

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

GILSON SIMÕES PORCIÚNCULA

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE
CONFIABILIDADE NO PROJETO DE SISTEMAS
AUTOMÁTICOS**

FLORIANÓPOLIS

2009

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

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE NO PROJETO DE
SISTEMAS AUTOMÁTICOS**

Tese submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de

DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

GILSON SIMÕES PORCIÚNCULA

Florianópolis, maio 2009

Ficha catalográfica

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

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE NO PROJETO DE
SISTEMAS AUTOMÁTICOS**

GILSON SIMÕES PORCIÚNCULA

Esta tese de Doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de

DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA

sendo aprovada em sua forma final.

Victor Juliano De Negri, Dr. - Orientador

Acires Dias, Dr - Co-Orientador

Eduardo Alberto Fancello, Dr.
Coordenador do curso

Banca Examinadora:

Victor Juliano De Negri, Dr. - UFSC - Presidente

Prof. Paulo Eigi Miyagi Dr. - EPUSP - Relator

Prof. Antonio Carlos Valdiero, Dr. - UNIJU

Prof. Edison da Rosa, Dr. - UFSC

Prof. André Ogliari, Dr - UFSC

DEDICATÓRIA

AGRADECIMENTOS

RESUMO

Os sistemas automáticos caracterizam-se por incorporarem diferentes tecnologias e desempenharem múltiplas funções independentes. Esses sistemas são dotados de componentes mecânicos, elétricos, eletrônicos e de *software*. Tais características são estabelecidas durante o processo de projeto e documentadas por meio de modelos estruturais, funcionais e comportamentais.

O processo de projeto de sistemas automáticos é revestido de dificuldades e requer, normalmente, profissionais com conhecimento específico em cada uma das tecnologias presentes nos mesmos. Por isso a análise do atributo confiabilidade dos sistemas automáticos, considerando todas as suas particularidades, pode se tornar uma tarefa complexa. Além disso, no caso dos sistemas hidráulicos e pneumáticos, deve-se considerar o grande número de componentes e a necessidade de troca de informações entre diferentes áreas tecnológicas.

Este trabalho apresenta uma metodologia que resulta na geração dos modelos de confiabilidade e o cálculo da estimativa de confiabilidade de sistemas automáticos durante o processo de projeto, com o intuito de incorporar a estes sistemas maior competitividade em mercados que requerem precisão na atuação de dispositivos, garantia de funcionamento e facilidade de manutenção. Desta forma, o desenvolvimento deste trabalho se dá no espaço de projeto de sistemas automáticos, focado principalmente em sistemas hidráulicos e pneumáticos, com avaliação da confiabilidade na fase conceitual do processo de projeto.

A metodologia proposta permite capturar informações dos modelos estruturais, funcionais e comportamentais, ainda nas fases iniciais do processo de projeto de sistemas automáticos. A Metodologia para Análise de Confiabilidade de Sistemas Automáticos (MACSA) considera a interação das diferentes áreas tecnológicas dos sistemas automáticos assim como as diferentes configurações operacionais definidas no sistema durante sua vida útil. A MACSA foi estruturada de forma sistemática e inserida na metodologia de projeto integrado de produto. Para a avaliação da MACSA foram analisados dois sistemas, uma unidade de potência e condicionamento hidráulico e uma bancada didática de dimensionamento de circuitos pneumáticos, ambos tomados como estudo de caso.

Para implementar a metodologia foram utilizadas ferramentas de modelagem de sistemas automáticos e de análise de confiabilidade, tais como, Rede Canal/Agência, Grafcet, Rede de Petri, Árvore de Falha e Árvore de Sucesso.

Os resultados obtidos na análise do estudo de caso demonstraram que o cálculo proposto pela MACSA considera situações mais realistas para a estimativa de confiabilidade

Resumo

de sistemas automáticos. Com isso demonstra-se que a aplicação da metodologia efetivamente contribui para melhorar a análise da confiabilidade de sistemas automáticos. Isso auxilia os agentes de projeto nas tomadas de decisões, sobre a melhor concepção para o seu projeto final, tornando os sistemas automáticos mais confiáveis, com menor tempo e custo de desenvolvimento.

ABSTRACT

Automatic systems have as features the use of different technologies and the execution of multiple independent functions. These systems comprise mechanical, electric, electronic components and software as well. Such features are established during the design process and documented through structural, functional, behavioral models.

An automatic system design process presents inherent difficulties and usually demands specialized professionals for each technology involved. Therefore, their reliability analysis, considering all the particularities involved, may become a complex task. Also, especially when it comes to hydraulic and pneumatic systems, the great number of components and the need for information exchange between different technological areas should be considered.

This thesis present a methodology that results in the generation of the reliability model and the calculation of the reliability index of automatic systems during the design process, in order to improve the system's competitiveness in markets demanding precision in the performance of devices, assured functioning and easy maintenance. In this fashion, this thesis is developed within the bounds of the design process of automatic systems, mainly focused on hydraulic and pneumatic systems, since it evaluates reliability during the conceptual phase of design process.

The proposed methodology allows gathering information from structural, functional and behavioral models during the early phases of the design process. The Methodology for Analysis of Automatic Systems' Reliability (MACSA) which takes into account the interactions of different technological areas of automatic systems, as well as different functional arrangements defined in the system during its useful life. MACSA was structured in a systematic form and inserted in an integrated product design methodology. The proposed methodology was evaluated on two case studies: a hydraulic power and conditioning unit and a didactic pneumatic test bench applied for the sizing of general pneumatic systems.

In order to implement the proposed methodology modeling and reliability analysis tools, such as Channel/Instance Net, Grafcet, Petri Nets, Fault Tree and Success Tree, were used.

The case studies' practical results demonstrated that MACSA considers more realistic situations for automatic systems reliability evaluation. By so, the adoption of the presented methodology contributes for an improvement of reliability evaluation during the automatic systems' design process. These aid designers in making decisions about the best

Abstract

conception for their final design, making the resulting automatic systems more reliable, and yielding a faster and cheaper design process.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Estrutura de interface entre os modelos do sistema e os modelos de confiabilidade.....	25
Figura 2.1 - Relacionamento entre função, comportamento e estrutura (adaptado de Takeda et al. (1994))	31
Figura 2.2 - Sistemas hidráulicos e pneumáticos no domínio de sistemas automáticos	32
Figura 2.3 - Módulos de um sistema hidráulico.....	33
Figura 2.4 - Modelo funcional/estrutural de sistema automático (DE NEGRI, 1996).....	35
Figura 2.5 - Válvula proporcional (a) vista explodida (b) vista de corte (Bastos et al., 2004) ..	41
Figura 2.6 - Exemplo de sistema a hidráulico automático (BENARD; CAUFFRIEZ; RENAUX, 2008)	42
Figura 3.1 - Representação gráfica do modelo do processo de desenvolvimento integrado de produtos - PRODIP (ROMANO, 2003).....	44
Figura 3.2 - Fluxograma da fase de projeto conceitual (BACK et al., 2008).....	46
Figura 3.3 - Predominância de linguagem dos modelos no fluxo de projeto de produto (FERREIRA, 1997).....	47
Figura 3.4 - Estrutura metodológica do projeto conceitual para sistemas automáticos (BELAN, 2007; DE NEGRI; SANTOS, 2007).....	48
Figura 3.5 - Rede de Petri: (a) Elementos do grafo; (b)Transição habilitada (c) Disparo da transição.....	50
Figura 3.6 - Relação Rede de Petri e determinação da falha (ADAMYAN; HE, 2002)	52
Figura 3.7 - Elementos básicos da Rede C/A (BELAN, 2007)	53
Figura 3.8 - Refinamento e condensação de Redes C/A (DE NEGRI, 1996).....	54

Lista de tabelas

Figura 3.9 - Plataforma de hidráulica proporcional - Módulo Demonstrativo: (a) Equipamento real; (b) Modelagem do sistema com Rede C/A, (PORCIÚNCULA et al., 2005).....	54
Figura 3.10 - Circuito hidráulico: (a); Diagrama de circuito hidráulico; (b) Rede C/A gráfica e (c) Rede C/A matricial (PORCIÚNCULA ET AL., 2005)	58
Figura 3.11 - Exemplo da estrutura de um Grafcet (adaptado de Johnsson (1999)).....	59
Figura 3.12 - Grafcet: (a) Junção <i>E</i> ; (b) Distribuição <i>E</i> (BARACOS, 1992).....	60
Figura 3.13 - Grafcet: (a) Junção <i>OU</i> ; (b) Distribuição <i>OU</i> (BARACOS, 1992).....	60
Figura 4.1 - Modelo de confiabilidade para componentes arranjados em série	66
Figura 4.2 - Modelo de confiabilidade para componentes arranjados em paralelo	66
Figura 4.3 - Árvore de falha, (LIU; CHIOU, 1997)	68
Figura 4.4 - Relações lógicas e cálculo da probabilidade de falha	69
Figura 4.5 - Redução de árvore de falha modelada em Rede de Petri (LIU; CHIOU, 1997) ..	70
Figura 4.6 - Modelo de confiabilidade gerado a partir da Figura 4.5 (c).....	70
Figura 4.7 - Representação do conceito espaço de sucesso - espaço de falha (Adaptado de VESELEY, 2002)	71
Figura 4.8 - Representação das relações lógicas das árvores de sucesso em Redes de Petri... 72	72
Figura 5.1 - Desdobramento da função de um sistema hidráulico	73
Figura 5.3 - Estrutura de interface entre os modelos do sistema e a MACSA.....	76
Figura 5.4 - A MACSA inserido no processo de projeto de produto	77
Figura 5.5 - Representação das atividades da MACSA	78
Figura 5.6 - Estrutura da Atividade 1 - Caracterizar sistema	80
Figura 5.7 - Estrutura da Atividade 2 - Definir configurações operacionais	84
Figura 5.8 - Exemplo de análise de fluxo de recurso.	86
Figura 5.9 - Parâmetros de conversão do vetor agência em vetor subsistema das árvores de sucesso.....	89

Lista de tabelas

Figura 5.10 – Estrutura da Atividade 3 – Definir modelos de confiabilidade	89
Figura 5.11 – Estrutura da Atividade 4 - Estimar confiabilidade	92
Figura 6.1 – UPCH – Unidade de potência e condicionamento hidráulica	96
Figura 6.2 – Circuito Hidráulico da UPCH (adaptado de Souto (2005))	97
Figura 6.3 – Componentes ativados/desativados para estados operacionais da UPCH.....	98
Figura 6.4 - Modelo funcional e estrutural da UPCH	99
Figura 6.5 – Detalhe da modelagem comportamental da UPCH em Grafcet.....	100
Figura 6.6 – Sistema hidráulico simplificado da UPCH	101
Figura 6.7 - Modelagem funcional/estrutural da UPCH	102
Figura 6.8 - Modelo comportamental em Grafcet : (a) modelo detalhado; (b) modelo geral	102
Figura 6.9 – Modelagem segundo nível da UPCH.....	103
Figura 6.10 - Modelo do desdobramento do SH em Rede C/A	104
Figura 6.11 - Modelo do desdobramento do SC em Rede C/A.....	104
Figura 6.12 – Matrizes K_{pre} e K_{post} do sistema hidráulico	106
Figura 6.13 – Cálculos dos vetores resultantes do sistema hidráulico: (A) VC_{Res} e (B) VL_{Res}	106
Figura 6.14 – Caracterização das agências controláveis da SH da UPCH.....	108
Figura 6.15 - (A) Vetores canais de controle e (B) Fluxo de recurso nas agências controláveis do SH.....	109
Figura 6.16 - Saída da atividade 1 – Caracterizar SH e SC	110
Figura 6.17 - Matrizes K_{Pre} e K_{Post} reduzidas para o estado $E1$	110
Figura 6.18 - Tabelas de análise do fluxo de recurso do SH.....	111
Figura 6.19 - Configuração final do sistema hidráulico para o estado $E1$	112
Figura 6.20 - Configuração final do sistema de controle para o estado $E1$	113
Figura 6.21 - Representação do cálculo do vetor $Va2_{resE1}$ do sistema hidráulico	114

Lista de tabelas

Figura 6.24 - Saída da atividade 2 - <i>Definir configurações</i>	114
Figura 6.25 - Vetores subsistemas do estado E1 da UPCH.....	115
Figura 6.26 - Definição da posição dos vetores subsistemas na $M_{m \times nsb}$, para o estado E1 da UPCH	116
Figura 6.27 - Matrizes de incidência das árvores de sucesso da UPCH	116
Figura 6.28 - Árvores de sucesso da UPCH para os estados E1, E2 e E3	117
Figura 6.29 - Gráfico de porcentagem de componentes x tempo de uso efetivo	121
Figura 6.30 - Gráfico componentes da UPCH x tempo de uso efetivo	122
Figura 6.31 - Gráfico comparativo de resultados da estimativa de confiabilidade da UPCH	121
Figura 7.1 - Bancada didática para dimensionamento de sistemas pneumáticos - SPCS.....	124
Figura 7.2 - Diagramas pneumáticos da SPCS: (A) Estação 1 (B) Estação 2	125
Figura 7.3 - Diagramas pneumáticos da SPCS (A) Estação 3 (B) Estação 4	126
Figura 7.4 - Diagrama elétrico parcial da estação 1 (A) ligações no CLP (B) contatos elétricos da estação 3.....	126
Figura 7.5 - Modelo da SPCS (A) diagrama Rede C/A (B) matrizes K_{pre} e K_{post}	127
Figura 7.6 - Modelo do sistema de transporte: (A) diagrama Rede C/A (B) matrizes K_{pre} e K_{post}	128
Figura 7.7 - Modelo funcional/estrutural do sistema de controle da SPCS	128
Figura 7.8 - Modelo da estação 1 (A) diagrama Rede C/A (B) matrizes K_{pre} e K_{post}	129
Figura 7.9 - Estados operacionais da SPCS: (A) modelo comportamental; (B) caracterização dos estados.....	130
Figura 7.10 - Saída da Atividade 1 - Caracterizar sistema SPCS	131
Figura 7.11 - Saída da atividade 2 - Configurar sistema SPCS.....	131
Figura 7.12 - Configuração final da SPCS para o estado E3 - diagrama pneumático.....	132

Lista de tabelas

Figura 7.13 - Gráfico de porcentagem de componentes x tempo de uso efetivo da SPCS.....	134
Figura 7.14 - Gráfico componentes da SPCS x tempo de uso efetivo.....	135
Figura A.1 - Estado 1 - Suprir p1 do usuário 1 com BF ou BV	148
Figura A.2 - Estado 2 - Suprir p1 do usuário 2 com BF ou BV	149
Figura A.3 - Estado 3 - Suprir acumulador com BF ou BV.....	149
Figura A.4 - Estado 4 - Suprir p2 do usuário 1 com acumulador	150
Figura A.5 - Estado 5 - Suprir 1 usuário com bomba e outro com acumulador.....	150
Figura A.6 - Estado 6 - Suprir os dois usuários com BF e BV	151
Figura B.1 - Estruturas da nomenclatura dos lugares das árvores de sucesso	152
Figura 8.1 - Representação de uma Árvore de Sucesso de sistema automático na forma de: (a) Rede e (b) Matricial	153

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Atividade do projeto conceitual do produto (BACK et al, 2008)	45
Tabela 2 - Análise dos componentes do circuito hidráulico da UPCH	98
Tabela 3 - Caracterização das agências do SH.....	105
Tabela 4 - Tabela de Informações dos estados da UPCH.....	107
Tabela 5 - Tabela de componentes para análise da confiabilidade da UPCH.....	118
Tabela 6 Tabela de probabilidade de utilização dos estados operacionais da UPCH	119
Tabela 7 - Tabela de cálculo da confiabilidade da UPCH.....	120
Tabela 8 - Caracterização das agências controláveis da SPCS.....	130
Tabela 9 - Tabela de cálculo da confiabilidade da SPCS	133

LISTA DE ABREVIATURAS

- BF - Bomba hidráulica de deslocamento Fixo
BV - Bomba hidráulica de deslocamento Variável
CLP - Controlador Lógico Programável
COBEM - Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica
EMC - Departamento de Engenharia Mecânica
EE - Energia Elétrica
EH - Energia Hidráulica
FG - Função Global
FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) - Análise dos modos de falha e seus efeitos
FP - Função Parcial
VFG - Variante da Função Global
FTA (*Fault Tree Analysis*) - Análise da árvore de falha
Grafcet - Gráfico Funcional de Controle de Etapas e Transições
LASHIP - Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos
NEDIP - Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos
MACSA - Método de Análise de Confiabilidade de Sistemas Automáticos
MSS - *Multi State System*
MTBF (*Mean Time Between Failure*) - Tempo médio entre falhas
MTTR (*Mean Time to Repair*) - Tempo médio para reparo
PRODIP - Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos
RIAC - *Reliability Information Analysis Center*
Rede C/A - Rede de Petri Canal/ Agência
SA - Sistema Automático
SC - Sistema de Controle
SEM - Sistema Energia Matéria
SH - Sistema Hidráulico
SADT (*Structured Analysis and Design Technique*) - Técnica estruturada de análise e projeto
SCPHP - Sistemas de controle de posição de hidráulica proporcional
SFC (*Sequential Function Charts*) - Diagrama sequencial de funções
SPCS - *System for the Pneumatic Circuits Sizing*
STA (*Success Tree Analysis*) - Análise da árvore de sucesso
UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina
UPCH - Unidade de Potência e Condicionamento Hidráulico

LISTA DE SÍMBOLOS DE VARIÁVEIS E PARÂMETROS

\vee - operador lógico OU vetorial

\wedge - operador lógico E vetorial

$\lambda(t)$ - taxa de falha

a - agência da Rede C/A

C_{conEj} - vetor canais de controle

C - canal da Rede C/A

C_{srEj} - conjuntos de canais sem recurso

C_C - canal consumidor

C_f - canal fornecedor

C_{Fc} - conjunto de canais de fluxo coerente

C - componentes

CR - componente reduzido

C - matriz de incidência da Rede de Petri

C_{rca} - matriz de incidência da Rede Canal Agência

E - Operador lógico E

E_j - Estado operacional

$f(t)$ - função densidade de probabilidade ou função densidade de probabilidade de falha

$F(t)$ - função de distribuição acumulada ou probabilidade de falha

inf - informação

K_{pre} - matriz de mapeamento dos canais precedentes

K_{post} - matriz de mapeamento dos canais posteriores

mat - matéria

MI - matriz de incidência da árvore de sucesso

OU - Operador lógico OU

p - passo do Grafcet

p - lugar da Rede de Petri

P - conjunto de lugares da Rede de Petri

$P(E_j)$ - probabilidade de utilidade de cada estado operacional

$Post$ - relação de procedência

Lista de símbolos de variáveis e parâmetros

Pre - relação de precedência

$R(t)$ - confiabilidade

t - transição da Rede de Petri

T - conjunto de transições da Rede de Petri (e transição do Grafcet)

V_a - vetor agência

VCK_{post} - vetor Coluna da matriz K_{post}

VCK_{pre} - vetor Coluna da matriz K_{pre}

VC_{Res} - - vetor Coluna resultante

VLK_{post} - vetor Linha da matriz K_{post}

VLK_{pre} - vetor Linha da matriz K_{pre}

VL_{Res} - - vetor Linha resultante

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	20
1.1 JUSTIFICATIVA	23
1.2 OBJETIVOS.....	26
1.2.1 Objetivo Geral	26
1.2.2 Objetivos específicos	26
1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO	27
CAPÍTULO 2 - PROJETO DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS	29
2.1 SISTEMAS AUTOMÁTICOS.....	29
2.1.1 Conceituação e caracterização dos sistemas automáticos	31
2.1.2 Sistemas hidráulicos e pneumáticos	32
2.2 MODELAGEM DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS.....	34
2.3 CONFIABILIDADE DOS SISTEMAS AUTOMÁTICOS	36
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIAS E FERRAMENTAS DE PROJETO PARA SISTEMAS AUTOMÁTICOS	43
3.1 METODOLOGIAS PARA PROJETO DE PRODUTOS	44
3.2 PROJETO PARA SISTEMAS AUTOMÁTICOS	47
3.3 REDES DE PETRI	48
3.4 REDE CANAL/AGÊNCIA	52
3.5 GRAFCET.....	57
3.5.1 Representação gráfica	58
3.5.2 Estruturas do Grafcet	60
CAPÍTULO 4 - MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS	62
4.1 DEFINIÇÃO DE CONFIABILIDADE	62
4.2 MODELAGEM E ANÁLISE DA CONFIABILIDADE EM SISTEMAS	65
4.2.1 Modelos de confiabilidade	65
4.2.2 Análise de árvore de falha (FTA)	67

4.2.3 Análise da Árvore de Sucesso (STA)	70
CAPÍTULO 5 - SISTEMATIZAÇÃO DA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS.....	73
5.1 PROPOSIÇÃO PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA.....	75
5.2 MÉTODO DE ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS (MACSA).....	76
5.2.1 Atividade 1 - Caracterizar sistema.....	79
5.2.2 Atividade 2 - Definir configurações.....	83
5.2.3 Atividade 3 - Definir modelos de confiabilidade.....	88
5.2.4 Atividade 4 - Estimar confiabilidade	91
5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A SISTEMÁTICA PROPOSTA	94
CAPÍTULO 6 - APLICAÇÃO DO MACSA - ESTUDO DE CASO 1 - UPCH	96
6.1 DESCRIÇÃO DA UPCH	96
6.1.1 Modelagem funcional e estrutural da UPCH.....	99
6.1.2 Modelagem comportamental da UPCH	100
6.1.3 Circuito simplificado da UPCH.....	100
6.2 APLICAÇÃO DO MACSA	103
6.2.1 Atividade 1 - Caracterizar sistema hidráulico	105
6.2.2 Atividade 2 - Definir configurações do sistema hidráulico	110
6.2.3 Atividade 3 - Definir modelos de confiabilidade da UPCH	115
6.2.4 Atividade 4 - Estimar confiabilidade da UPCH.....	118
6.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS	122
CAPÍTULO 7 - ESTUDO DE CASO 2 - SPCS	124
7.1 DESCRIÇÃO DA SPCS	124
7.2 APLICAÇÃO DO MACSA	127
7.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS	135
CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES.....	137
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	141
APÊNDICE A	148

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Os sistemas tratados neste trabalho são sistemas técnicos que têm a capacidade de mover-se, regular-se ou operar por si mesmo, tratados como Sistemas Automáticos (DE NEGRI, 1996). Uma das características destes sistemas é que são constituídos de diferentes tecnologias decorrentes da associação de componentes mecânicos, eletroeletrônicos e de software.

Os sistemas automáticos normalmente são analisados como sistemas complexos¹. Segundo Bernard et al. (2008) a complexidade de sistemas automáticos pode ser caracterizada em função de diferentes atributos, tais como: tecnologia, estados, tamanho, interação de componentes e sistemas. Quanto maior o valor destes atributos, maior a complexidade do sistema, ou seja, maior a incerteza da análise sobre o comportamento, confiabilidade e disponibilidade durante sua vida útil.

A Função Global² (FG) de um sistema automático pode ser atendida por diferentes Variantes da Função Global (VFGs), podendo estas serem mutuamente exclusivas. As variantes da função global são relações entre as entradas e saídas do sistema que solucionam um determinado problema de diferentes formas.

Mazetto (2000) utilizou o conceito de VFGs para definir as estruturas funcionais de um sistema modular. Em sistemas automáticos o atendimento de uma VFG significa que o sistema atende a uma solicitação do usuário, para uma determinada necessidade, a qual está programada no sistema de controle e que, conseqüentemente, determina a configuração funcional/estrutural específica do sistema. No Capítulo 5 discute-se as VFGs e a contribuição da sua definição para o método de análise da confiabilidade de sistemas automáticos.

No processo de projeto de sistemas automáticos é necessário uma adequada aplicação de metodologias e ferramentas que contemplem as diferentes áreas tecnológicas envolvidas e a identificação e atendimento das VFGs do sistema.

Durante o ciclo de vida dos sistemas automáticos, principalmente no período de utilização, é necessário um planejamento estratégico de manutenção, considerando a caracterís-

¹ Neste trabalho um sistema complexo é definido como:

“Um sistema em que o seu 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.” (VRIES et al., 1994 apud DE NEGRI; DE NEGRI, 1996).

² Expressa a relação entre as entradas e as saídas baseada no fluxo de energia, matéria e sinal do sistema.

tica de funcionamento automático, ou seja, de atender funções totalmente ou parcialmente desassistidas. Desta forma, uma falha no atendimento de uma função parcial ou elementar de um sistema automático pode acarretar vários efeitos indesejados, que vão desde pequenas perdas na qualidade até o não atendimento total da função do sistema.

No processo de projeto de sistemas automáticos, assim como na maioria dos sistemas de engenharia, a probabilidade de falha tem sido um dos parâmetros mais importante a ser definido (AVONTUUR; WERF, 2001; CONRARD et al., 2004; PAPADOPOULOS; GRANTE, 2004; VINADÉ, 2003). Sendo assim, entende-se que a utilização de uma metodologia que apresente métodos e ferramentas que agreguem informações para a análise do atributo confiabilidade³ desde as fases iniciais de projeto, além de afetar positivamente os atributos de disponibilidade e manutenibilidade⁴ deste sistema, poderá também conferir uma melhor qualidade, produtividade e segurança durante a utilização dos produtos.

A análise de confiabilidade geralmente é feita nas fases finais do processo de projeto, quando já estão definidos todos os detalhamentos do projeto. Nesta fase, geralmente, um especialista tem a tarefa de avaliar a confiabilidade do sistema. No entanto, as modificações nesta fase são limitadas e com alto custo, devido a poucas possibilidades de modificação na estrutura do projeto (AVONTUUR; WERF, 2001).

Um exemplo do exposto no parágrafo anterior é relatado por Machado e Gorga (2003) que utilizam as características dos componentes eletrônicos, tais como, tamanho reduzido e baixo custo efetivo, para aumentar a confiabilidade e disponibilidade em sistemas de automação de usinas hidrelétricas. Segundo os autores, a distribuição das funções de controle do sistema em elementos de *hardware* cada vez menores, permite o isolamento de falhas, bem como a aplicação de redundância de recursos. No entanto, esta estratégia geralmente é desenvolvida apenas para a parte de controle do sistema e quando este já está em operação, necessitando de um reprojeto do sistema e elevando o custo da solução.

Por sua vez, os atributos de confiabilidade e manutenibilidade inseridos nas fases iniciais de projeto foram tratados por Vinadé (2003) com o desenvolvimento de um sistema especialista para auxiliar no projeto de sistemas hidráulicos. Nesse trabalho, o conhecimento

³ Confiabilidade é a probabilidade de um item atender sua função de forma adequada, durante um dado intervalo de tempo, sob condições especificadas (BILLINTON; ALLAN, 1983).

⁴ Manutenibilidade é a capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos (ABNT, 1994).

foi sistematizado com a definição de modelos de confiabilidade e a análise dos modos de falha e seus efeitos, com o intuito de estabelecer estratégias de manutenção do sistema para o ciclo de vida ainda nas fases conceitual e preliminar do processo de projeto.

Vinadé (2003) tratou de sistemas puramente hidráulicos. No entanto, quando se considera a parte de controle do sistema, que envolve o circuito elétrico e/ou *software* de controle, aumenta-se a complexidade na determinação da confiabilidade destes sistemas. Isto ocorre porque cada estado do sistema, definido pelo sistema de controle, irá refletir diferentes configurações operacionais no circuito hidráulico e no circuito elétrico.

Para tanto, vislumbra-se que a sistematização do processo de projeto de sistemas hidráulicos, considerando tanto o sistema formado por componentes mecânicos hidráulicos, como os componentes elétricos, eletrônicos e *software*, é fundamental para se definir os modelos de confiabilidade do sistema de forma coerente, sistemática e livre de erros. Modelo de confiabilidade é um modelo matemático usado para previsão ou estimação das medidas de confiabilidade de um item (ABNT, 1994) e, segundo Billinton e Allan (1987), esses modelos são representados por redes compostas por componentes conectados em série, paralelo, malhas ou combinações destas interligações.

Em pesquisas desenvolvidas nos últimos anos no Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (LASHIP/EMC/UFSC) tem-se deparado com circuitos hidráulicos que atendem um sistema de diferentes modos, ou seja, com a operação de diferentes componentes, estabelecendo específicas configurações operacionais do sistema. Para cada uma destas configurações, alguns componentes se encontram ativados e outros desativados. Desta forma, cada configuração operacional define um determinado estado do sistema.

