000000			
	c6.6	000000		<b>000001</b>	C: Inf		
	c6.7	<b>000001</b>	S: Inf	000000			
	c16.1	000000		<b>010000</b>	C: Oleo		
	c16.2	000000		<b>010000</b>	C: Oleo		
	c16.3	000000		<b>010000</b>	C: Oleo		
c16.4	000000		<b>010000</b>	C: Oleo			

$E_{re11} = \{Ag, Oleo, Haste, Eut, Ec, Inf\}$

Figura 5.15. Mapeamento dos canais limites de  $N_{11}$ .

**Mapeamento das agências de suprimento e/ou consumo** – terceira e quarta etapa da análise estrutural.

A terceira e quarta etapa do processo de mapeamento, responsáveis pelas agências limites, estão expostas na Figura 5.16. O resultado destas, segundo o vetor  $VLRes$ , indica que o sistema distribuidor não apresenta nenhuma agência de suprimento e/ou consumo. Desta forma, todos os elementos limites desta rede são canais.

	a3.1	a3.2	a3.3	a3.4	a3.5	a3.6	a3.7
$VLK_{pre}$	010011	010011	011010	100110	000001	000001	010011
$VLK_{post}$	010011	010011	011010	100110	000001	000001	010011
$VLRes$	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000

Figura 5.16. Mapeamento das agências limites de  $N_{11}$ .

Comparando-se os canais de suprimento e/ou consumo, indicados pelo processo de mapeamento, com os canais que se deseja modelar, percebe-se que a rede está de acordo com a intenção do projetista. Baseado nesta correspondência e na equivalência entre os modelos gráfico (Figura 5.8) e matemático (Apêndice D), considera-se que a rede é coerente quanto à estrutura.

**Construção dos grafos de fluxo de recursos** – segunda etapa da análise de coerência de fluxo de recursos.

Finalizada a análise estrutural, inicia-se a de coerência de fluxo de recursos (seção 4.1.2 ). Como a rede não apresenta nenhuma agência limite, a primeira etapa não precisa ser executada, partindo-se diretamente para a segunda, a qual é destinada à criação dos grafos de fluxo de recursos (Figura 5.17).

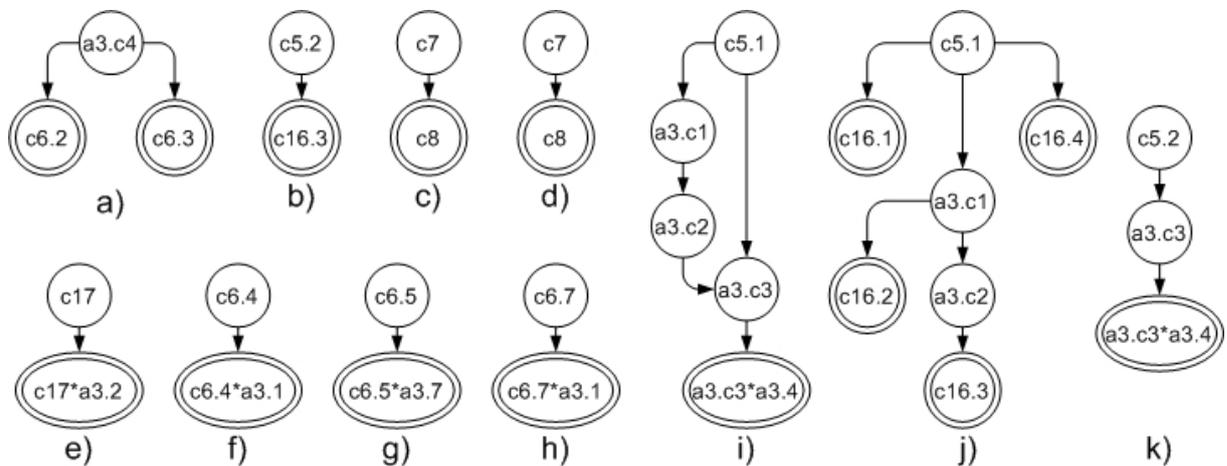


Figura 5.17. Grafos de fluxo de recursos para o sistema distribuidor ( $N_{11}$ ).

As informações contidas nos grafos de fluxos de recursos, apresentados na Figura 5.17, podem ser expressas por uma tabela, conforme segue:

Grafo	Canal de Suprimento	Recurso	Canais de Consumo
a	a3.c4	informação	c6.2 e c6.3
b	c5.2	oleo	c16.3
c	c7	água	c8
d	c7	energia utilizável	c8
e	c17	informação	c17*a3.2
f	c6.4	informação	c6.4*a3.1
g	c6.5	informação	c6.5*a3.7
h	c6.7	informação	c6.7*a3.1
i	c5.1	energia de controle	a3.c3*a3.4
j	c5.1	óleo	c16.1, c16.2, c16.3 e c16.4
k	c5.2	energia de controle	a3.c3*a3.4

**Analisando os resultados dos grafos** – terceira, quarta e quinta etapa da análise de coerência de fluxo de recursos.

Dando seqüência à análise de coerência de fluxo de recursos, gera-se a tabela de dependência apresentada na Figura 5.18, a qual sintetiza as informações contidas nos grafos de fluxo de recursos Figura 5.17.

Suprimento/Consumo (Fluxo de recursos)	a3.c4	c7	c17	c5.1	c5.2	c6.4	c6.5	c6.7
	000001	100100	000001	010010	010010	000001	000001	000001
a3.c3*a3.4	000010	000000	000000	000000	<b>000010</b>	<b>000010</b>	000000	000000
c6.4*a3.1	000001	000000	000000	000000	000000	000000	<b>000001</b>	000000
c6.5*a3.7	000001	000000	000000	000000	000000	000000	000000	<b>000001</b>
c6.7*a3.1	000001	000000	000000	000000	000000	000000	000000	<b>000001</b>
c17*a3.2	000001	000000	000000	<b>000001</b>	000000	000000	000000	000000
c8	100100	000000	<b>100100</b>	000000	000000	000000	000000	000000
c6.1	000001	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000
c6.2	000001	<b>000001</b>	000000	000000	000000	000000	000000	000000
c6.3	000001	<b>000001</b>	000000	000000	000000	000000	000000	000000
c6.6	000001	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000
c16.1	010000	000000	000000	000000	<b>010000</b>	000000	000000	000000
c16.2	010000	000000	000000	000000	<b>010000</b>	000000	000000	000000
c16.3	010000	000000	000000	000000	<b>010000</b>	<b>010000</b>	000000	000000
c16.4	010000	000000	000000	000000	<b>010000</b>	000000	000000	000000

Figura 5.18. Etapa três do processo de análise de coerência de fluxo de recursos.

A Figura 5.19 expõe as atividades referentes à conclusão da quarta etapa, a qual verifica se para cada recurso de cada canal de suprimento existe ao menos um de consumo. Como o vetor resultante é nulo, esta condição é verificada para todos os canais de suprimento.

a3.c4	c7	c17	c5.1	c5.2	c6.4	c6.5	c6.7
<b>000001</b>	<b>100100</b>	<b>000001</b>	<b>010010</b>	<b>010010</b>	<b>000001</b>	<b>000001</b>	<b>000001</b>
⊕							
000001	100100	000001	010010	010010	000001	000001	000001
=							
000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000

Figura 5.19. Etapa quatro do processo de análise de coerência de fluxo de recursos.

A Figura 5.20 expõe o resultado da análise sobre os canais, sendo verificado se para cada recurso de cada canal de consumo existe ao menos um de suprimento. A condição não é verificada para os canais de consumo 'c6.1' e 'c6.6', pois não está especificado quais são os canais de origem do recurso 'inf'. Este fato implica na necessidade de se refinar a agência 'a3.1', afim de se identificar o canal de suprimento do recurso que sai por 'c6.1' e similarmemente, refinar 'a3.7' para 'c6.6' (Figura 5.8).

a3.c3*a3.4	000010	+	000010	=	000000
c6.4*a3.1	000001		000001		000000
c6.5*a3.7	000001		000001		000000
c6.7*a3.1	000001		000001		000000
c17*a3.2	000001		000001		000000
c8	100100		100100		000000
c6.1	000000		000001		000001
c6.2	000001		000001		000000
c6.3	000001		000001		000000
c6.6	000000		000001		000001
c16.1	010000		010000		000000
c16.2	010000		010000		000000
c16.3	010000		010000		000000
c16.4	010000		010000		000000

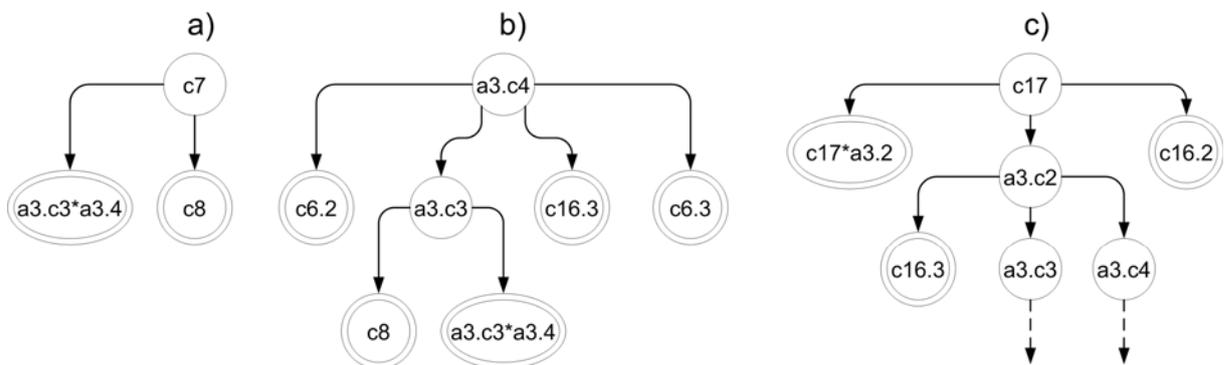
Figura 5.20. Etapas cinco do processo de análise de coerência de fluxo de recursos.

Sendo assim, conclui-se a análise de fluxo de recurso com a condição de que para que o modelo seja coerente, é necessário apresentar os refinamentos das agências ‘a3.1’ e ‘a3.7’ e que estes contenham algum canal de suprimento para o recurso que sai, respectivamente, por ‘c6.1’ e ‘c6.6’. Estes refinamentos estão expostos na seção 5.5 , a qual explica como realizar a conversão de um modelo específico em rede C/A (Figura 5.23).

**Construção dos grafos de fluxo de recursos** – segunda etapa da análise de dependência entre recursos.

O próximo procedimento de análise proposto por esta dissertação é a análise de dependência entre recursos, cujo objetivo é mapear a relação de dependência dos recursos dos canais de consumo para com os de suprimento, independente do recurso (seção 4.1.3 ).

Os grafos de fluxo de recursos, gerados segundo os procedimentos descritos pela segunda etapa são apresentados na Figura 5.21. As setas direcionadas para baixo e com a linha tracejada indicam que a seqüência a partir daquele canal já foi considerada por outro grafo.



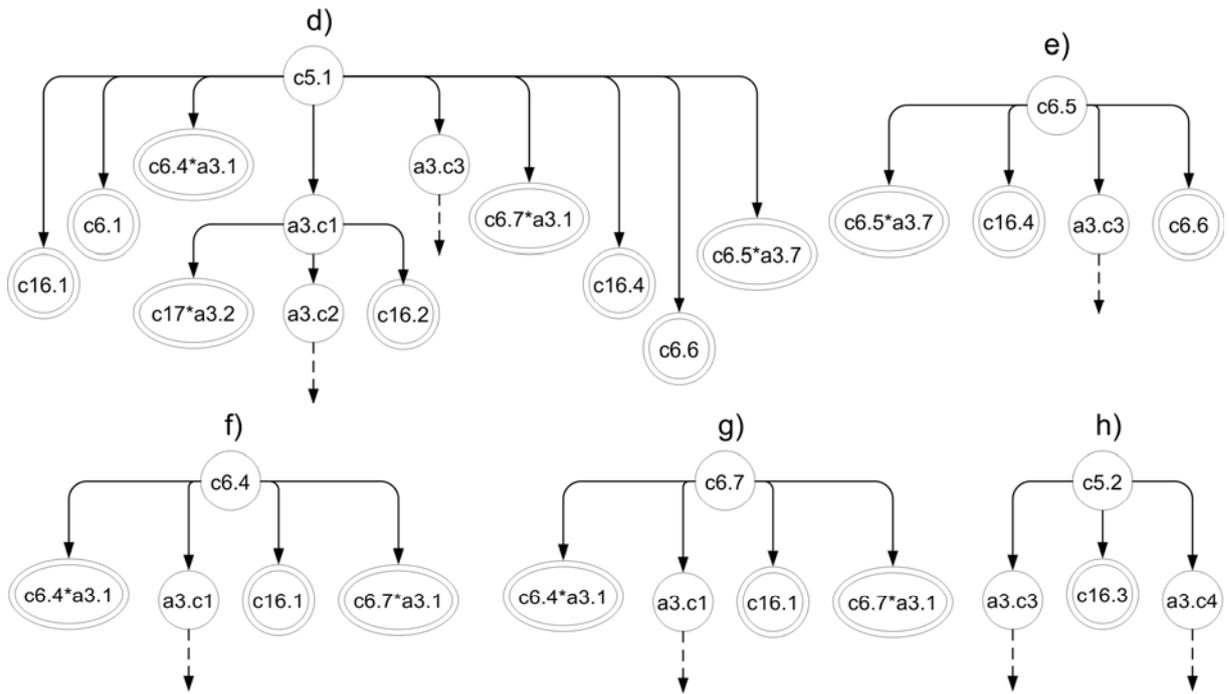


Figura 5.21. Grafos de fluxo de recursos, independente do recurso, para o sistema distribuidor ( $N_{11}$ ).

**Analisando os resultados dos grafos** – terceira etapa da análise de dependência entre recursos.

As informações contidas nos grafos, referentes aos canais de suprimento e consumo são convertidas em uma tabela de dependência conforme segue:

Suprimento/ Consumo (dependência)	a3.c4	c7	c17	c5.1	c5.2	c6.4	c6.5	c6.7
a3.c3*a3.4	1	1	1	1	1	1	1	1
c6.4*a3.1	0	0	0	1	0	1	0	1
c6.5*a3.7	0	0	0	1	0	0	1	0
c6.7*a3.1	0	0	0	1	0	1	0	1
c17*a3.2	0	0	1	1	0	1	0	1
c8	1	1	1	1	1	1	1	1
c6.1	0	0	0	1	0	0	0	0
c6.2	1	0	1	1	1	1	0	1
c6.3	1	0	1	1	1	1	0	1
c6.6	0	0	0	1	0	0	1	0
c16.1	0	0	0	1	0	1	0	1
c16.2	0	0	1	1	0	1	0	1
c16.3	1	0	1	1	1	1	0	1
c16.4	0	0	0	1	0	0	1	0

Através desta tabela é possível inferir sobre alguns aspectos relacionados ao sistema, sem a necessidade da rede C/A. Por exemplo, é possível saber que a quantidade de óleo que sai por 'c16.1' depende da quantidade de óleo que entra por 'c5.1' e das informações de controle oriundas de 'c6.4' e 'c6.7' ou que, em sentido contrário, a quantidade de óleo e energia de controle que entra por 'c5.1' pode influenciar todos os canais de consumo.

É possível também utilizar a tabela como uma ferramenta de análise, por exemplo, sabendo-se que o canal de consumo 'c16.1' é uma saída controlada, a tabela deve mostrar, como realmente mostra, que 'c16.1' depende de algum canal de suprimento de informação.

Com a fim da análise de dependência, conclui-se a descrição da execução dos procedimentos de análise sobre o problema da central hidrelétrica Passo do Inferno.

## 5.5 Modelos específicos

De acordo a seqüência de atividades sugeridas pela metodologia (Figura 3.3), já foram descritos o refinamento do sistema utilizando redes C/A e a aplicação dos procedimentos de análise sobre estas, garantindo-se que as mesmas estão coerentes quanto à estrutura, ao fluxo de recursos e dependência entre recursos. O próximo passo, para finalizar a quarta atividade descrita pela metodologia, consiste em realizar a formalização do comportamento (coluna direita) em um nível de abstração equivalente ao encontrado no modelo funcional/estrutural. Entretanto, como a modelagem comportamental de um sistema não é foco desta dissertação, esta tarefa não será tratada por esta dissertação. Da mesma forma, a quinta atividade, que consiste em refinar o sistema utilizando diagramas específicos, e também uma parcela da sexta (coluna da direita e do meio), que propõem a decisão por princípios de solução e a modelagem comportamental dos modelos, não serão descritas neste trabalho.

Logo, parte-se direto para a parcela da sexta atividade (coluna esquerda - Figura 3.3) que sugere a conversão dos modelos específicos em redes C/A, a fim de possibilitar a execução dos métodos de análise e síntese (Capítulo 4) sobre as redes. Desta forma, o que se pretende nesta seção não é gerar regras e nem procedimentos de conversão, mas sim deixar claro, através de alguns exemplos, que existe uma relação direta entre os modelos específicos funcionais e a rede C/A e que a conversão é possível.

Para exemplificar a conversão de modelos específicos em redes C/A foram selecionadas partes dos circuitos hidráulico (Figura 5.22) e elétrico (Figura 5.24) dos relatórios de projeto do regulador de velocidade da central Passo do Inferno (Reivax, 2003).

A Figura 5.22 expõe as partes do circuito hidráulico que estão presentes no sistema distribuidor (Figura 5.8). Visualiza-se sobre o circuito, a inserção de quadrados (□), indicando que o elemento contornado equivale a uma agência, e de círculos (○) mostrando alguns canais de entrada e saída do sistema, os quais ajudam a entender o circuito. A Figura 5.22 ainda apresenta duas regiões destacadas (1 e 2) por contornos (traço-ponto), tais contornos delimitam os componentes hidráulicos que serão convertidos para RdP C/A (Figura 5.23).