Sendo assim, é interessante considerar os diferentes estados do sistema para estabelecer a confiabilidade de atendimento das diferentes VFGs do sistema, bem como tratar das diferentes tecnologias envolvidas em cada caso. Desta forma, a definição dos modelos de confiabilidade para esses sistemas pode ficar comprometida se os mesmos forem gerados de forma intuitiva e não sistematizada, tornando-se uma tarefa difícil, tediosa e muito propícia a erros.

Dentro deste contexto, esta tese propõe uma metodologia de análise da confiabilidade de sistemas automáticos a ser aplicado ainda nas fases iniciais do processo de projeto, na qual são considerados os diferentes estados do sistema, assim como todos os seus componentes, independentemente de sua área tecnológica. Por fases iniciais de projeto entendem-se as fases informacional e conceitual (BACK et al., 2008) nas quais estão disponíveis os mode-

los funcional, estrutural e comportamental do sistema (DE NEGRI; SANTOS, 2007). Com isso espera-se melhorar o processo de análise da confiabilidade, utilizando-se ferramentas apropriadas ao processo de projeto de sistemas hidráulicos e pneumáticos.

1.1 JUSTIFICATIVA

As empresas têm-se deparado com a necessidade de prover o mercado com produtos mais complexos, desenvolvendo várias funções, cada vez mais confiáveis. Os processos de projeto desses produtos devem permitir tomadas de decisão de forma mais rápida e organizada, com tempo e custo menores.

Agregar confiabilidade em sistemas complexos, que englobam várias tecnologias e operam em diferentes estados, de acordo com a função solicitada ou configurada pelo usuário é uma tarefa relativamente difícil devido à quantidade de variáveis e às trocas de informações entre componentes. Neste contexto, pesquisas realizadas por Azaron et al. (2006) e Lisnianski (2007) destacam que na avaliação da confiabilidade de sistemas automáticos ou sistemas de multiestado (MSS – *Multi State System*) são utilizadas basicamente três estratégias:

- 1) O sistema é analisado como um sistema de estado único;
- 2) A análise parte da definição de diferentes configurações de componentes que atendem uma determinada função;
- 3) A análise é feita utilizando métodos estocásticos.

Em relação às abordagens citadas acima, Azaron et al. (2006) e Lisnianski (2007) apontam que a primeira provoca uma discrepância entre a confiabilidade estimada teoricamente e a observada na prática, na segunda a análise está focada especificamente para a verificação do sucesso da função do sistema e na terceira a análise de confiabilidade se torna complexa e demanda tempo e um processamento computacional considerável, devido à explosão de estados.

Neste trabalho a análise de confiabilidade será baseada na segunda estratégia apresentada uma vez que sistemas automáticos como, por exemplo, um sistema hidráulico constituído de um único circuito hidráulico, pode desempenhar diferentes funções, gerando diferentes configurações operacionais. Isto só é possível devido à interação dos sistemas de atuação mecânicos, elétricos e eletrônicos, a qual é decorrente da programação que controla as funções do sistema.

Nestes casos, para avaliar a confiabilidade do sistema devem ser identificados os vários cenários de trabalho deste sistema, considerando as diferentes funções que podem ser solicitadas pelo usuário. Os cenários estão associados a cada VFG do sistema.

Com a definição dos cenários desejados, a determinação da probabilidade de ocorrência desses durante a vida útil do sistema e a existência de um banco de dados de taxas de falha, poder-se-á estimar melhor a confiabilidade para um determinado tempo de uso do sistema. Adotando-se esta sistemática no processo de projeto, a análise da confiabilidade desses sistemas tornar-se-á um processo sistematizado, o que auxiliará no tratamento de particularidades que poderão surgir durante a vida útil do equipamento.

Os modelos funcionais, estruturais e comportamentais, que são fundamentais na representação técnica de sistemas automáticos (DE NEGRI, 1996) representam o sistema sob diferentes perspectivas, auxiliando os agentes de projeto na interpretação do sistema.

Segundo De Negri e Santos (2007) o modelo funcional estabelece de forma inequívoca a função de cada componente no sistema e a inter-relação entre elas para que um sistema atenda a uma FG desejada pelo usuário. Por sua vez, o modelo estrutural representa o conjunto de componentes em um sistema e o conjunto de relações que conectam estes componentes com outros, sendo que estas relações podem indicar conexões físicas ou de comunicações ou de relações hierárquicas. Por fim, o modelo comportamental representa a relação das entradas, proveniente do ambiente externo, com o estado interno e a influência que o sistema exerce sobre o ambiente externo. Por isso a interação de forma sistematizada das informações geradas nestes modelos deve ser a base para a identificação das diferentes configurações operacionais do sistema.

No caso da avaliação do atributo confiabilidade de sistemas, a análise da árvore de falha (FTA - Fault Tree Analysis) é um dos métodos mais utilizados (VESELEY, 2002). No entanto, a construção destas árvores de forma manual é uma tarefa árdua, consome muito tempo e está muito propícia a erros (WANG et al., 2002). Em sistemas automáticos esta dificuldade aumenta devido ao inter-relacionamento de componentes de diferentes áreas tecnológicas.

Pesquisas como de Papadopoulos e Maruhn (2001) e Wang et al., (2002) propõem algoritmos que geram árvores de falha de forma automatizada nas fases iniciais do processo de projeto de sistemas. Todavia, nestes trabalhos a captura das informações nos modelos funcionais, para gerar essas árvores de falha, não é sistematizada, ou seja, as relações de causa e efeito entre os eventos do sistema são definidas de forma intuitiva.

De acordo com o exposto acima, percebe-se que existe uma lacuna na área de análise de confiabilidade de sistemas automáticos no que tange a atender diferentes funções e tratar subsistemas de diferentes tecnologias.

O cenário apresentado na Figura 1.1 resume a abordagem do problema a ser tratado nesta tese. No quadro 1 está o modelo funcional/estrutural utilizado na fase conceitual do processo de projeto o qual poderá representar os diferentes subsistemas do sistema automático, independente da tecnologia utilizada (neste exemplo, hidráulica e elétrica).

O quadro 2 apresenta o modelo comportamental também utilizado na fase de projeto conceitual, neste é possível representar a programação das ações do sistema, ou seja, evidenciar os diferentes estados em que o sistema poderá operar.

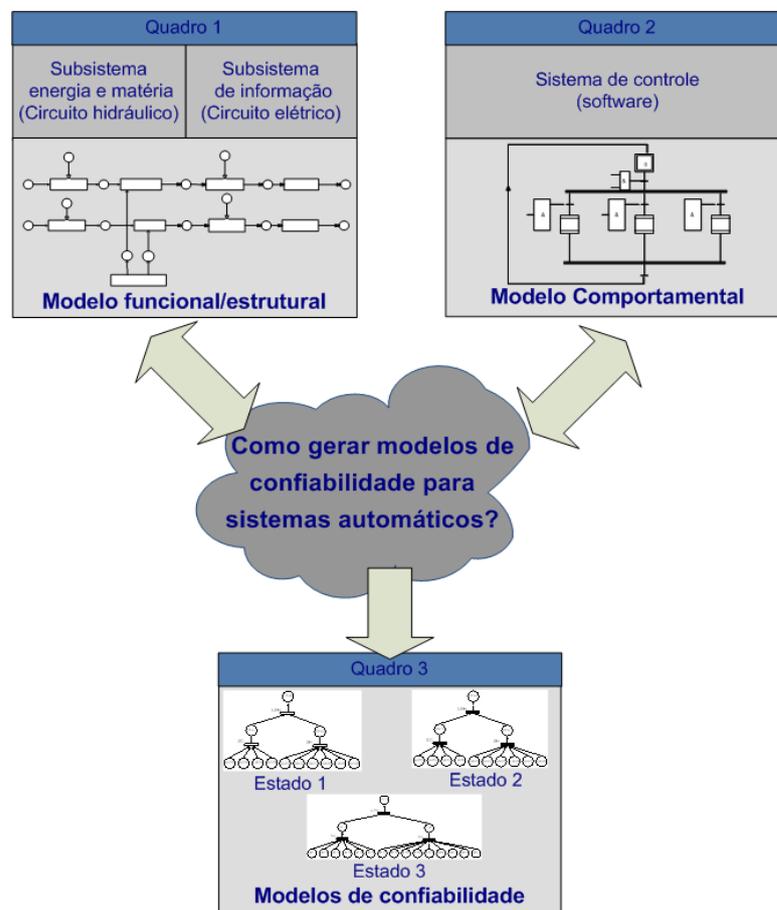


Figura 1.1 - Estrutura de interface entre os modelos do sistema e os modelos de confiabilidade

Os modelos de confiabilidade de um sistema automático para os diferentes estados que poderá se encontrar durante sua vida útil estão representados no quadro 3.

A área nebulosa representa a necessidade de uma metodologia que defina procedimentos adequados para a geração dos modelos de confiabilidade a partir das informações existentes nos modelos funcional/estrutural e comportamental.

Sendo assim, este trabalho objetiva apresentar uma metodologia aplicável às fases iniciais do processo de projeto, capturando as informações do modelo funcional do sistema de forma estruturada e definindo a relação entre os componentes por meio da árvore de sucesso⁵. Além disso, as árvores de sucesso deverão ser geradas de acordo com a configuração operacional definida pelo modelo comportamental do sistema.

Desta forma, espera-se proporcionar uma análise do atributo de confiabilidade com menor tempo, maior facilidade e, principalmente, com estimativa de confiabilidade teórica coerente com a confiabilidade apresentada na prática. Além disso, pretende-se gerar conhecimento sobre o processo de projeto que possibilite inferir na determinação de outros fatores, tais como na otimização do uso do equipamento e na diminuição do custo de manutenção.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo da metodologia apresentada nesta tese é proporcionar aos agentes de projeto maior poder de decisão no desenvolvimento de sistemas automáticos, por meio de uma sistemática da análise de confiabilidade de sistemas automáticos a partir de informações extraídas de modelos técnicos essenciais desenvolvidos nas fases iniciais de projeto. A metodologia proposta possibilita estruturar de forma automática as configurações operacionais do sistema, estimar a confiabilidade do sistema e gerar os modelos de confiabilidade do sistema.

Com isso espera-se que sejam projetados sistemas mais confiáveis, com menor custo de desenvolvimento, operação e manutenção.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atender o objetivo geral apresentado acima, diferentes tarefas e hipóteses devem ser atendidas. Desta forma, detalhando esse objetivo apresentam-se os objetivos específicos do trabalho:

⁵ Árvore de sucesso é o complemento da árvore de falha. Nos próximos capítulos serão apresentadas maiores informações e justificativas da utilização deste modelo.

- ⇒ Desenvolver uma metodologia para análise de confiabilidade de sistemas automáticos que auxilie o projetista nas tomadas de decisões sobre as concepções de projeto do sistema nas fases iniciais do processo de projeto.
- ⇒ Inserir a metodologia proposta nesta tese na fase de projeto conceitual da metodologia de Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (PRODIP).
- ⇒ Avaliar a confiabilidade de sistemas automáticos considerando os diferentes estados operacionais do sistema.
- ⇒ Melhorar a estimativa da confiabilidade de sistemas automáticos, para que esta esteja o mais próximo possível da confiabilidade real do sistema.
- ⇒ Estimar os prováveis tempos de uso efetivos de cada componente durante o ciclo de vida do sistema.
- ⇒ Verificar a aplicação da metodologia em sistemas hidráulicos e pneumáticos, por meio de estudo de caso, utilizando informações de projeto de equipamentos reais.
- ⇒ Sistematizar as entradas de dados, procedimentos e geração de resultados do método de análise de confiabilidade de sistemas automáticos, de forma que auxilie a sua implementação computacional

1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este trabalho está dividido em sete capítulos com as seguintes disposições e conteúdos:

No Capítulo 2 é apresentado um estudo sobre o domínio da pesquisa, no qual são apresentadas definições, vantagens e aplicações dos sistemas automáticos. A partir da caracterização e conceituação destes sistemas, inserem-se os sistemas hidráulicos e pneumáticos, uma vez que atualmente estes envolvem, já com grande frequência, tecnologias eletrônicas e de *software*. Neste capítulo também é discutida a modelagem de forma estrutural, funcional e comportamental de sistemas automáticos. Em seguida, é apresentado um levantamento do estado da arte sobre a análise de confiabilidade em sistemas automáticos e, particularmente, em sistemas hidráulicos e pneumáticos.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia de processo de projeto na qual está embasada esta tese e são apresentadas as ferramentas utilizadas para modelagem e análise de sistemas automáticos, tais como Rede Canal Agência, GRAFCET e Redes de Petri. São apre-

sentados conceitos, vantagens, desvantagens e as principais aplicações destas em projetos de sistemas de engenharia.

Em seguida, no Capítulo 4, são apresentados os conceitos de confiabilidade e as ferramentas e métodos de análise de confiabilidade, tais como FTA e FMEA. Neste também é mostrada a representação da FTA em uma estrutura de Rede de Petri.

O Capítulo 5 apresenta a estrutura da MACSA - Metodologia para Análise de Confiabilidade de Sistemas Automáticos. O capítulo traz uma breve introdução ao domínio de aplicação, relacionando este com as contribuições apresentadas nos capítulos anteriores. Em seguida é apresentada uma abordagem para representação e solução do problema. O capítulo é finalizado com as proposições para solução do problema e a apresentação da metodologia proposta.

No capítulo 6 é apresentado um estudo de caso utilizando a MACSA para estimar a confiabilidade de um sistema simplificado representativo de uma UPCH - Unidade de Potência e Condicionamento Hidráulico. A intenção deste capítulo é demonstrar a aplicabilidade do método para um sistema real, o qual foi desenvolvido durante esta pesquisa.

Um segundo estudo de caso é apresentado no Capítulo 7, trata-se agora de um sistema pneumático, uma bancada didática para dimensionamento de componentes pneumáticos. Com a aplicação da MACSA neste segundo estudo de caso verificou-se que o metodologia proposta adapta-se para diferentes tipos de sistemas automáticos, independentemente da tecnologia utilizada.

Finalizando este documento, são apresentadas as conclusões sobre a relevância da metodologia proposta e dos resultados alcançados com a aplicação da mesma e o direcionamento para trabalhos futuros na linha de pesquisa desta tese.

CAPÍTULO 2 – PROJETO DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS

Este capítulo versa sobre o domínio da pesquisa na qual este trabalho está inserido, destacando as definições sobre os sistemas automáticos. A partir da caracterização e conceitualização destes sistemas, procurou-se considerar os sistemas hidráulicos e pneumáticos dentro deste contexto, uma vez que esses sistemas atualmente são também portadores de tecnologia eletrônica e de *software*. Estas tecnologias, ao mesmo tempo em que viabilizam que tais sistemas sejam utilizados em diversas áreas, agregando as características e vantagens dos sistemas automáticos, também acarretam uma série de novos tipos de relacionamentos entre os componentes de diferentes tecnologias, determinando novas variáveis que devem ser levadas em conta na análise do atributo confiabilidade.

O capítulo é composto por três tópicos principais. Inicialmente é apresentada uma revisão sobre os principais conceitos e definições dos sistemas automáticos. Nesse contexto, são descritas as características e particularidades de tais sistemas, as áreas de pesquisa e suas aplicações, assim como suas principais vantagens e desvantagens em relação à avaliação do atributo confiabilidade no processo de projeto. Além disso, é apresentada uma seção específica sobre sistemas hidráulicos e pneumáticos.

No segundo tópico disserta-se sobre a modelagem de sistemas automáticos, abordando as ferramentas e os tipos de modelagens utilizadas no processo de projeto destes. No terceiro tópico apresenta-se um estudo sobre os métodos de análise de confiabilidade aplicada a sistemas automáticos, destacando as diferentes estratégias de análise citadas no capítulo anterior.

2.1 SISTEMAS AUTOMÁTICOS

Os sistemas automáticos são equipamentos ou dispositivos que, para desempenhar uma determinada tarefa, utilizam recursos de diferentes áreas tecnológicas, tais como, componentes mecânicos, eletroeletrônicos e *software* de controle. Tais sistemas, geralmente, são programados para terem autonomia ao desenvolver as tarefas para as quais foram designados. Atualmente, estes sistemas estão incorporados a vários produtos, que vão desde eletrodomésticos até grandes sistemas de controle de satélites, por exemplo.

O aumento do nível de automação presente nestes sistemas, combinado com os avanços dos sistemas eletrônicos e os novos meios de comunicação disponíveis no mercado, têm sido fatores importantes para que os sistemas automáticos sejam aplicados em diversas

áreas da indústria. Geralmente são utilizados onde há necessidade de sistemas compactos e flexíveis, que desenvolvam diferentes tarefas de forma pré-programada.

Os sistemas automáticos geralmente apresentam características específicas no atendimento de suas funções, principalmente devido a sua autonomia operacional e aos diferentes estados em que o sistema poderá se encontrar durante sua vida útil. Dessa forma, a percepção do atendimento da função em sistemas automáticos está intrinsecamente ligada ao projeto do sistema de controle e as diferentes configurações operacionais definidas no sistema. Estas configurações são representadas no modelo funcional/estrutural do sistema que define o arranjo e relaciona os componentes do sistema que estão sendo utilizados para atender determinada função.

Yuchang et al. (2007) estuda sistemas de múltiplas fases. As fases são períodos com diferentes tempos de duração onde são caracterizadas diferentes estruturas funcionais durante a vida útil do sistema, atendendo assim um conjunto de funções de modo sequencial. Outros autores como Ramirez-Marquez e Coit (2007), Lisnianski (2007) e Li e Zuo (2008) avaliam sistemas de múltiplos estados considerando que cada componente, durante o atendimento de sua função, pode se encontrar em diferentes estados e conseqüentemente contribuir de forma diferenciada durante a vida útil do sistema. Esta análise é baseada na probabilidade de desempenho dos componentes e considera que os mesmos podem se encontrar nos seguintes estados de desempenho: 1) atendimento total da função, 2) falha do componente ou 3) atendimento parcial da função (componente degradado).

Os sistemas automáticos tratados neste trabalho são sistemas que apresentam diferentes formas de atender uma função. Sendo assim, a FG deve ser detalhada para diferentes VFGs, podendo estas ser equivalentes, diferenciadas por um qualificador de função⁶, ou totalmente distintas.

Sendo assim, de acordo com o modelo comportamental do sistema e os diferentes arranjos funcionais e estruturais, um componente pode não ser solicitado ou então pode participar do atendimento de uma ou mais VFG do sistema. Isto interfere, conseqüentemente, no inter-relacionamento, na utilização e no estado de cada componente do sistema.

De acordo com Takeda et. al. (1994) o conjunto de funções de um sistema está relacionado com o seu comportamento, assim como os diferentes estados em que este sistema

⁶ Define o modo com que a função será atendida, tais como, maneira, qualidade, estado, ou seja especifica o modo de realizar, dá uma noção de refinamento da função atendida (LINHARES, 2005).

poderá se encontrar (Figura 2.1). Nos sistemas automáticos os potenciais estados estão definidos a priori no sistema de controle e as funções a serem atendidas dependerão das necessidades apresentadas pelo usuário.

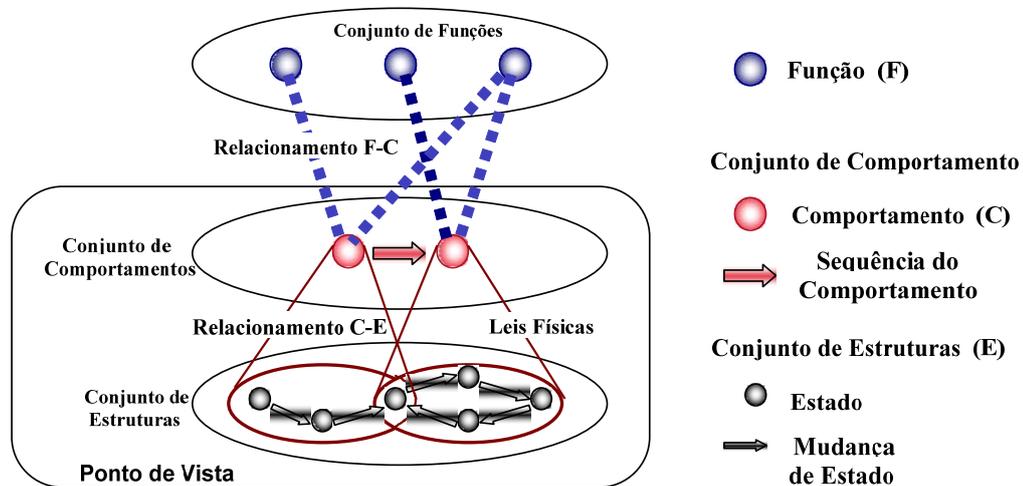


Figura 2.1 – Relacionamento entre função, comportamento e estrutura (adaptado de Takeda et al. (1994))

2.1.1 Conceituação e caracterização dos sistemas automáticos

Segundo De Negri (1996), no domínio dos sistemas multitecnológicos, existem diferentes denominações para os mesmos, de acordo com o campo de aplicação, como os sistemas mecatrônicos e os sistemas eletromecânicos controlados.

De acordo com Benard et al. (2008) os sistemas automáticos são elementos discretos, interconectados e que, interagindo em conjunto, realizam uma função pré-determinada.

De Negri (1996) define como sistemas automáticos os sistemas que integram componentes que realizam as ações físicas, ou seja, que processam energia e matéria, juntamente com as funções de controle e processamento de informações. Este trabalho está embasado neste conceito, o qual será explorado nos próximos capítulos pela análise do processamento de energia, matéria e informação.

Desta forma, os sistemas automáticos manipulam o fluxo de informação, energia e matéria dentro de um processo específico, com o intuito de provocar uma mudança em um determinado ambiente externo ao sistema. Para tanto, estes sistemas apresentam uma combinação adequada das áreas de mecânica, computação e eletrônica, possibilitando as seguintes características no projeto (SOUZA, 2005):

⇒ Simplificação do sistema mecânico;

- ⇒ Redução de tempo e de custo de desenvolvimento;
- ⇒ Facilidade de introduzir modificações ou novas capacidades;
- ⇒ Flexibilidade para receber futuras modificações ou novas funções.

Devido à combinação de diferentes tecnologias, o projeto de sistemas automáticos não é uma tarefa trivial, uma vez que essa tarefa exige o envolvimento de especialistas de diferentes áreas. Questões como conhecimento, experiência e utilização de ferramentas de análise e de projeto são determinantes para a decisão do melhor caminho para a obtenção da solução para um determinado problema. No entanto, independente do domínio de aplicação e da complexidade, os sistemas automáticos podem ser decompostos em dois subsistemas: o sistema de informação e o sistema de energia e matéria. No sistema de informação acontece o processamento de informação e sinal, pelo uso de computadores ou controladores programáveis, enquanto no sistema de energia e matéria acontece a transformação dos recursos por meio de processos físicos e energéticos.

De acordo com as características citadas acima sobre os sistemas automáticos, e considerando os sistemas hidráulicos e pneumáticos atuais, que são portadores de componentes mecânicos, eletroeletrônicos e controlados por *software*, verifica-se que os mesmos estão inseridos dentro do domínio de sistemas automáticos, conforme representado na Figura 2.2



Figura 2.2 – Sistemas hidráulicos e pneumáticos no domínio de sistemas automáticos

Na próxima seção analisa-se brevemente os sistemas hidráulicos e pneumáticos objetivando embasar os capítulos 6 e 7, onde serão apresentados projetos de sistema hidráulico e pneumático, respectivamente, utilizados nos estudos de caso.

2.1.2 Sistemas hidráulicos e pneumáticos

Os sistemas hidráulicos e pneumáticos utilizam a tecnologia associada com a geração, controle e transmissão de potência empregando fluidos pressurizados. Estes sistemas

constituem-se em uma forma concreta de aplicação dos princípios da mecânica dos fluidos compressível e incompressível e estão presentes em várias áreas de aplicação, devido às inúmeras vantagens amplamente conhecidas (LINSINGEN, 2003).

Os sistemas hidráulicos e pneumáticos podem ser representados por três módulos bem definidos: 1) circuito de potência e condicionamento do fluido, 2) circuito de atuação e 3) sistema de controle, este último incluindo o circuito elétrico e a programação implementada em dispositivos eletrônicos. A Figura 2.3 apresenta a configuração de um sistema hidráulico em que são apresentados os diagramas representativos destes três módulos e alguns componentes que contemplam os mesmos.

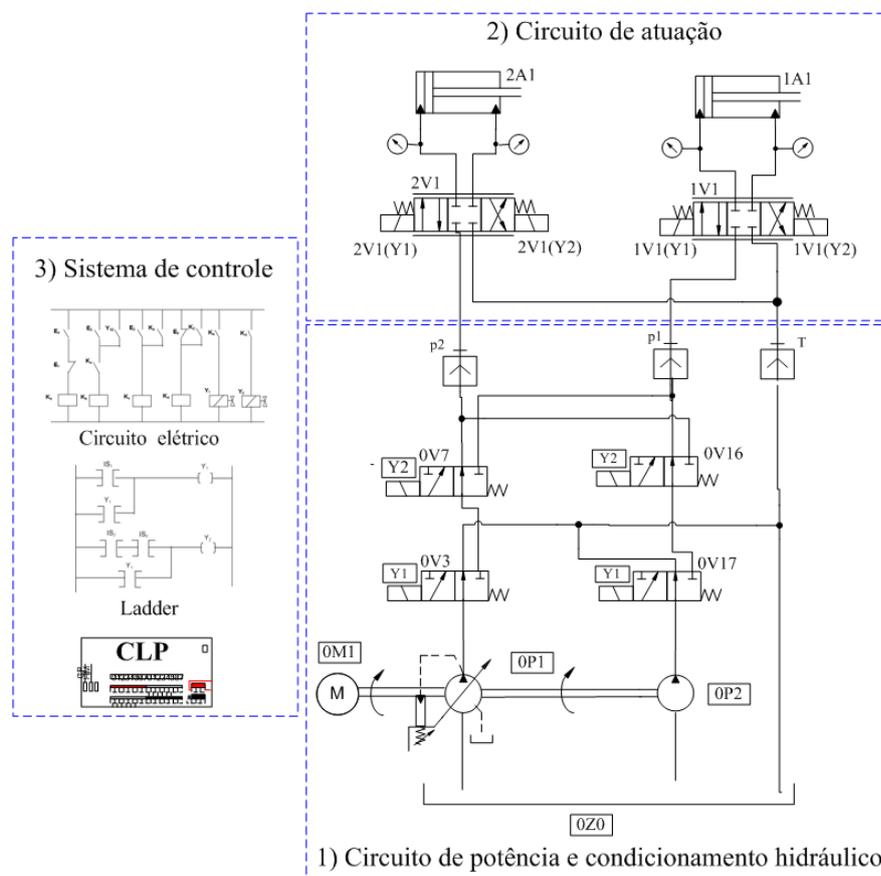


Figura 2.3 – Módulos de um sistema hidráulico

No circuito do sistema de atuação (2), válvulas direcionais e cilindros assimétricos têm a função de controlar e converter energia hidráulica em energia mecânica. No circuito da unidade de potência (1), o reservatório, o motor elétrico, as bombas hidráulicas e as válvulas direcionais têm a função de converter energia elétrica em energia hidráulica controlada.

Um sistema de controle (3) usual pode ser composto por um controlador lógico programável (CLP), por um circuito elétrico e por um *software* de controle sequencial. Este mó-

dulo tem a função de controlar a operação do sistema de atuação (2) e da unidade de potência (1) de forma adequada para que o sistema atenda a sua função de forma efetiva.

Para que estes sistemas ((1), (2) e (3)) executem suas tarefas plenamente é necessário que os componentes mecânicos (hidráulicos ou pneumáticos) e os componentes que realizam o controle, processamento e a transmissão de sinais tenham sido adequadamente selecionados e dimensionados.

2.2 MODELAGEM DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS

Neste trabalho modela-se os sistemas automáticos enfatizando-se o fluxo de informação, energia e matéria e utilizando-se modelos diagramáticos, os quais definem, durante as fases de projeto do sistema, o conjunto de ações desejadas, as mudanças de estado que ocorrem no sistema para atender uma determinada função e as relações entre os componentes do sistema.

Os modelos diagramáticos são compostos de um conjunto de linhas e símbolos gráficos que podem representar características funcionais, estruturais e comportamentais de um sistema real (DE NEGRI; SANTOS 2007). De forma geral, um modelo funcional estabelece de forma inequívoca a função de cada componente no sistema e a interrelação entre elas para que um sistema atenda a uma função global desejada pelo usuário. Por sua vez, um modelo estrutural representa o conjunto de elementos em um sistema e o conjunto de relações que conectam estes elementos com outros, sendo que estas relações podem indicar conexões físicas ou de comunicações ou de relações hierárquicas. Por fim um modelo comportamental representa a relação das entradas, proveniente do ambiente externo, com o estado interno e a influência que o sistema exerce sobre o ambiente externo.

O processo de projeto em sistemas automáticos segue a linha do projeto integrado, caracterizado pela interação de vários especialistas com distintas formações, que devem trabalhar em sintonia, trocando informações nas diferentes áreas tecnológicas requeridas. Metodologias específicas para o processo de projeto dos sistemas automáticos têm sido estudadas para que os mesmos sejam bem planejados e desenvolvidos de forma estruturada, e principalmente, para que os agentes de projeto consigam se comunicar indistintamente da área tecnológica a qual pertençam. Porém, apesar dos esforços despendidos, percebe-se que ainda não há uma metodologia de projeto consolidada para os sistemas automáticos (DE NEGRI; SANTOS 2007).

Pesquisas realizadas no LASHIP/EMC/UFSC como De Negri (1996), Attié (1998), Paes (2001), Santos (2003), Souto (2005) e Belan (2007) contribuíram na sistematização de mé-

todos de projeto para os sistemas automáticos. Esses estudos partiram da descrição funcional, estrutural e comportamental do sistema, contemplando a multidisciplinaridade dos sistemas e norteando a utilização adequada de ferramentas de análise de projeto já existentes.

De Negri (1996) desenvolve um modelo de sistemas automáticos utilizando a notação em Rede Canal/Agência, conforme Figura 2.4, na qual faz uma representação genérica de sistemas por meio de uma estrutura simples e de fácil assimilação por pessoas de formações diversas. Esta modelagem define parâmetros de projeto de forma funcional e estrutural, o que evidencia, desde as partes iniciais do projeto, uma visão estruturada do sistema.

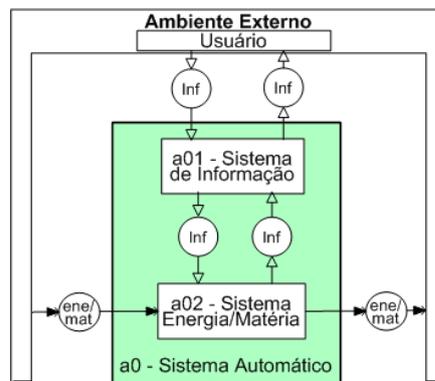


Figura 2.4 - Modelo funcional/estrutural de sistema automático (DE NEGRI, 1996)

A modelagem funcional e estrutural dos sistemas automáticos tende a direcionar os agentes de projeto de uma estrutura complexa, que atenda uma função global, para componentes que atendem funções elementares do sistema. Isto define a abordagem *top-down*, que está presente em metodologias de processo de projeto, tais como as apresentadas por Pahl e Beitz (1996) e Back et al. (2008). Além disso, esta modelagem define o fluxo de informação entre seus componentes e subsistemas, equivalentes aos diagramas de fluxo de dados utilizados na engenharia de *software*.

De acordo com o modelo da Figura 2.4, o sistema automático é caracterizado pelo sistema de informação e o sistema de energia/matéria. O sistema de informação engloba os equipamentos que processam sinais e dados, tais como computadores, controladores lógicos programáveis, controladores, válvulas de processamento de sinais (válvulas 'E' e 'OU'), entre outros. Por sua vez, o sistema energético/material (processo físico ou químico) abrange máquinas, dispositivos e equipamentos que transformam ou processam energia e/ou matéria.

Especificamente, Santos (2003) apresenta um breve estudo sobre o projeto conceitual de sistemas técnicos, no qual discute teorias e metodologias propostas para o desenvolvi-

mento de sistemas técnicos, assim como integra a síntese de controladores a eventos discretos com a modelagem funcional e estrutural utilizada por De Negri e Paes (2003).

Belan (2007) formaliza matematicamente a modelagem em Rede Canal Agência (Redes C/A), definindo os elementos básicos da rede, a representação da rede por meio de vetores e matrizes e os procedimentos que permitem que os modelos sejam analisados por meio de operações matemáticas. Esta ferramenta, bem como sua formalização e seus métodos de análises serão apresentados no próximo capítulo.

2.3 CONFIABILIDADE DOS SISTEMAS AUTOMÁTICOS

A ampliação do grau de automação e da utilização de componentes de diferentes tecnologias, combinado com a grande demanda desses produtos no mercado, tem aumentado a preocupação das equipes de projeto em relação à confiabilidade e a manutenibilidade dos sistemas automáticos. Além disso, a alta competitividade do mercado exige produtos confiáveis, de qualidade, com alta produtividade e baixo custo.

Dessa forma, encontrar soluções que melhorem as tarefas de projeto e que interfiram positivamente sobre os atributos de confiabilidade e manutenibilidade do sistema, de forma sistemática, é fundamental para o desenvolvimento dos sistemas automáticos.

O Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (NEDIP/EMC/UFSC) tem pesquisado o atributo confiabilidade no processo de projeto. Vinadé (2003) propôs a sistematização do processo de análise confiabilidade e manutenibilidade aplicado a sistemas hidráulicos, no qual implementou um sistema especialista para apoio da manutenção de sistemas hidráulicos. Machado Neto (2002) apresentou uma metodologia para a garantia da confiabilidade no desenvolvimento de produtos mecatrônicos, na qual é proposta uma série de tarefas e ensaios de confiabilidade durante a fase de projeto de produto.

A análise e a avaliação da confiabilidade e da segurança dos sistemas automáticos são tarefas que podem apresentar várias dificuldades devido ao fato da confiabilidade e da segurança dependerem do estado de falha de cada componente e também da sequência de ocorrência destas falhas (ADAMYAN; HE 2002). Neste contexto, Mendigutxia (1995), Vinadé (2003), Machado e Gorga (2003), Avontur e Werff (2001), Dimitrov et al.(2002) e Yu et al. (2007), entre outros, desenvolveram ferramentas e métodos de análise de falhas, com o intuito de melhorar a análise de confiabilidade desses sistemas.

Sistemas de monitoração são utilizados na análise e avaliação dos sistemas automáticos com o intuito de auxiliarem no tratamento da confiabilidade e na disponibilidade destes

sistemas. O sistema de tolerância de falha (Fault Tolerant System) tem como objetivos básicos: 1) impedir que as falhas sejam produzidas, 2) antecipar-se à ocorrência da falha e 3) minimizar o efeito das falhas sobre o sistema (MENDIGUTXIA, 1995).

Os sistemas especialistas se destacam na área de monitoração de sistemas automáticos devido à possibilidade de interpretação de alguns sintomas, que podem ser associados a um determinado estado do mesmo. Os sistemas especialistas são muito utilizados, na medida em que dispõem de ferramentas que transformam o conhecimento empírico do especialista, no caso, sobre falhas de sistemas automáticos, em regras que podem ser utilizadas pelo projetista para atribuir ao produto em desenvolvimento os requisitos necessários para incorporar os atributos de confiabilidade e de manutenibilidade (VINADÉ 2003).

O avanço tecnológico proporcionou a interação harmônica de componentes mecânicos, eletrônicos e de *softwares*, no entanto introduziu novas possibilidades de falhas no sistema requerendo, por sua vez, novas ferramentas e métodos que possam tratar de forma adequada os novos modos de falhas⁷. Por outro lado, esta mesma tecnologia é utilizada na detecção e tratamento das mesmas. Neste cenário, o avanço da tecnologia digital e a redução dos custos dos equipamentos permitem a utilização de técnicas, como (MACHADO; GORGA, 2003):

- ⇒ Distribuição de funções em elementos de *hardware*, que são cada vez menores, o que permite o isolamento da falha. Possibilita também o autodiagnóstico e a troca à “quente”, influenciando diretamente grandezas como o MTTR (Mean Time to Repair – tempo médio para reparo);
- ⇒ Redundância ou duplicação/recolocação de recursos. Qualquer elemento que possua uma função crítica no sistema ou que tenha um MTBF (Mean Time Between Failure – tempo médio entre falhas) inaceitável pode ser considerado como sujeito a aplicação de técnicas de redundância.

No entanto, grande parte das pesquisas realizadas com o intuito de avaliar a confiabilidade de sistemas técnicos são implementadas nas fases finais do processo de projeto. Segundo Avontur e Werff (2001) a análise de confiabilidade destes sistemas é feita nas fases de projeto preliminar e detalhado, em que já está definida a estrutura do produto. Nestas fases, geralmente, um especialista em confiabilidade tem a tarefa de avaliar a confiabilidade do

⁷ Modo com que o item falha ou deixa de apresentar o resultado desejado ou esperado.

sistema. No entanto, as modificações que ele poderá propor nesta fase de projeto podem ser limitadas e com alto custo, devido a poucas possibilidades de modificação do produto.

O que se nota, pelas escolas de projeto como as representadas por Pahl e Beitz (1996), Back et al. (2008), Blanchard e Fabrick (1990), é que tomadas de decisão sobre os atributos de confiabilidade e manutenibilidade são mais eficientes e menos custosas se forem realizadas ainda nas fases iniciais do processo de projeto.

Autores como Dimitrov et al. (2002) e Yu et al. (2007) utilizam modelos baseados em processos estocásticos para avaliar a confiabilidade de sistemas. Entre estes, os modelos de Markov e simulação de Monte Carlo são os mais utilizados sendo empregados, basicamente, para complementar as análises feitas com modelos combinatórios tais como: 1) árvore de falha, 2) árvore de eventos ou 3) diagrama de blocos, quando esses são insuficientes para representar o modelo de confiabilidade de um sistema complexo (MOURA, 2006).

No entanto, a partir do tamanho e da complexidade do sistema, estes processos começam a apresentar várias desvantagens, tais como a explosão de estados, no caso dos modelos de Markov e o tempo de processo, no caso da simulação de Monte Carlo. Desta forma, as pesquisas desenvolvidas nesta área têm utilizado algumas estratégias para amenizar as desvantagens destes métodos.

Alguns trabalhos são desenvolvidos utilizando o modelo semi Markov, pois o mesmo ameniza a explosão de estados comparando com o modelo de Markov. Além disso, é mais adequado para sistemas reparáveis⁸. Lisnianski (2007) apresenta uma metodologia de avaliação da confiabilidade para sistemas multicomponentes e multiestados, utilizando o modelo semi Markov juntamente com diagramas de blocos. Moura (2006) desenvolve uma avaliação de indicadores de desempenho e confiabilidade de sistemas complexos utilizando modelos semi Markov e Redes Bayesianas para sistemas reparáveis.

Outros autores optam pela estratégia de decomposição do sistema antes de aplicar os processos estocásticos. Azaron et al. (2006) define uma metodologia para a análise da confiabilidade voltada para sistemas redundantes passivos. Para isso o autor define diferentes caminhos que levam o sistema ao sucesso (*minimal paths set*) e para arranjos menores de componentes aplica o modelo de Markov. Huang e Chang (2007) aplicam o conceito de árvore de falha dinâmica, onde a árvore é dividida em sub-árvores independentes e para cada uma dessas árvores é aplicado o modelo de Markov.

⁸ Sistemas para o quais a ação de reparo consiste de qualquer procedimento que não seja a sua completa substituição ou renovação (MOURA, 2006)

Benard, Cauffriez e Renaux (2008) apresentam uma metodologia para avaliar a dependabilidade de sistemas automáticos. Dependabilidade é um termo coletivo usado para descrever o desempenho da disponibilidade e seus fatores de influência: confiabilidade, manutenibilidade e suporte logístico de manutenção (ABNT, 1994). Os autores definem as configurações operacionais do sistema e aplicam para cada configuração uma avaliação quantitativa dos atributos confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade e segurança, utilizando a simulação de Monte Carlo.

Distefano e Puliafito (2009) avaliam a confiabilidade de disponibilidade de sistemas dinâmicos dependentes utilizando diagramas de blocos de confiabilidade dinâmica. Para esta análise, as estruturas do sistema são detalhadas e decompostas de acordo com suas funções. Neste trabalho, os autores avaliam um sistema de fornecimento de água, o qual apresenta cinco bombas e dois pontos de fornecimento de água para uma cidade. Este sistema possibilita que o fornecimento de água da cidade seja feito por quatro diferentes configurações operacionais. Nesta análise os diagramas de blocos são gerados por meio de uma ferramenta de modelagem de modelos combinatórios.

De acordo com as pesquisas apresentadas acima, as estratégias de análise de confiabilidade são utilizadas de maneira conjunta, ou seja, geralmente são definidas determinadas configurações do sistema e posteriormente para essas estruturas são aplicadas uma análise utilizando métodos estocásticos. Esta abordagem é feita principalmente para amenizar as desvantagens dos métodos estocásticos. No entanto, a definição das estruturas funcional e estrutural, assim como a definição dos modelos de confiabilidade do sistema, é totalmente dependente dos agentes de projeto.

Confiabilidade em sistemas hidráulicos e pneumáticos

A confiabilidade em sistemas hidráulicos e pneumáticos visa garantir as funções de: 1) desempenho primário, tais como força, velocidade e torque, 2) desempenho de qualidade com baixo custo operacional e de manutenção, precisão e estabilidade e 3) desempenho em termos de risco, incluindo segurança pessoal, integridade do meio ambiente e segurança dos equipamentos e instalações.

Adicionalmente, os seguintes requisitos têm sido intensificados para a construção de sistemas hidráulicos e pneumáticos: 1) emprego de altas pressões (sistemas hidráulicos), 2) obtenção de altas velocidades, 3) integração de sistemas de controle, 4) alta eficiência e 5) longa vida útil. Com o desenvolvimento da tecnologia micro-eletrônica nas últimas décadas, tem havido um aumento na utilização de sistemas eletro-hidráulicos e eletropneumáticos e,

consequentemente, estes sistemas tem se tornado mais complexos, surgindo novos problemas tecnológicos que podem dificultar a análise de confiabilidade destes sistemas.

Segundo Jingy et al. (2001), devido à estrutura complexa dos componentes hidráulicos, o estudo da confiabilidade requer um maior empenho dos profissionais e apropriadas ferramentas para a análise de todo o sistema. Além disso, como citado anteriormente, as novas tecnologias em sistemas hidráulicos, tais como aquisição, tratamento e armazenagem de dados, exigem uma maior atenção sobre a análise de confiabilidade destes sistemas, devido principalmente, a troca de informação e sinal entre componentes de diferentes tecnologias.

O fluxo de energia que ocorre concomitante com o fluxo de matéria (fluido hidráulico ou ar comprimido) que acontece internamente nos sistemas hidráulicos e pneumáticos, pode provocar o desgaste e o transporte de impurezas dentro do sistema. Os componentes hidráulicos geralmente apresentam uma estrutura mecânica complexa com diversos orifícios, além de serem compostos por elementos móveis, conforme exemplificado pela Figura 2.5. Desta forma, a presença de impurezas nestes orifícios ou entre elementos podem causar vários danos no sistema, alterando o comportamento do mesmo e possivelmente afetando na função do sistema como um todo.

A grande maioria dos trabalhos voltados para a análise da confiabilidade de sistemas hidráulicos está baseada no controle da contaminação do fluido (JINGY et al., 2001). O fluido hidráulico é um dos principais causadores de falhas, pois o mesmo promove a transferência de todas as impurezas físico-químicas provenientes do processo para todos os componentes do sistema (AMORIM, 2003).

A Figura 2.5 apresenta uma representação de válvula hidráulica proporcional. Nesta representação verifica-se a quantidade de elementos que compõem este componente, dos quais alguns destes, durante o atendimento de suas funções, apresentam movimentos relativos entre si e, além disso, estão em contato direto com o fluido hidráulico.

Vinadé (2003) inferiu sobre os atributos de confiabilidade e manutenibilidade de sistemas hidráulicos empregados em reguladores de velocidade e a importância do fluido para estes atributos. Desta forma, a monitoração das condições do fluido em sistemas hidráulicos apresenta grande relevância nas tomadas de decisão em diagnósticos e ações de manutenção do sistema.

A monitoração de parâmetros operacionais, tais como vazão e pressão nos sistemas, auxilia no controle da degradação dos componentes do sistema e também serve como alerta para que providências de reposição ou ações de manutenção sejam definidas. Por fim, estas

ações são utilizadas para evitar falhas, aumentar a confiabilidade e a disponibilidade do equipamento.

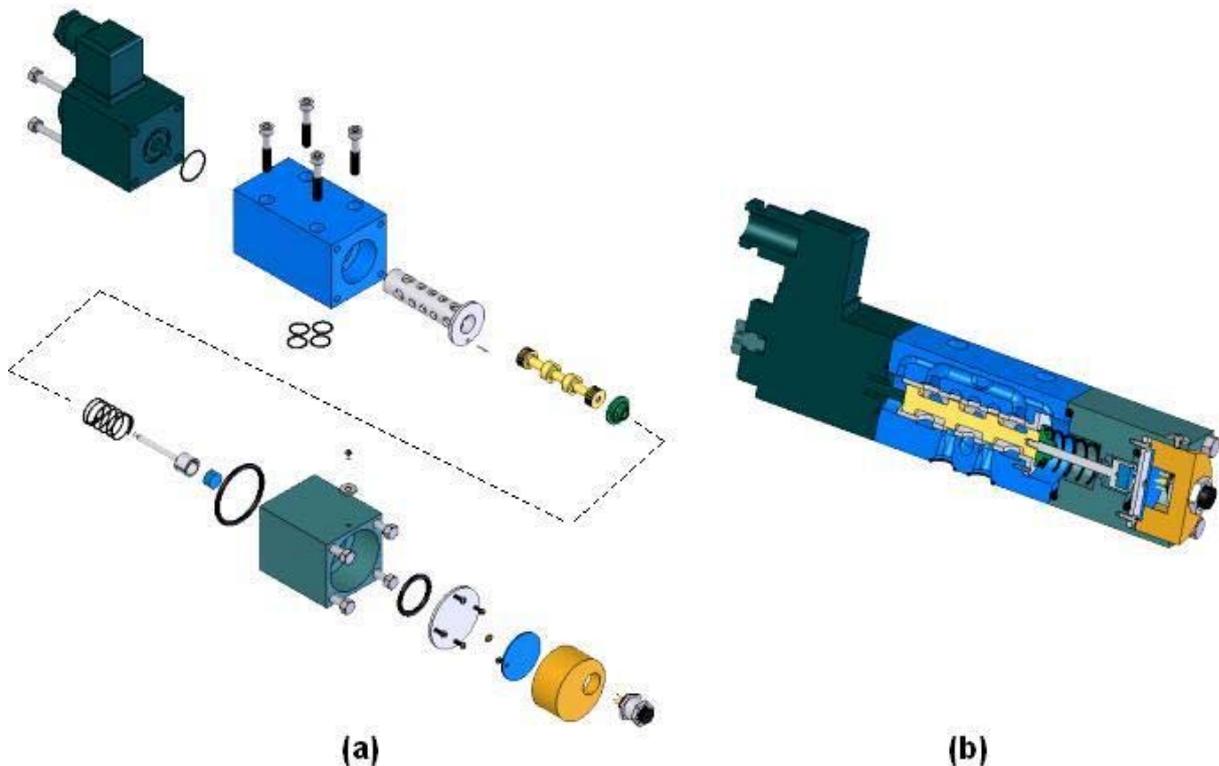


Figura 2.5 – Válvula proporcional (a) vista explodida (b) vista de corte (Bastos et al., 2004)

Trabalhos que avaliam os sistemas hidráulicos e pneumáticos com a abordagem de sistemas automáticos têm sido desenvolvidos nos últimos anos. Benard, Cauffriez e Renaux (2008) estudaram o caso de um sistema hidráulico no qual avaliam o atributo dependabilidade na fase de projeto do sistema. Para isso, utilizam uma estrutura metodológica desenvolvida em SADT (Structured Analysis and Design Technique), para avaliar a dependabilidade qualitativamente e a simulação de Monte Carlo para avaliar a dependabilidade quantitativamente.

A Figura 2.6 esquematiza o sistema hidráulico automático utilizado no estudo de caso do método proposto por Benard, Cauffriez e Renaux (2008). Neste trabalho, os autores definem primeiramente os macros estados e identificam as diferentes configurações funcionais e estruturais do sistema, as quais são representadas por funções matemáticas e, posteriormente, a estrutura operacional do sistema é definida, relacionando essas funções. Os autores definem como estruturas operacionais a modelagem comportamental do sistema. A avaliação da dependabilidade é feita para cada uma destas estruturas operacionais e, além

disso, os autores avaliam a criticidade (probabilidade de ocorrência da falha relacionada com a severidade da mesma) de seus componentes e o impacto desta no sistema.

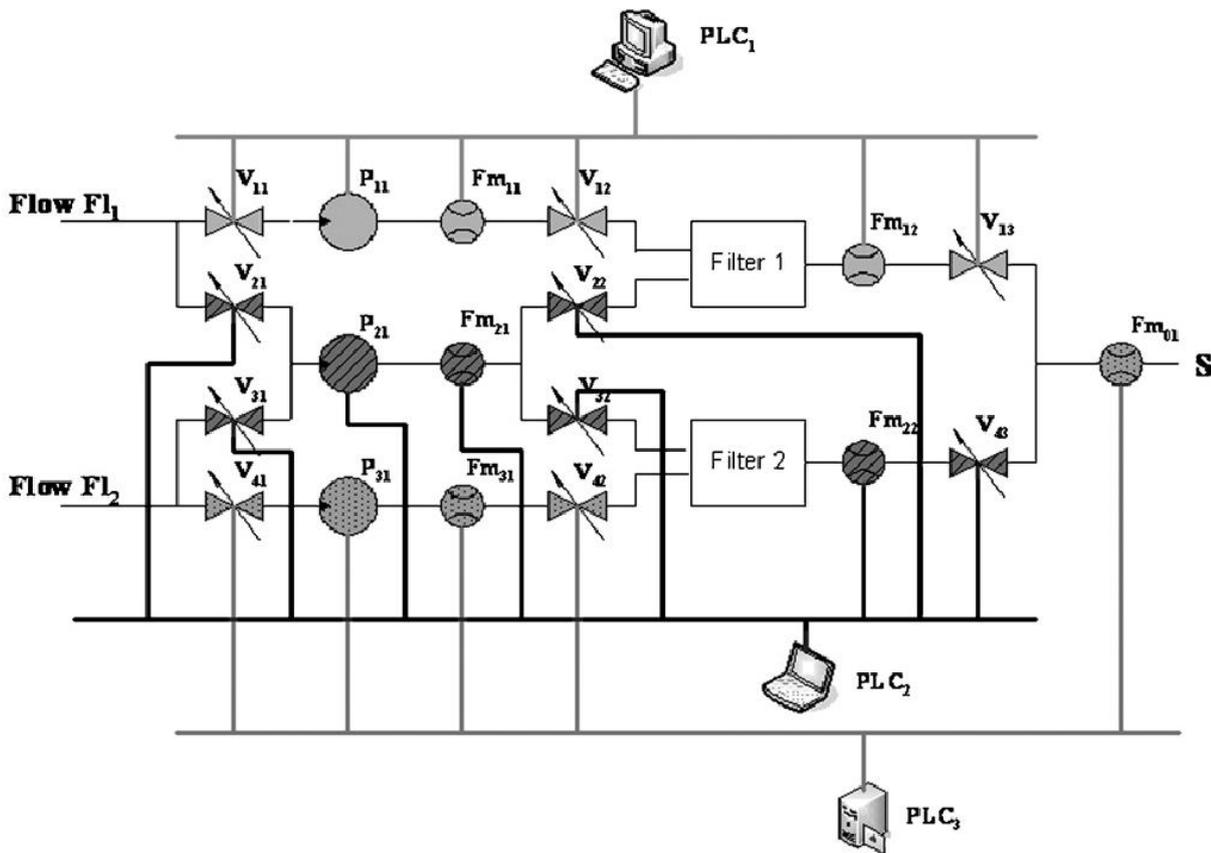


Figura 2.6 - Exemplo de sistema a hidráulico automático (BENARD; CAUFFRIEZ; RENAUX, 2008)

Na abordagem adotada por Benard, Cauffriez e Renaux (2008), a definição das configurações funcionais e estruturais do sistema depende da experiência dos agentes de projeto e as funções matemáticas que as representam são desenvolvidas de forma intuitiva.

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIAS E FERRAMENTAS DE PROJETO PARA SISTEMAS AUTOMÁTICOS

A atividade de projeto deve ser orientada por meio de metodologia que contemple, de forma sistematizada, o uso de ferramentas e métodos para auxiliar nas decisões durante o desenvolvimento de produtos. A partir desta premissa, apresenta-se neste capítulo uma revisão básica sobre metodologias de projeto, que servirá de fundamento para o desenvolvimento da metodologia proposta neste trabalho. Além disso, apresentam-se os principais métodos e ferramentas utilizadas para a modelagem de sistemas automáticos na fase de processo de projeto.

Na primeira seção deste capítulo será apresentado o modelo de referência PRODIP, desenvolvido no NEDIP/EMC/UFSC e descrito em Back et al. (2008), no qual evidencia-se as principais fases de projeto, ou seja, projeto informacional, conceitual, preliminar e detalhado e define-se a inserção do método para estimativa da confiabilidade de sistemas automáticos na fase de projeto conceitual. Desta forma, haverá destaque para a apresentação da fase de projeto conceitual.

Além do modelo de referência PRODIP, uma estrutura metodológica do projeto conceitual para sistemas automáticos proposta por Belan (2007) é apresentada. Nessa estrutura são utilizados modelos estrutural, funcional e comportamental no processo de projeto, a partir de ferramentas específicas para o projeto de sistemas automáticos.

As ferramentas utilizadas neste trabalho, relacionadas ao projeto de sistemas automáticos, serão apresentadas nas seções seguintes contemplando: 1) Rede de Petri, utilizada para representar sistemas a eventos discretos, possibilitando a modelagem gráfica, assim como a manipulação matemática de seus dados; 2) Rede C/A, que é uma ferramenta com perspectiva funcional/estrutural de sistema automático; 3) Grafcet, que se destina a modelagem comportamental dos sistemas automáticos.

Este estudo sobre metodologia de projeto e modelos para análise de sistemas automáticos na fase de projeto conceitual mostra a importância e a possibilidade de análise de confiabilidade nesta fase. No próximo capítulo será realizado um estudo sobre métodos para a análise e avaliação da confiabilidade de sistemas. O objetivo é completar os métodos e ferramentas necessárias para a estimativa de confiabilidade no processo de projeto de sistemas automáticos.

3.1 METODOLOGIAS PARA PROJETO DE PRODUTOS

As metodologias de desenvolvimento de produto são caracterizadas por sistematizarem tarefas, métodos e procedimentos.

O Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (NEDIP/EMC/UFSC) tem publicado trabalhos sobre metodologias de desenvolvimento de produtos industriais para diferentes áreas de atuação. Romano (2003) apresenta um modelo de referência para o processo de desenvolvimento de produtos, que se divide em três macro-fases: Planejamento do projeto, Elaboração do projeto do produto e Implementação, sendo estas compostas por fases, conforme apresentado na Figura 3.1. A macro-fase “Elaboração do projeto do produto”, formada pelas fases de projeto informacional, conceitual, preliminar e detalhado, representa o período nas quais as atividades de projeto irão transformar necessidades e ideias em especificações, concepções e modelos detalhados do produto que será produzido.

A síntese dos trabalhos de Pahl e Beitz (1996), Back (1983) e Hubka e Eder (1988), Ferreira (1997), Ogliari (1999), Fonseca (2000) e Romano (2003), entre outros, resultou no Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (PRODIP) adotado pelo NEDIP, apresentado em Back, et al. (2008).



Figura 3.1 – Representação gráfica do modelo do processo de desenvolvimento integrado de produtos – PRODIP (BACK, et al, 2008)

No modelo de referência PRODIP são apresentadas, além das fases do processo de projeto, as entradas e saídas de cada fase do projeto. A seguir destacam-se os métodos e ferramentas recomendadas para cada fase, com ênfase no projeto conceitual.