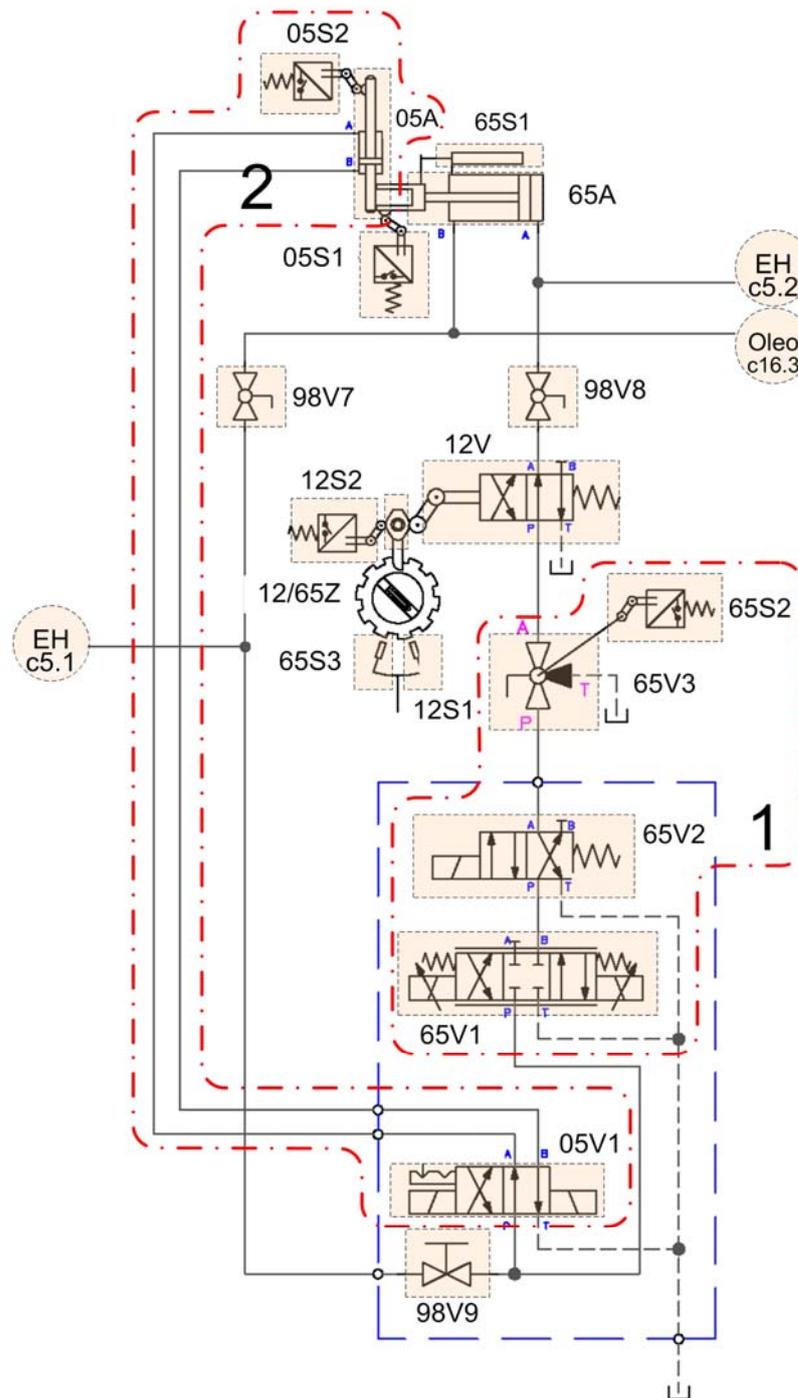


Figura 5.22. Parte do circuito hidráulico da central hidrelétrica.

Deste modo, a Figura 5.23 apresenta as redes C/A que são equivalentes às regiões que estão em destaque no circuito hidráulico da Figura 5.22, sendo que a rede 'a' é equivalente à região 1 e a 'b' a '2'. Observando-se tais figuras, fica evidente que todos os elementos ativos do circuito hidráulico foram convertidos em agências, sendo os canais caracterizados apenas pelas tubulações e bifurcações. Estas evidências comprovam que a conversão de um circuito hidráulico em uma RdP C/A é relativamente simples.

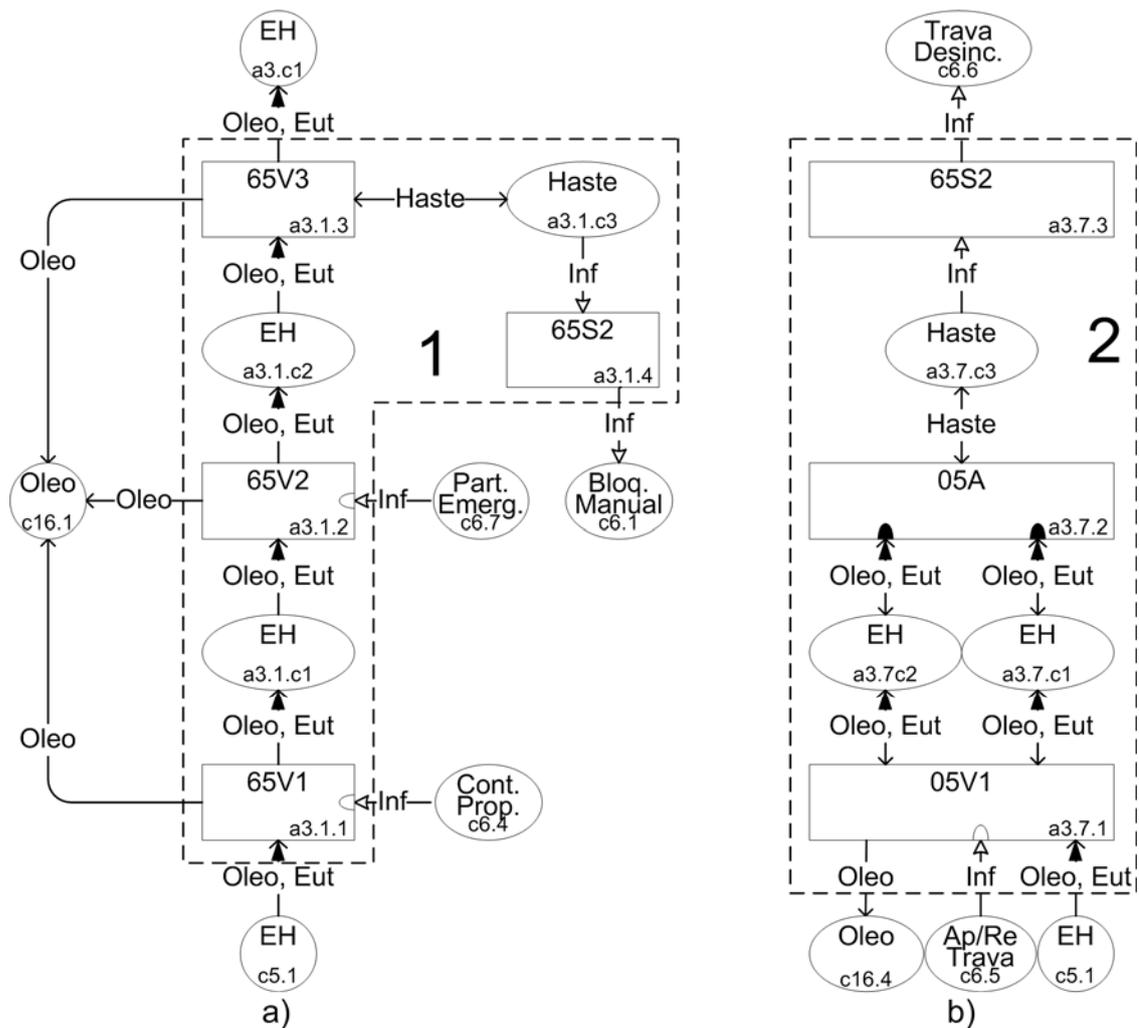


Figura 5.23. Redes C/A equivalentes às regiões selecionadas no circuito hidráulico. a) Região 1 e b) 2.

A Figura 5.24 expõe partes do circuito elétrico pertencente ao módulo RTVX100 (Figura 5.9), as quais foram escolhidas convenientemente a fim de exemplificar a conversão entre modelos funcionais, de forma que o modelo equivalente resultante é composto por uma única rede C/A (Figura 5.25).

Igualmente ao caso do circuito hidráulico, na Figura 5.24 os quadrados ( ) indicam que o elemento contornado equivalente é uma agência.

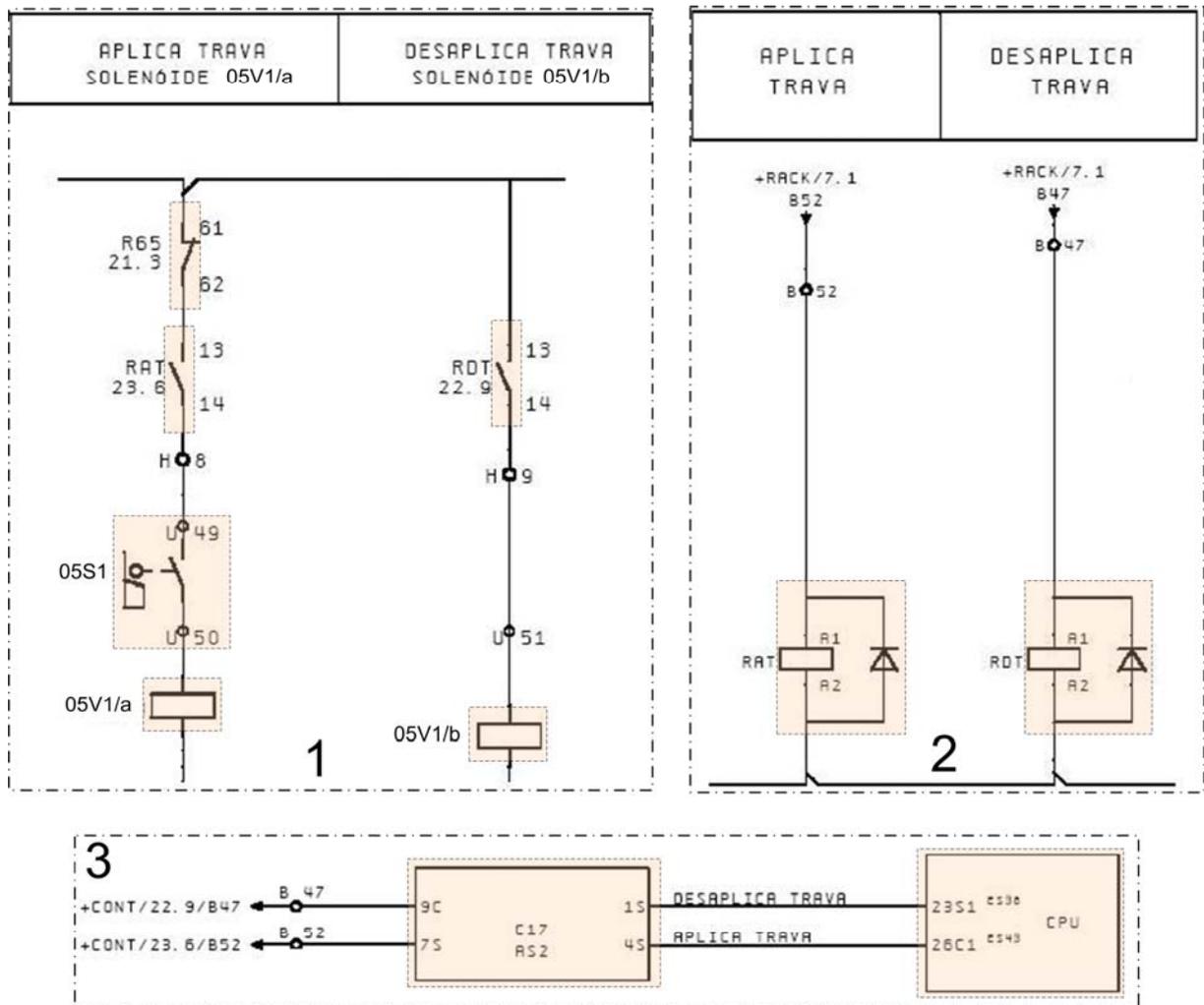


Figura 5.24. Partes do circuito elétrico da central hidrelétrica (Reivax, 2003a).

Cada região destacada na rede C/A (Figura 5.25) corresponde a uma parte do circuito elétrico (Figura 5.24), sendo numeradas de 1 a 3 para que seja possível a distinção entre as mesmas.

Observando como foi realizada a conversão para o caso do circuito elétrico, tem-se que similarmente ao anterior, todos os elementos ativos são representados por agências, restando para a modelagem através de canais somente a fiação.

A conclusão que se chega com os exemplos apresentados é que os modelos funcionais específicos apresentam uma equivalência direta com a RdP C/A, tornando o processo de conversão uma tarefa relativamente fácil, quando os modelos representam a mesma perspectiva do sistema.

Apesar de não ser mostrado nesta dissertação, pode-se utilizar a rede C/A para representar programas de software, evidenciando os módulos, sub-rotinas e as informações trocadas entre estes.

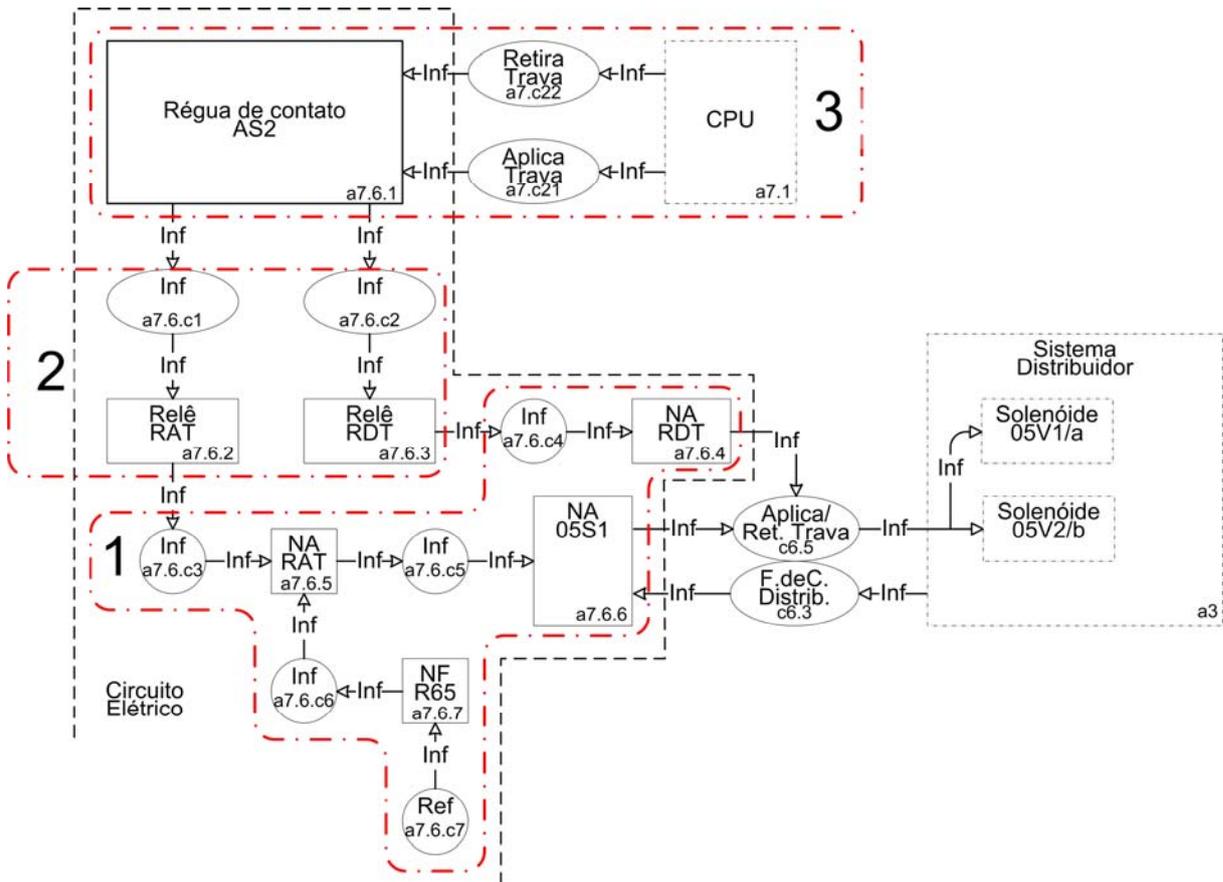


Figura 5.25. RdP C/A equivalente às regiões selecionadas no circuito elétrico. a) Região 1, b) 2 e c) 3.

### 5.6 Composição da RdP C/A

A próxima e última atividade proposta pela metodologia de projeto adotada (Figura 3.3), consiste em gerar modelos condensados, segundo os procedimentos descritos na seção 4.2, a fim de facilitar a comunicação entre o pessoal envolvido com o projeto.

Optou-se por utilizar a PCH (Fig. 12 – apêndice E) para exemplificar os procedimentos de composição, escolha esta justificada pelo fato de que a mesma engloba sistemas com características elétricas, hidráulicas e de software em uma mesma rede C/A. Como o objetivo principal da utilização do processo de condensação é facilitar a comunicação entre as equipes envolvidas com o projeto, a característica multidisciplinar do sistema torna vantajosa a condensação do sistema por partes, visto que é possível que os subsistemas sejam projetados e montados por pessoas diferentes.

O procedimento apresentado na seção 4.2, apesar de ser direcionado para casos onde se deseja realizar uma condensação total da rede, pode ser facilmente aplicado ao caso de condensação parcial, bastando que sejam desconsiderados, nas matrizes  $\kappa_{pre13}$  e  $\kappa_{post13}$ , os elementos que não estão na região que será condensada e nem em contato direto com os elementos internos a esta região. Para facilitar a definição dos limites das áreas que serão condensadas, segue a tabela referente à Fig. 12 (Apêndice E):

Agência	Responsabilidade
a6.1	Especialista elétrico
a6.2	Especialista em software
a6.3	Especialista hidráulico
a6.4	Especialista hidráulico
a6.5	Especialista hidráulico
a6.6	Especialista hidráulico
a6.7	Especialista hidráulico
a6.8	Especialista hidráulico

Logo, para a formação da rede condensada que representa os sistemas hidráulicos, eliminam-se das matrizes  $\kappa_{pre13}$  e  $\kappa_{post13}$  (Apêndice D) as agências ‘a6.1’, ‘a6.2’ e ‘a6.3’ e os canais que não estão diretamente ligados às agências de responsabilidade de um especialista hidráulico. Também podem ser eliminados das tabelas os canais ocultos, visto que os mesmos são mais úteis para os processos de análise do que no auxílio a comunicação. Após a exclusão destes elementos é necessário mapear novamente os canais limites, a fim de descobrir quais são os canais de entrada e/ou saída da rede condensada.

A partir deste ponto, o procedimento para encontrar a RdP C/A condensada é o mesmo que o descrito na seção 4.2 , o qual é composto por 3 etapas. A primeira consiste em reorganizar a matriz, colocando os canais e agências na seguinte ordem: entrada, saída e internos (Obs. A definição de internos para este método não tem nada a ver com o fluxo de recursos).

A segunda etapa é destinada à geração das matrizes  $\kappa_{pre}$  (Figura 5.26) e  $\kappa_{post}$  (Figura 5.27), referentes à rede condensada. Estas são obtidas através da eliminação dos canais internos e da condensação de todas as agências em uma única (operação ‘OU’), a qual por sua vez representa o sistema e suas ligações com os canais de entrada e saída.

<b>Kpre</b>	a6.4	a6.5	a6.6	a6.7	a6.8	a6.9	a6.10	a6.11	a6.12
a6.c20	<b>001</b>	000	000	000	000	000	000	000	000
a6.c21	<b>010</b>	000	000	000	000	000	000	000	000
c20	000	000	000	000	000	<b>010</b>	000	000	000
c16.1	000	000	000	000	000	000	000	000	<b>100</b>
c16.2	000	000	000	000	000	000	000	000	<b>100</b>
c16.3	000	000	000	000	000	000	000	000	<b>100</b>
c16.4	000	000	000	000	000	000	000	000	<b>100</b>
a6.c14	000	000	000	000	000	000	000	000	000
a6.c15	000	000	000	000	000	000	000	000	000
a6.c19	000	000	000	000	000	000	000	000	000
a6.c23	000	000	000	000	000	000	000	000	000
a6.c24	000	000	000	000	000	000	000	000	000
c5.1	000	000	000	000	000	000	000	000	000
c5.2	000	000	000	000	000	000	000	000	000
c19.6	000	000	000	000	000	000	000	000	000



<b>Kpre</b>	Sistema
a6.c20	<b>001</b>
a6.c21	<b>010</b>
c20	<b>010</b>
c16.1	<b>100</b>
c16.2	<b>100</b>
c16.3	<b>100</b>
c16.4	<b>100</b>
a6.c14	000
a6.c15	000
a6.c19	000
a6.c23	000
a6.c24	000
c5.1	000
c5.2	000
c19.6	000

Figura 5.26. Composição da matriz  $\kappa_{pre}$  da rede condensada.

<b>Kpost</b>	a6.4	a6.5	a6.6	a6.7	a6.8	a6.9	a6.10	a6.11	a6.12
a6.c20	000	000	000	000	000	000	000	000	000
a6.c21	000	000	000	000	000	000	000	000	000
c20	000	000	000	000	000	000	000	000	000
c16.1	000	000	000	000	000	000	000	000	000
c16.2	000	000	000	000	000	000	000	000	000
c16.3	000	000	000	000	000	000	000	000	000
c16.4	000	000	000	000	000	000	000	000	000
a6.c14	000	000	000	000	<b>001</b>	000	000	000	000
a6.c15	000	000	000	000	<b>001</b>	000	000	000	000
a6.c19	000	<b>001</b>	000	000	000	000	000	000	000
a6.c23	000	000	000	000	000	000	<b>001</b>	000	000
a6.c24	000	000	000	000	000	000	000	<b>001</b>	000
c5.1	000	000	<b>110</b>	000	000	000	000	000	000
c5.2	000	000	000	000	000	<b>110</b>	000	000	000
c19.6	000	000	000	000	<b>001</b>	000	000	000	000

<b>Kpost</b>	Sistema
a6.c20	000
a6.c21	000
c20	000
c16.1	000
c16.2	000
c16.3	000
c16.4	000
a6.c14	<b>001</b>
a6.c15	<b>001</b>
a6.c19	<b>001</b>
a6.c23	<b>001</b>
a6.c24	<b>001</b>
c5.1	<b>110</b>
c5.2	<b>110</b>
c19.6	<b>001</b>

Figura 5.27. Composição da matriz  $K_{post}$  da rede condensada.

A terceira e última etapa é destinada à geração da rede gráfica a partir do modelo matemático obtido na etapa anterior, a qual está exposta na Figura 5.28 – a.

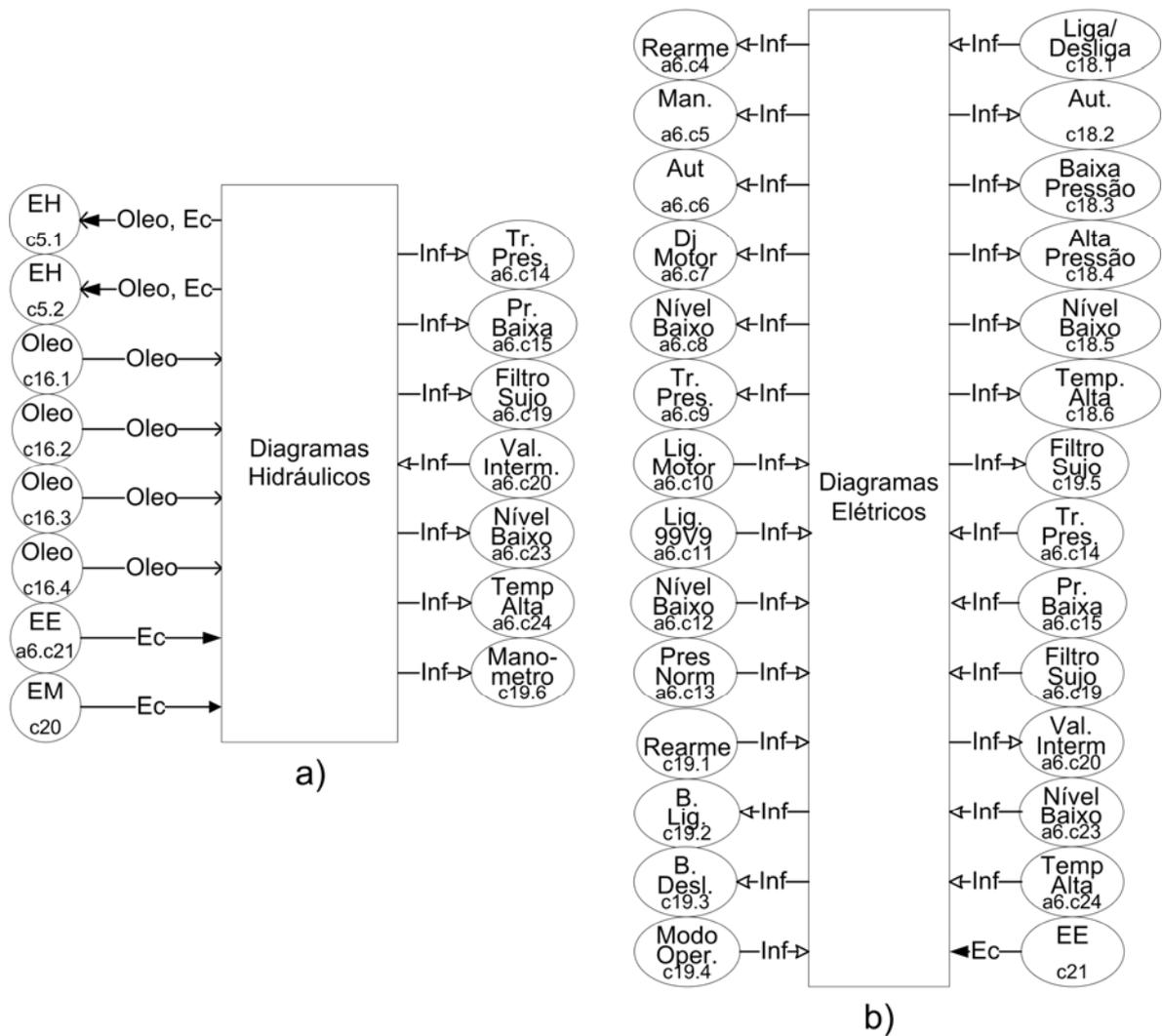


Figura 5.28. a) Rede condensada para os sistemas hidráulicos e b) de software.

O sistema apresentado na Figura 5.28 – b representa a condensação dos diagramas elétricos e é obtido segundo os mesmos procedimentos descritos para o caso dos sistemas hidráulicos, sendo exposto porque será utilizado na próxima seção, a qual trata da compatibilidade entre redes C/A.

### 5.7 Compatibilidade entre redes C/A

A atividade de análise de compatibilidade entre redes (atividade 7 – Figura 3.3) tem como finalidade descobrir previamente, os equívocos cometidos na caracterização dos canais, economizando tempo e evitando danos aos equipamentos. Por exemplo, pode-se verificar se um determinado par de fios, destinado à alimentação de um solenóide, realmente oferece a tensão que o equipamento necessita para operar.

Segundo os conceitos discutidos na seção 4.3 , para realizar a verificação de compatibilidade entre duas redes C/A, deve-se executar uma varredura nos canais de entrada e/ou saída das redes condensadas sob análise. Os canais equivalentes devem apresentar as mesmas propriedades e atributos.

Para analisar a compatibilidade entre a rede condensada que representa os sistemas hidráulicos (Fig. 12 – apêndice E) e a que representa os elétricos (Figura 5.28), efetua-se uma varredura sobre todos os canais ( $C$  e  $C_{ex}$ ) das duas redes. A Figura 5.29 expõe o resultado deste processo, mostrando somente os canais que são equivalentes.

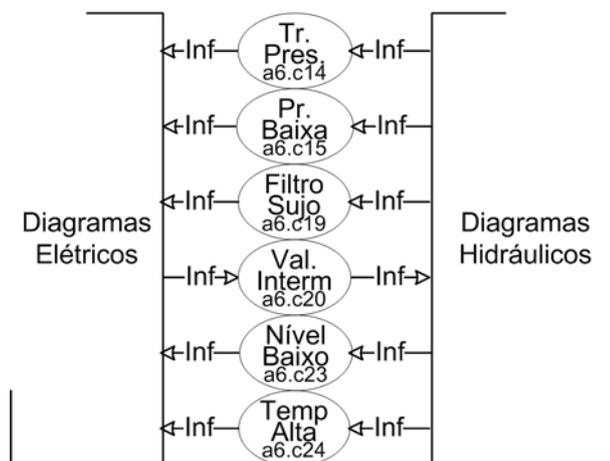


Figura 5.29. Verificação da compatibilidade entre redes C/A.

A tabela abaixo lista as informações relacionadas aos canais mostrados na Figura 5.29. A escolha por quais informações mostrar foi feita com base nas características do problema e na quantidade de informação disponível, de forma que as informações da tabela podem variar dependendo do problema e da necessidade.

Nome Espec.	Nome Genérico	No	Atributos do Recurso			Duto			Agência Fonecedora		Agência Receptora	
				Tensão	Corrente	Tipo	Bitola	Cor	Conector	Local	Conector	Local
a6.c14	Tr. Pres.	2	Positivo	24 V		Blindado	2 mm	Cinza	direto	99S3	MBKKB 2.5	U17
			Retorno		0 - 4 mA	Blindado	2 mm	Cinza/Preto	direto	99S3	MBKKB 2.5	U28
a6.c15	Pr. Baixa	2	Positivo	24 V		Simples	2 mm	Vermelho	direto	99S6	MBKKB 2.5	U15
			Retorno	0;24 V		Simples	2 mm	Marron	direto	99S6	MBKKB 2.5	U26
a6.c19	Filtro Sujo	2	Positivo	24 V		Simples	2 mm	Vermelho	direto	99S5	MBKKB 2.5	U40/U41
			Retorno	0;24 V		Simples	2 mm	Marron	direto	99S5	MBKKB 2.5	U42/U43
a6.c20	Val. Interm.	2	Positivo	24 V		Simples	3 mm	Vermelho	MBKKB 2.5	U31	direto	99V9
			Retorno	0 V		Simples	3 mm	Preto	MBKKB 2.5	U19	direto	99V9
a6.c23	Nível Baixo	2	Positivo	24 V		Simples	2 mm	Vermelho	direto	99S7	MBKKB 2.5	U16
			Retorno	0;24 V		Simples	2 mm	Marron	direto	99S7	MBKKB 2.5	U37
a6.c24	Temp. Alta	2	Positivo	24 V		Simples	2 mm	Vermelho	direto	99S4	MBKKB 2.5	U14
			Retorno	0;24 V		Simples	2 mm	Marron	direto	99S4	MBKKB 2.5	U25

Pode ser observado que cada canal representa fisicamente dois fios, sendo necessária a caracterização de cada um deles. Deve-se ressaltar que as informações devem ser apresentadas seguindo um padrão definido pela empresa.

Para este exemplo todas as informações referentes aos canais equivalentes foram condensadas em uma única tabela. Entretanto, é possível que as informações sobre os canais sejam dispostas em tabelas diferentes, sendo uma para cada rede condensada. Neste último caso a comparação entre as informações exige mais cuidado, entretanto pode ser vantajoso sob o ponto de vista de modularidade.

Com o estudo apresentado neste capítulo, conclui-se que as informações expostas, apesar de não serem suficientes para que se tenha a idéia real de como foi realizado o projeto do regulador de velocidade, o objetivo principal de selecionar um problema que possibilite a aplicação de todas as propostas sugeridas foi atendido.

## CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES

O trabalho apresentado nesta dissertação, desenvolvido no Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos da Universidade Federal de Santa Catarina, surgiu da percepção da inexistência de modelos funcionais, com características integradoras, que apresentasse métodos matemáticos capazes de avaliar a coerência da estrutura do modelo. Afirmção que foi evidenciada nos modelos funcionais expostos no Capítulo 2, os quais apesar de serem baseados em regras teóricas de utilização, refinamento e condensação, não apresentam um formalismo matemático e nem dispõem de procedimentos de análise.

Com base neste panorama o presente trabalho propõe a formalização da estrutura da rede C/A, cujos objetivos principais são, além de obter um formalismo matemático para a estrutura do modelo, comprovar que com a formalização é possível elaborar procedimentos matemáticos que auxiliem no processo de análise do modelo e encorajar o uso da rede C/A como modelo central. Desta forma, descreve-se, a formalização da RdP C/A por uma  $n$ -upla e da hierarquia entre redes C/A por triplas.

Levando-se em conta os exemplos mostrados nesta dissertação e os outros executados em paralelo a esta, considera-se que tais  $n$ -uplas são suficientes para representar matematicamente a rede C/A, seja esta pertencente a uma hierarquia ou não. Garante-se desta forma, a equivalência entre a rede gráfica e a matemática.

Tendo em vista que o projetista, na atividade de projeto, modela os sistemas utilizando a rede C/A gráfica, considera-se que o modelo matemático, entre outras finalidades, é útil para possibilitar a avaliação da coerência da rede gráfica. Nesta dissertação, por exemplo, os três métodos propostos para a análise das propriedades da rede são executados sobre a representação matemática.

Estes procedimentos de análise visam à coerência do modelo segundo três aspectos diferentes, consistindo na análise de coerência estrutural, de fluxo de recursos e de dependência entre recursos. Entretanto, tendo em vista que tais métodos de análise não foram testados exaustivamente nem foram expostos a algum teorema matemático que prove sua eficácia, considera-se que os métodos descritos são necessários, mas não suficientes, para garantir a coerência entre o modelo gráfico e o que se deseja representar. Destaca-se que tal conclusão é consequência principalmente da dificuldade de se identificar erros que não são de modelagem, mas sim de projeto.

Este trabalho também apresenta outros dois procedimentos, os quais visam o tratamento da rede C/A a fim de facilitar a comunicação entre o pessoal envolvido com a atividade de projeto. Um é destinado à síntese de redes condensadas, a fim de simplificar os modelos, e o outro a análise da compatibilidade entre redes, que tem como objetivo verificar se

os recursos esperados/fornecidos por uma são compatíveis com os fornecidos/esperados por outra.

Conclui-se que o objetivo central da dissertação de formalizar a estrutura da rede C/A e provar que a formalização possibilita a criação de métodos matemáticos foi alcançado. Contribui-se desta forma, com o esforço coletivo de diversos pesquisadores na tentativa de firmar uma metodologia para projeto de sistemas automáticos, visto que a mesma ainda não está consolidada.

Em defesa da metodologia adotada por esta dissertação, observa-se uma tendência em utilizar os conceitos introduzidos pela essência da lei da causalidade vertical formulada por Tjalve (1979), a qual fala que uma vez que a função é formulada, então é possível designar uma série de alternativas como solução, de forma que a decomposição de uma função particular em sub-funções só é possível e sensato quando um meio tenha sido escolhido para realizar a função. Entretanto, sem deixar de lado a idéia de livre pensamento proposta pela escola alemã, já que a primeira atividade da metodologia (Figura 3.3) não se fixa à projetos e princípios de solução bem conhecidos.

Uma peculiaridade em prol da utilização da rede C/A como modelo central, está relacionada a existência de métodos que auxiliam à síntese do controlador. Segundo descrito no Capítulo 2, dentre os modelos tratados, três apresentam técnicas que auxiliam o projetista a alcançar o controlador diretamente do modelo funcional, são estes o *PFS*, *IDEF0* e a própria rede C/A. Destaca-se, no entanto, que tanto os métodos apresentados sobre o *PFS* (Miyagi, 1996) e (Villani, 2000), quanto sobre o *IDEF0* (Santarek e Buseif, 1998) e (Lee et al, 2004), a síntese do controlador é baseada em redes de Petri, já para a rede C/A o controlador gerado é baseado em autômatos (Santos, 2003). Desta forma, como o *PFS* é praticamente o mesmo modelo que a RdP C/A, pressupõe-se que já existam métodos para se alcançar o controlador baseado em redes de Petri ou autômatos, a partir de uma rede C/A.