Projeto Informacional

A fase de projeto informacional utiliza as informações da macro-fase de planejamento. Esta fase de projeto parte das necessidades do cliente ou usuário e define as especificações de projeto, tendo como tarefas principais: 1) identificar os requisitos dos usuários, 2) definir os requisitos do projeto e 3) definir as especificações de projeto. Fonseca (2000) contribuiu com a sistematização e a implementação computacional dessa fase.

Projeto Conceitual

O projeto conceitual é a fase do processo de projeto que gera, a partir das especificações, uma ou mais concepções para um produto que atenda da melhor maneira possível esta necessidade, sujeita às limitações de recursos e às restrições de projeto, (FERREIRA, 1997; OGLIARI, 1999). Nessa fase, as especificações de projeto são processadas com base em ferramentas que transformam-nas em conceitos funcionais do produto. Essa etapa de projeto é considerada a mais importante, pois as decisões tomadas na mesma irão influenciar diretamente as fases subsequentes.

As principais atividades desta fase são: 1) estabelecer a estrutura funcional, 2) desenvolver as concepções alternativas do produto e 3) selecionar e avaliar a concepção do produto. A Tabela 1 apresenta estas atividades, descrevendo suas tarefas e saídas.

Tabela 1 – Atividade do projeto conceitual do produto (BACK et al, 2008)

Atividades	Tarefas	Saída
Estabelecer a estrutura funcional do produto	Definir a função global e as subfunções do produto; estabelecer as estruturas funcionais alternativas; analisar e a selecionar estrutura funcional;	Função global; estruturas funcionais alternativas; subfunções desenvolvidas; estrutura funcional selecionada.
Desenvolver as concepções alternativas do produto	Desenvolver princípios de solução para as subfunções; combinar princípios de solução para formar a função global; monitorar o desenvolvimento das concepções em relação às especificações de projeto; selecionar concepções mais adequadas; elaborar modelos das concepções; estimar custos das concepções.	Estrutura funcional, princípios de soluções; concepções alternativas; modelos das concepções alternativas; estimativas de custo das concepções alternativas.
Selecionar concepção do produto.	Avaliar comparativamente as concepções alternativas em relação às especificações de projeto; conduzir avaliação de riscos e oportunidades de cada concepção em relação ao projeto do produto e ao plano de manufatura, descrever as características da concepção selecionada	Relatório de avaliação das concepções alternativas; concepção do produto
Avaliar a concepção do produto.	Verificar se a concepção atende ao escopo do projeto e emitir parecer sobre a concepção.	Avaliação da concepção do produto.

A Figura 3.2 apresenta um modelo da fase de projeto conceitual, no qual um fluxograma das atividades técnicas, administrativas e financeiras é apresentado. O destaque para esta fase deve-se ao fato da presente pesquisa estar centrada na fase de projeto conceitual.

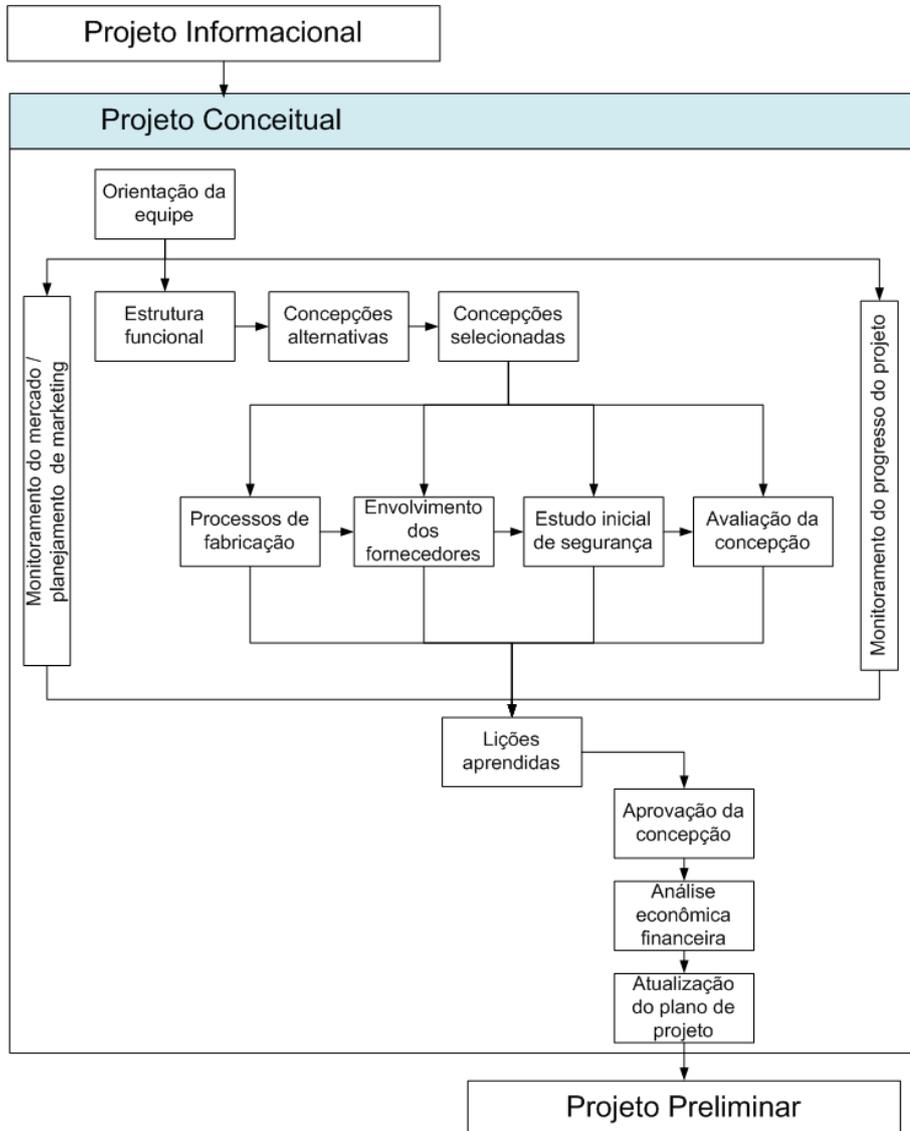


Figura 3.2 – Fluxograma da fase de projeto conceitual (BACK et al., 2008)

Projeto Preliminar

A fase de projeto preliminar é comumente considerada como aquela em que o produto “toma corpo”, onde se tem o leiaute do produto. É também denominada de “materialização do produto”. Nessa fase, a concepção definida no projeto conceitual é avaliada em relação a critérios técnicos e econômicos.

Projeto Detalhado

No projeto detalhado é definida a geometria final do produto e todos os parâmetros requeridos para a produção. Essa fase destina-se a vários propósitos: 1) aprovação do protó-

tipo; 2) finalização das especificações dos componentes; 3) detalhamento do plano de manufatura e 4) preparação da solicitação de investimento (BACK et al, 2008).

3.2 PROJETO PARA SISTEMAS AUTOMÁTICOS

Na fase de projeto conceitual, agora com foco em projeto de sistemas automáticos, este trabalho desenvolve uma metodologia para analisar a confiabilidade no processo de projeto, por meio da avaliação das concepções geradas nessa fase.

Para executar essas análises, são avaliados os modelos do sistema desenvolvido na fase de projeto conceitual. Nesta fase de projeto são desenvolvidos basicamente modelos de linguagem gráfica e esta representação se estende para as demais fases de desenvolvimento do sistema (FERREIRA, 1997). A Figura 3.3 mostra uma representação da distribuição dos diferentes tipos de modelos durante a fase de projeto do produto.

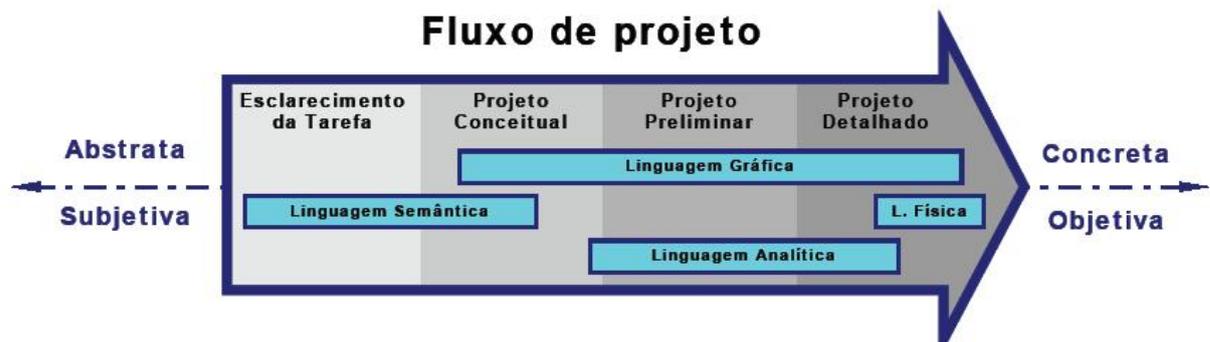


Figura 3.3 – Predominância de linguagem dos modelos no fluxo de projeto de produto (FERREIRA, 1997)

No projeto de sistemas automáticos, com o intuito de facilitar a análise, são utilizados os modelos de linguagem gráfica para representar as diferentes visões do sistema. Estes modelos apresentam perspectivas funcional, estrutural e comportamental do sistema (DE NEGRI; SANTOS 2007).

A partir do trabalho de Santos (2003) e complementado por Belan (2007), foi definida uma metodologia para a fase de projeto conceitual de sistemas automáticos (Figura 3.4). Para representar esses modelos são utilizadas ferramentas, tais como: Rede C/A, Grafcet e diagramas hidráulicos e elétricos.

Nas próximas seções serão apresentadas as ferramentas utilizadas na sistemática proposta.

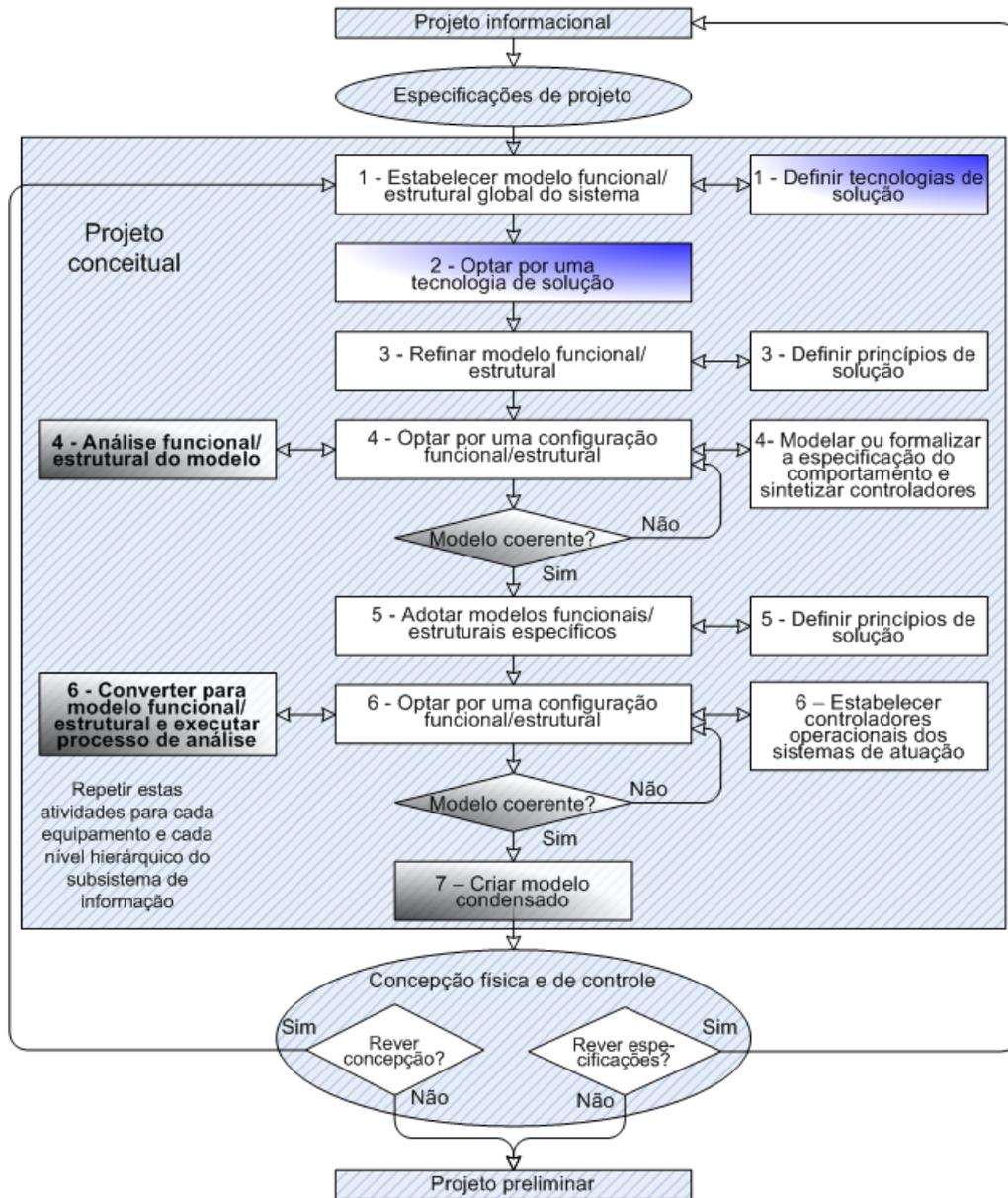


Figura 3.4 - Estrutura metodológica do projeto conceitual para sistemas automáticos (BELAN, 2007; DE NEGRI; SANTOS, 2007)

3.3 REDES DE PETRI

A Rede de Petri é uma ferramenta gráfica e matemática utilizada em um grande número de aplicações em que as noções de eventos e evolução simultânea de estados são importantes, (CARDOSO; VALETE, 1997). Além disso, apresenta um formalismo que possibilita a análise, avaliação e implementação computacional do sistema modelado pela rede.

As Redes de Petri foram desenvolvidas por Carl Adam Petri em 1962. Esse modelo lógico para análise de sistemas a eventos discretos tem sido utilizado em grande escala como modelo comportamental de sistemas, principalmente na área de projeto de sistemas de ma-

nufatura, na qual o sincronismo, a concorrência e o paralelismo de tarefas são comuns. Atualmente as Redes de Petri têm sido utilizadas também como ferramenta para diferentes tipos de análise de projeto, tais como, análise de confiabilidade e análise de falha em sistemas. Neste contexto pode-se citar os trabalhos de Knezevic e Odoom (2001), Liu e Chiou (1997) e Riascos et al. (2003).

Uma Rede de Petri é vista como um tipo particular de grafo orientado, constituído de dois tipos de nós: as transições e os lugares, os quais são interligados por arcos. A Rede de Petri é uma quádrupla $R = (P, T, Pre, Post)$, onde:

- ⇒ P é um conjunto de lugares representado por círculos.
- ⇒ T é um conjunto de transições representado por barras.
- ⇒ Pre e $Post$ são as relações de precedência e procedência aplicados sobre $P \times T$ e $T \times P$, respectivamente, representadas por arcos.

A Figura 3.5 (a) apresenta uma Rede de Petri e a identificação de seus elementos: 1) *lugar*, representado por um círculo, pode ser interpretado como um estado parcial ou uma condição atual do sistema 2) *transição*, representado por barra ou retângulo, está associada a um evento que ocorre no sistema 3) *ficha*, representado por um ponto no *lugar*, é um indicador significando que a condição associada ao lugar é verificada (CARDOSO; VALETE, 1997).

Neste trabalho utiliza-se Redes de Petri ordinárias, as quais o peso de todos os arcos é igual a 1. A regra de evolução está baseada apenas nos conceitos de condição e evento, onde os lugares representam a condição e as transições os eventos.

Uma transição tem certo número de lugares de entrada e lugares de saída representando as pré-condições e as pós-condições, respectivamente. A presença de uma ficha em um lugar indica que a condição associada aquele lugar é verdadeira (PERKUSICH; LIMA, 2007). A evolução dessas redes acontece de acordo com as seguintes regras:

- 1) Uma transição t é dita habilitada se cada lugar de entrada p de t é marcado pelo menos por uma ficha, conforme representado na Figura 3.5 (b).
- 2) Uma transição habilitada pode ou não disparar, dependendo se o evento ocorreu.
- 3) O disparo de uma transição t retira fichas de cada lugar de entrada p de t e adiciona fichas a cada lugar de saída p de t , conforme representado na Figura 3.5 (c).

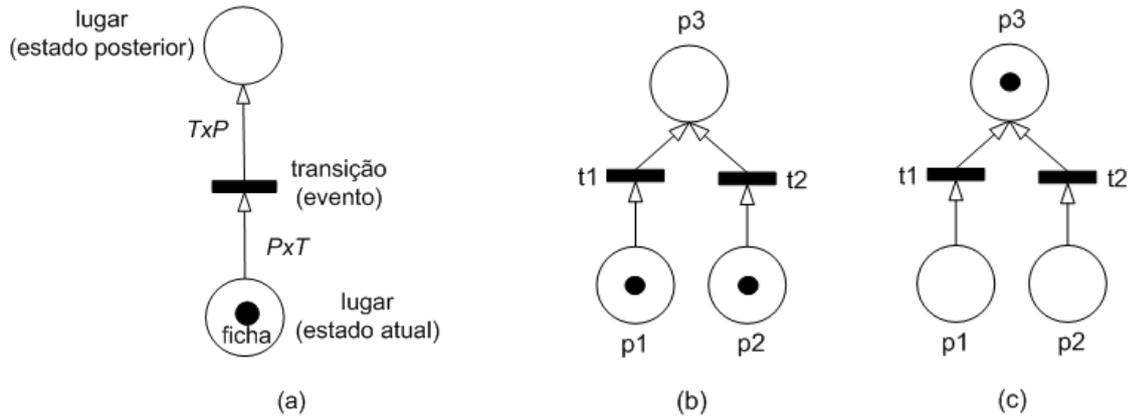


Figura 3.5 – Rede de Petri: (a) Elementos do grafo; (b) Transição habilitada (c) Disparo da transição

Além da representação gráfica, a Rede de Petri proporciona uma representação matricial, a qual facilita a implementação computacional do sistema e sua verificação automática. As informações contidas na representação gráfica de uma Rede de Petri podem ser organizadas numa matriz de incidência C (Equação (3.1)). A matriz Pre é formada a partir dos elementos $a_{ij} = Pre(p, t)$ que indica o peso do arco que liga um lugar de entrada p_i para uma transição t_j e a matriz $Post$ é formada a partir dos elementos $b_{ij} = Post(t, p)$ que indica o peso do arco que liga uma transição t_j para um lugar de saída p_i (CARDOSO; VALETE, 1997).

Nessas matrizes, as colunas são mapeadas pelas transições e as linhas pelos lugares da rede, como exemplificado na Equação (3.2) referente à rede mostrada na Figura 3.5(b). Quando não existe relação de precedência ou procedência o valor do elemento na matriz é nulo.

$$C = Post - Pre \tag{3.1}$$

$$\begin{matrix} p1 \\ p2 \\ p3 \end{matrix} \begin{matrix} t1 & t2 \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 1 & 1 \end{matrix} = \begin{matrix} p1 \\ p2 \\ p3 \end{matrix} \begin{matrix} t1 & t2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{matrix} - \begin{matrix} p1 \\ p2 \\ p3 \end{matrix} \begin{matrix} t1 & t2 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{matrix} \tag{3.2}$$

Devido à aplicação das Redes de Petri em diferentes áreas, outros tipos de redes foram desenvolvidas, nas quais foram inseridas outras características, tais como agregar informações nas fichas, lugares ou transições. Algumas dessas redes são citadas abaixo, (CARDOSO; VALETE, 1997):

- ⇒ Redes de Petri de alto nível: essas redes possuem características que permitem a modelagem de sistemas mais complexos, nos quais o comportamento é definido por processos simultâneos e semelhantes. Como exemplo de redes de alto nível pode-se

citar as 1) Rede de Petri Coloridas, 2) Rede de Petri Predicado-Transição e 3) Rede de Petri à Objetos.

- ⇒ Redes de Petri Interpretadas: esse tipo de rede considera os dados comportamentais do sistema e do ambiente no qual o mesmo está inserido. Na Rede de Petri Interpretada além da estrutura da rede e de sua marcação, ela introduz o tempo, a interação com o ambiente e os dados contidos nas fichas para a evolução do sistema.
- ⇒ Redes de Petri com tempo: nessas redes o tempo pode ser associado como um atraso ao disparo das transições ou a permanência de uma ficha em um lugar.
- ⇒ Redes de Petri estocásticas: é uma rede na qual cada transição tem associada uma variável aleatória com distribuição exponencial, que expressa a frequência de disparo da transição. Uma Rede de Petri estocástica, que também contém transições instantâneas (sem atraso), é uma Rede de Petri generalizada estocástica.

As Redes de Petri apresentam propriedades que podem ser utilizadas como ferramentas de análise durante o desenvolvimento de projeto. As propriedades estáticas, que representam as características estruturais da rede, têm o propósito de caracterizar as subclasses da rede, nas quais é possível identificar informações adicionais sobre o comportamento dinâmico do modelo em Rede de Petri. Os principais métodos utilizados para análise estrutural que auxiliam na caracterização do comportamento das Redes de Petri são:

- ⇒ Invariantes de lugar: é um conjunto de lugares no qual a soma das fichas permanece constante para todas as marcações possíveis.
- ⇒ Invariantes de transição: um invariante de transição acontece quando uma sequência de disparo definida não modifica a marcação da rede.

Outros métodos utilizados para facilitar a análise dessas propriedades são as técnicas de redução e decomposição da rede. As técnicas de redução são utilizadas para simplificar um modelo complexo por meio da redução dos elementos da rede, preservando as propriedades a serem analisadas. Essa redução é feita retirando da Rede de Petri os lugares e/ou transições que não afetam as propriedades de interesse.

Vários trabalhos têm sido desenvolvidos utilizando a modelagem em Redes de Petri na análise de falha e confiabilidade em sistemas complexos. Nesses trabalhos, a análise de confiabilidade utiliza as Redes de Petri como uma representação equivalente a modelos como FTA e diagramas de blocos, para então valer-se do formalismo e da facilidade da imple-

mentação computacional para análises qualitativa e quantitativa da confiabilidade desses sistemas.

Riascos (2002) apresentou uma metodologia de análise e tratamento de falhas em máquinas automáticas utilizando Redes de Petri, na qual desenvolveu em um único modelo, o processo normal de funcionamento da máquina e uma rede de detecção e tratamento de falhas.

Knezevic e Odoom (2001) e Liu e Chiou (1997) apresentaram métodos de análise de falha baseados em modelos de Redes de Petri, para análise de confiabilidade de sistemas. A ferramenta mostrou-se adequada para a representação da árvore de falha de sistemas automáticos, para o cálculo de probabilidade de falha, para a definição do modelo de confiabilidade do sistema e para a definição dos grupos mínimos de corte (ver seção 4.2.2).

Adamyán e He (2002) apresentaram uma metodologia para identificar a sequência de falha e avaliar a probabilidade de ocorrência das falhas em sistemas de manufatura. No estudo, os autores relacionam os conceitos de Redes de Petri com a determinação de falha num sistema, conforme a Figura 3.6, onde definem os elementos das Redes de Petri da seguinte forma:

- ⇒ Uma falha será determinada a partir do disparo de uma transição;
- ⇒ As causas das falhas serão determinadas por lugares de entrada da transição;
- ⇒ Os efeitos das falhas serão determinados pelos lugares de saída da transição.

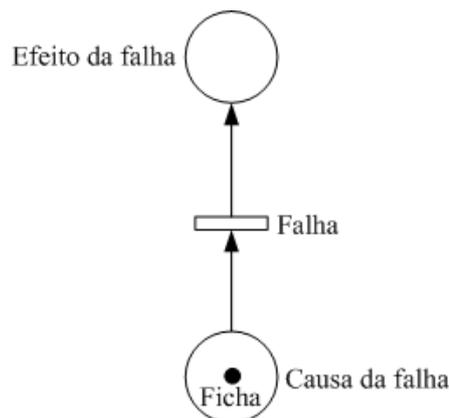


Figura 3.6 – Relação Rede de Petri e determinação da falha (ADAMYAN; HE, 2002)

3.4 REDE CANAL/AGÊNCIA

A Rede de Petri Canal/Agência (Rede C/A) é um grafo direcionado bipartido, composto por dois elementos básicos: unidades ativas, representadas por retângulos e uni-

dades passivas representadas por círculos, conectados por arcos direcionados que representam o fluxo de recursos (HEUSER, 1990 apud DE NEGRI; DE NEGRI, 1996). A Figura 3.7 apresenta a simbologia usada para os elementos da notação Rede C/A.

Sob a perspectiva funcional, as unidades passivas correspondem aos recursos que fluem pelo 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 desempenham atividades, correspondendo às operações aplicadas sobre os recursos como bombeamento, montagem, transporte, processamento, etc.

Numa perspectiva estrutural, as unidades passivas são designadas canais, constituídas de componentes do sistema que dão suporte para que os recursos possam fluir sem causar modificação no seu estado. Como exemplos, podem-se citar: tubulações, eixos, fios, depósitos, mensagens, memórias etc. Os retângulos representam as agências que correspondem ao local onde acontecem as atividades, tais como: bombas, componentes de máquinas, estações de trabalho, *software*, entre outros. É importante observar que a orientação indicada pelos arcos que acoplam estes elementos não tem significado sob o ponto de vista estrutural (DE NEGRI, 1996).

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 3.7 – Elementos básicos da Rede C/A (BELAN, 2007)

As Redes C/A são usadas para realizar a modelagem funcional e estrutural de sistemas. Os elementos da notação que representam o modelo são simples e não são específicos para área alguma, além de ser de fácil entendimento.

O refinamento de um canal ou de uma agência consiste no detalhamento destes, identificando-se novos canais e agências internas, conforme ilustrado na Figura 3.8. Do mesmo modo, canais e agências podem ser agrupados formando elementos condensados. O re-

sultado do processo de refinamento ou condensação é uma Rede C/A. Logo, a regra básica de só haver interligação entre canais e agências deve ser sempre atendida.