Por fim, a rede C/A formal e os métodos de análise e síntese, inseridos em uma metodologia de projeto para sistemas automáticos (Santos, 2003), são aplicados sobre o modelo de uma PCH a fim de avaliar a eficiência e real utilidade dos métodos, com o intuito de validar os assuntos tratados nesta dissertação.

Escolheu-se, com base nas características dimensionais e de multidisciplinaridade do sistema, o projeto do regulador de velocidade da central hidrelétrica Passo do Inferno. De acordo com a solução apresentada no Capítulo 5, conclui-se que a quantidade de aspectos tratados, apesar de não serem suficientes para que se tenha a idéia real de como foi realizado o projeto do regulador de velocidade, atendem ao objetivo principal, que foi a seleção de um problema que possibilite a aplicação de todas as propostas sugeridas. Desta forma, consideram-se como validados os estudos apresentados por esta dissertação.

Entre as sugestões para trabalhos futuros, cita-se a aplicação da metodologia (Santos, 2003), incluindo o formalismo e os métodos de análise e síntese, de forma completa em

um projeto em fase real de concepção, para assim avaliar na prática, a efetiva utilidade dos resultados obtidos nesta dissertação. Entretanto, como a área prática espera resultados reais, acredita-se que com os procedimentos matemáticos sugeridos, tais resultados apareçam com mais facilidade.

Outra sugestão consiste em aplicar os procedimentos sugeridos em outras áreas, que não as voltadas para sistemas hidráulicos, a fim de saber se os mesmos resultados descritos aqui continuam sendo válidos, podendo assim quem sabe se chegar à conclusão de que os métodos propostos são necessários e suficientes para que o modelo esteja coerente.

Por fim e extremamente importante para que as propostas consigam ser aceitas pela área prática, fica a sugestão da construção de uma ferramenta computacional capaz de reproduzir de forma automática os métodos de análise e síntese da rede C/A, de forma que esta dissertação sirva de guia para a elaboração do software.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BACK, N.. **Metodologia de projeto de produtos industriais**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983. 389 p.
- CARDOSO, J.; VALETTE, R.. **Redes de Petri**. Florianópolis: Editora da UFSC, 1997. 211 p.
- CHAKRABARTI, A.. **Engineering design synthesis: Understand, approaches and tools**. ISBN 1852334924. Grã-Bretanha: Springer. 2002. 356 p.
- CHANDRASEKARAN, B.; JOSEPHSON, J. R.. Function in device representation. **Engineering with computers**. London: Springer-Verlag, 2000. pp. 162-177.
- DE NEGRI, V. 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) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996.
- \_\_\_\_\_. **Sistemas automáticos: conceitos, modelos e projeto**. Universidade Federal de Santa Catarina, mar. 1997. 41 f. Notas de aula. Apostila. Disponível em: <<http://www.laship.ufsc.br>>.
- \_\_\_\_\_. **Introdução aos sistemas para automação e controle industrial**. Universidade Federal de Santa Catarina, mar. 2004. 52 f.. Notas de aula. Apostila. Disponível em: <<http://www.laship.ufsc.br>>.
- DE NEGRI, V. J.; SANTOS, E. A. P.. **Projeto de sistemas de automação da manufatura**. In: AGUIRRE, L. A. et al. Enciclopédia de Automática. Vol. 2. Sao Paulo: Editora Edgar Blucher, 2007. Livro não publicado.
- EDER, W. E.. Design modeling: a design science approach (and Why does industry not use it?). **Journal of engineering design**, Vol. 9, No 4, pp. 355-370.1998.
- FERREIRA, M. G. G.. **Utilização de modelos para a representação de produtos no projeto conceitual**. 1997. 140 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federa de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.
- FEDERAL INFORMATION PROCESSING STANDARDS PUBLICATIONS. **FIPS PUBS 183**. Integration definition for function modeling (IDEF0). Dec. 1993. 128 p.
- FORCELLINI, F. A. et al. **Projeto conceitual**. Universidade Federal de Santa Catarina, mar. 2005. 168f. Notas de aula. Apostila.
- FRANKENBERGER, E.; BADKE-SCHAUB, P.. Modelling design processes in industry: empirical investigations of design work in practice. **Automation in construction**, No 7, 1998. 139-155 p.
- FROST, R. B.. Why does industry ignore design science?. **Journal of Engineering Design**, Vol. 10, No 4, 1999. 4p.
- HEUSER, C. A.. **Modelagem conceitual de sistemas: redes de Petri**. Versão preliminar publicada para a V escola brasileiro-argentina de informática. Campinas: Editora R. Vieira, 1990. 150p.
- HUBKA, W.; EDER, W. E.. **Theory of technical systems: a total concept theory for engineering design**. ISBN 3540174516. Alemanha: Springer, 1988. 275p.

- IDEF. **Integrated definition methods**. Disponível em: < <http://www.idef.com/> >. Acesso em: 22 dec. 2006.
- IEC. **International Electrotechnical Commission**. IEC 848 – Preparation of function charts for control systems. Suisse, 1988. 99p.
- IEC. **International Electrotechnical Commission**. IEC 1131 – Programmable controllers – programming languages. Suisse, 1993.
- JENSEN, K.. **Coloured Petri nets: basic concepts**. Vol.1, 2. ed.. Alemanha: Springer, 1996. 234 p.
- LEE, K. at al.. Construction and performance analysis of a Petri net model based on a functional model in a CIM system. **International journal of advanced manufacturing technology**, Vol. 23, No 1-2, pp. 139-147. 2004.
- MAFFIN, D.. Engineering design models: context, theory and practice. **Journal of engineering design**, Vol. 9, No 4, pp. 315-327. 1998.
- MIYAGI, P. E.. **Controle programável: fundamentos do controle de sistemas a eventos discretos**. São Paulo: Edgard Blücher. 1996. 194 p.
- OGLIARI, A.. **Sistematização da concepção de produtos auxiliada por computador com aplicações no domínio de componentes de plásticos injetados**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.
- PAES, F. H. S.. **Sistematização da modelagem no projeto de sistemas mecatrônicos exemplificada na automação de centrais hidrelétricas**. 2001. 125f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- PAES, F. H. S.; DE NEGRI, V. J.. **Modelagem para automação de pequenas centrais hidrelétricas: Capacitação industrial para construção de sistemas hidráulicos de controladores de turbinas**. Projeto PADCT / REIVAX. Florianópolis, 2002. Disponível em: <<http://www.laship.ufsc.br>>.
- PAHL, G.; BEITZ, W.. **Engineering design: a systematic approach**. London Berlin: Springer, 1988.
- PETERSON, J. L.. **Petri net theory and the modeling of system**. Prentice-Hall, 1981.
- PULM, U.; LINDEMANN, U.. Enhanced systematics for functional product structuring. **International Conference on engineering design**. ICED 01 Glasgow, 21-23 ago. 2001. 8 p.
- QUEIROZ, M. H.; CURY, J. E. R.. Controle supervisorio modular de sistemas de manufatura discretos. **Revista controle & automação**, Vol. 13, No 2. Campinas, mai/ago. 2002.
- RAMADGE, P. J.; WONHAM, W. M.. The control of discrete event systems. Proceeding of the **IEEE**, 77(1): 81-98, Jan. 1989.
- REISIG, W.. **Petri nets: an introduction**. Berlin: Springer-Verlag. 1985.
- REIVAX. **Diagrama hidráulico**. No F03025-02-11. 2003. 1 p.
- \_\_\_\_\_. **Manual do regulador de tensão e velocidade RTVX100**. No F03025-02-06. 2003a. 29 p.

\_\_\_\_\_. **Manual do painel de comando da bomba**. No F03025-02-14-01. 2003b. 7 p.

ROHATYNSKI, R.. Diagnosing the gap between methodology of engineering design and industrial practice. **International conference on engineering design**, ICED01 Glasgow, 21-23 Ago. 2001. 8 p.

ROSEN, K. H.. **Discrete mathematics and its applications**. 5. ed. New York: Mc Graw Hill, 2003. 787p.

SANTAREK, K.; BUSEIF, I. M.. Modelling and design of flexible manufacturing system using SADT and Petri nets tools. **Journal of materials processing technology**, Vol. 76, No 1-3, pp. 212-218. abr. 1998.

SANTOS, E. A. P.. **Contribuições ao projeto conceitual de sistemas de manipulação e montagem automatizados**. 2003. 193f.. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

SOUTO, R. B.. **Automação do processo de rebarbamento de peças em máquinas de moldagem de plástico por sopro**. 2002. 66 f.. Projeto de fim de curso (Engenharia de Controle e Automação Industrial). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

TJALVE, E.. **A short course in industrial design**. Newnes-Butterworths. 1979.

UMEDA, Y.; TOMIYAMA, T.. Functional reasoning in design. **IEEE expert, intelligent & their applications**, Vol 12, No 2, pp. 42-48. 1997

VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. **VDI 2860**: Assembly and handling; handling functions, handling units; Terminology, definitions and symbols. 1990.

VILLANI, E.. **Abordagem híbrida para modelagem de sistemas de ar condicionado em edifícios inteligentes**. 2000. 168 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

VILLANI, E.; MIYAGI, P. E.. A Hybrid Petri net modeling approach for HVAC systems in intelligent buildings. **Revista controle & automação**. Vol. 15, No 2. abr/mai/jun. 2004. 14 p.

ZUBEREK, W. M.; BLUEMKE, I.. Hierarchies of place/transition refinements in Petri nets. **IEEE**. ISBN 0-7803-3685-2/96, pp. 355-360. 1996.

WIKIPÉDIA. Enciclopédia livre (on line). Disponível em: <[http://pt.wikipedia.org/wiki/Usina\\_Hidrel%C3%A9trica\\_Passo\\_do\\_Inferno](http://pt.wikipedia.org/wiki/Usina_Hidrel%C3%A9trica_Passo_do_Inferno)>. Acesso em: 20 janeiro 2007.

## APÊNDICE A

### TABELA DE SÍMBOLOS MATEMÁTICOS

LÓGICA																	
Símbolo	Nome	Significado															
$\vee$	OU	<p><u>Ex:</u> Tabela verdade</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="padding: 2px 10px;"><math>p</math></th> <th style="padding: 2px 10px;"><math>q</math></th> <th style="padding: 2px 10px;"><math>p \vee q</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="padding: 2px 10px;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">1</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">1</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">1</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td></tr> </tbody> </table>	$p$	$q$	$p \vee q$	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0
$p$	$q$	$p \vee q$															
1	1	1															
1	0	1															
0	1	1															
0	0	0															
$\wedge$	E	<p><u>Ex:</u> Tabela verdade</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="padding: 2px 10px;"><math>p</math></th> <th style="padding: 2px 10px;"><math>q</math></th> <th style="padding: 2px 10px;"><math>p \wedge q</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="padding: 2px 10px;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">1</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td></tr> </tbody> </table>	$p$	$q$	$p \wedge q$	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
$p$	$q$	$p \wedge q$															
1	1	1															
1	0	0															
0	1	0															
0	0	0															
$\oplus$	OU exclusivo "XOR"	<p><u>Ex:</u> Tabela verdade</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="padding: 2px 10px;"><math>p</math></th> <th style="padding: 2px 10px;"><math>q</math></th> <th style="padding: 2px 10px;"><math>p \oplus q</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="padding: 2px 10px;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">1</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">1</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td></tr> </tbody> </table>	$p$	$q$	$p \oplus q$	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0
$p$	$q$	$p \oplus q$															
1	1	0															
1	0	1															
0	1	1															
0	0	0															
$\rightarrow$	se...então	<p>se...então</p> <p><u>Ex:</u> <math>p</math>: José vai ao mercado <math>q</math>: José vai fazer compras</p> <p><math>p \rightarrow q</math></p> <p><u>Se</u> José vai ao mercado <u>então</u> ele vai fazer compras.</p>															
$\leftrightarrow$	se e somente se	<p>se e somente se</p> <p><u>Ex:</u> <math>p</math>: Maria vai à praia <math>q</math>: Maria vai tirar notas boas</p> <p><math>p \leftrightarrow q</math></p> <p>Maria vai à praia <u>se e somente se</u> ela tirar notas boas.</p>															
$\forall$	para todo	<p>"Para todo" ou "Para qualquer que seja"</p> <p><u>Ex:</u> <math>\forall x &gt; 0</math>, <math>x</math> é positivo. Significa que <u>para qualquer</u> <math>x</math> maior que 0, <math>x</math> é positivo.</p>															
$ $	tal que	<p><u>Ex:</u> <math>\mathbf{R}_+ = \{x \in \mathbf{R} / x \geq 0\}</math>, significa que <math>\mathbf{R}_+</math> é o conjunto dos números pertencentes aos reais <u>tal que</u> esses</p>															

		números sejam maiores ou iguais a zero.
$\Rightarrow$	implica	<p><u>Ex:</u> <math>A</math>: São Paulo é capital de um estado brasileiro  <math>B</math>: São Paulo é uma cidade brasileira  <math>A \Rightarrow B</math></p> <p><u>Ex:</u> sendo verdadeira a afirmação que está antes dele, então também será verdadeira a afirmação à sua direita. Por exemplo, “São Paulo é capital de um estado brasileiro” implica que “São Paulo é uma cidade brasileira”.</p>
<b>CONJUNTOS</b>		
<b>Símbolo</b>	<b>Nome</b>	<b>Significado</b>
$\mathbb{N}$	Números naturais	<u>Ex:</u> $\{0,1,2,3,\dots\}$
$\{, \}$	chaves	o conjunto de... <u>Ex:</u> $\{a,b,c\}$ representa o conjunto composto por $a$ , $b$ e $c$ .
$\{\}$ ou $\emptyset$	conjunto vazio	Significa que o conjunto não tem elementos, é um conjunto vazio. <u>Ex:</u> $A = \{1,2,3\}$ e $B = \{4,5,6\}$ $A \cap B = \emptyset$
$\in$	pertence	Indica relação de pertinência. <u>Ex:</u> $5 \in \mathbb{N}$ . Significa que o 5 pertence aos números naturais.
$\notin$	não pertence	Não pertence. <u>Ex:</u> $-1 \notin \mathbb{N}$ . Significa que o número -1 não pertence aos números naturais.
$\exists$	existe	Indica existência. <u>Ex:</u> $\exists x \in \mathbb{Z} \mid x > 3$ Significa que existe um $x$ pertencente ao conjunto dos números inteiros tal que $x$ é maior que 3.
$\subset$	está contido	<u>Ex:</u> $\mathbb{N} \subset \mathbb{Z}$ ou seja, o conjunto dos números naturais está contido no conjunto dos números inteiros.
$\not\subset$	não está contido	<u>Ex:</u> $\mathbb{R} \not\subset \mathbb{N}$ ou seja, o conjunto dos números reais não está contido no conjunto dos números naturais.
$\supset$	contém	<u>Ex:</u> $\mathbb{Z} \supset \mathbb{N}$ , ou seja, o conjunto dos números inteiros contém o conjunto dos números naturais.
$A \cup B$	união de conjuntos	Lê-se como "A união B"

		<p><u>Ex:</u> <math>A = \{5,7,10\}</math>  <math>B = \{3,6,7,8\}</math>  <math>A \cup B = \{3,5,6,7,8,10\}</math></p>
$A \cap B$	intersecção de conjuntos	<p>Lê-se como "A intersecção B"  <u>Ex:</u> <math>A = \{1,3,5,7,8,10\}</math>  <math>B = \{2,3,6,7,8\}</math>  <math>A \cap B = \{3,7,8\}</math></p>
$A \times B$	produto cartesiano	<p>Lê-se como "produto cartesiano de A e B".  <math>A = \{5,7\}</math>  <math>B = \{3,6,9\}</math>  <math>A \times B = \{(5,3), (5,6), (5,9), (7,3), (7,6), (7,9)\}</math></p>
$A = B$	igual	<p>Lê-se como "A igual a B"  <u>Ex:</u> <math>A = \{5,7,10\}</math>  <math>B = \{5,7,10\}</math>  <math>A = B = \{5,7,10\}</math></p>
$A \neq B$	diferente	<p>Lê-se como "A diferente de B"  <u>Ex:</u> <math>A = \{5,7,10\}</math>  <math>B = \{5,10\}</math>  <math>A \neq B</math></p>
$A \approx B$	equivalente	<p>Colocando os números em ordem crescente e as letras em ordem alfabética, pode-se fazer uma equivalência entre os conjuntos.  <u>Ex:</u> <math>A = \{1,2,4,7,8,9\}</math>  <math>B = \{a,b,d,g,h,i\}</math>  <math>A \approx B</math></p>
$P(A)$	conjunto das partes ou conjunto de todos os subconjuntos	<p>Lê-se como "conjunto das partes de A"  <u>Ex:</u> <math>A = \{0,1,2\}</math>  <math>P(A) = \{ \{ \}, \{0\}, \{1\}, \{2\}, \{0,1\}, \{0,2\}, \{1,2\}, \{0,1,2\} \}</math></p>
$n$ -upla	uma $n$ -upla é um grupo de ' $n$ ' elementos dispostos ordenadamente.	
Matriz	Matrizes são utilizadas pela matemática discreta para expressar a relação entre os elementos de conjuntos.	
<b>FUNÇÃO</b>		
<b>Símbolo</b>	<b>Nome</b>	<b>Significado</b>
:	definido por	<u>Ex:</u>

$f : A \rightarrow B$	função de $A$ para $B$	A função $f$ é <u>definida como</u> o mapeamento do conjunto $A$ no conjunto $B$ .
$f(a) = b$	a função $f$ aplicada em $a$ é igual a $b$ .	Indica que $b$ é o único elemento de $B$ determinado por pela função $f$ para o elemento $a$ de $A$ .

## APÊNDICE B

### GRAFO DE FLUXO DE RECURSOS

Um grafo de fluxo de recursos tem a finalidade de mapear os canais por onde um determinado recurso pode fluir, ou seja, o grafo expõe o caminho que um determinado recurso pode percorrer e, por conseqüência, quais canais podem ser percorridos pelo recurso. O mapeamento é construído a partir de um canal de suprimento e segue até que todos os vértices tenham sido explorados.

O grafo é utilizado nesta dissertação para auxiliar o mapeamento da relação dos canais de consumo para com os de suprimento, sendo aplicado primeiramente, na seção 4.1.2 onde o mapeamento, exposto por uma matriz de dependência, depende também do recurso, ou seja, neste caso o grafo é utilizado para mapear o fluxo de um recurso específico. Posteriormente, o grafo é aplicado na análise de dependência entre recursos (seção 4.1.3), onde o mapeamento independe do recurso e se deseja saber qual é o fluxo, independentemente do recurso.

O processo para geração de um grafo de fluxo de recursos deve ser realizado com base nas matrizes  $\kappa_{pre}$  e  $\kappa_{post}$ , entretanto com referência a somente um *bit*. O que implica em considerar somente um recurso, como acontece na seção 4.1.2, ou devem ser representados todos os recursos por um único *bit*, como realizado na seção 4.1.3.

Logo, quando se deseja construir o grafo para um determinado recurso (seção 4.1.2), as matrizes  $\kappa_{pre}$  e  $\kappa_{post}$  devem ser simplificadas a fim de mostrar só este recurso (Fig. 1).

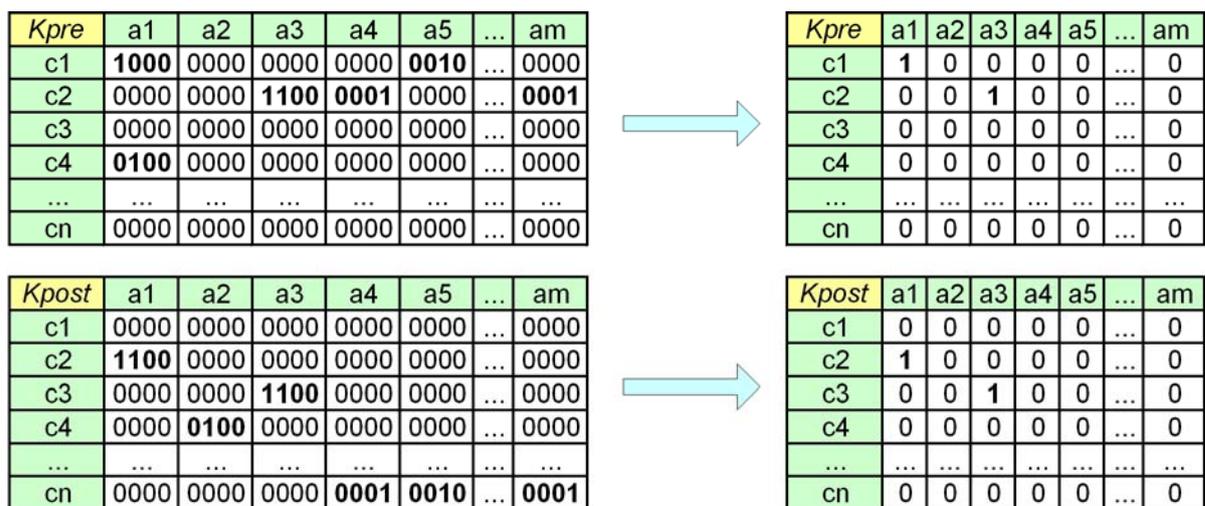


Fig. 1. Simplificação das matrizes  $\kappa_{pre}$  e  $\kappa_{post}$ , para expor somente o recurso '1000'.

Quando o grafo de fluxo de recursos independe do recurso (seção 4.1.3 ), deve-se expressar todos os recursos por um único *bit*, o que é alcançado por uma operação ‘OU’ entre todos os *bits* que compõem os campos das matrizes  $\kappa_{pre}$  e  $\kappa_{post}$  (Fig. 2).

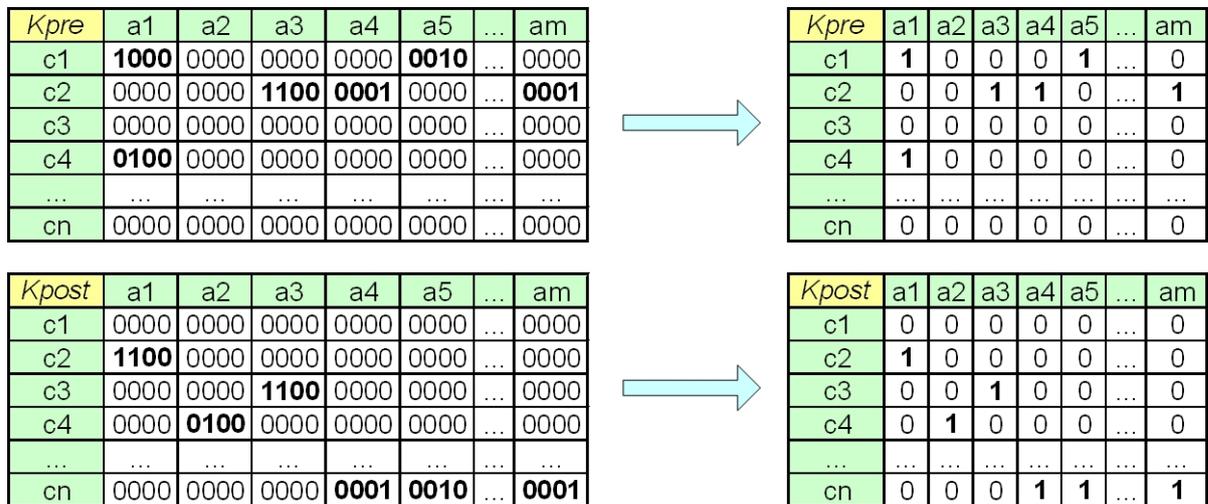


Fig. 2. Simplificação das matrizes  $\kappa_{pre}$  e  $\kappa_{post}$ , para representar todos os recursos por um único *bit*.

Visualmente, o grafo de fluxo de recursos é um grafo direcionado e composto por um único tipo de vértice, os quais são simbolizados por círculos e se equivalem aos canais na rede C/A. Nesta dissertação os vértices do grafo que representam os canais de saída serão destacados com um círculo duplo, deixando o grafo com a aparência de um autômato (Ramadge e Wonham, 1989), entretanto vale salientar que o significado do grafo de fluxo de recursos **não** tem nada a ver com autômatos.

Para exemplificar os passos a serem seguidos para a construção do grafo, serão utilizadas as matrizes simplificadas  $\kappa_{pre}$  e  $\kappa_{post}$ , expostas na Fig. 2 e referentes à rede da Figura 4.1.

Segue o procedimento para gerar o gráfico referente ao canal de entrada ‘c1’:

1. O primeiro vértice do grafo é referente ao canal de suprimento que deu origem ao processo, no caso ‘c1’. A primeira etapa consiste em verificar quais agências têm como pré-condição o canal ‘c1’, através da matriz  $\kappa_{pre}$ . Para o exemplo, tem-se ‘a1’ e ‘a5’.

<i>K<sub>pre</sub></i>	a1	a2	a3	a4	a5	...	a <sub>m</sub>
c1	<b>1</b>	0	0	0	<b>1</b>	...	0
c2	0	0	<b>1</b>	<b>1</b>	0	...	<b>1</b>
c3	0	0	0	0	0	...	0
c4	<b>1</b>	0	0	0	0	...	0
...	...	...	...	...	...	...	...
c <sub>n</sub>	0	0	0	0	0	...	0

Grafo de fluxo de recursos



Fig. 3. Primeira etapa na construção do grafo de fluxo de recursos.

- Os próximos vértices a serem acrescentados ao grafo serão os canais que saem das agências detectadas na etapa anterior. No exemplo, tem-se 'c2' como pós de 'a1' e 'cn' de 'a5'.

<i>Kpost</i>	a1	a2	a3	a4	a5	...	am
c1	0	0	0	0	0	...	0
c2	<b>1</b>	0	0	0	0	...	0
c3	0	0	<b>1</b>	0	0	...	0
c4	0	<b>1</b>	0	0	0	...	0
...	...	...	...	...	...	...	...
cn	0	0	0	<b>1</b>	<b>1</b>	...	<b>1</b>

Grafo de fluxo de recursos

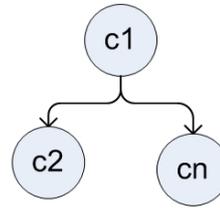


Fig. 4. Segunda etapa na construção do grafo de fluxo de recursos.

- Verificar quais destes canais ('c2' e 'cn') são canais de consumo, de modo que se for canal de consumo, então se marca o canal com um círculo duplo e se considera que o vértice já foi explorado. Caso o canal não seja de consumo, então se dá continuidade ao processo, repetindo-se as etapas de 1 a 3 para cada vértice ainda não explorado (Fig. 6). No exemplo, 'cn' é canal de consumo e 'c2' deve ser explorado (Fig. 5).

Grafo de fluxo de recursos

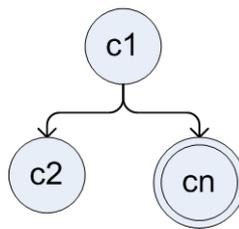


Fig. 5. Terceira etapa na construção do grafo de fluxo de recursos.

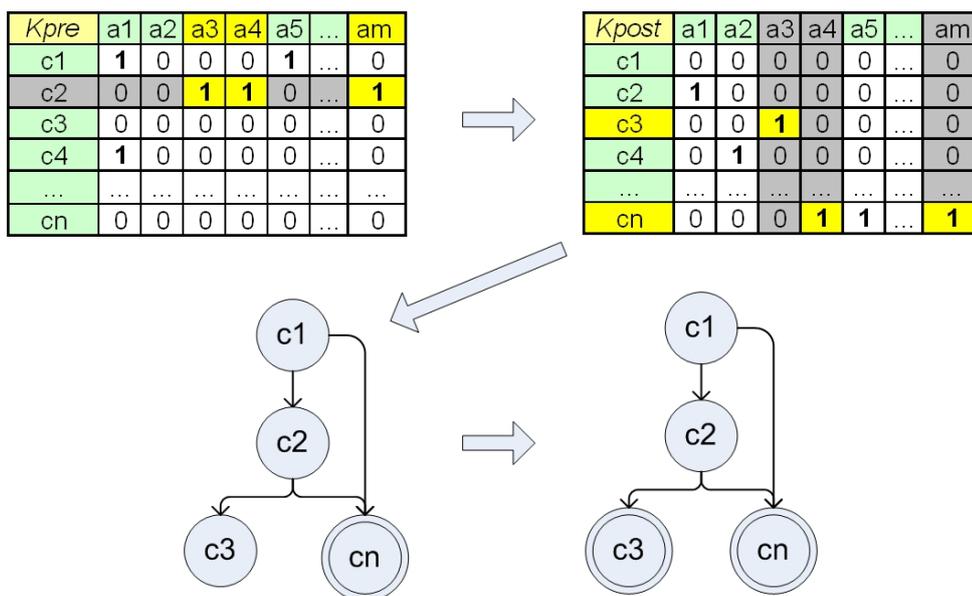


Fig. 6. Resultado para a exploração do canal 'c1'.



Os vértices contornados por traço-ponto (Fig. 7), são meramente ilustrativos e representam os subsistemas que estão ligados ao refinamento por meio de um elemento externo. Estes não devem ser considerados na formalização matemática da rede refinada, pois já estão definidos pela rede de nível superior e não apresentam ligação direta com o refinamento. Estes critérios gráficos serão utilizados em todos os modelos desta dissertação e tem a função de facilitar a visualização do que se deseja representar.

Por não haver informações claras a respeito da estrutura do gerador (a2 na Figura 5.7), o mesmo foi refinado segundo os conceitos apresentados por Paes (2001), analogia baseada no fato de que o autor modela uma central hidrelétrica que tem as mesmas características da tratada nesta dissertação, utilizando uma turbina Francis disposta horizontalmente e um regulador RTVX100.

O gerador (a2.2 na Fig. 8) é responsável pela conversão da energia mecânica em elétrica e é composto basicamente por: gerador, disjuntor e barramento elétrico, os quais não serão detalhados neste trabalho. O gerador, que fica apoiado em mancais (a2.1 e a2.3), recebe a energia mecânica na forma de torque e rotação através do eixo (c4) e fornece energia elétrica (c1) com a frequência e tensão reguladas.

Segundo Paes (2001), após o processo de automação da central a função de manter a tensão nominal da máquina em valor definido para operação, que até então era realizada pela excitatriz (a2.5 na Fig. 8), passa a ser realizada pelo regulador de tensão e circuitos eletrônicos. No entanto, o autor relata que a excitatriz permaneceu no local original cumprindo agora uma função exclusivamente mecânica, para manter o balanceamento das forças no conjunto turbina-gerador.

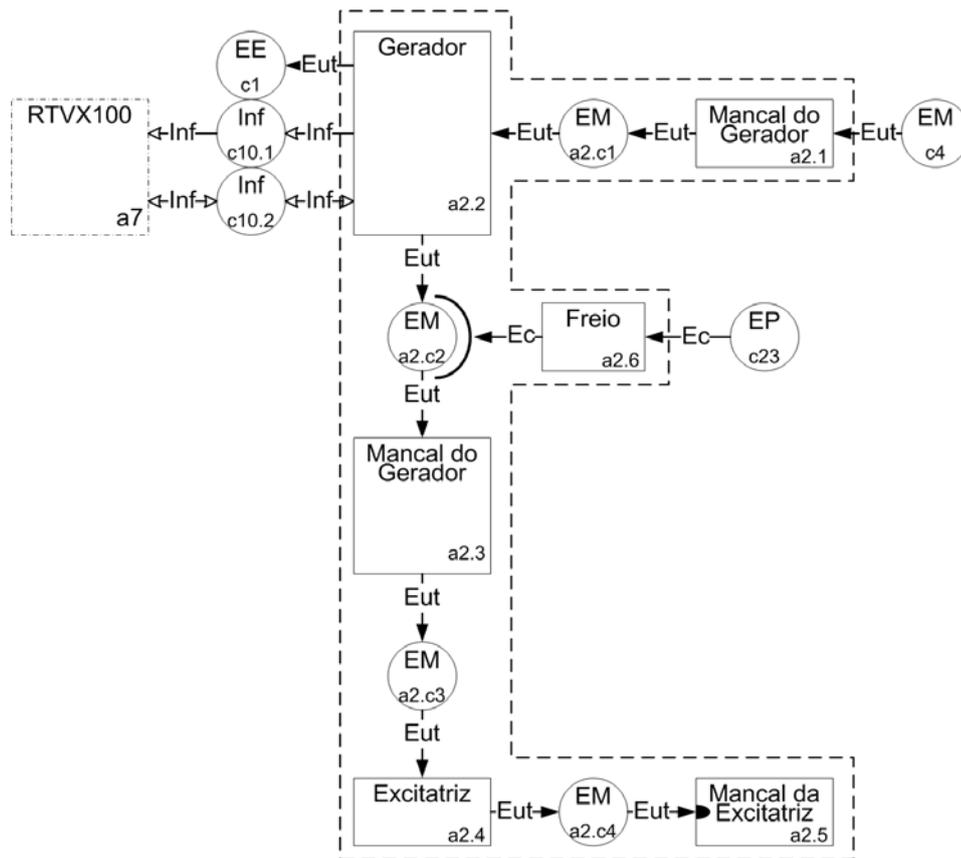


Fig. 8. Refinamento do gerador.

O rotor (a4 na Figura 5.7) é o elemento central da turbina, sendo responsável pela transformação da energia hidráulica contida na água em energia mecânica. O rotor é constituído de pás fixas que possuem determinada curvatura, através das quais consegue mudar a direção do fluxo da água e, conseqüentemente, variar do momento de inércia da água e fazer girar o rotor. A rotação e o torque gerados no rotor são transmitidos para os processos seguintes através de um eixo (c4, a4.c1 e a4.c2) (Fig. 9).

O eixo é apoiado em três mancais, dois para contenção de esforços radiais e um para esforços axiais, sendo que este último é chamado de mancal de escora e é modelado juntamente com um dos radiais (a4.3 na Fig. 9). Como os mancais operaram com valores de força elevados, estes devem ser monitorados por um sistema de lubrificação e refrigeração. O sistema de lubrificação consiste em reservatório de óleo, sensores: vazão, nível e temperatura do óleo e a bomba que o faz circular (a4.5). O trocador de calor é formado por uma serpentina que passa por dentro do óleo e utiliza a água proveniente do caracol para o resfriamento do óleo (Paes, 2001).

O eixo também é o local onde está acoplada a roda dentada (a4.4), é através dela que é realizada uma das medições de velocidade. Dois sensores indutivos (*pickup*) são instalados próximos à roda dentada e ao facear os dentes da roda emite um sinal correspondente a frequência para a CPU (c13 – *pickup* 1) e para o CLP do cliente (c14 – *pickup* 2). Uma outra medição de frequência é realizada através de um conversor (quadrador) que a

partir da tensão dos TP's da máquina disponibiliza, para a CPU, um sinal proporcional à frequência do gerador (c10.1 na Fig. 8). Este sinal tem prevalência ao sinal do *pick-up*, de modo que a perda deste levará automaticamente a CPU a comutar para o sinal proveniente da roda dentada, caso este também não esteja disponível o sistema será levado ao estado de falha grave.

O detector de sobrevelocidade (a4.6 na Fig. 9) consiste em um dispositivo mecânico acoplado diretamente ao eixo (a4.c2), o qual tem uma função de segurança. Caso a velocidade ultrapasse certo limite, determinado com base no momento de inércia do detector, este se desloca acionando uma válvula hidráulica (a3.2 na Figura 5.8) que provoca o fechamento das pás da turbina.