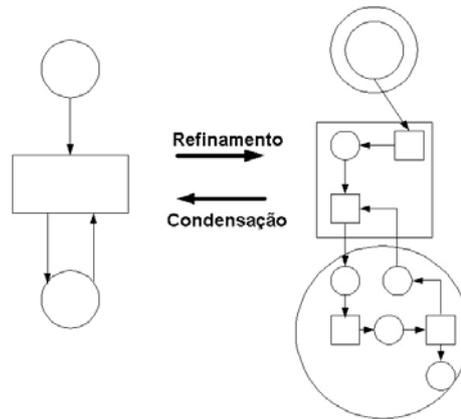


Figura 3.8 - Refinamento e condensação de Redes C/A (DE NEGRI, 1996)

Como exemplo, a Figura 3.9 apresenta a modelagem de um equipamento hidráulico (plataforma de hidráulica proporcional – Módulo Demonstrativo). Com o desdobramento do sistema em Rede C/A foi possível identificar os principais módulos que atendem funções parciais do sistema estudado. Desta forma, a avaliação da confiabilidade do sistema foi realizada de forma modular, na perspectiva de que o atendimento da função global do sistema depende do atendimento da função de cada módulo (PORCIÚNCULA et al., 2005)

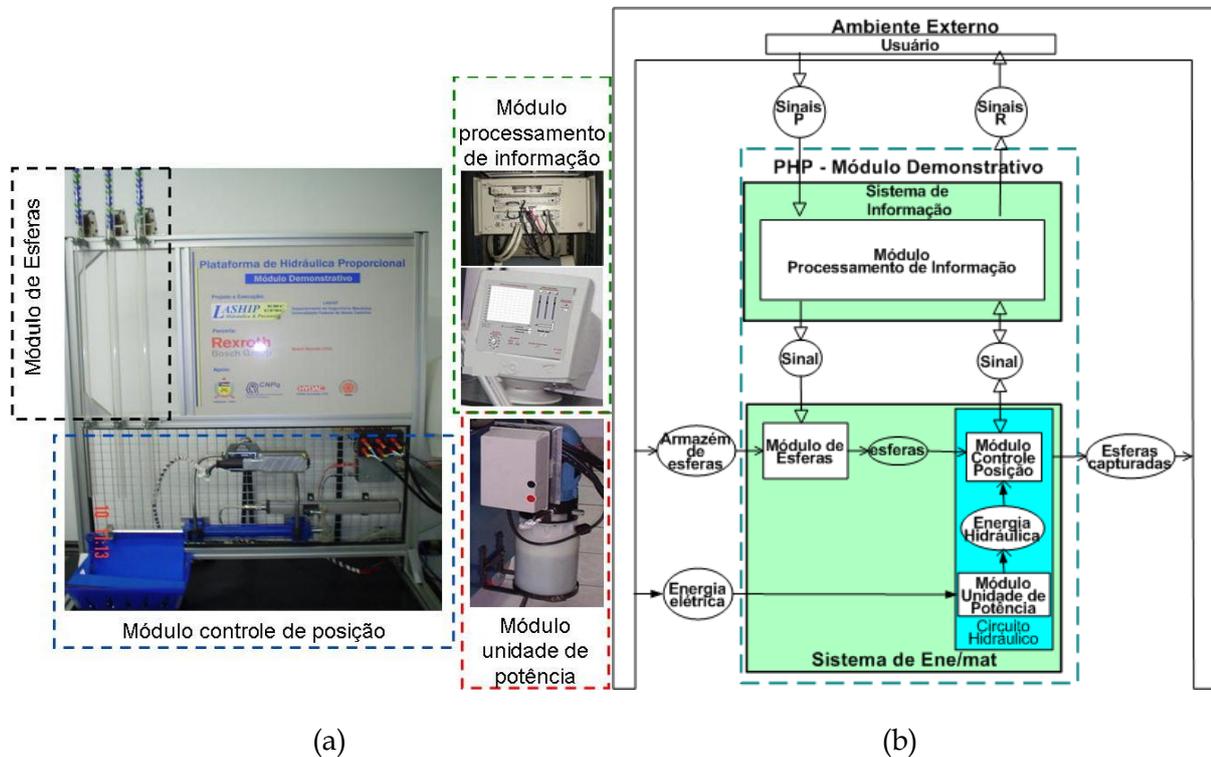


Figura 3.9 – Plataforma de hidráulica proporcional – Módulo Demonstrativo: (a) Equipamento real; (b) Modelagem do sistema com Rede C/A, (PORCIÚNCULA et al., 2005)

O formalismo das Redes C/A proposto por Belan (2007) permitiu a geração de um modelo matemático equivalente ao modelo gráfico, baseado na teoria de conjuntos, funções e matrizes.

A representação da Rede C/A em forma matricial facilita a manipulação da rede, pois permite o uso de operações matemáticas sobre as entidades da rede, o que viabiliza uma implementação automática dos métodos de análise nos sistemas modelados com essa ferramenta. A Rede C/A é definida pelas matrizes K_{pre} (matriz de incidência anterior) e K_{post} (matriz de incidência posterior) (BELAN, 2007). A matriz K_{pre} relaciona os canais precedentes de cada agência e a K_{post} relaciona os canais posteriores à cada agência da Rede C/A.

Neste trabalho, a definição das diferentes configurações operacionais do sistema automático terá por base a manipulação matricial do modelo funcional e estrutural proposto por Belan (2007). No trabalho proposto por Belan (2007) foram definidos métodos de análise e síntese de Rede C/A, destacando-se aqui o método de análise de coerência estrutural e o método de análise de coerência de fluxo de recurso:

- ⇒ O método de análise de coerência estrutural tem 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 o tipo de recursos que o percorrem;
- ⇒ O método de análise de coerência de fluxo de recurso 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 todo recurso que sai do sistema deve definir um caminho que percorrido no sentido inverso atinge um canal de entrada.

O método de análise de coerência estrutural baseia-se na determinação dos canais limites das matrizes K_{pre} e K_{post} do sistema, ou seja, são identificados os canais fornecedores de recursos para o sistema e os canais consumidores de recursos do sistema.

No entanto, neste trabalho a análise será feita independentemente do tipo de recurso que flui na rede. Assim, o interesse estará apenas no fluxo e não na identificação do tipo de recurso que está fluindo pelos canais. Desta forma, a relação entre canal e agência será representada por apenas um bit, pela unidade (1) quando o canal é percorrido por um determinado recurso e por zero (0) quando o canal não é percorrido.

A seguir são apresentadas quatro etapas que determinam os canais limites do sistema, sendo que maiores detalhes sobre estas etapas serão apresentadas no Capítulo 5:

1. Para cada linha de K_{pre} e K_{post} , aplicar a operação 'OU' entre as colunas de uma mesma linha. Obtendo-se dois vetores coluna, um referente à matriz K_{pre} (VCK_{pre}) e outro à K_{post} (VCK_{post}). As dimensões dos vetores devem ser iguais ao número de canais da rede.
2. Mapear os canais limites: Para encontrar quais são os canais fornecedores e/ou consumidores, subtrai-se o vetor VCK_{pre} de VCK_{post} . O resultado é um vetor coluna (VC_{Res}). Para cada elemento de VC_{Res} referente a um canal, tem-se que:
 - Se o bit for igual a '-1' então este é um canal consumidor;
 - Se o bit for igual a '0', então este canal é um canal interno;
 - Se o bit for igual a '1', então este é um canal fornecedor.
3. Para cada coluna de K_{pre} e K_{post} , aplicar a operação 'OU' entre as linhas de uma mesma coluna. Obtendo-se dois vetores linha, um referente à matriz K_{pre} (VLK_{pre}) e outro à K_{post} (VLK_{post}). A dimensão dos vetores deve ser igual ao número de agências da rede.
4. Mapear as agências limites: Para encontrar as agências fornecedoras e consumidoras, faz-se a subtração do vetor VLK_{pre} do vetor VLK_{post} . O resultado é um vetor coluna (VL_{Res}). Para cada elemento de VL_{Res} referente a uma agência, tem-se que:
 - Se o bit for igual a '-1' então esta é uma agência fornecedora;
 - Se o bit for igual a '0', então esta agência é uma agência interna;
 - Se o bit for igual a '1', então esta é uma agência consumidora.

O método de análise de coerência de fluxo de recurso verifica se um determinado recurso que entra no sistema tem condições de ser retirado ou, no caso contrário, se para um canal consumidor existe algum canal fornecedor de onde este recurso tenha se originado. Como ponto de partida para a análise da coerência de fluxo de recursos, considera-se que o mapeamento dos canais limites já tenha sido realizado.

A análise de coerência de fluxo de recurso é feita de forma iterativa entre as matrizes K_{pre} e K_{post} a partir de cada canal fornecedor. Para cada canal fornecedor da rede, primeiramente é feita uma varredura na matriz K_{pre} para identificar as agências que estão interligadas aos mesmos e posteriormente estas agências são mapeadas na matriz K_{post} para identificar os canais que estão interligados com estas agências.

Caso estes canais encontrados sejam canais consumidores então o fluxo deste sistema está completo, caso contrário, segue-se a iteração mapeando as agências interligadas a estes canais na matriz K_{pre} . Esta iteração continua até que se encontrem os canais consumidores, ou que se chegue à conclusão de que o fluxo não está coerente, ou seja, que não existe um caminho de fluxo de um canal fornecedor para um canal consumidor.

Obviamente para se utilizar estes métodos de análise, o sistema deve estar modelado em Rede C/A. Para tanto, Belan (2007) apresenta exemplos de conversões de sistemas modelados em diagramas específicos da área de mecânica, hidráulica e elétrica para um modelo em Rede C/A equivalente. A Figura 3.10(a) apresenta um exemplo de circuito hidráulico (PORCIÚNCULA et al., 2005) e a sua modelagem em Rede C/A na forma gráfica e matricial são apresentadas nas Figura 3.10 (b) e (c), respectivamente.

3.5 GRAFCET

O Gráfico Funcional de Controle de Etapas e Transições (Grafcet) foi criado na Europa em 1979, numa parceria entre a comunidade científica e a industrial. O objetivo era criar uma linguagem concisa e completa para atender as necessidades de acadêmicos e projetistas (BARACOS, 1992). Esta ferramenta representa graficamente a modelagem comportamental e de lógica de controle de sistemas sequenciais e, além disso, é utilizada na programação de CLPs e atua como meio de interação entre projetista e usuário de sistemas automáticos (IEC, 2002).

O Grafcet é uma derivação das Redes de Petri que, primeiramente, foi desenvolvido para aplicação específica na área eletromecânica. No entanto, como sua estrutura de modelagem independe do tipo de tecnologia que está sendo tratado no sistema, o Grafcet foi aplicada em outras áreas da indústria, como por exemplo, em sistemas hidráulicos e pneumáticos (IEC, 2002). Conforme citado em Paes (2001), o Grafcet teve uma boa receptividade das pessoas que trabalham na indústria e, com a sua padronização, ganhou credibilidade no âmbito industrial. Além disso, no campo acadêmico, vários trabalhos foram e estão sendo desenvol-

vidos nessa área, sob diversos enfoques, que vão desde editores e ferramentas para simulação de Grafcet até *softwares* de controle em tempo real.

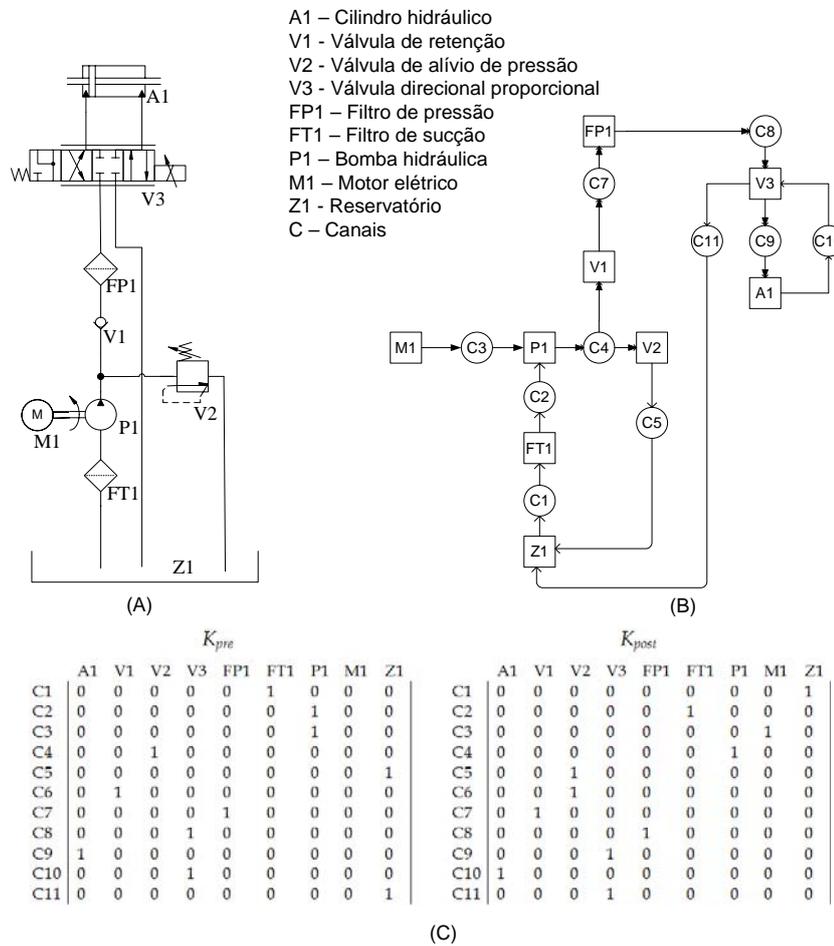


Figura 3.10 – Circuito hidráulico: (a); Diagrama de circuito hidráulico; (b) Rede C/A gráfica e (c) Rede C/A matricial (PORCIÚNCULA et al., 2005)

3.5.1 Representação gráfica

A representação gráfica do Grafcet consiste em passos, que são representados por quadrados e em transições representadas por barras horizontais. Os passos e as transições são interligados por arcos, a evolução do modelo é interpretada de cima para baixo. O passo inicial, isto é, o passo que está ativo quando o sistema for iniciado, é representado por um quadrado duplo. O Grafcet possibilita várias sequências em uma única representação tais como, configurações de sequências alternativas, paralelas e saltos. A Figura 3.11 apresenta um exemplo de modelo comportamental em Grafcet.

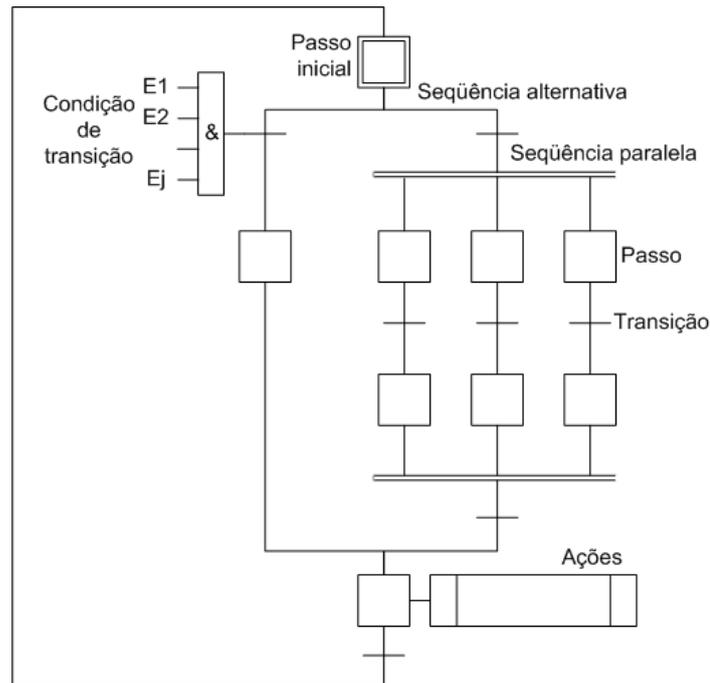


Figura 3.11 – Exemplo da estrutura de um Grafcet (adaptado de Johnsson (1999))

A seguir são definidos os elementos do Grafcet (BARACOS, 1992):

- ⇒ Passo: um passo pode estar ativo ou inativo, os passos ativos definem o estado do sistema. Para cada estado pode estar associada uma ou mais ações e estas ações são executadas quando o passo é ativado.
- ⇒ Transição: As transições são utilizadas para conectar os passos e cada transição tem suas condições de disparo. As transições determinam a possibilidade de evolução de um passo ativo para outro. Uma transição está habilitada se todos os passos precedentes a ela estiverem ativos. Se a transição estiver habilitada e as condições desta transição forem verdadeiras a mesma irá disparar. O disparo de uma transição promove a desativação dos passos que a precedem e a ativação dos passos que as sucedem.
- ⇒ Condição de transição: Em cada transição estão associadas condições de disparo da transição, ou seja, para a transição disparar, as condições devem estar satisfeitas e tais condições podem ser representadas por uma expressão ou variável lógica.
- ⇒ Ações: São as ações que modificam o ambiente do sistema, produzindo algum tipo de trabalho. As ações são representadas num retângulo contendo três campos: o primeiro indica alguma propriedade do sinal que gera a ação, no segundo campo é desig-

nada à ação e no terceiro é indicado o elemento de sinal que confirma a realização da ação.

3.5.2 Estruturas do Grafcet

Assim como nas Redes de Petri, o Grafcet também permite a combinação de diferentes formas entre seus passos, possibilitando o sincronismo, a concorrência e o paralelismo de ações. A Figura 3.12(a), mostra uma Junção *E*, na qual para que o passo 3 seja ativado é necessário que os passos 1 e 2 estejam ativados e a transição *T1* seja disparada. A Figura 3.12 (b) apresenta uma Distribuição *E*, na qual para que os passos 2 e 3 sejam simultaneamente ativados, é necessário que o passo 1 esteja ativado e a transição *T1* seja disparada.

Esses casos acontecem na modelagem de sistemas que apresentam operações simultâneas a partir de um determinado passo da sequência, e posteriormente estas operações paralelas convergem para outro passo comum.

A Figura 3.13 (a) mostra uma junção *OU*, na qual para que o passo 3 seja ativado, é necessário que o passo 1 esteja ativado e a transição *T1* seja disparada ou que o passo 2 esteja ativado e a transição *T2* seja disparada.

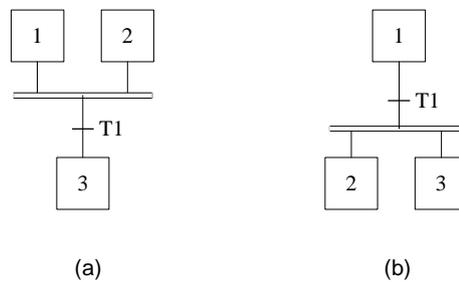


Figura 3.12 – Grafcet: (a) Junção *E* ; (b) Distribuição *E* (BARACOS, 1992)

A Figura 3.13 (b) apresenta uma distribuição *OU*, na qual para que o passo 2 seja ativado é necessário que o passo 1 esteja ativado e a transição *T1* seja disparada e para ativar o passo 3 é necessário que o passo 1 esteja ativado e a transição *T2* seja disparada.

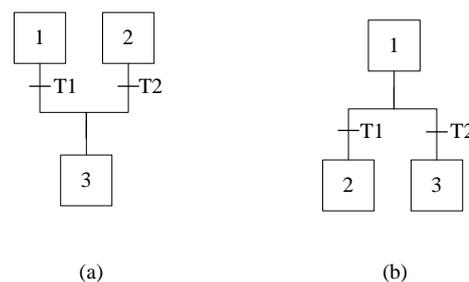


Figura 3.13 – Grafcet: (a) Junção *OU* ; (b) Distribuição *OU* (BARACOS, 1992)

Os casos apresentados acima ocorrem em modelagem de sistemas que permitem opções alternativas a partir de um determinado passo da sequência e, posteriormente, a alternativa escolhida irá ativar novamente a sequência principal.

CAPÍTULO 4 - MÉTODOS PARA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS

Neste capítulo apresentam-se os principais conceitos, métodos, técnicas e ferramentas utilizadas na análise de confiabilidade de sistemas automáticos. Definições do atributo confiabilidade de sistemas e da taxa de falhas dos componentes são apresentadas, assim como a análise de confiabilidade de sistemas, sendo definidos os modelos de confiabilidade e os métodos de Análise de Árvore de Falha (FTA) e de Análise de Árvore de Sucesso (STA).

Em seguida apresenta-se a relação entre FTA e STA definida por Veseley (2002). A árvore de sucesso será utilizada na implementação do Método de Análise da Confiabilidade de Sistemas Automáticos (MACSA) a ser apresentado no Capítulo 5, pois se verificou que essa ferramenta facilita a geração dos modelos de confiabilidade dos sistemas automáticos. Os principais motivos da utilização das árvores de sucesso são explicitados neste capítulo, onde se destaca suas principais contribuições para esse trabalho.

Por fim, apresentam-se pesquisas na linha de análise de confiabilidade em sistemas utilizando as Redes de Petri para representar FTA. Essa representação permite a manipulação dos dados dessas árvores de forma matricial o que facilita o processo de análise do sistema.

4.1 DEFINIÇÃO DE CONFIABILIDADE

Sendo a confiabilidade a probabilidade de um item atender sua função de forma adequada, durante um dado intervalo de tempo, sob condições especificadas (BILLINTON; ALLAN, 1983). A medida deste atributo representa a probabilidade do sistema não falhar durante um tempo t .

Este conceito pode ser expresso por uma função densidade de probabilidade de falha $f(t)$ e/ou por uma função de distribuição acumulada ou **função acumulada de probabilidade de falha** $F(t)$ (BILLINTON E ALLAN; 1983).

A **função acumulada de probabilidade de falha** $F(t)$, ou simplesmente **probabilidade de falha**, é uma medida de probabilidade de falha definida em um período, cuja representação pode ser em medida de tempo, ciclos, distância etc. No entanto, geralmente se deseja avaliar a probabilidade de sobrevivência do sistema durante um determinado período. Sendo assim, a medida de interesse é o complemento da probabilidade de falha do siste-

ma, ou seja, o complemento da função acumulada de probabilidade de falha, chamada de **função confiabilidade do sistema** (ou **confiabilidade**) que pode ser expressa por:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (4.1)$$

A derivada da função acumulada de probabilidade de falha $F(t)$ gera a **função densidade de probabilidade de falha** $f(t)$, onde:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (4.2)$$

Estas relações também são comumente expressas na forma integral, a Equação (4.3) representa a **função probabilidade de falha** e a Equação (4.4) a **função confiabilidade**:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (4.3)$$

e

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt \quad (4.4)$$

Considerando que a área da função de densidade deve ser igual à unidade, então a equação de confiabilidade pode ser reescrita, conforme Equação (4.5):

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (4.5)$$

No entanto, a taxa de falha (λ) que representa a relação entre o número de falhas ocorridas em um item num determinado período de tempo, pode ser identificado na prática. Então pode-se estabelecer uma relação entre ela e a função densidade de probabilidade de falha. Desta forma, pode-se encontrar a **taxa de falha do sistema** dividindo a função densidade de probabilidade de falha pela área desta função para um tempo maior que o tempo de interesse:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{\int_t^{\infty} f(t) dt} \quad (4.6)$$

e substituindo-se a Equação (4.5), obtém-se:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (4.7)$$

e da Equação (4.2), tem-se:

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} \quad (4.8)$$

Integrando-se ambos os lados da Equação (4.8) obtêm-se da Equação (4.9):

$$\int_t^{R(t)} \frac{1}{R(t)} dR(t) = \int_0^t -\lambda(t) dt \quad (4.9)$$

de onde obtêm-se a Equação (4.10) chamada de equação geral da confiabilidade.:

$$R(t) = \exp \left[-\int_0^t \lambda(t) dt \right] \quad (4.10)$$

Considerando-se a taxa de falha constante tem-se a Equação (4.11):

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (4.11)$$

A variação da taxa de falha durante o ciclo de vida depende das características do item que está sendo analisado. Billinton e Allan (1983) apresentam a curva de taxa de falha conhecida também como “curva da banheira”. Embora esta seja uma curva teórica, serve muito bem para análise dos sistemas reais, caracterizando as falhas segundo três períodos característicos: 1) falhas de juventude, 2) falhas de vida útil e 3) falhas de descarte. O primeiro período é caracterizado pelas falhas de juventude, que são aquelas originadas no projeto do produto, processo de fabricação, embalagem ou montagem. Dependem do controle de qualidade no processo de manufatura. No segundo período, falhas de vida útil, tem-se as falhas aleatórias que requerem ações de predição, dado que suas ocorrências, em função da imprevisibilidade, não podem ser caracterizadas no tempo. No terceiro período, falhas de descarte, as falhas são caracterizadas pelo desgaste, e nestas é possível definir ações baseadas no tempo e também na condição dos componentes do sistema.

Sendo assim, uma gestão adequada dos atributos de confiabilidade e manutenibilidade na fase de projeto poderá diminuir o período e a variação da taxa de falha de juventude, assim como uma gestão adequada da manutenção, pelo uso de monitoramento das condições operacionais, pode prolongar o período de utilidade, aumentando a vida útil do sistema.

Instituições de pesquisa como o Centro de Análise das informações de Confiabilidade (RIAC – Reliability Information Analysis Center) desenvolvem bancos de dados de valores de taxas de falha (λ) de componentes (RAC, 1999). Os valores apresentados nesses bancos referem-se à taxa constante, ou seja, considerados no período de falhas de vida útil do

componente. Na área da eletrônica, esses bancos de dados já estão bem específicos, no entanto, em outras áreas, como de componentes hidráulicos, tais bancos ainda são muito generalizados ou não consideram grande parte dos contextos de aplicação destes componentes (O'CONNOR, 1985).

4.2 MODELAGEM E ANÁLISE DA CONFIABILIDADE EM SISTEMAS

Geralmente a análise da confiabilidade em sistemas se dá por meio da decomposição de sistemas complexos em menos complexos, onde a granulometria depende da profundidade da análise e também da disponibilidade de dados dos componentes do sistema. Uma vez que os dados de falha e de operação de um componente ou de um conjunto deles sejam conhecidos, é possível calcular a confiabilidade do sistema.

A análise de confiabilidade em sistemas complexos pode ser realizada a partir de módulos, o que facilita a identificação dos componentes e suas relações no sistema. Segundo Blischke e Murthy (2000), esta modularização pode estar estruturada em níveis, sendo que cada nível pode apresentar vários módulos.

No caso dos sistemas hidráulicos é possível observar essa estrutura já na modelagem como um sistema automático, como apresentado na Figura 2.4, onde se tem os módulos: Sistema de Energia/Matéria (unidade hidráulica) e Sistema de Informação (sistema de controle). Segundo Blanchard et al (1995), o modelo de confiabilidade é uma extensão da representação funcional do sistema. Para tanto, recomenda-se estabelecer a estrutura funcional do sistema antes de definir o modelo de confiabilidade.

4.2.1 Modelos de confiabilidade

Conforme Billinton e Allan (1983), na prática um sistema é frequentemente representado como uma rede composta por componentes conectados em série, paralelo, compondo malhas ou uma combinação dessas interligações. No entanto, é importante salientar que o modelo de confiabilidade pode não seguir necessariamente a mesma estrutura física do sistema.

Os componentes, em um grupo, são ditos em série do ponto de vista da confiabilidade, se todos os componentes devem funcionar para o sucesso do sistema, ou seja, basta apenas um componente falhar para todo sistema falhar (Figura 4.1).



Figura 4.1 - Modelo de confiabilidade para componentes arranjados em série

Considerando-se um sistema composto de dois componentes, cada um apresentando uma taxa de falha constante, se λ_1 e λ_2 são taxas de falha dos componentes, a taxa da falha do sistema será $\lambda_1 + \lambda_2$. A confiabilidade dos componentes R_1 e R_2 , sobre um tempo de operação t , será $\exp[-\lambda_1 t]$ e $\exp[-\lambda_2 t]$, respectivamente. A confiabilidade do sistema é a combinação probabilística dos componentes, isto é, $R_1 \cdot R_2 = \exp[-(\lambda_1 + \lambda_2)t]$. Em geral, para sistemas em série, onde os n componentes são independentes, pode-se definir a confiabilidade conforme a Equação (4.12).

$$R = \prod_{i=1}^n R_i \tag{4.12}$$

Os componentes, em um grupo, são ditos em paralelo, se necessitar de apenas um componente funcionando para o sucesso do sistema, isto é, todos devem falhar para o sistema falhar (Figura 4.2).

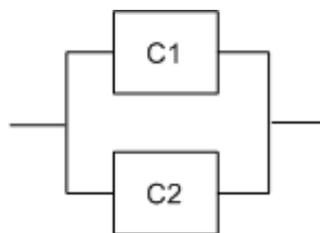


Figura 4.2 - Modelo de confiabilidade para componentes arranjados em paralelo

No caso de sistemas compostos por dois componentes em paralelo, e que apresentem as confiabilidades R_1 e R_2 , a operação do sistema ocorrerá satisfatoriamente se pelo menos um deles estiver funcionando. Portanto, a confiabilidade do sistema R é igual à probabilidade de sucesso do componente 1 ou 2, isto é, $(R_1 + R_2) = R_1 + R_2 - R_1 \cdot R_2$, e em função da taxa de falha tem-se que, $R = \exp[-\lambda_1 t] + \exp[-\lambda_2 t] - \exp[-(\lambda_1 + \lambda_2)t]$. A expressão geral para a confiabilidade de n componentes independentes para este caso é definida como a Equação (4.13).

$$R = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \tag{4.13}$$

Além dos modelos de confiabilidade em série e em paralelo, também existem os chamados modelos complexos. Esses modelos podem ser reduzidos em várias combinações de submodelos em série e em paralelo, ou aproximações usando-se análises especiais. Para facilitar a análise de sistemas complexos, com o propósito de identificar falhas potenciais, pode-se utilizar os métodos do grupo mínimo de corte (BILLINTON E ALLAN; 1983).

4.2.2 Análise de árvore de falha (FTA)

O método de análise da árvore de falha (FTA - Fault Tree Analysis) é um método que tem por referência um diagrama lógico, usado para demonstrar as relações entre um potencial evento ou falha indesejável (evento de topo), que afetará o desempenho do sistema, e as razões ou as causas subjacentes deste evento. Neste caso, o evento de topo ou falha indesejada deve ser especificado adequadamente, pois pode ser criada uma árvore de falha com várias causas e sem foco (BLANCHARD et al., 1995). A análise de árvore de falha envolve os seguintes passos:

- ⇒ Definição do evento de topo;
- ⇒ Construção da árvore de falha;
- ⇒ Análise qualitativa e quantitativa.

Vale ressaltar que, para se chegar à estrutura da árvore de falha, na qual todos os eventos de falha são combinados a partir de relações lógicas, é necessário um entendimento do funcionamento do sistema, assim como conhecer as causas e falhas que afetam o sistema e como estas se relacionam na estrutura do mesmo. Depois de definida a estrutura da árvore de falha é necessário avaliar a probabilidade de ocorrência do evento de topo no sistema.

O cálculo da probabilidade de ocorrência do evento de topo em uma árvore de falha é feito a partir da combinação dos componentes. Isto pode ser feito por meio de relações lógicas definidas na estrutura da árvore de falha, juntamente com as regras básicas de probabilidade para sistemas em série e em paralelo. A ocorrência do evento de topo, ou seja, uma falha do sistema é devido a diferentes combinações dos eventos básicos. Para definir, na árvore, essas possibilidades de combinações dos eventos, são utilizados os conceitos de grupo de corte para árvore de falha.

O grupo de corte para uma árvore de falha é um conjunto de elementos básicos no qual a ocorrência simultânea dos mesmos resulta na ocorrência do evento de topo. Um grupo de corte é definido como mínimo se o mesmo não pode ser reduzido sem perder sua ca-

racterística como um grupo de corte. Para o exemplo apresentado por Liu e Chiou (1997), conforme a árvore de falha da Figura 4.3, os grupos de corte desta são: {1}, {2}, {3}, {5, 6}, {4, (6,7)}, {5, (6,7)} e os grupos mínimos de corte são: {1}, {2}, {3}, {5, 6}, {4, (6,7)}. Desta forma, se ocorrer qualquer um dos eventos 1, 2 ou 3 ou ainda, se ocorrerem os eventos combinados 5 e 6 ou 4, 6 e 7, o evento de topo ocorrerá.

Billinton e Allan (1983) definem grupo mínimo de corte como um grupo de componentes de um sistema que quando falha, resulta em falha no sistema. Porém, se qualquer um dos componentes estiver funcionando, este conjunto de componentes não levará o sistema à falha. Conforme a definição, todos os componentes do grupo mínimo devem falhar para causar falha no sistema. O método de grupo de corte tem como vantagem a facilidade de aplicação computacional para sistemas com estrutura de redes variadas e, além de relatar diretamente os modos em que o sistema pode falhar, ele identifica os diferentes caminhos nos quais o sistema pode falhar.

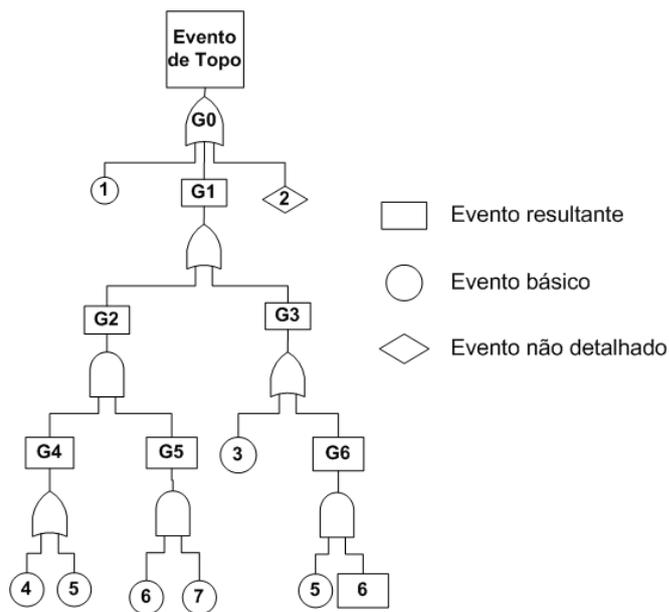


Figura 4.3 - Árvore de falha, (LIU; CHIOU, 1997)

4.2.2.1 FTA representada por uma estrutura de Rede de Petri

Trabalhos utilizando a modelagem em Rede de Petri foram desenvolvidos para a área de análise de projeto de sistemas, sendo que parte deles focaram a análise e a avaliação da confiabilidade de sistemas. Uma das análises que tem sido representada pelas estruturas de Rede de Petri é a análise de árvore de falha. Liu e Chiou (1997) apresentam modelos gráfi-

cos em Rede de Petri que representam as relações de causa e efeito entre os eventos, similarmente à árvore de falha,

A Figura 4.4 apresenta portas lógicas *E* e *OU* de árvore de falha e de Rede de Petri, onde *A* e *B* são eventos independentes que se relacionam por meio das portas e provocam um evento *S*. Na terceira coluna é apresentado o cálculo da probabilidade de falha do evento *S*, de acordo com as relações dos eventos *A* e *B* definidas pelas portas lógicas *E* e *OU*.

		Árvore de falha	Rede de Petri	Probabilidade de falha
Relações lógicas	OU			$F_S = F_A + F_B - F_A \cdot F_B$
	E			$F_S = F_A \cdot F_B$

Figura 4.4 – Relações lógicas e cálculo da probabilidade de falha

Rochdi et al. (1999) também propôs a modelagem de árvore de falha por meio da estrutura de Rede de Petri, as quais foram utilizadas para determinar os grupos mínimos de corte do sistema. Neste artigo, o autor denomina como árvore de falha coerente as árvores de falha que contém apenas portas lógicas *E* e *OU*.

Ambos trabalhos, tanto o de Liu e Chiou (1997) quanto o de Rochdi et al. (1999), apresentaram algoritmos para determinar os grupos mínimos de corte, os quais são baseados nos mesmos métodos utilizados na FTA clássica. No entanto, Liu e Chiou (1997) demonstram que técnicas de redução utilizadas na análise de Rede de Petri se mostraram mais eficientes para determinar os grupos mínimos de corte.

A Figura 4.5 apresenta um exemplo de redução de uma árvore de falha modelada em Rede de Petri e os desdobramentos em grupos mínimos de corte utilizando técnicas de redução.

Para reduzir a árvore de falha da Figura 4.5 (a) para a Figura 4.5 (b), foram feitas duas fusões de transições, de *t6* com *t12* e de *t78* com *t34*. E na redução da árvore de falha da Figura 4.5 (b) para a Figura 4.5 (c), foi feita uma fusão de lugares de *p9* com *p11* e uma fusão de transição de *t10* com *t734*.

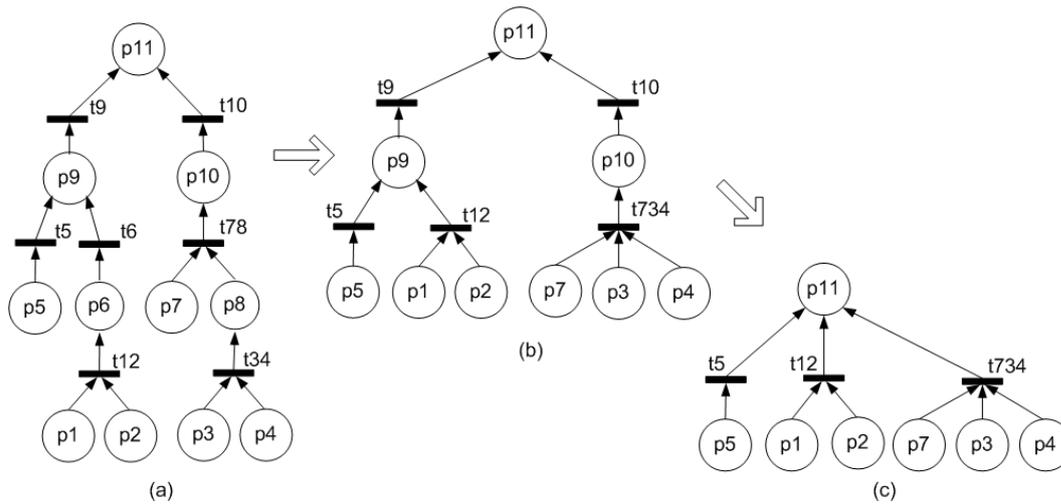


Figura 4.5 – Redução de árvore de falha modelada em Rede de Petri (LIU; CHIOU, 1997)

Pode-se observar que cada grupo de corte é caracterizado por uma transição da Rede rede de Petri, representada na Figura 4.5. Desta forma, tem-se os seguintes grupos mínimos de corte $\{(p5)(p1, p2)(p7, p3, p4)\}$. Este método, baseado nas técnicas de redução, pode ser útil para se determinar os modelos de confiabilidade do sistema. A Figura 4.6 apresenta o diagrama de blocos do exemplo apresentado na Figura 4.5 (c).

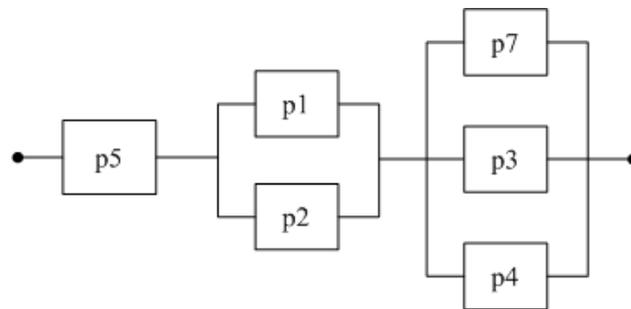


Figura 4.6 – Modelo de confiabilidade gerado a partir da Figura 4.5 (c)

4.2.3 Análise da Árvore de Sucesso (STA)

O método de Análise da Árvore de Sucesso (STA - Success Tree Analysis) é um complemento da Análise da Árvore de Falha. Vesely (2002) discute a utilização de árvore de sucesso e árvore de falha e mostra que a operação de um sistema pode ser considerada sob dois pontos de vista: 1) as diferentes possibilidades de sucesso e 2) as diferentes possibilidades de falha do sistema, no espaço de sucesso e espaço de falha, respectivamente, como mostrado na Figura 4.7.

O sistema pode assim se encontrar em sucesso total, onde foi atendida a função por completo ou em falha total, onde a função não pode ser atendida por completo. Além disso,

pontos intermediários coincidentes entre os dois espaços podem ser identificados como, por exemplo, Mínimo sucesso aceitável e Máxima falha tolerável.

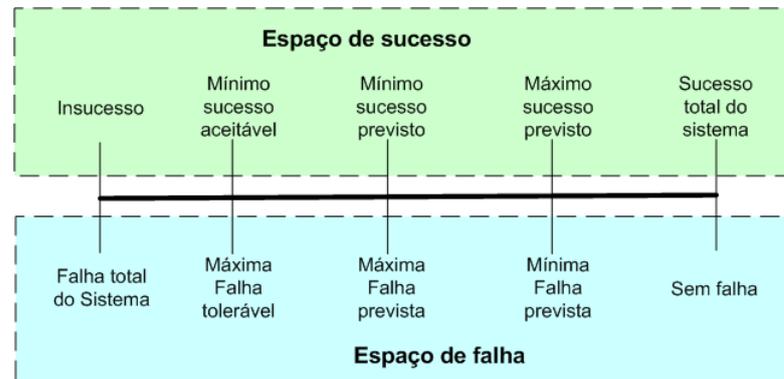


Figura 4.7 – Representação do conceito espaço de sucesso – espaço de falha (Adaptado de VESELEY, 2002)

Em Veseley (2002) são apresentadas algumas das principais vantagens de se avaliar a confiabilidade de sistemas por meio do espaço de falha. Entre essas vantagens o autor aponta que o número de modos de falha é menor que o número de modos de sucesso do sistema.

Neste trabalho optou-se pelas árvores de sucesso pois o sucesso do sistema está focado em atender o evento de topo, ou seja, atender uma das VFG do sistema. As principais razões de se utilizar as árvores de sucesso neste trabalho são:

- A análise da confiabilidade do sistema deverá ser desenvolvida na fase conceitual do processo de projeto, quando o agente de projeto está interessado em encontrar soluções.
- A estrutura proposta para gerar as árvores de sucesso segue a mesma lógica de busca de soluções do problema.
- As árvores de sucesso poderão absorver de forma direta as informações geradas nos modelo funcional, estrutural e comportamental que são utilizados na fase do processo de projeto.
- Organizar, armazenar e disponibilizar de forma adequada informações geradas na fase inicial do processo de projeto.
- Possibilidade de estimar a confiabilidade a partir da concepção do sistema.

A estrutura das árvores de sucesso será representada por uma estrutura de Rede de Petri, como apresentado no capítulo anterior, pois, vários trabalhos têm sido desenvolvidos

utilizando a modelagem em Rede de Petri para a análise de confiabilidade em sistemas complexos.

A Figura 4.8 apresenta a configuração de uma árvore de sucesso em Rede de Petri, na forma gráfica e matricial.

		Representação gráfica	Representação matricial														
Portas lógicas	OU		<table border="1"> <tr> <td></td> <td>ta</td> <td>tb</td> </tr> <tr> <td>CRab</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Ca</td> <td>-1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Cb</td> <td>0</td> <td>-1</td> </tr> </table>		ta	tb	CRab	1	1	Ca	-1	0	Cb	0	-1		
		ta	tb														
CRab	1	1															
Ca	-1	0															
Cb	0	-1															
E		<table border="1"> <tr> <td></td> <td>tab</td> </tr> <tr> <td>CRab</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Ca</td> <td>-1</td> </tr> <tr> <td>Cb</td> <td>-1</td> </tr> </table>		tab	CRab	1	Ca	-1	Cb	-1							
	tab																
CRab	1																
Ca	-1																
Cb	-1																

Figura 4.8 – Representação das relações lógicas das árvores de sucesso em Redes de Petri

Nesta representação estão definidas duas relações lógicas entre os ramos das Árvores de Sucesso. Para a relação lógica *OU* o sistema *Sab* depende do sucesso dos componentes *Ca* ou *Cb*, ou seja, o sucesso de apenas um dos componentes é suficiente para atender a função do sistema com sucesso. E para a relação lógica *E* o sistema *Sab* depende do sucesso dos componentes *Ca* e *Cb* simultaneamente, ou seja, os dois componentes devem atender com sucesso suas funções para que o sistema atenda sua função com sucesso.

CAPÍTULO 5 - SISTEMATIZAÇÃO DA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS

De acordo com as definições apresentadas nos capítulos anteriores, os sistemas automáticos são sistemas com certo grau de autonomia e flexibilidade na execução de suas funções no sentido de que apresentam diferentes formas de atender a sua função global. Assim sendo, a função do sistema é composta por um conjunto de VFGs, que se alternam de acordo com o estado operacional do sistema.

Nos sistemas automáticos, o *software* de controle define quais VFGs devem ser atendidas, determinando a configuração dos diferentes arranjos funcionais e estruturais do sistema que estará operando durante um intervalo de tempo. Cada arranjo configurado engloba determinados componentes do sistema, sendo que alguns componentes ficam desativados e outros são compartilhados por diferentes configurações.

Exemplos típicos desses sistemas são os atuais equipamentos hidráulicos, nos quais um circuito hidráulico é compartilhado para atender diferentes funções. Por exemplo, pode-se considerar que uma unidade de potência tem como função fornecer energia hidráulica com certa vazão qualificada pela necessidade do usuário, ou seja, a unidade pode fornecer energia hidráulica com vazão variável, vazão constante ou com máxima vazão. Neste caso, o qualificador da função especifica o tipo da vazão que será fornecida pelo sistema.

A Figura 5.1 apresenta o desdobramento da função (KAUFMAN; WOODHEAD, 2006) para o sistema hidráulico citado acima. Neste diagrama a FG do sistema envolve três variantes: VFG1, VFG2, VFG3.

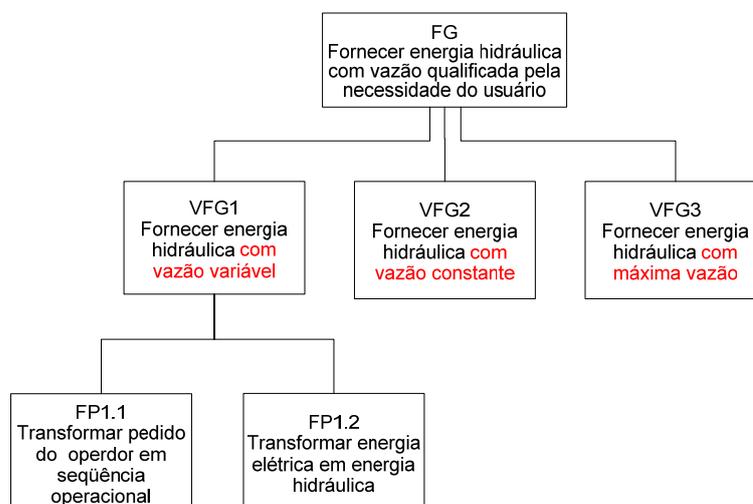


Figura 5.1 – Desdobramento da função de um sistema hidráulico

Neste caso, as três variantes da função global possuem uma relação *OU* significando que o atendimento de uma dessas leva ao atendimento da FG para um determinado estado operacional do sistema.

Cada uma dessas VFGs pode ser detalhada em funções parciais. A Figura 5.1, mostra a VFG1 detalhada em duas funções parciais, FP1.1 e FP1.2. Estas funções possuem uma relação *E*, significando que o atendimento da VFG1 depende de FP1.1 e FP1.2. O mesmo deve ser considerado para VFG2 e VFG3.

A decisão sobre qual das variantes da função global (VFG1, VFG2 ou VFG3) deve ser atendida dependerá da solicitação do operador do sistema. No entanto, a definição da estrutura funcional para atender uma das VFGs será uma determinação do sistema de controle que é responsável pela execução das sequências operacionais definidas pelo modelo comportamental.

A Figura 5.2 apresenta um cenário, onde o modelo comportamental do sistema, implementado no *software* de controle, atua sobre o modelo estrutural/funcional de um circuito hidráulico. Nesta representação ilustra-se que as configurações do modelo estrutural/funcional são alteradas de acordo com os estados definidos no modelo comportamental.

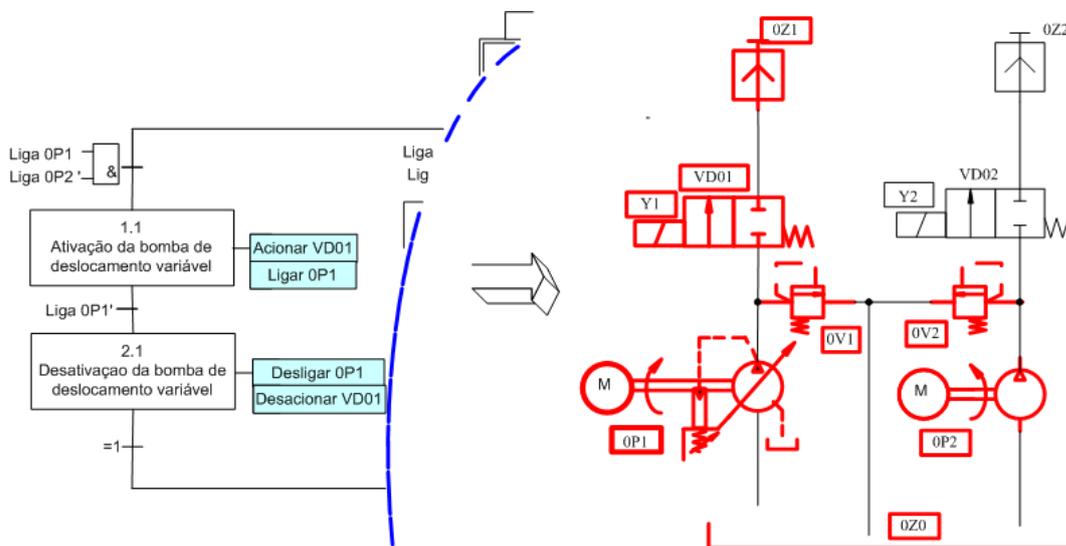


Figura 5.2 - Cenário de atuação do modelo comportamental sobre modelo estrutural/funcional

Neste caso, apresentado na Figura 5.2, o estado definido no modelo comportamental ativa os componentes representados em vermelho no modelo estrutural/funcional. Os outros componentes (VD02 e 0Z2) ficam desativados, ou seja, eles não participam do atendimento da função para este estado operacional do sistema. Observa-se também que a bomba hidráulica (OP2) também é ativada, este componente não participa no atendimento desta

função específica, porém ele é um elemento limite, pois poderá haver fluxo de recurso pelo componente, neste caso fluido hidráulico, o que torna necessária a presença do componente, caso contrário poderia haver desvio de recurso do sistema, neste caso vazamento do fluido hidráulico. Desta forma, uma possível falha deste componente poderia comprometer o atendimento da função.

Neste cenário foi representado apenas o sistema hidráulico, mas esta interação acontece de forma similar com os sistemas elétrico e eletrônico.

Dentro deste contexto, a avaliação da confiabilidade para sistemas automáticos pode se tornar uma tarefa complexa, uma vez que o compartilhamento de componentes para atender diferentes funções pode mascarar o verdadeiro tempo de uso (número de ciclos) de cada componente durante a vida útil do sistema.

Nos próximos tópicos são apresentadas a proposição para solução do problema e a Metodologia para Análise de Confiabilidade de Sistemas Automáticos (MACSA).

5.1 PROPOSIÇÃO PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA

Como relatado durante os capítulos anteriores, a hipótese assumida nesta tese é que a análise da confiabilidade considere os diferentes estados operacionais e tecnologias envolvidas nos sistemas automáticos. Além disso, que esta análise pode ocorrer nas fases iniciais do processo de projeto, onde o projetista trabalha com as concepções de projeto.

Em sistemas hidráulicos e pneumáticos, os princípios de solução utilizados para desenvolver as concepções de projeto, na grande maioria das vezes, baseiam-se nos componentes já disponíveis no mercado. A principal função do agente de projeto é escolher e adequar o arranjo desses componentes para que os mesmos atendam as diferentes funções do sistema.

Na fase de projeto conceitual as informações estão representadas principalmente por modelos gráficos e a proposta é desenvolver um método que consiga capturar informações dos modelos estrutural/funcional e comportamental do sistema e definir os modelos de confiabilidade de acordo com diferentes estados operacionais do sistema.

Esta problemática foi relatada no Capítulo 1, conforme Figura 1.1, e a solução apresentada é a Metodologia para Análise de Confiabilidade de Sistemas Automáticos (MACSA). Esta metodologia tem o intuito de resolver não só a região nebulosa representada na Figura 1.1, assim como fazer uma análise sobre a confiabilidade do sistema automático conforme a Figura 5.3.

A Figura 5.3 representa a interface entre os modelos representativos do sistema automático e a MACSA. A figura também apresenta os resultados esperados da análise do sis-

tema a partir da aplicação da MACSA. O tópico seguinte apresenta a estrutura da metodologia proposta, suas atividades, etapas e tarefas.

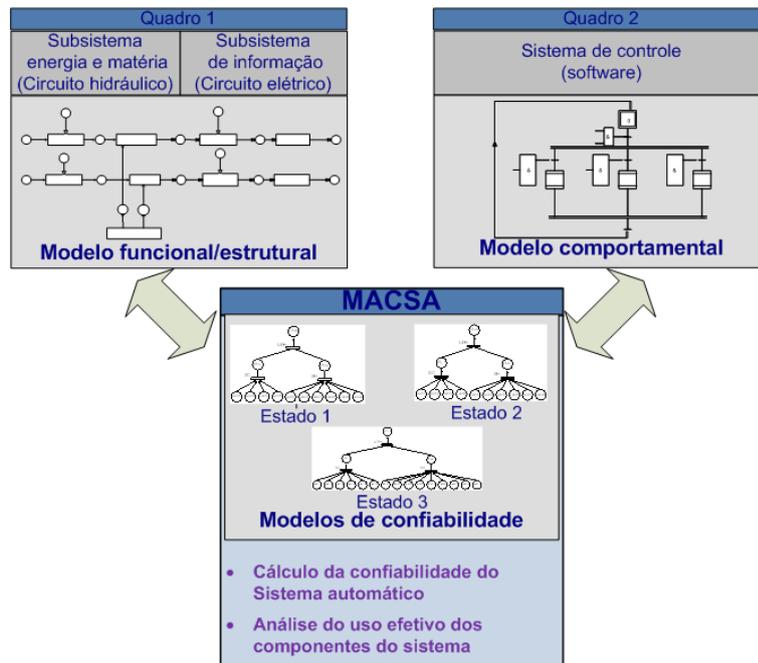


Figura 5.3 - Estrutura de interface entre os modelos do sistema e a MACSA

5.2 METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS (MACSA)

Este tópico apresenta a Metodologia para Análise de Confiabilidade de Sistemas Automáticos (MACSA). A MACSA tem o intuito de sistematizar a análise de confiabilidade de sistemas automáticos e está inserida na fase conceitual da metodologia PRODIP, conforme indicado na Figura 5.4. Nesta figura, mostra-se que a MACSA auxilia o projetista na tomada de decisão, baseada na análise do atributo confiabilidade, durante a atividade de avaliação da concepção do sistema. Sendo assim, a análise será baseada nas informações contidas nos modelos funcional, estrutural e comportamental do sistema, desenvolvidos na fase conceitual do processo de projeto.

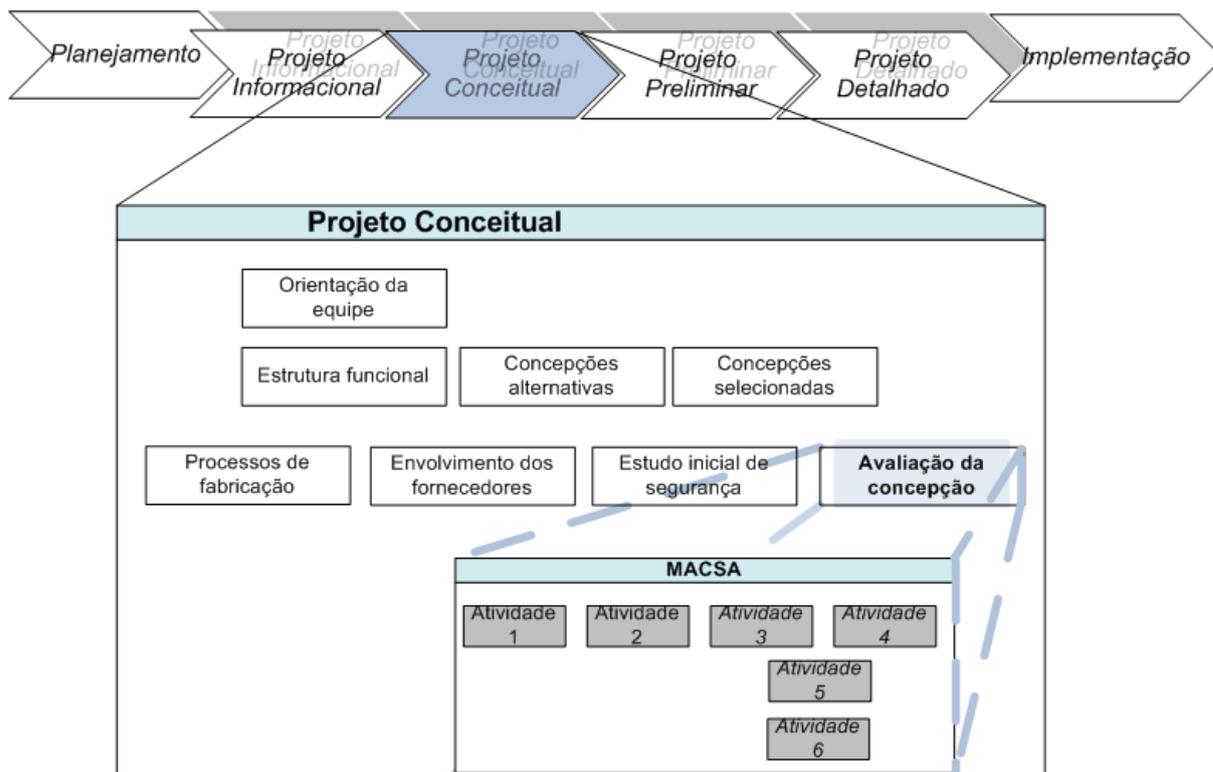


Figura 5.4 - A MACSA inserida no processo de projeto de produto

A MACSA envolve seis atividades e tem como saída a aprovação da concepção para o atributo confiabilidade, conforme a Figura 5.5. As seis atividades da metodologia são caracterizadas abaixo:

A primeira atividade da metodologia é caracterizar o sistema com base na modelagem funcional, estrutural e comportamental, onde se define os canais fornecedores e consumidores e identificam-se os canais sem recursos⁹ para todos os estados do sistema.