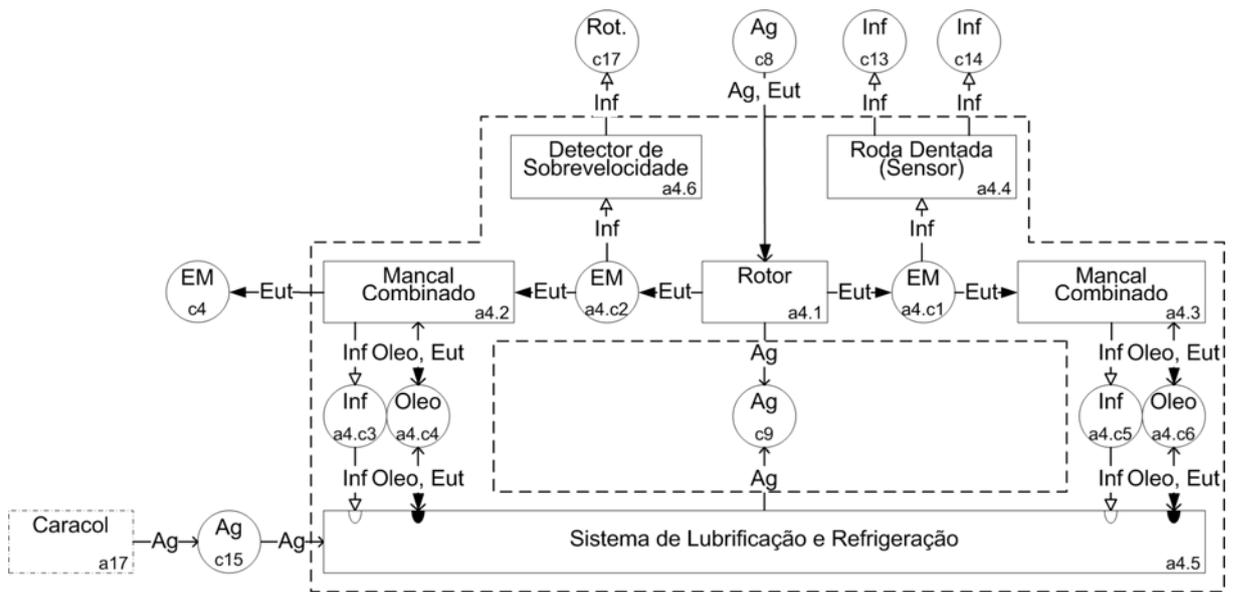


Fig. 9. Refinamento do rotor.

A Fig. 10 expõe os refinamentos dos mancais combinados, sendo 'a)' referente ao mancal representado pela agência 'a4.2' e 'b)' pela 'a4.3' (Fig. 10), tais refinamentos apesar de evidenciarem que os transdutores captam as informações do óleo contido nos mancais, foram criados mais com o objetivo exemplificar um refinamento em segundo nível hierárquico.

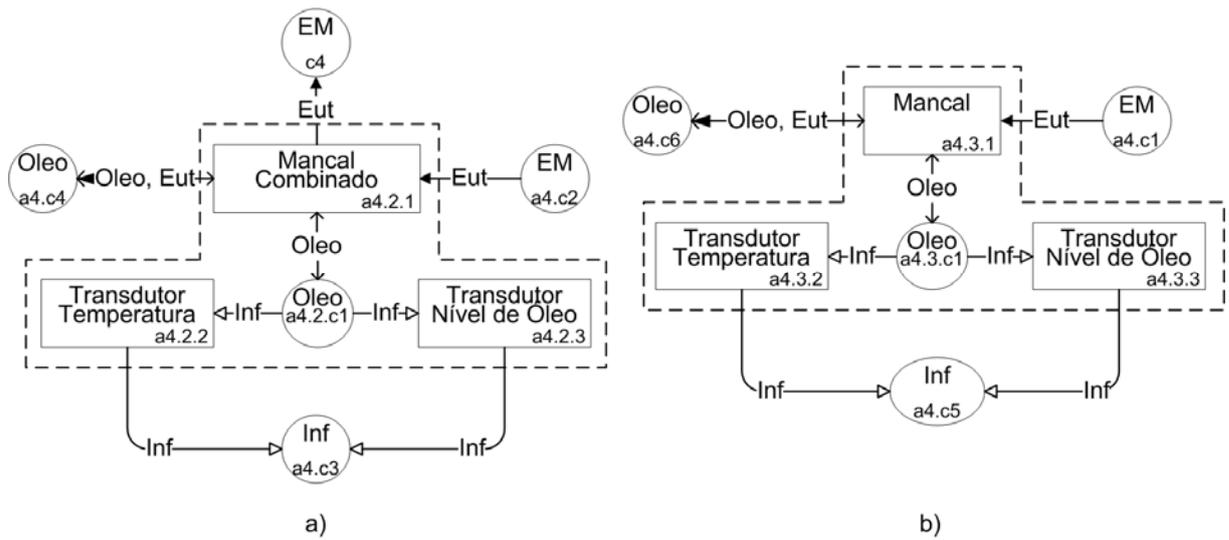
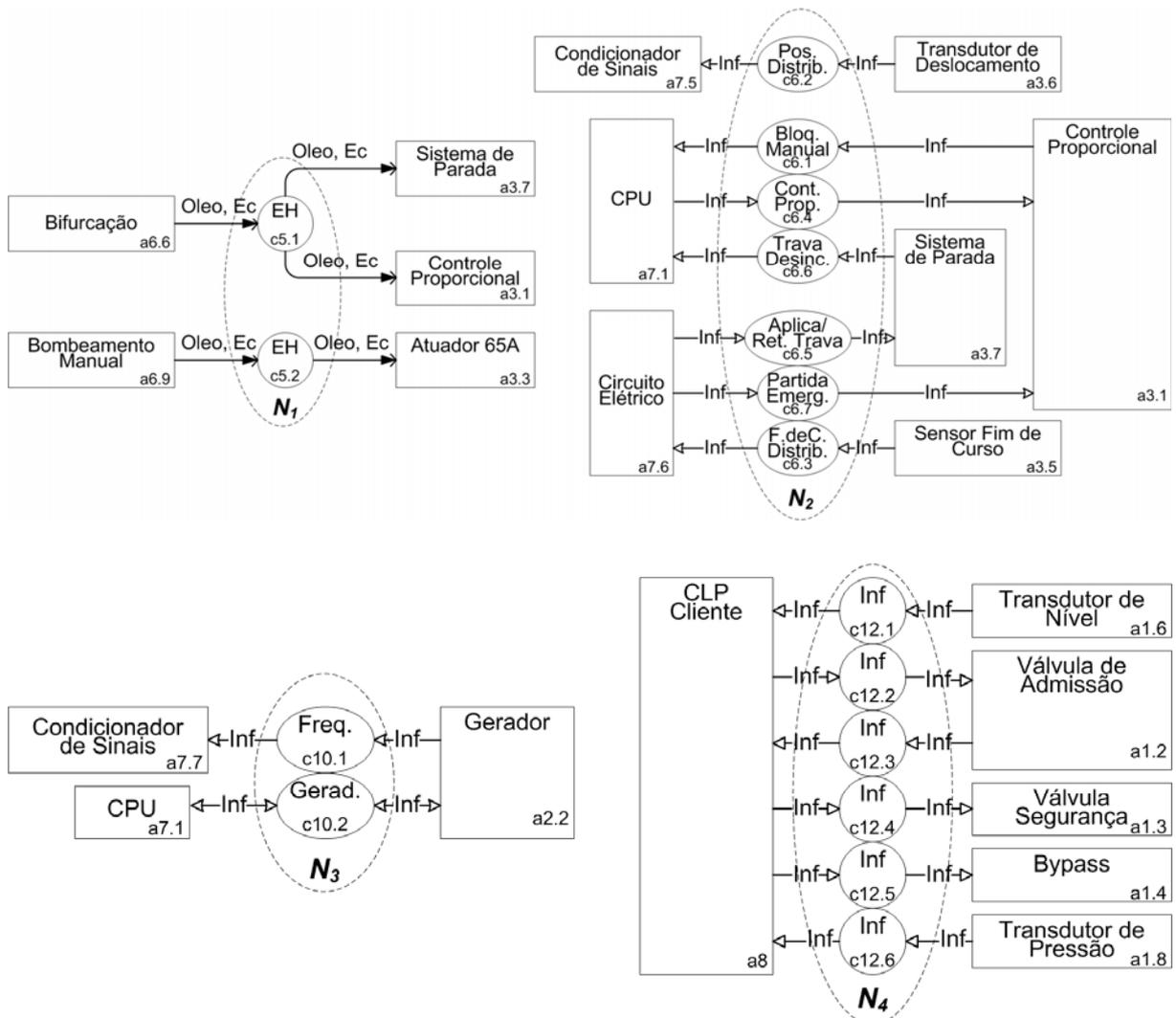
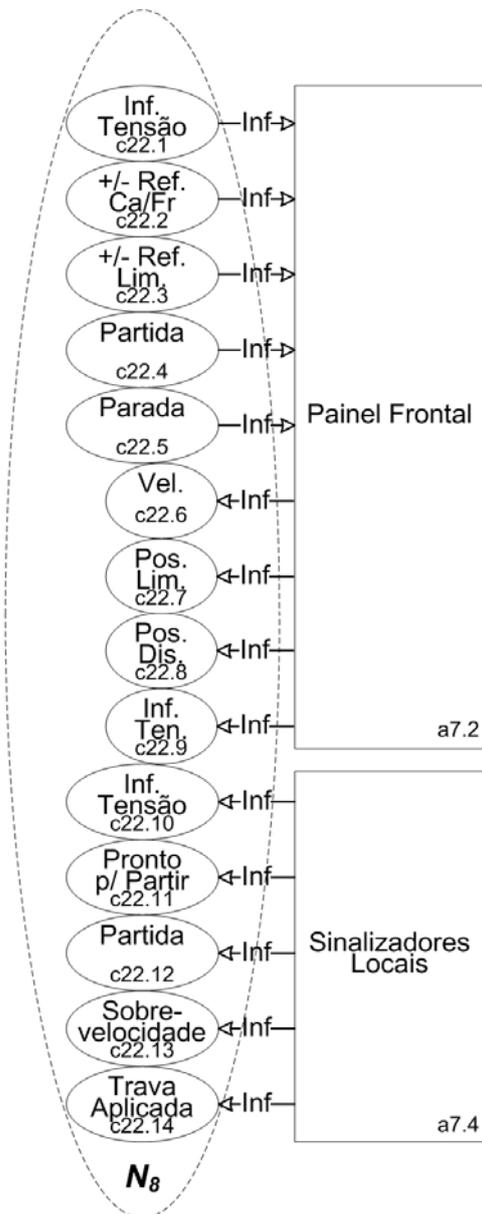
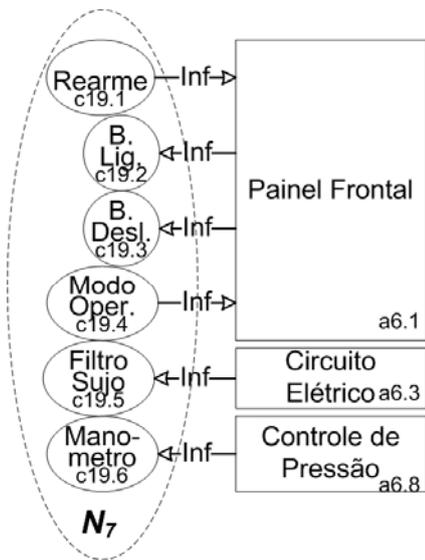
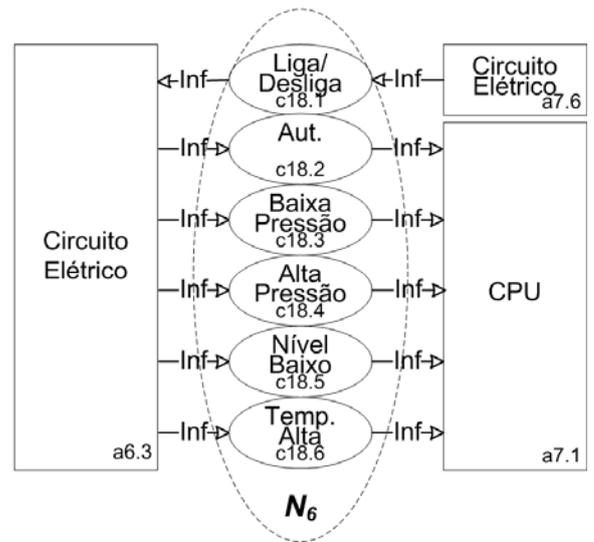
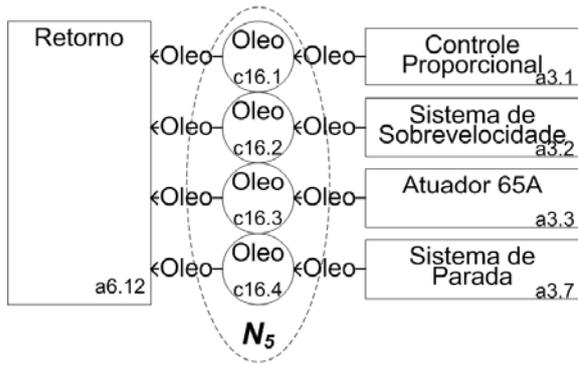


Fig. 10. Refinamento dos mancais combinados. a) Mancal 'a4.2' e b) Mancal 'a4.3'.

As redes apresentadas abaixo ( $N_1$  a  $N_8$ ) se referem aos refinamentos dos canais, que por simplificação, estão expostas somente na forma gráfica, ou seja, sem o formalismo matemático equivalente (apêndice D) e também sem explicações pontuais.





## APÊNDICE D

### MODELOS MATEMÁTICOS EQUIVALENTES ÀS REDES C/A

$$\mathfrak{R}_{ca0} = \{N_0, N_{f0}, \delta_0\}$$

$N_0 = \{C_0, A_0, C_{ex0}, A_{ex0}, E_{re0}, \lambda_{re0}, \lambda_{ca0}, K_{pre0}, K_{post0}\}$  - (Figura 5.7 – Capítulo 5).

$$C_0 = \{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, c_9, c_{10}, c_{11}, c_{12}, c_{13}, c_{14}, c_{15}, c_{16}, c_{17}, c_{18}, c_{19}, c_{20}, c_{21}, c_{22}, c_{23}\}$$

$$A_0 = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8\}$$

$$C_{ex0} = \{\}$$

$$A_{ex0} = \{\}$$

$$E_{re0} = \{Ag, Oleo, Eut, Ec, Inf\}$$

$$\lambda_{re0}(\{Ag, Oleo\}) = M$$

$$\lambda_{re0}(\{Eut, Ec\}) = E$$

$$\lambda_{re0}(\{Inf\}) = I$$

$$\lambda_{ca0}(c_1) = \lambda_{ca0}(c_4) = \{Eut\}$$

$$\lambda_{ca0}(c_2) = \lambda_{ca0}(c_7) = \lambda_{ca0}(c_8) = \{Ag, Eut\}$$

$$\lambda_{ca0}(c_3) = \lambda_{ca0}(c_9) = \lambda_{ca0}(c_{11}) = \lambda_{ca0}(c_{15}) = \lambda_{ca0}(a_5) = \{Ag\}$$

$$\lambda_{ca0}(c_5) = \{Oleo, Ec\}$$

$$\lambda_{ca0}(c_6) = \lambda_{ca0}(c_{10}) = \lambda_{ca0}(c_{12}) = \lambda_{ca0}(c_{13}) = \lambda_{ca0}(c_{14}) = \lambda_{ca0}(c_{17}) = \{Inf\}$$

$$\lambda_{ca0}(c_{18}) = \lambda_{ca0}(c_{19}) = \lambda_{ca0}(c_{22}) = \lambda_{ca0}(a_7) = \lambda_{ca0}(a_8) = \{Inf\}$$

$$\lambda_{ca0}(c_{16}) = \{Oleo\}$$

$$\lambda_{ca0}(c_{20}) = \lambda_{ca0}(c_{22}) = \lambda_{ca0}(c_{23}) = \{Ec\}$$

$$\lambda_{ca0}(a_1) = \lambda_{ca0}(a_4) = \{Ag, Eut, Inf\}$$

$$\lambda_{ca0}(a_2) = \{Eut, Inf\}$$

$$\lambda_{ca0}(a_3) = \lambda_{ca0}(a_6) = \{Ag, Oleo, Eut, Ec, Inf\}$$

<b>Kpre0</b>	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8
c1	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c2	{Ag, Eut}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c3	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c4	∅	{Eut}	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c5	∅	∅	{Oleo, Ec}	∅	∅	∅	∅	∅
c6	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	{Inf}	∅
c7	∅	∅	{Ag, Eut}	∅	∅	∅	∅	∅
c8	∅	∅	∅	{Ag, Eut}	∅	∅	∅	∅
c9	∅	∅	∅	∅	{Ag}	∅	∅	∅
c10	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	{Inf}	∅
c11	∅	∅	∅	∅	{Ag}	∅	∅	∅
c12	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	{Inf}
c13	∅	∅	∅	∅	∅	∅	{Inf}	∅
c14	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	{Inf}
c15	∅	∅	∅	{Ag}	∅	∅	∅	∅
c16	∅	∅	∅	∅	∅	{Oleo}	∅	∅
c17	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅
c18	∅	∅	∅	∅	∅	{Inf}	{Inf}	∅
c19	∅	∅	∅	∅	∅	{Inf}	∅	∅
c20	∅	∅	∅	∅	∅	{Ec}	∅	∅
c21	∅	∅	∅	∅	∅	{Ec}	∅	∅
c22	∅	∅	∅	∅	∅	∅	{Inf}	∅
c23	{Ec}	{Ec}	∅	∅	∅	∅	∅	∅