A atividade posterior é identificar as diferentes configurações operacionais, ou seja, identificar as configurações estruturais/funcionais do sistema necessárias para atender as VFGs que podem ser solicitadas pelo usuário.

Nessas duas primeiras atividades o sistema é tratado de forma modular, sendo cada subsistema analisado separadamente. O uso da Rede C/A na modelagem de sistemas facilita a modularização de sistemas automáticos, os quais geralmente são definidos a partir de dois subsistemas principais, o Sistema de Energia/Matéria e o Sistema de Informação. Dependendo da complexidade do sistema em estudo, a quantidade de subsistemas pode ser deta-

⁹ Canais não providos de recurso, ou seja, para um determinado estado do sistema esse canal não fornece e nem consome recurso de nenhuma agência do sistema.

lhada até que se possa ter uma identificação mais adequada dos componentes, do relacionamento destes no fluxo operacional do sistema e dos seus dados de confiabilidade.

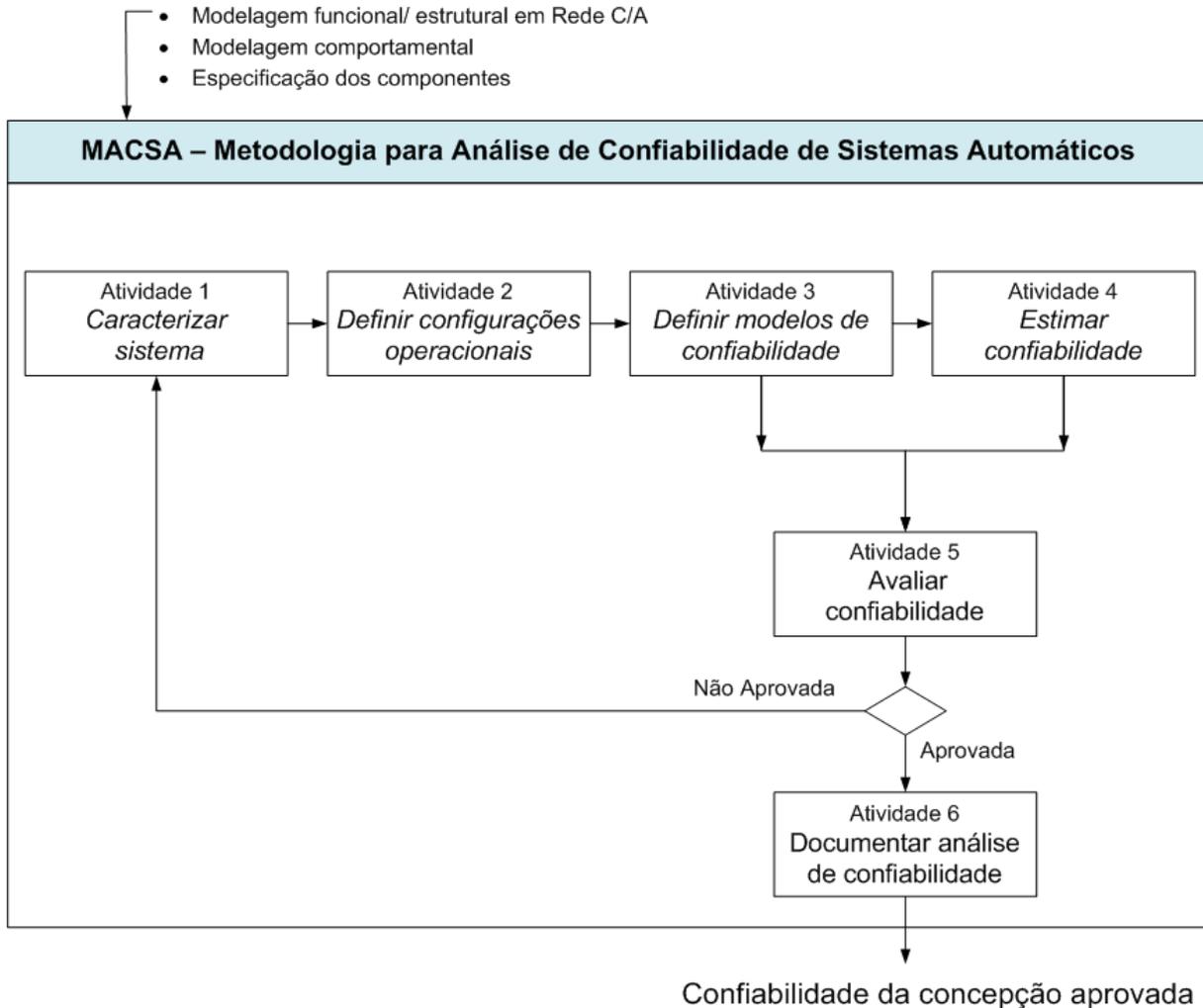


Figura 5.5 – Representação das atividades da MACSA

Para desenvolver estas atividades na MACSA é necessário que o agente de projeto relacione as informações do projeto sob dois aspectos:

1. Informações sobre a visão funcional/estrutural do sistema, que é possível definir a partir da modelagem do sistema em Rede C/A.
2. Informações sobre a visão comportamental do sistema, que identifique os possíveis estados que o sistema pode se encontrar durante sua operação. Estes estados devem estar relacionados com as VFGs.

Uma vez definida as diferentes configurações operacionais do sistema, os modelos de confiabilidade são definidos para as mesmas (Atividade 3), com o intuito de analisar a confiabilidade do sistema. Com os modelos de confiabilidade definidos é possível fazer uma

estimativa da confiabilidade (Atividade 4) baseada nas diferentes configurações do sistema e no tempo de acionamento dos componentes do sistema.

Na atividade 5 os resultados da análise são avaliados baseados nos requisitos e restrições do projeto do sistema e a partir dessa avaliação define-se a aprovação ou não do atributo confiabilidade do sistema. Caso este atributo não seja aprovado a concepção deve ser alterada e retornar para atividade 1 da MACSA, caso contrário a análise deve ser documentada na atividade 6. Finalmente, com o atributo confiabilidade aprovado, a concepção segue para as atividades finais da fase de projeto conceitual definidas no PRODIP.

A seguir são apresentadas as atividades da MACSA, onde são definidas suas etapas e tarefas. Durante essa apresentação, em algumas dessas etapas e tarefas das atividades, o leitor será direcionado para seções do Capítulo 6, onde se apresenta a aplicação da MACSA para o estudo de caso de um sistema hidráulico.

5.2.1 Atividade 1 - Caracterizar sistema

Esta atividade tem como objetivo capturar dos modelos estrutural/funcional e comportamental as informações essenciais para se definir as diferentes configurações operacionais do sistema. Para isso utiliza-se como estratégia de análise a manipulação do modelo funcional/estrutural em Rede C/A a partir de técnicas de análise estrutural propostas por Belan (2007) juntamente com informações obtidas no modelo comportamental.

A **Atividade 1 - Caracterizar sistema** é detalhada em quatro etapas, as quais são detalhadas por tarefas. Como dito anteriormente, a saída desta atividade são os *canais fornecedores de recursos* (C_f), os *canais consumidores de recursos* (C_c) e os conjuntos de *canais sem recursos* C_{srEj} . A Figura 5.6 apresenta a estrutura desta atividade.

A seguir descreve-se cada etapa da atividade 1

Etapa 1. Identificar os canais fornecedores e consumidores;

Nessa etapa determinam-se quais são os canais limites da Rede C/A (BELAN, 2007) ou, em outras palavras, quais são os elementos que fornecem (entrada) e consomem (saída) os recursos que fluem pelo sistema. Esta etapa tem como entrada o modelo funcional/estrutural do sistema e como resultado os canais fornecedores e consumidores de recursos. Conforme Figura 5.6 a etapa 1 é detalhada em quatro tarefas, citadas a seguir:

Tarefa 1. Identificar as matrizes K_{pre} e K_{post} do sistema.

Nesta tarefa identificam-se as matrizes K_{pre} e K_{post} a partir do modelo funcional/estrutural do sistema.

Tarefa 2. Calcular os vetores VCK_{pre} , VCK_{post} , VLK_{pre} e VLK_{post} .

Os vetores VCK_{pre} e VCK_{post} são vetores colunas das matrizes K_{pre} e K_{post} , respectivamente, assim como os vetores VLK_{pre} e VLK_{post} são vetores linhas das respectivas matrizes, os cálculos destes vetores estão representados na seção 6.2.1.

Tarefa 3. Calcular os vetores resultantes VC_{Res} e VL_{Res} .

Os vetores VC_{Res} e VL_{Res} são resultantes dos vetores colunas VCK_{pre} e VCK_{post} e dos vetores linhas VLK_{pre} e VLK_{post} , os cálculos destes vetores estão representados na seção 6.2.1.

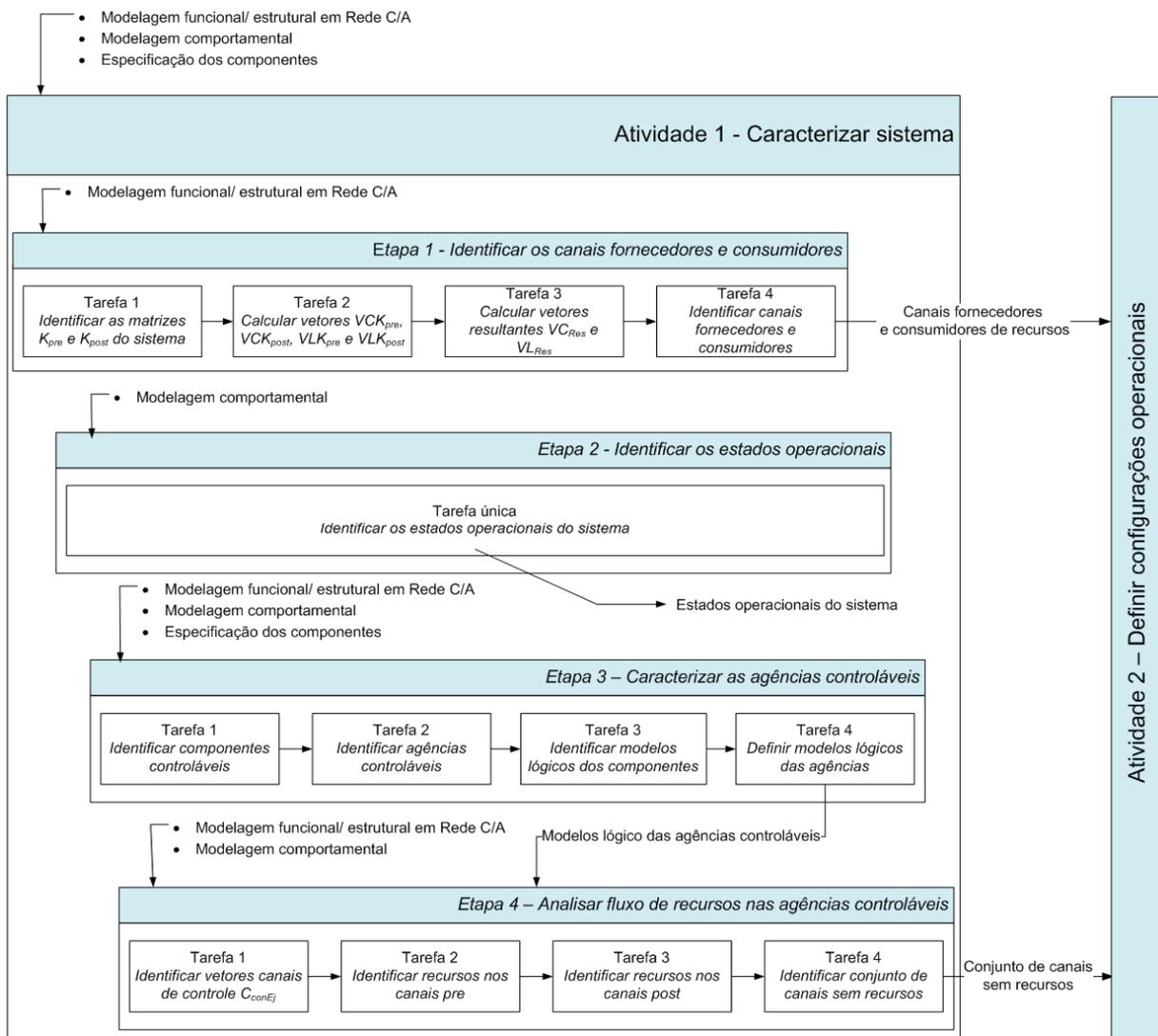


Figura 5.6 – Estrutura da Atividade 1 - Caracterizar sistema

Tarefa 4. Identificar canais fornecedores e consumidores

Nesta tarefa identificam-se os canais fornecedores e consumidores de recursos do sistema a partir da análise dos vetores $VC_{Re,s}$ e $VL_{Re,s}$ e define-se um conjunto de C_f e outro de C_c , os quais são direcionados para a **Atividade 2 – Definir configurações operacionais**.

A análise dos vetores $VC_{Re,s}$ e $VL_{Re,s}$ está apresentada na seção 6.2.1 .

Etapa 2. Identificar os estados operacionais;

Nesta etapa são reunidas informações relativas a cada estado operacional do sistema, as quais estão representadas no modelo comportamental. Entre essas informações estão: 1) código do estado, 2) nome do estado, 3) função relacionada ao estado e a 4) probabilidade de utilização do estado. Esta última informação é decorrente da expectativa do projetista ou do futuro usuário do equipamento quanto à intensidade de utilização do mesmo nos diferentes estados.

Esta etapa tem como entrada o modelo comportamental e como resultado uma tabela com os estados operacionais do sistema, a mesma é direcionada para a **Atividade 4 – Estimar confiabilidade**. Conforme a Figura 5.6 a etapa 2 é representada por uma única tarefa que corresponde aos procedimentos já descritos acima.

Na seção 6.2.1 apresenta-se um exemplo desta tabela para o estudo de caso.

Etapa 3. Caracterizar as agências controláveis¹⁰;

Nesta etapa tem-se o objetivo de definir os modelos lógicos das agências controláveis. Este modelo define a relação entre os recursos que saem e entram na agência, para isso é analisada a estrutura funcional do componente de cada agência. Esta etapa tem como entrada o modelo funcional/estrutural, o modelo comportamental e as especificações dos componentes do sistema e como resultado os modelos lógicos das agências controláveis. Conforme Figura 5.6 a etapa 3 é detalhada em quatro tarefas citadas a seguir:

Tarefa 1. Identificar componentes controláveis

Nesta tarefa verifica-se no modelo comportamental quais são os componentes que são ativados ou desativados nos estados operacionais do sistema.

Tarefa 2. Identificar agências controláveis

Nesta tarefa verifica-se o modelo funcional/estrutural do sistema representado em Rede C/A e identificam-se as agências que representam os componentes controláveis identificados na tarefa anterior.

¹⁰ São elementos do modelo funcional/estrutural, que representam componentes que recebem informações do ambiente externo ou de um sistema de controle e seu estado é alterado com essa informação.

Tarefa 3. Identificar modelos lógicos dos componentes

Esta tarefa tem como objetivo definir os modelos lógicos dos componentes controláveis, esses modelos são definidos a partir dos modelos funcionais de cada componente controlável.

Tarefa 4. Definir modelos lógicos das agências

Por analogia dos modelos lógicos dos componentes, definem-se os modelos lógicos das agências, os quais definem a lógica de fluxo de recurso nas agências controláveis. Definidos os modelos lógicos das agências controláveis, estes são direcionados para Etapa 4.

Na seção 6.2.1 apresenta-se a Tabela 3 que representa o procedimento de caracterização das agências controláveis.

Etapa 4. Analisar o fluxo de recursos nas agências controláveis.

Nesta etapa é analisado o fluxo de recursos nas agências controláveis, para cada estado do sistema. Esta análise é feita por meio da identificação da existência ou não de recurso nos canais posteriores em função da existência ou não de recurso nos canais precedentes das agências controláveis e do modelo lógico da agência. A partir dessa análise são definidos os canais sem recursos do sistema.

Esta etapa tem como entrada o modelo funcional/estrutural, o modelo comportamental e os modelos lógicos das agências controláveis e como resultado os conjuntos de canais sem recursos. Conforme a Figura 5.6, a etapa 4 é detalhada em quatro tarefas citadas a seguir:

Tarefa 1. Identificar os vetores canais de controle

Nesta tarefa são criados vetores dos *canais de controle* (C_{conEi}) das agências controláveis, nesses vetores representa-se a existência ou não de recursos nesses canais, nos diferentes estados do sistema. Os canais de controle são canais precedentes (pre) às agências controláveis, nos quais a existência ou não de recurso caracteriza a agência como ativada ou desativada.

O recurso característico dos canais de controle é a informação (*inf*). Este tipo de recurso geralmente é inserido por uma ação do usuário ou por um sistema lógico ou software de controle. Na seção 6.2.1 apresenta-se a Figura 6.15 (A) que representa os vetores dos C_{conEj} do estudo de caso.

Tarefa 2. Identificar recursos nos canais pre

Nesta tarefa identificam-se os canais precedentes às agências controláveis, assim como, monitora-se para cada estado do sistema a existência de recursos nos canais de contro-

le. Os canais precedentes, que não são canais de controle, são considerados sempre providos de recurso e, desta forma, sempre serão representados por 1 (um).

Tarefa 3. Identificar recursos nos canais post

Nesta tarefa verifica-se a existência de recurso nos canais posteriores às agências controláveis. Para isso, a presença de recurso nos canais posteriores de cada agência é relacionada com a presença de recursos nos canais precedentes das mesmas de acordo com o modelo lógico de cada agência.

Na seção 6.2.1 apresenta-se a Figura 6.15 (B) que representa uma sistematização das duas últimas tarefas apresentadas, neste caso, aplicada no estudo de caso apresentado.

Tarefa 4. Identificar conjuntos de canais sem recursos

Baseada na análise realizada com as tarefas anteriores é possível identificar quais canais ficam desprovidos de recursos para cada estado operacional do sistema. Com isso, para cada estado é definido um conjunto de *canais sem recurso* (C_{srEj}). Estes conjuntos de C_{srEj} são direcionados para a **Atividade 2 – Definir configurações**.

Uma vez identificados os conjuntos de C_f e C_c do sistema e definidos os conjuntos de C_{srEj} , chega-se ao final da **Atividade 1 - caracterizar sistema**.

5.2.2 Atividade 2 – Definir configurações operacionais

Esta atividade tem como objetivo definir as diferentes configurações operacionais por meio da manipulação do modelo funcional/estrutural e de informações que caracterizam os estados operacionais do sistema.

A **Atividade 2 – Definir configurações operacionais** é detalhada em quatro etapas, as quais são detalhadas por tarefas. A saída dessa atividade são os *vetores agências* ($VaxEj$), nos quais estão representadas as agências que restaram na estrutura de um sistema para um determinado estado operacional. A Figura 5.7, apresenta a estrutura desta atividade.

A seguir descreve-se cada etapa da atividade 2.

Etapa 1. Reduzir as matrizes K_{pre} e K_{post} para cada estado;

O objetivo dessa etapa é eliminar da análise da confiabilidade os canais e as agências que não participam do atendimento da função de determinado estado operacional do sistema. Para essa redução utilizam-se os conjuntos de C_{srEj} , definido na **Atividade 1 - caracterizar sistema**. Para isso os canais pertencentes ao conjunto de C_{srEj} são eliminados das matrizes

K_{pre} e K_{post} , assim como são eliminadas as colunas zeradas simultaneamente nas matrizes K_{pre} e K_{post} .

Esta etapa tem como entrada o modelo funcional/estrutural e os conjuntos de C_{srEj} e como resultado as matrizes reduzidas ($K_{preREDj}$) e ($K_{postREDj}$), as quais são direcionadas para a etapa 2. Conforme a Figura 5.7 a etapa 1 é representada por uma única tarefa que corresponde aos procedimentos já descritos acima.

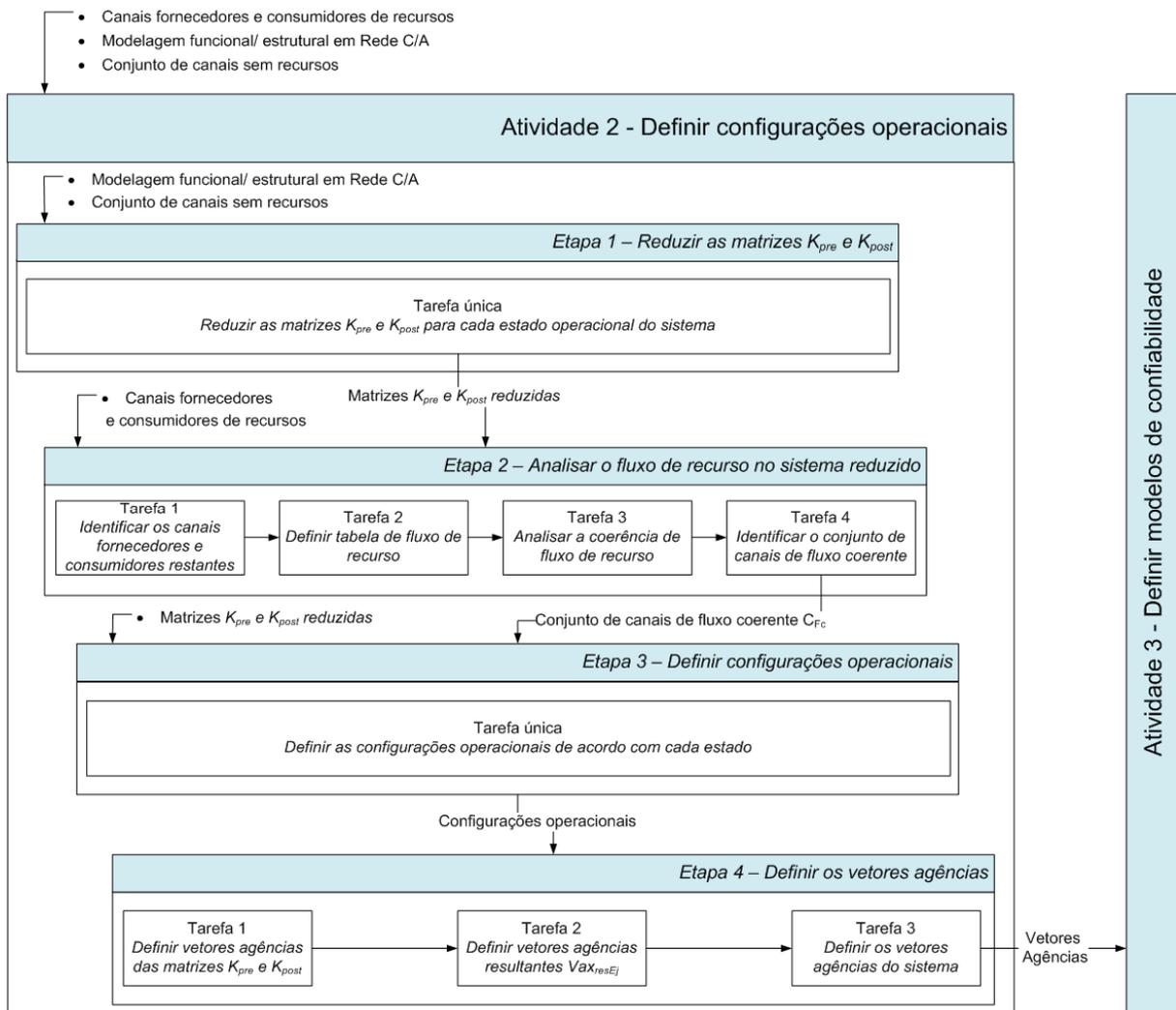


Figura 5.7 – Estrutura da Atividade 2 - Definir configurações operacionais

Etapa 2. Analisar o fluxo de recurso do sistema reduzido;

O objetivo dessa etapa é verificar se após a redução do modelo do sistema, os recursos que restaram percorrem o sistema de forma coerente. Nesta etapa define-se o conjunto de *canais de fluxo coerente* (C_{Fc}), o qual reúne todos os canais que restaram no sistema reduzido e

mantém um fluxo coerente, ou seja, direcionam recursos de um canal fornecedor para um canal consumidor ou para um canal bloqueado por uma agência controlável.

Esta etapa tem como entrada os conjuntos de C_f e C_c e as matrizes $K_{preREDj}$ e $K_{postREDj}$ e como resultado os conjuntos de C_{Fc} , os quais são direcionados para a etapa 3. Conforme Figura 5.7 a etapa 2 é detalhada em quatro tarefas citadas a seguir:

Tarefa 1. Identificar os canais fornecedores e consumidores restantes

Nesta tarefa identificam-se os canais fornecedores e os canais consumidores de recursos restantes nas matrizes $K_{preREDj}$ ou $K_{postREDj}$ e definem-se os conjuntos *canais fornecedores de recurso do sistema reduzido* (C_{fRed}) e *canais consumidores de recurso do sistema reduzido* (C_{cRed}).

Tarefa 2. Definir tabela de fluxo de recurso

Nesta tarefa é criada uma tabela para verificar o fluxo de recurso, com dimensão $m \times n$ onde m = número de agências das matrizes $K_{preREDj}$ ou $K_{postREDj}$ e n = número de canais de fornecedores do sistema reduzido. Nesta, em sua primeira linha, deve-se alocar em cada coluna um canal fornecedor pertencente ao conjunto C_{fRed} .

Tarefa 3. Analisar a coerência de fluxo de recurso

Para realizar a análise de fluxo de recurso utilizam-se as matrizes $K_{preREDj}$ ou $K_{postREDj}$ e a tabela de fluxo de recurso. A Figura 5.8 apresenta um exemplo dessas matrizes e da tabela de fluxo de recurso para melhorar o entendimento dos procedimentos dessa tarefa.

Desta forma, os procedimentos dessa tarefa são os seguintes:

Para cada canal fornecedor alocado em uma coluna da tabela verifica-se na matriz $K_{preREDj}$ as agências as quais este canal precede, ver Figura 5.8 (a). Uma vez identificada, esta agência deve ser encontrada na matriz $K_{postREDj}$, e anotado na tabela os canais posteriores a esta agência, sendo que podem ocorrer quatro possibilidades:

Não encontrar canal posterior a essa agência (na $K_{postREDj}$). Neste caso fazem parte do sistema o canal fornecedor e os canais eventualmente anotados na tabela até o momento. E o processo desta tarefa deve ser iniciado na próxima coluna da tabela.

Encontrar um canal posterior a essa agência (na $K_{postREDj}$). Neste caso o canal deve ser anotado na próxima linha da tabela e o mesmo processo desta tarefa deve ser repetido para este canal. Observa-se que se este canal já fazia parte da tabela, deve-se desconsiderar este

canal e seguir para a próxima coluna. Na tabela B, apresentada na Figura 5.8 (b), os canais repetidos estão identificados em *itálico e sublinhados simples*.

Estado E1 – Matrizes K_{pre} e K_{post} reduzidas do SH																	
$K_{preRED1}$								$K_{postRED2}$									
	a021	a022	a023	a024	a025	a026	a028	a029		a021	a022	a023	a024	a025	a026	a028	a029
C011	0	0	1	0	0	0	0	0	C011	0	0	0	0	0	0	0	0
C012	0	1	0	0	0	0	0	0	C012	0	0	0	0	0	0	0	0
C051	0	1	0	0	0	0	0	0	C051	0	0	0	0	0	0	0	0
C21	0	1	0	0	0	0	0	0	C21	1	0	0	0	0	0	0	0
C22	0	0	1	0	0	0	0	0	C22	1	0	0	0	0	0	0	0
C24	0	0	0	1	0	1	0	0	C24	0	1	0	0	0	0	0	0
C25	1	0	0	0	0	0	0	0	C25	0	0	0	1	1	0	0	0
C053	0	0	0	0	0	1	0	0	C053	0	0	0	0	0	0	0	0
C26	0	0	0	0	0	0	1	0	C26	0	0	0	0	0	1	0	0
C041	0	0	0	0	0	0	0	0	C041	0	0	0	0	0	0	1	0
C042	0	0	0	0	0	0	0	0	C042	0	0	0	0	0	0	0	1

(a)

Estado E1 - Análise de fluxo de recurso no SH reduzido							
Tabela Base de fluxo de recurso				Tabela de fluxo de recurso			
C011	C012	C051	C053	C011	C012	C051	C053
				-	C24	<u>C24</u>	<u>C26</u>
					C25	C26	
				C21	C22	<u>C041</u>	
				<u>C24</u>	-		

(b)

Figura 5.8 – Exemplo de análise de fluxo de recurso.