<b>Kpost0</b>	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8
c1	∅	{Eut}	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c2	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c3	∅	∅	∅	∅	{Ag}	∅	∅	∅
c4	∅	∅	∅	{Eut}	∅	∅	∅	∅
c5	∅	∅	∅	∅	∅	{Oleo, Ec}	∅	∅
c6	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	{Inf}	∅
c7	{Ag, Eut}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c8	∅	∅	{Ag, Eut}	∅	∅	∅	∅	∅
c9	∅	∅	∅	{Ag}	∅	∅	∅	∅
c10	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	{Inf}	∅
c11	{Ag}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c12	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	{Inf}
c13	∅	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅
c14	∅	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅
c15	{Ag}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c16	∅	∅	{Oleo}	∅	∅	∅	∅	∅
c17	∅	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅
c18	∅	∅	∅	∅	∅	{Inf}	{Inf}	∅
c19	∅	∅	∅	∅	∅	{Inf}	∅	∅
c20	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c21	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c22	∅	∅	∅	∅	∅	∅	{Inf}	∅
c23	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅

$$N_{f0} = \{N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6, N_7, N_8, N_9, N_{10}, N_{11}, N_{12}, N_{13}, N_{14}\}$$

$$N_9 = \{C_9, A_9, C_{ex9}, A_{ex9}, E_{re9}, \lambda_{re9}, \lambda_{ca9}, K_{pre9}, K_{post9}\} - \text{(Fig. 7 – apêndice C).}$$

$$C_9 = \{a_1.c_1, a_1.c_2, a_1.c_3, a_1.c_4, c_{12.2} * a_{1.2}, c_{12.4} * a_{1.3}, c_{12.5} * a_{1.4}, c_{23} * a_{1.2}, c_{23} * a_{1.3}, c_{23} * a_{1.4}\}$$

$$A_9 = \{a_{1.1}, a_{1.2}, a_{1.3}, a_{1.4}, a_{1.5}, a_{1.6}, a_{1.8}\}$$

$$C_{ex9} = \{c_2, c_7, c_{11}, c_{15}, c_{23}, c_{12.1}, c_{12.2}, c_{12.3}, c_{12.4}, c_{12.5}, c_{12.6}\}$$

$$A_{ex9} = \{\}$$

$$E_{re9} = \{Ag, Eut, Ec, Inf\}$$

$$\lambda_{re9}(\{Ag\}) = M$$

$$\lambda_{re9}(\{Eut, Ec\}) = E$$

$$\lambda_{re9}(\{Inf\}) = I$$

$$\lambda_{ca9}(a_1.c_1) = \lambda_{ca9}(a_1.c_3) = \lambda_{ca9}(a_{1.1}) = \lambda_{ca9}(a_{1.5}) = \{Ag, Eut\}$$

$$\lambda_{ca10}(a_1.c_2) = \{Ag, Eut, Inf\}$$

$$\lambda_{ca10}(a_1.c_4) = \{Ag, Inf\}$$

$$\lambda_{ca9}(c_{12.2} * a_{1.2}) = \lambda_{ca9}(c_{12.4} * a_{1.3}) = \lambda_{ca9}(c_{12.5} * a_{1.4}) = \{Inf\}$$

$$\lambda_{ca9}(c_{23} * a_{1.2}) = \lambda_{ca9}(c_{23} * a_{1.3}) = \lambda_{ca9}(c_{23} * a_{1.4}) = \{Ec\}$$

$$\lambda_{ca9}(a_{1.2}) = \lambda_{ca9}(a_{1.3}) = \lambda_{ca9}(a_{1.4}) = \{Ag, Eut, Ec, Inf\}$$

$$\lambda_{ca9}(a_{1.6}) = \lambda_{ca9}(a_{1.8}) = \{Inf\}$$

Kpre9	a1.1	a1.2	a1.3	a1.4	a1.5	a1.6	a1.8
a1.c1	∅	{Ag, Eut}	∅	∅	∅	∅	∅
a1.c2	∅	∅	{Ag, Eut}	{Ag, Eut}	∅	∅	∅
a1.c3	∅	∅	∅	∅	{Ag, Eut}	∅	∅
a1.c4	∅	∅	∅	∅	{Ag}	∅	{Inf}
c12.2*a1.2	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c12.4*a1.3	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c12.5*a1.4	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c23*a1.2	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c23*a1.3	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c23*a1.4	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c2	{Ag, Eut}	∅	∅	∅	∅	{Inf}	∅
c7	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c11	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c15	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c23	∅	{Ec}	{Ec}	{Ec}	∅	∅	∅
c12.1	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c12.2	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅
c12.3	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c12.4	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅
c12.5	∅	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅
c12.6	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅

<i>Kpost9</i>	a1.1	a1.2	a1.3	a1.4	a1.5	a1.6	a1.8
a1.c1	{Ag, Eut}	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a1.c2	∅	{Ag, Eut}	∅	∅	∅	∅	∅
a1.c3	∅	∅	{Ag, Eut}	{Ag, Eut}	∅	∅	∅
a1.c4	∅	∅	∅	∅	{Ag}	∅	∅
c12.2*a1.2	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅
c12.4*a1.3	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅
c12.5*a1.4	∅	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅
c23*a1.2	∅	{Ec}	∅	∅	∅	∅	∅
c23*a1.3	∅	∅	{Ec}	∅	∅	∅	∅
c23*a1.4	∅	∅	∅	{Ec}	∅	∅	∅
c2	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c7	∅	∅	∅	∅	{Ag, Eut}	∅	∅
c11	{Ag}	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c15	∅	∅	∅	∅	{Ag}	∅	∅
c23	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c12.1	∅	∅	∅	∅	∅	{Inf}	∅
c12.2	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c12.3	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅
c12.4	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c12.5	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c12.6	∅	∅	∅	∅	∅	∅	{Inf}

$N_{10} = \{C_{10}, A_{10}, C_{ex10}, A_{ex10}, E_{re10}, \lambda_{re10}, \lambda_{ca10}, K_{pre10}, K_{post10}\}$  - (Fig. 8 – apêndice

C).

$$C_{10} = \{a_2.c_1, a_2.c_2, a_2.c_3, a_2.c_4, a_2.c_4 * a_{2.5}\}$$

$$A_{10} = \{a_{2.1}, a_{2.2}, a_{2.3}, a_{2.4}, a_{2.5}, a_{2.6}\}$$

$$C_{ex10} = \{c_1, c_4, c_{23}, c_{10.1}, c_{10.2}\}$$

$$A_{ex10} = \{\}$$

$$E_{re10} = \{Eut, Ec, Inf\}$$

$$\lambda_{re10}(\{Eut, Ec\}) = E$$

$$\lambda_{re10}(\{Inf\}) = I$$

$$\lambda_{ca10}(a_2.c_1) = \lambda_{ca10}(a_2.c_3) = \lambda_{ca10}(a_2.c_4) = \lambda_{ca10}(a_2.c_4 * a_{2.5}) = \{Eut\}$$

$$\lambda_{ca10}(a_2.c_2) = \{Eut, Ec\}$$

$$\lambda_{ca10}(a_{2.1}) = \lambda_{ca10}(a_{2.3}) = \lambda_{ca10}(a_{2.4}) = \lambda_{ca10}(a_{2.5}) = \{Eut\}$$

$$\lambda_{ca10}(a_{2.2}) = \{Eut, Inf\}$$

$$\lambda_{ca10}(a_{2.6}) = \{Ec\}$$

<i>Kpre10</i>	a2.1	a2.2	a2.3	a2.4	a2.5	a2.6	<i>Kpost10</i>	a2.1	a2.2	a2.3	a2.4	a2.5	a2.6
a2.c1	∅	{Eut}	∅	∅	∅	∅	a2.c1	{Eut}	∅	∅	∅	∅	∅
a2.c2	∅	∅	{Eut}	∅	∅	∅	a2.c2	∅	{Eut}	∅	∅	∅	{Ec}
a2.c3	∅	∅	∅	{Eut}	∅	∅	a2.c3	∅	∅	{Eut}	∅	∅	∅
a2.c4	∅	∅	∅	∅	{Eut}	∅	a2.c4	∅	∅	∅	{Eut}	∅	∅
a2.c4*a2.5	∅	∅	∅	∅	∅	∅	a2.c4*a2.5	∅	∅	∅	∅	{Eut}	∅
c1	∅	∅	∅	∅	∅	∅	c1	∅	{Eut}	∅	∅	∅	∅
c4	{Eut}	∅	∅	∅	∅	∅	c4	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c23	∅	∅	∅	∅	∅	{Ec}	c23	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c10.1	∅	∅	∅	∅	∅	∅	c10.1	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅
c10.2	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	c10.2	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅

$$N_{11} = \{C_{11}, A_{11}, C_{ex11}, A_{ex11}, E_{re11}, \lambda_{re11}, \lambda_{ca11}, K_{pre11}, K_{post11}\} \quad - \text{ (Figura 5.8 -$$

Capítulo 5).

$$C_{11} = \{a_{3.c1}, a_{3.c2}, a_{3.c3}, a_{3.c4}, a_{3.c3} * a_{3.4}, c_{6.4} * a_{3.1}, c_{6.5} * a_{3.7}, c_{6.7} * a_{3.1}, c_{17} * a_{3.1}\}$$

$$A_{11} = \{a_{3.1}, a_{3.2}, a_{3.3}, a_{3.4}, a_{3.5}, a_{3.6}, a_{3.7}\}$$

$$C_{ex11} = \{c_7, c_8, c_{17}, c_{5.1}, c_{5.2}, c_{6.1}, c_{6.2}, c_{6.3}, c_{6.4}, c_{6.5}, c_{6.6}, c_{6.7}, c_{16.1}, c_{16.2}, c_{16.3}, c_{16.4}\}$$

$$A_{ex11} = \{\}$$

$$E_{re11} = \{Ag, Oleo, Haste, Eut, Ec, Inf\}$$

$$\lambda_{re11}(\{Ag, Oleo, Haste\}) = M$$

$$\lambda_{re11}(\{Eut, Ec\}) = E$$

$$\lambda_{re11}(\{Inf\}) = I$$

$$\lambda_{ca11}(a_{3.c1}) = \lambda_{ca11}(a_{3.c2}) = \{Oleo, Ec\}$$

$$\lambda_{ca11}(a_{3.c3}) = \lambda_{ca11}(a_{3.c3} * a_{3.3}) = \{Ec\}$$

$$\lambda_{ca11}(a_{3.c4}) = \{Haste, Inf\}$$

$$\lambda_{ca11}(c_{6.4} * a_{3.1}) = \lambda_{ca11}(c_{6.5} * a_{3.7}) = \lambda_{ca11}(c_{6.7} * a_{3.1}) =$$

$$\lambda_{ca11}(c_{17} * a_{3.1}) = \{Inf\}$$

$$\lambda_{ca11}(a_{3.1}) = \lambda_{ca11}(a_{3.2}) = \lambda_{ca11}(a_{3.7}) = \{Oleo, Ec, Inf\}$$

$$\lambda_{ca11}(a_{3.3}) = \{Oleo, Haste, Ec, Inf\}$$

$$\lambda_{ca11}(a_{3.4}) = \{Ag, Eut, Ec\}$$

$$\lambda_{ca11}(a_{3.5}) = \lambda_{ca11}(a_{3.6}) = \{Inf\}$$



$N_{12} = \{C_{12}, A_{12}, C_{ex12}, A_{ex12}, E_{re12}, \lambda_{re12}, \lambda_{ca12}, K_{pre12}, K_{post12}\}$  - (Fig. 9 – apêndice

C).

$$C_{12} = \{a_4.c_1, a_4.c_2, a_4.c_3, a_4.c_4, a_4.c_5, a_4.c_6, a_4.c_3 * a_{4.5}, a_4.c_4 * a_{4.5}, a_4.c_5 * a_{4.5}, a_4.c_6 * a_{4.5}\}$$

$$A_{12} = \{a_{4.1}, a_{4.2}, a_{4.3}, a_{4.4}, a_{4.5}, a_{4.6}\}$$

$$C_{ex12} = \{c_4, c_8, c_9, c_{13}, c_{14}, c_{15}, c_{17}\}$$

$$A_{ex12} = \{\}$$

$$E_{re12} = \{Ag, Oleo, Eut, Inf\}$$

$$\lambda_{re12}(\{Ag, Oleo\}) = M$$

$$\lambda_{re12}(\{Eut\}) = E$$

$$\lambda_{re12}(\{Inf\}) = I$$

$$\lambda_{ca12}(a_{4.c_1}) = \{Eut, Inf\}$$

$$\lambda_{ca12}(a_{4.c_2}) = \{Eut\}$$

$$\lambda_{ca12}(a_{4.c_3}) = \lambda_{ca12}(a_{4.c_5}) = \lambda_{ca12}(a_{4.c_3} * a_{4.5}) = \{Inf\}$$

$$\lambda_{ca12}(a_{4.c_5} * a_{4.5}) = \{Inf\}$$

$$\lambda_{ca12}(a_{4.c_4}) = \lambda_{ca12}(a_{4.c_6}) = \{Oleo, Eut\}$$

$$\lambda_{ca12}(a_{4.c_4} * a_{4.5}) = \lambda_{ca12}(a_{4.c_6} * a_{4.5}) = \{Eut\}$$

$$\lambda_{ca12}(a_{4.1}) = \{Ag, Eut\}$$

$$\lambda_{ca12}(a_{4.2}) = \lambda_{ca12}(a_{4.3}) = \{Oleo, Eut, Inf\}$$

$$\lambda_{ca12}(a_{4.4}) = \lambda_{ca12}(a_{4.6}) = \{Inf\}$$

$$\lambda_{ca12}(a_{4.5}) = \{Ag, Oleo, Eut, Inf\}$$

<i>Kpre12</i>	a4.1	a4.2	a4.3	a4.4	a4.5	a4.6
a4.c1	∅	∅	{Eut}	{Inf}	∅	∅
a4.c2	∅	{Eut}	∅	∅	∅	{Inf}
a4.c3	∅	∅	∅	∅	{Inf}	∅
a4.c4	∅	{Oleo}	∅	∅	{Oleo, Eut}	∅
a4.c5	∅	∅	∅	∅	{Inf}	∅
a4.c6	∅	∅	{Oleo}	∅	{Oleo, Eut}	∅
a4.c4*a4.5	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a4.c6*a4.5	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a4.c5*a4.5	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a4.c3*a4.5	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c4	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c8	{Ag, Eut}	∅	∅	∅	∅	∅
c9	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c13	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c14	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c15	∅	∅	∅	∅	{Ag}	∅
c17	∅	∅	∅	∅	∅	∅

<i>K</i> <sub>post12</sub>	a4.1	a4.2	a4.3	a4.4	a4.5	a4.6
a4.c1	{Eut}	∅	∅	∅	∅	∅
a4.c2	{Eut}	∅	∅	∅	∅	∅
a4.c3	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅
a4.c4	∅	{Oleo, Eut}	∅	∅	{Oleo}	∅
a4.c5	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅
a4.c6	∅	∅	{Oleo, Eut}	∅	{Oleo}	∅
a4.c4*a4.5	∅	∅	∅	∅	{Eut}	∅
a4.c6*a4.5	∅	∅	∅	∅	{Eut}	∅
a4.c5*a4.5	∅	∅	∅	∅	{Inf}	∅
a4.c3*a4.5	∅	∅	∅	∅	{Inf}	∅
c4	∅	{Eut}	∅	∅	∅	∅
c8	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c9	{Ag}	∅	∅	∅	{Ag}	∅
c13	∅	∅	∅	{Inf}	∅	∅
c14	∅	∅	∅	{Inf}	∅	∅
c15	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c17	∅	∅	∅	∅	∅	{Inf}

$N_{13} = \{C_{13}, A_{13}, C_{ex13}, A_{ex13}, E_{re13}, \lambda_{re13}, \lambda_{ca13}, K_{pre13}, K_{post13}\}$  - (Fig. 12 – Apêndice E).

$$C_{13} = \{a_6.c_1, a_6.c_2, a_6.c_3, a_6.c_4, a_6.c_5, a_6.c_6, a_6.c_7, a_6.c_8, a_6.c_9, a_6.c_{10}, a_6.c_{11}, a_6.c_{12}, a_6.c_{13}, a_6.c_{14}, a_6.c_{15}, a_6.c_{16}, a_6.c_{17}, a_6.c_{18}, a_6.c_{19}, a_6.c_{20}, a_6.c_{21}, a_6.c_{22}, a_6.c_{23}, a_6.c_{24}, a_6.c_{25}, a_6.c_{25} * a_{6.8}, a_6.c_{20} * a_{6.4}\}$$

$$A_{13} = \{a_{6.1}, a_{6.2}, a_{6.3}, a_{6.4}, a_{6.5}, a_{6.6}, a_{6.7}, a_{6.8}, a_{6.9}, a_{6.10}, a_{6.11}, a_{6.12}\}$$

$$C_{ex13} = \{c_{20}, c_{21}, c_{5.1}, c_{5.2}, c_{16.1}, c_{16.2}, c_{16.3}, c_{16.4}, c_{18.1}, c_{18.2}, c_{18.3}, c_{18.4}, c_{18.5}, c_{18.6}, c_{19.1}, c_{19.2}, c_{19.3}, c_{19.4}, c_{19.5}, c_{19.6}\}$$

$$A_{ex13} = \{\}$$

$$E_{re13} = \{Oleo, Ec, Inf\}$$

$$\lambda_{re13}(\{Oleo\}) = M$$

$$\lambda_{re13}(\{Ec\}) = E$$

$$\lambda_{re13}(\{Inf\}) = I$$

$$\begin{aligned} \lambda_{ca13}(a_6.c_1) &= \lambda_{ca13}(a_6.c_2) = \lambda_{ca13}(a_6.c_3) = \lambda_{ca13}(a_6.c_4) = \lambda_{ca13}(a_6.c_5) = \\ \lambda_{ca13}(a_6.c_6) &= \lambda_{ca13}(a_6.c_7) = \lambda_{ca13}(a_6.c_8) = \lambda_{ca13}(a_6.c_9) = \lambda_{ca13}(a_6.c_{10}) = \\ \lambda_{ca13}(a_6.c_{11}) &= \lambda_{ca13}(a_6.c_{12}) = \lambda_{ca13}(a_6.c_{13}) = \lambda_{ca13}(a_6.c_{14}) = \\ \lambda_{ca13}(a_6.c_{15}) &= \lambda_{ca13}(a_6.c_{19}) = \lambda_{ca13}(a_6.c_{20}) = \lambda_{ca13}(a_6.c_{23}) = \\ \lambda_{ca13}(a_6.c_{24}) &= \lambda_{ca13}(a_{6.1}) = \lambda_{ca13}(a_{6.2}) = \lambda_{ca13}(a_{6.3}) = \lambda_{ca13}(a_{6.10}) = \\ \lambda_{ca13}(a_{6.11}) &= \lambda_{ca13}(a_6.c_{20} * a_{6.4}) = \{Inf\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_{ca13}(a_6.c_{16}) &= \lambda_{ca13}(a_6.c_{17}) = \lambda_{ca13}(a_6.c_{18}) = \lambda_{ca13}(a_6.c_{25}) = \lambda_{ca13}(a_{6.6}) = \\ \lambda_{ca13}(a_{6.7}) &= \lambda_{ca13}(a_{6.9}) = \{Oleo, Ec\} \end{aligned}$$

$$\lambda_{ca13}(a_{6.4}) = \lambda_{ca13}(a_{6.5}) = \lambda_{ca13}(a_{6.8}) = \{Oleo, Ec, Inf\}$$



<i>Kpost13</i>	a6.1	a6.2	a6.3	a6.4	a6.5	a6.6	a6.7	a6.8	a6.9	a6.10	a6.11	a6.12
a6.c1	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a6.c2	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a6.c3	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a6.c4	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a6.c5	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a6.c6	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a6.c7	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a6.c8	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a6.c9	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a6.c10	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a6.c11	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a6.c12	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a6.c13	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a6.c14	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅
a6.c15	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅
a6.c16	∅	∅	∅	∅	∅	{Oleo, Ec}	{Oleo, Ec}	∅	∅	∅	∅	∅
a6.c17	∅	∅	∅	∅	{Oleo, Ec}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a6.c18	∅	∅	∅	{Oleo, Ec}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a6.c19	∅	∅	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a6.c20	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a6.c21	∅	∅	{Ec}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a6.c22	∅	∅	∅	{Oleo}	∅	∅	∅	{Oleo}	{Oleo}	∅	∅	{Oleo}
a6.c23	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	{Inf}	∅	∅
a6.c24	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	{Inf}	∅
a6.c25	∅	∅	∅	∅	∅	∅	{Oleo, Ec}	∅	∅	∅	∅	∅
a6.c25*a6.8	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	{Ec}	∅	∅	∅	∅
a6.c20*a6.4	∅	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c20	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c21	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c5.1	∅	∅	∅	∅	∅	{Oleo, Ec}	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c5.2	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	{Oleo, Ec}	∅	∅	∅
c16.1	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c16.2	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c16.3	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c16.4	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c18.1	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c18.2	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c18.3	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c18.4	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c18.5	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c18.6	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c19.1	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c19.2	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c19.3	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c19.4	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c19.5	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c19.6	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅

$$N_{14} = \{C_{14}, A_{14}, C_{ex14}, A_{ex14}, E_{re14}, \lambda_{re14}, \lambda_{ca14}, K_{pre14}, K_{post14}\} \quad \text{- (Figura 5.9 -$$

Capítulo 5).

$$C_{14} = \{a_7.c_1, a_7.c_2, a_7.c_3, a_7.c_4, a_7.c_5, a_7.c_6, a_7.c_7, a_7.c_8, a_7.c_9, a_7.c_{10}, a_7.c_{11}, a_7.c_{12}, a_7.c_{13}, a_7.c_{14}, a_7.c_{15}, a_7.c_{16}, a_7.c_{17}, a_7.c_{18}, a_7.c_{19}, a_7.c_{20}, a_7.c_{21}, a_7.c_{22}, a_7.c_{23}, a_7.c_{24}, a_7.c_{25}\}$$

$$A_{14} = \{a_{7.1}, a_{7.2}, a_{7.3}, a_{7.4}, a_{7.5}, a_{7.6}, a_{7.7}\}$$

$$C_{ex14} = \{c_{13}, c_{6.1}, c_{6.2}, c_{6.3}, c_{6.4}, c_{6.5}, c_{6.6}, c_{6.7}, c_{10.1}, c_{10.2}, c_{18.1}, c_{18.2}, c_{18.3}, c_{18.4}, c_{18.5}, c_{18.6}, c_{22.1}, c_{22.2}, c_{22.3}, c_{22.4}, c_{22.5}, c_{22.6}, c_{22.7}, c_{22.8}, c_{22.9}, c_{22.10}, c_{22.11}, c_{22.12}, c_{22.13}, c_{22.14}\}$$

$$A_{ex14} = \{\}$$

$$E_{re14} = \{Inf\}$$

$$\lambda_{re14}(\{Inf\}) = I$$

$$\lambda_{ca14}(a_7.c_1) = \lambda_{ca14}(a_7.c_2) = \lambda_{ca14}(a_7.c_3) = \lambda_{ca14}(a_7.c_4) =$$

$$\lambda_{ca14}(a_7.c_5) = \lambda_{ca14}(a_7.c_6) = \lambda_{ca14}(a_7.c_7) = \lambda_{ca14}(a_7.c_8) =$$

$$\lambda_{ca14}(a_7.c_9) = \lambda_{ca14}(a_7.c_{10}) = \lambda_{ca14}(a_7.c_{11}) = \lambda_{ca14}(a_7.c_{12}) =$$

$$\lambda_{ca14}(a_7.c_{13}) = \lambda_{ca14}(a_7.c_{14}) = \lambda_{ca14}(a_7.c_{15}) = \lambda_{ca14}(a_7.c_{19}) =$$

$$\lambda_{ca14}(a_7.c_{20}) = \lambda_{ca14}(a_7.c_{23}) = \lambda_{ca14}(a_7.c_{24}) = \lambda_{ca14}(a_7.c_{25}) =$$

$$\lambda_{ca14}(a_7.c_1) = \lambda_{ca14}(a_7.c_2) = \lambda_{ca14}(a_7.c_3) = \lambda_{ca14}(a_7.c_4) = \lambda_{ca14}(a_7.c_5) =$$

$$\lambda_{ca14}(a_7.c_6) = \lambda_{ca14}(a_7.c_7) = \{Inf\}$$

<b>Kpre14</b>	a7.1	a7.2	a7.3	a7.4	a7.5	a7.6	a7.7	<b>Kpost14</b>	a7.1	a7.2	a7.3	a7.4	a7.5	a7.6	a7.7
a7.c1	{Inf}	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	a7.c1	{Inf}	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅
a7.c2	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	a7.c2	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅
a7.c3	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	a7.c3	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅
a7.c4	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	a7.c4	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅
a7.c5	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	a7.c5	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅
a7.c6	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	a7.c6	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a7.c7	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	a7.c7	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a7.c8	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	a7.c8	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a7.c9	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	a7.c9	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a7.c10	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	a7.c10	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅
a7.c11	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	a7.c11	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅
a7.c12	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	a7.c12	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅
a7.c13	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	a7.c13	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅
a7.c14	∅	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	a7.c14	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a7.c15	∅	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	a7.c15	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a7.c16	∅	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	a7.c16	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a7.c17	∅	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	a7.c17	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a7.c18	∅	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅	a7.c18	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a7.c19	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	a7.c19	∅	∅	∅	∅	{Inf}	∅	∅
a7.c20	∅	∅	∅	∅	∅	{Inf}	∅	a7.c20	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a7.c21	∅	∅	∅	∅	∅	{Inf}	∅	a7.c21	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a7.c22	∅	∅	∅	∅	∅	{Inf}	∅	a7.c22	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅
a7.c23	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	a7.c23	∅	∅	∅	∅	∅	{Inf}	∅
a7.c24	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	a7.c24	∅	∅	∅	∅	∅	∅	{Inf}
a7.c25	∅	∅	∅	∅	∅	{Inf}	∅	a7.c25	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c13	∅	∅	∅	∅	∅	{Inf}	∅	c13	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c6.1	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	c6.1	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c6.2	∅	∅	∅	∅	{Inf}	∅	∅	c6.2	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c6.3	∅	∅	∅	∅	∅	{Inf}	∅	c6.3	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c6.4	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	c6.4	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c6.5	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	c6.5	∅	∅	∅	∅	∅	{Inf}	∅
c6.6	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	c6.6	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c6.7	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	c6.7	∅	∅	∅	∅	∅	{Inf}	∅
c10.1	∅	∅	∅	∅	∅	∅	{Inf}	c10.1	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c10.2	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	c10.2	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c18.1	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	c18.1	∅	∅	∅	∅	∅	{Inf}	∅
c18.2	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	c18.2	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c18.3	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	c18.3	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c18.4	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	c18.4	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c18.5	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	c18.5	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c18.6	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	∅	c18.6	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c22.1	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	c22.1	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c22.2	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	c22.2	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c22.3	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	c22.3	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c22.4	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	c22.4	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c22.5	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅	c22.5	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
c22.6	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	c22.6	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅
c22.7	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	c22.7	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅
c22.8	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	c22.8	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅
c22.9	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	c22.9	∅	{Inf}	∅	∅	∅	∅	∅
c22.10	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	c22.10	∅	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅
c22.11	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	c22.11	∅	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅
c22.12	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	c22.12	∅	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅
c22.13	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	c22.13	∅	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅
c22.14	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	c22.14	∅	∅	∅	{Inf}	∅	∅	∅

$\delta_0 =$

<i>C o U A o</i>	$\delta_0$
c1	Indefinido
c2	Indefinido
c3	Indefinido
c4	Indefinido
c5	$N_1$
c6	$N_2$
c7	Indefinido
c8	Indefinido
c9	Indefinido
c10	$N_3$
c11	Indefinido
c12	$N_4$
c13	Indefinido
c14	Indefinido
c15	Indefinido
c16	$N_5$
c17	Indefinido
c18	$N_6$
c19	$N_7$
c20	Indefinido
c21	Indefinido
c22	$N_8$
c23	Indefinido
a1	$N_9$
a2	$N_{10}$
a3	$N_{11}$
a4	$N_{12}$
a5	Indefinido
a6	$N_{13}$
a7	$N_{14}$
a8	Indefinido

$$\mathfrak{R}_{ca12} = \{N_{12}, N_{f12}, \delta_{12}\}$$

$N_{12} = \{C_{12}, A_{12}, C_{ex12}, A_{ex12}, E_{re12}, \lambda_{re12}, \lambda_{ca12}, K_{pre12}, K_{post12}\}$  - A formalização desta rede é a mesma da apresentada neste apêndice (acima) (Fig. 9 – apêndice C).

$$N_{f12} = \{N_{12 \cdot 1}, N_{12 \cdot 2}\}$$

$$N_{12 \cdot 1} = \{C_{12 \cdot 1}, A_{12 \cdot 1}, C_{ex12 \cdot 1}, A_{ex12 \cdot 1}, E_{re12 \cdot 1}, \lambda_{re12 \cdot 1}, \lambda_{ca12 \cdot 1}, K_{pre12 \cdot 1}, K_{post12 \cdot 1}\} - \text{(Fig. 10 – (a) – apêndice C)}.$$

$$C_{12 \cdot 1} = \{a_{4 \cdot 2} \cdot c_1\}$$

$$A_{12 \cdot 1} = \{a_{4 \cdot 2 \cdot 1}, a_{4 \cdot 2 \cdot 2}, a_{4 \cdot 2 \cdot 3}\}$$

$$C_{ex12 \cdot 1} = \{c_4, a_4 \cdot c_2, a_4 \cdot c_3, a_4 \cdot c_4\}$$

$$A_{ex12 \cdot 1} = \{\}$$

$$E_{re12.1} = \{Oleo, Eut, Inf\}$$

$$\lambda_{re12.1}(\{Oleo\}) = M$$

$$\lambda_{re12.1}(\{Eut\}) = E$$

$$\lambda_{re12.1}(\{Inf\}) = I$$

$$\lambda_{ca12.1}(a_{4.2.c1}) = \{Oleo, Inf\}$$

$$\lambda_{ca12.1}(a_{4.2.1}) = \{Oleo, Eut\}$$

$$\lambda_{ca12.1}(a_{4.2.2}) = \lambda_{ca12.1}(a_{4.2.3}) = \{Inf\}$$

<i>Kpre12.1</i>	a4.2.1	a4.2.2	a4.2.3	<i>Kpost12.1</i>	a4.2.1	a4.2.2	a4.2.3
a4.2.c1	{Oleo}	{Inf}	{Inf}	a4.2.c1	{Oleo}	∅	∅
c4	∅	∅	∅	c4	{Eut}	∅	∅
a4.c2	{Eut}	∅	∅	a4.c2	∅	∅	∅
a4.c3	∅	∅	∅	a4.c3	∅	{Inf}	{Inf}
a4.c4	{Oleo}	∅	∅	a4.c4	{Oleo, Eut}	∅	∅

$$N_{12.2} = \{C_{12.2}, A_{12.2}, C_{ex12.2}, A_{ex12.2}, E_{re12.2}, \lambda_{re12.2}, \lambda_{ca12.2}, K_{pre12.2}, K_{post12.2}\} -$$

(Fig. 10 – (b) – apêndice C).

$$C_{12.2} = \{a_{4.3.c1}\}$$

$$A_{12.2} = \{a_{4.3.1}, a_{4.3.2}, a_{4.3.3}\}$$

$$C_{ex12.2} = \{a_4.c1, a_4.c5, a_4.c6\}$$

$$A_{ex12.2} = \{\}$$

$$E_{re12.2} = \{Oleo, Eut, Inf\}$$

$$\lambda_{re12.2}(\{Oleo\}) = M$$

$$\lambda_{re12.2}(\{Eut\}) = E$$

$$\lambda_{re12.2}(\{Inf\}) = I$$

$$\lambda_{ca12.2}(a_{4.3.c1}) = \{Oleo, Inf\}$$

$$\lambda_{ca12.2}(a_{4.3.1}) = \{Oleo, Eut\}$$

$$\lambda_{ca12.2}(a_{4.3.2}) = \lambda_{ca12.2}(a_{4.3.3}) = \{Inf\}$$

<i>Kpre12.2</i>	a4.3.1	a4.3.2	a4.3.3	<i>Kpost12.2</i>	a4.3.1	a4.3.2	a4.3.3
a4.3.c1	{Oleo}	{Inf}	{Inf}	a4.3.c1	{Oleo}	∅	∅
a4.c1	{Eut}	∅	∅	a4.c1	∅	∅	∅
a4.c5	∅	∅	∅	a4.c5	∅	{Inf}	{Inf}
a4.c6	{Oleo}	∅	∅	a4.c6	{Oleo, Eut}	∅	∅

$\delta_0 =$ 

<i>C 12 U A 12</i>	$\delta_{12}$
a4.c1	Indefinido
a4.c2	Indefinido
a4.c3	Indefinido
a4.c4	Indefinido
a4.c5	Indefinido
a4.c6	Indefinido
a4.c4*a4.5	Indefinido
a4.c6*a4.5	Indefinido
a4.c5*a4.5	Indefinido
a4.c3*a4.5	Indefinido
a4.1	Indefinido
a4.2	<i>N 12.1</i>
a4.3	<i>N 12.2</i>
a4.4	Indefinido
a4.5	Indefinido
a4.6	Indefinido



Além de uma modelagem equivalente ao circuito hidráulico da Fig. 11, a Fig. 12 inclui a representação do circuito elétrico, painel frontal e CLP.

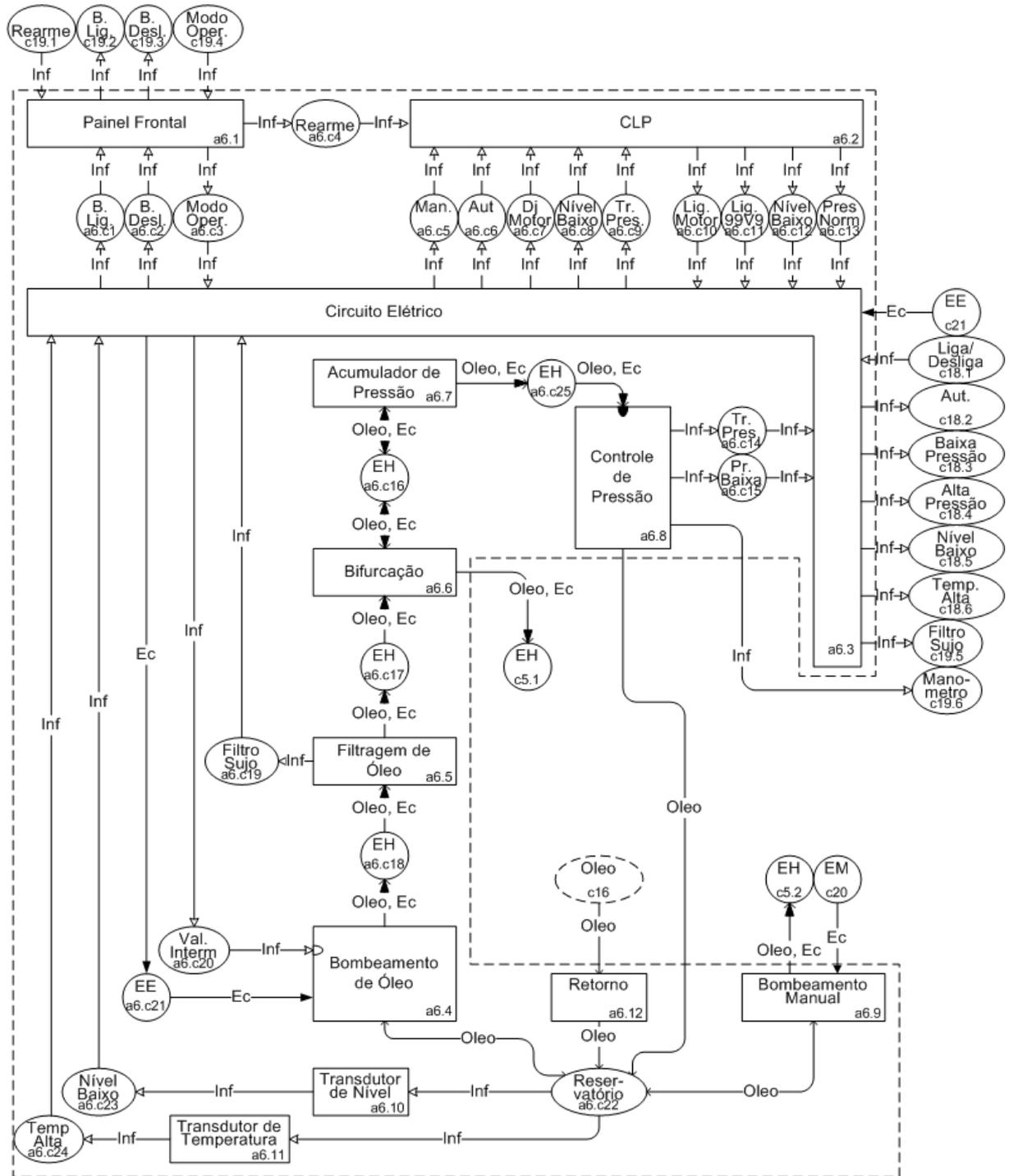


Fig. 12. Rede C/A da unidade de potência hidráulica -  $N_{13}$ .