Encontrar mais de um canal posterior a esta agência (na $K_{postREDj}$). Neste caso, a partir dessa linha a coluna deve ser subdividida em uma nova coluna para cada canal encontrado, conforme tabela B da Figura 5.8 (b). E o mesmo processo desta tarefa deve ser repetido para o canal da primeira subcoluna criada.

Encontrar um canal consumidor posterior a esta agência (na $K_{postREDj}$). Neste caso o canal deve ser anotado na próxima linha da tabela e marcado para identificar que é um canal consumidor, e com isso conclui o fluxo do recurso. Sendo assim, o canal fornecedor, os canais internos deste fluxo e o canal consumidor fazem parte do sistema e o processo desta tarefa deve ser iniciado para a próxima coluna da tabela. Na tabela B, apresentada na Figura 5.8 (B), os canais consumidores estão identificados em *vermelho itálico e sublinhados duplo*.

Nos casos citados acima, em que foram encontrados canais posteriores as agências, segue-se na matriz $K_{preREDj}$ identificando as agências que estes precedem. Sendo que podem ocorrer duas possibilidades:

Não encontrar agência(s) precedida(s) de um canal analisado (na $K_{preREDj}$). Neste caso fazem parte do sistema o canal fornecedor e os canais anotados na tabela até o momento. E o processo desta tarefa deve ser iniciado para a próxima coluna da tabela.

Encontrar uma agência(s) precedida(s) de um canal analisado (na $K_{preREDj}$). Neste caso re-torna-se a analisar os canais posteriores da matriz $K_{postREDj}$, definindo um processo iterativo entre as matrizes $K_{preREDj}$ e $K_{postREDj}$.

Tarefa 4. Identificar o conjunto de canais de fluxo coerente

Nessa tarefa são identificados os canais que restaram na tabela de fluxo de recurso, os quais estão coerentes em relação ao fluxo de recurso para este estado do sistema. Estes canais devem ser relacionados em um conjunto de *canais de fluxo coerente* (C_{Fc}).

Na seção 6.2.2 apresentam-se os procedimentos completos da etapa 3 aplicados para o estudo de caso.

Etapa 3. Definir as configurações operacionais;

Nessa etapa, uma vez que todos os canais que estabelecem um fluxo coerente estão reunidos no conjunto de C_{Fc} , define-se que os canais que não fazem parte deste conjunto, assim como as agências relacionadas somente a eles, não participam do atendimento da função de determinado estado, sendo assim devem ser eliminados das matrizes $K_{preREDj}$ e $K_{postREDj}$. Tem-se, então, um novo arranjo estrutural e funcional para o sistema em análise de acordo com cada estado operacional.

Esta etapa tem como entrada as matrizes $K_{preREDj}$ e $K_{postREDj}$ e os conjuntos de C_{Fc} e como resultado as matrizes K_{preEj} e K_{postEj} que representam as configurações para os diferentes estados operacionais do sistema, as quais são direcionadas para a etapa 4. Conforme Figura 5.7 a etapa 3 é representada por uma única tarefa que corresponde aos procedimentos já descritos acima.

Etapa 4. Definir os vetores agências.

O objetivo dessa etapa é definir vetores compostos pelas agências que restaram no sistema para cada estado operacional. Esta etapa tem como entrada as matrizes K_{preEj} e K_{postEj} e como resultado os *vetores agências* (Vax_{Ej}), os quais são direcionados para a **Ativi-**

dade 3 - Definir modelos de confiabilidade. Conforme a Figura 5.7, a etapa 4 é detalhada em três tarefas citadas a seguir:

Tarefa 1. Definir vetores agências das matrizes K_{preEj} e K_{postEj}

Nesta tarefa aplica-se a operação *OU* entre as linhas da matriz K_{PreE1} e K_{PostE1} e assim definem-se os vetores Vax_{preEj} e Vax_{postEj} .

Tarefa 2. Definir vetores agências resultantes Vax_{resEj}

Nesta tarefa aplica-se a operação *OU* entre os vetores Vax_{preEj} e Vax_{postEj} e encontra-se o vetor Vax_{resEj} .

Tarefa 3. Definir vetores agências do sistema Vax_{Ej}

Nesta tarefa define-se o *vetor agência* Vax_{Ej} do estado que é representado pela transposta negativa do vetor Vax_{resEj} .

Na seção 6.2.2 apresenta-se a aplicação da etapa 4 no estudo de caso.

Completando a tarefa 3 da etapa 4, obtém-se a saída da **Atividade 2 - Definir configurações**. Os vetores agências do sistema são vetores coluna negativos, que serão utilizados para definir a dependência entre sistemas na **Atividade 3 - Definir modelos de confiabilidade**.

5.2.3 Atividade 3 - Definir modelos de confiabilidade

O objetivo dessa atividade é determinar os modelos de confiabilidade para cada configuração operacional do sistema. Para isso utilizam-se os Vax_{Ej} para definir as matrizes de incidência das árvores de sucesso que representam os modelos de confiabilidade dos estados operacionais do sistema. No Apêndice B apresenta-se uma sistemática da representação das árvores de sucesso a partir das informações de uma Rede C/A.

A **Atividade 3 - Definir modelos de confiabilidade** é detalhada em três etapas, as quais são detalhadas por tarefas. A saída desta atividade são os modelos de confiabilidade representados pelas árvores de sucesso. A Figura 5.10 apresenta a estrutura desta atividade.

A seguir descreve-se sobre cada etapa da atividade 3.

Etapa 1. Definir os vetores subsistemas;

A definição dos *vetores subsistema* ($S_n ax_{Ej}$) das árvores de sucesso é feita a partir dos Vax_{Ej} gerados na **Atividade 2 - Definir configurações operacionais**. Essa definição serve para facilitar a geração e manipulação das árvores de sucesso do sistema em análise. A Figu-

ra 5.9 apresenta a definição da conversão dos Vax_{Ej} em $S_n ax_{Ej}$ das Árvores de Sucesso, conforme nomenclatura definida na Figura B.2 apresentada no Apêndice B.

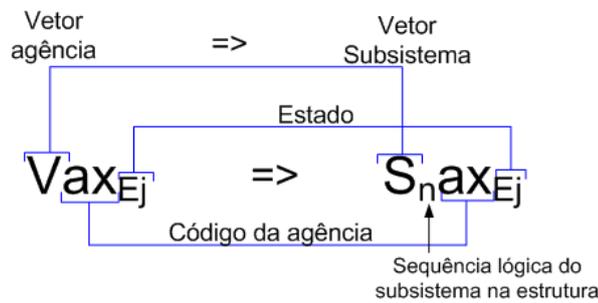


Figura 5.9 – Parâmetros de conversão do vetor agência em vetor subistema das árvores de sucesso

Além disso, as agências que compõem os vetores agência e não foram detalhadas recebem um prefixo C , indicando que as mesmas serão analisadas como componentes do sistema. Por exemplo, agências que eram denominadas $a021$ e $a022$ passam a ser definidas por $Ca021$ e $Ca022$.

Esta etapa tem como entrada os Vax_{Ej} e como resultado os *vetores subistema* $S_n ax_{Ej}$, os quais são direcionadas para a etapa 2. Conforme a Figura 5.10, a etapa 1 é representada por uma única tarefa que corresponde aos procedimentos já descritos acima.

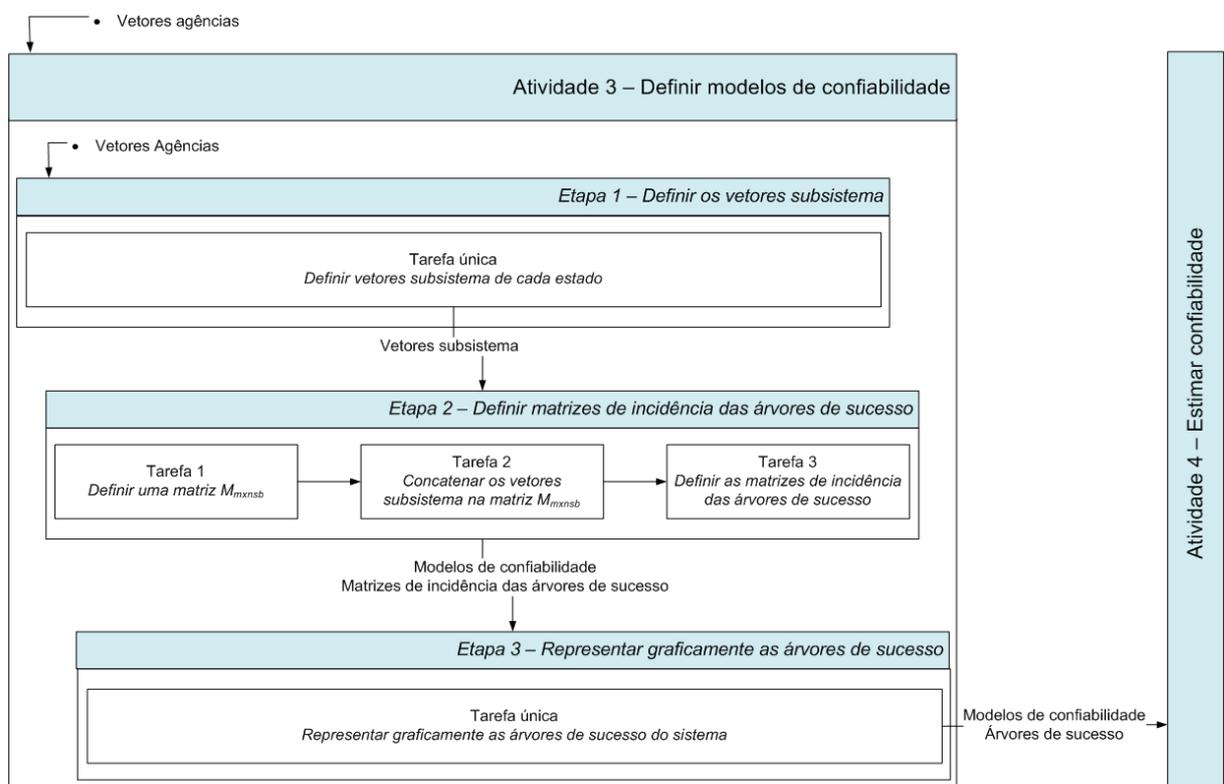


Figura 5.10 – Estrutura da Atividade 3 – Definir modelos de confiabilidade

Etapa 2. Definir matrizes de incidência das árvores de sucesso;

O objetivo dessa etapa é definir as matrizes de incidência da árvore de sucesso para cada estado operacional do sistema por meio da concatenação dos $S_n ax_{Ej}$ em uma única matriz.

Esta etapa tem como entrada os $S_n ax_{Ej}$ e como resultado as matrizes de incidência das árvores de sucesso (MI_{Ej}), as quais são direcionadas para a etapa 3. Conforme a Figura 5.10, a etapa 2 é detalhada em três tarefas citadas a seguir:

Tarefa 1. Definir uma matriz $M_{m \times nsb}$

Nesta tarefa define-se uma matriz $M_{m \times nsb}$, onde m é o número de itens (componentes + subsistemas) e nsb é o número de subsistemas. A diagonal principal da submatriz quadrada, formada na parte superior dessa matriz, é composta por elementos igual a um (1) e todos os outros valores da matriz iguais a zero (0)

Tarefa 2. Concatenar os vetores subsistema na matriz $M_{m \times nsb}$

Nesta tarefa concatenam-se os vetores verticalmente seguindo a sequência lógica da estrutura e horizontalmente deve-se evitar a superposição entre vetores, considerando dessa forma, o tamanho dos vetores precedentes. Esta concatenação é sistematizada de acordo com a nomenclatura de cada vetor subsistema definido na etapa 1.

Para definir a posição de concatenação de cada vetor subsistema na matriz $M_{m \times nsb}$ é necessário especificar a linha e a coluna de inserção do primeiro elemento do vetor, conforme a notação matricial da posição, dada por $M[l, c]$ onde l indica a linha e c indica a coluna da matriz.

A regra para que a concatenação dos vetores seja feita de forma sistemática está representada na Equação (5.1).

$$\begin{aligned}
 S_1 a 0_{E1} &\Rightarrow M[2, 1] \\
 S_2 a 0_{E1} &\Rightarrow M[m_1 + 2, 2] \\
 S_3 a 0_{E1} &\Rightarrow M[m_1 + m_2 + 2, 3] \\
 &\vdots \\
 S_n ax_{Ej} &\begin{cases} \text{Se } n = 1 \Rightarrow M[2, 1] \\ \text{Se } n > 1 \Rightarrow M[m_1 + \dots + m_{n-2} + m_{n-1} + 2, n] \end{cases}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

onde:

m_n – é o número de linhas do vetor do subsistema n ;

n – é a ordem sequencial lógica dos subsistemas.

Tarefa 3. Definir matrizes de incidência das árvores de sucesso

Para definir as matrizes de incidência das árvores de sucesso deve-se inserir na matriz $M_{m \times nsb}$ os vetores subsistema nas posições definidas na tarefa 2 e identificar os lugares e transições da Rede de Petri que representam as árvores de sucesso do sistema.

Na seção 6.2.3 apresenta-se a aplicação dessa etapa 2, onde define-se as matrizes de incidência das árvores de sucesso do estudo de caso.

Etapa 3. Representar graficamente as árvores de sucesso.

Nessa etapa representam-se as árvores de sucesso na forma gráfica, o que facilita a interpretação qualitativa sobre as relações de dependência entre os componentes e subsistemas para atender determinadas funções do sistema. Para representar as árvores de sucesso de forma gráfica são utilizadas as MI_{E_j} definidas na etapa 2.

Esta etapa tem como entrada as MI_{E_j} das árvores de sucesso e como resultado os modelos de confiabilidade, ou seja, as árvores de sucesso na forma gráfica, as quais são direcionadas para a **Atividade 4 – Estimar confiabilidade**. Conforme a Figura 5.10, a etapa 1 é representada por uma única tarefa que corresponde aos procedimentos já descritos acima.

Definidos os modelos de confiabilidade do sistema, chega-se ao final da **Atividade 3 – Definir modelos de confiabilidade**.

5.2.4 Atividade 4 – Estimar confiabilidade

Nessa atividade é feita a análise de confiabilidade do sistema de acordo com as configurações dos diferentes estados operacionais do sistema. Para isso utiliza-se as *matrizes de incidência* MI_{E_j} das árvores de sucesso, a probabilidade do tempo de atuação para cada estado operacional durante a vida útil do sistema e as taxas de falha dos componentes.

A **Atividade 4 – Estimar confiabilidade** é detalhada em três etapas, as quais são detalhadas por tarefas. A saída dessa atividade é a estimativa de confiabilidade do sistema. A Figura 5.11, apresenta a estrutura desta atividade.

A seguir descreve-se cada etapa da atividade 4.

Etapa 1. Definir dados dos componentes;

Esta etapa tem a função de gerar a tabela de componentes do sistema, com suas respectivas características e valores de taxa de falha. Como uma tabela de caracterização das agências do sistema já foi apresentada na **Atividade 1 - Caracterizar sistema**, nesse momento apenas resgata-se essas informações e adicionam-se os parâmetros de análise, tais como, código dos componentes e valores de taxas de falha.

Esta etapa tem como entrada as especificações dos componentes e como resultado a tabela de dados dos componentes do sistema, a mesma é direcionada para a etapa 2. Conforme a Figura 5.11, a etapa 1 é representada por uma única tarefa que corresponde aos procedimentos já descritos acima.

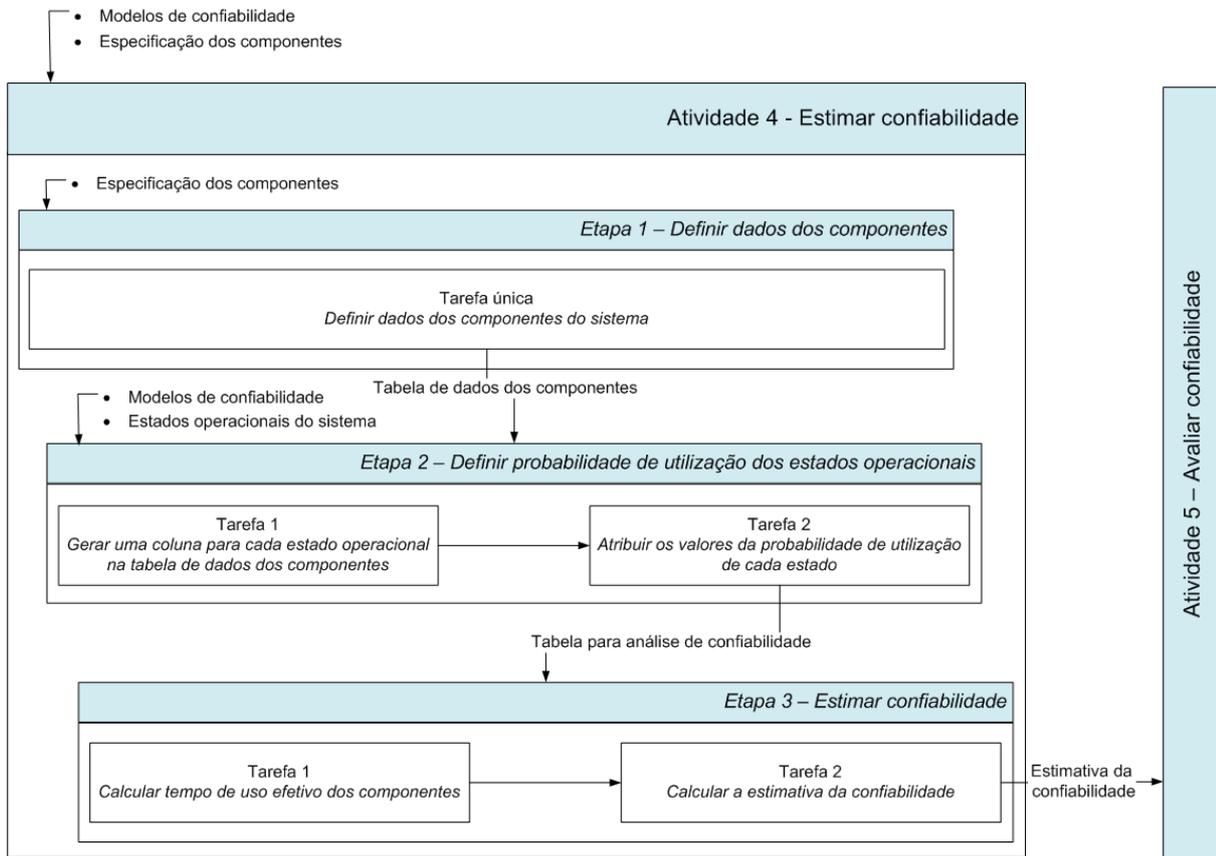


Figura 5.11 – Estrutura da **Atividade 4 - Estimar confiabilidade**

Etapa 2. Definir probabilidade de utilização dos estados operacionais;

Nesta etapa os componentes do sistema ativos em cada estado operacional devem ser identificados para atribuir a *probabilidade de utilização do estado* $[P(E_j)]$. Esta etapa tem como entrada os modelos de confiabilidade, a tabela de estados operacionais do sistema e a tabela de dados dos componentes e como resultado a tabela para análise de confiabilidade, a mesma é direcionada para a etapa 3. Conforme a Figura 5.11 a etapa 2 é detalhada em duas tarefas citadas a seguir:

Tarefa 1. Gerar uma coluna para cada estado operacional na tabela de dados dos componentes

Nesta tarefa inclui-se uma coluna, para cada estado operacional existente no sistema, na tabela de dados dos componentes.

Tarefa 2. Atribuir os valores de probabilidade de utilização de cada estado

Nesta tarefa a célula de cada componente pertencente as matrizes MI_{E_j} , deve receber o valor da $P(E_j)$ para cada estado específico conforme colunas definidas na tarefa 1. Quando o componente não pertence à matriz MI_{E_j} , a célula deste recebe um valor nulo.

Na seção 6.2.4 apresenta-se a aplicação dessa etapa no estudo de caso.

Etapa 3. Estimar confiabilidade.

Nesta etapa é feito o cálculo de estimativa da confiabilidade do sistema automático considerando os diferentes estados operacionais em que o sistema se encontra durante o tempo de uso considerado. Além disso, avalia-se o *tempo de uso efetivo* (t_{ef}) de cada componente do sistema.

Esta etapa tem como entrada a tabela para análise de confiabilidade e como resultado a estimativa da confiabilidade, a mesma é direcionada **para a Atividade 5 – Avaliar confiabilidade**. Conforme a Figura 5.11 a etapa 3 é detalhada em duas tarefas citadas a seguir:

Tarefa 1. Calcular tempo de uso efetivo dos componentes

Nesta tarefa calcula-se o t_{ef} de cada componente do sistema durante o tempo de uso considerado, conforme Equação (6.13).

$$t_{ef(i)} = t \times \sum_j P(E_{ij}) \quad (5.2)$$

Tarefa 2. Calcular a estimativa da confiabilidade

Nesta tarefa calcula-se a estimativa da confiabilidade do sistema por meio da equação geral da confiabilidade, considerando a *taxa de falha* λ dos componentes, a $P(E_j)$ e o *tempo de uso do sistema* (t), conforme Equação (6.12).

$$R[t, P(E_{ij})] = \exp \left\{ \left[\sum_i -\lambda_i \cdot \left(\sum_j P(E_{ij}) \right) \cdot t \right] \right\} \quad (5.3)$$

Na seção 6.2.4 apresenta-se o cálculo da estimativa da confiabilidade para o estudo de caso.

Uma vez calculada a estimativa de confiabilidade do sistema e analisado o tempo efetivo de uso dos componentes do sistema, chega-se ao final da **Atividade 4 – Estimar confiabilidade**.

5.2.5 Atividade 5 – Avaliar confiabilidade

Esta atividade tem como objetivo avaliar os resultados obtidos na estimativa da confiabilidade do sistema. Essa avaliação irá depender dos requisitos e restrições de projeto definidos na fase de projeto informacional. Para essa avaliação devem-se considerar os custos agregados para atender a confiabilidade estimada, os custos de uma falha no sistema e os custos de manutenção dos componentes durante a vida útil do sistema.

A **Atividade 5 – Avaliar confiabilidade** tem como saída a decisão sobre o atributo de confiabilidade estimado, nesta pode-se optar em aprovar ou não a confiabilidade estimada para o sistema. Caso a confiabilidade do sistema não seja aprovada, alterações devem ser providenciadas na concepção do sistema e a mesma deve ser avaliada novamente pela MACSA, partindo da **Atividade 1 – Caracterizar sistema**. Caso a confiabilidade do sistema seja aprovada, a concepção do sistema deve seguir para a **Atividade 6 – Documentar a análise de confiabilidade**.

5.2.6 Atividade 6 – Documentar a análise de confiabilidade

Esta atividade tem como objetivo registrar os resultados obtidos na estimativa da confiabilidade do sistema. Para esse registro devem ser documentados os resultados obtidos na análise de confiabilidade, tais como, o gráfico da função confiabilidade do sistema e os gráficos que representem o uso efetivo dos componentes do sistema.

A **Atividade 6 – Documentar a análise de confiabilidade** tem como saída um relatório sobre os resultados obtidos na análise de confiabilidade, o qual deve ser anexado aos documentos de projeto do sistema e deve encaminhar a concepção com o atributo de confiabilidade aprovado para as atividades finais da fase de projeto conceitual.

5.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE A MACSA

A MACSA apresentada neste capítulo leva em consideração as diferentes configurações operacionais apresentadas por esse sistema, onde a definição da VFG a ser atendida pelo sistema é uma decisão do usuário, mas cabe ao sistema de controle definir a configuração que atenderá a função solicitada.

Salienta-se a importância da identificação das diferentes configurações operacionais, já que componentes do sistema poderão ser compartilhados para o atendimento de determinadas funções, enquanto outros podem ficar desativados em algum momento ou ativados

durante toda a vida útil. Isso poderá mascarar o efetivo tempo de uso dos componentes, o que afetará diretamente na análise de confiabilidade do sistema.

Além disso verificou-se, em pesquisas apresentadas nos capítulos de revisão bibliográfica, que independente dos métodos utilizados na análise de confiabilidade, sejam estes combinatórios ou estocásticos, é fundamental a decomposição e a identificação das configurações operacionais dos sistemas. Trabalhos como Benard et al. (2008), Huang e Chang (2007), Azaron et al. (2006) focam a necessidade da decomposição dos sistemas para amenizar as desvantagens dos métodos estocásticos, tais como explosão de estado e tempo de processamento.

Todavia, nessas pesquisas a decomposição do sistema ainda é feita de forma intuitiva, ou seja, a definição das estruturas funcional e estrutural, assim como a definição dos modelos de confiabilidade do sistema, depende da experiência do projetista. Como os sistemas automáticos envolvem componentes de diferentes tecnologias, geralmente apresentam uma estrutura complexa e composta por um número considerável de componentes, a definição dessas estruturas pode se tornar uma tarefa difícil e propícia a erros.

Sendo assim, a MACSA inova ao induzir a modelagem funcional/estrutural do sistema de diferentes tecnologias por meio de uma mesma ferramenta, a qual proporciona uma manipulação da estrutura do sistema por meio de operações matemáticas. A partir dessa premissa, a metodologia permite a identificação das diferentes configurações operacionais, assim como, os modelos de confiabilidade do sistema de forma automática, por meio da interação entre os modelos funcional/estrutural e o modelo comportamental do sistema. Com isso, o projetista não toma nenhuma decisão intuitiva para a definição das configurações e modelos de confiabilidade.

A MACSA apresenta também uma inovação incremental no método de análise de confiabilidade baseada na equação geral da confiabilidade, onde os parâmetros de análise, taxas de falha (λ) e t são considerados constantes. Na MACSA considera-se que o tempo de uso t_{ef} varia de acordo com a probabilidade de utilização das diferentes funções solicitadas pelo usuário durante a vida útil do sistema. Essa abordagem proporciona a personalização de estimativa de confiabilidade do sistema de acordo com as necessidades de uso do produto pelo usuário.

CAPÍTULO 6- APLICAÇÃO DA MACSA - ESTUDO DE CASO 1 - UPCH

Para avaliar a aplicação da MACSA, desenvolveu-se um estudo de caso sobre uma concepção de uma Unidade de Potência e Condicionamento Hidráulica – UPCH. A UPCH tem como função o suprimento de energia hidráulica para dois circuitos de testes de componentes hidráulicos. Este equipamento foi desenvolvido no LASHIP/EMC/UFSC (DE NEGRI et al., 2005).

6.1 DESCRIÇÃO DA UPCH

A UPCH é composta por componentes mecânicos (hidráulicos) e eletroeletrônicos. Seu controle é realizado por um CLP – Controlador Lógico Programável. Este equipamento pode ser compartilhado por dois usuários, os quais possuem diferentes possibilidades de configurar o seu pedido. Dependendo do experimento a ser realizado nas bancadas, os usuários poderão escolher uma configuração de suprimento da UPCH utilizando duas linhas de pressão, p1 e p2, e ainda escolher o suprimento por uma bomba hidráulica de deslocamento fixo, por uma bomba de deslocamento variável ou por um acumulador hidráulico, além das combinações destes componentes. A Figura 6.1 apresenta uma fotografia da UPCH.



Figura 6.1 – UPCH – Unidade de potência e condicionamento hidráulica

A Figura 6.2 apresenta o circuito hidráulico da UPCH desenvolvido para atender as distintas funções de sistema com fins didáticos e experimentais. Desta forma, dependendo da função solicitada pelos usuários, diferentes configurações operacionais são assumidas pelo circuito.

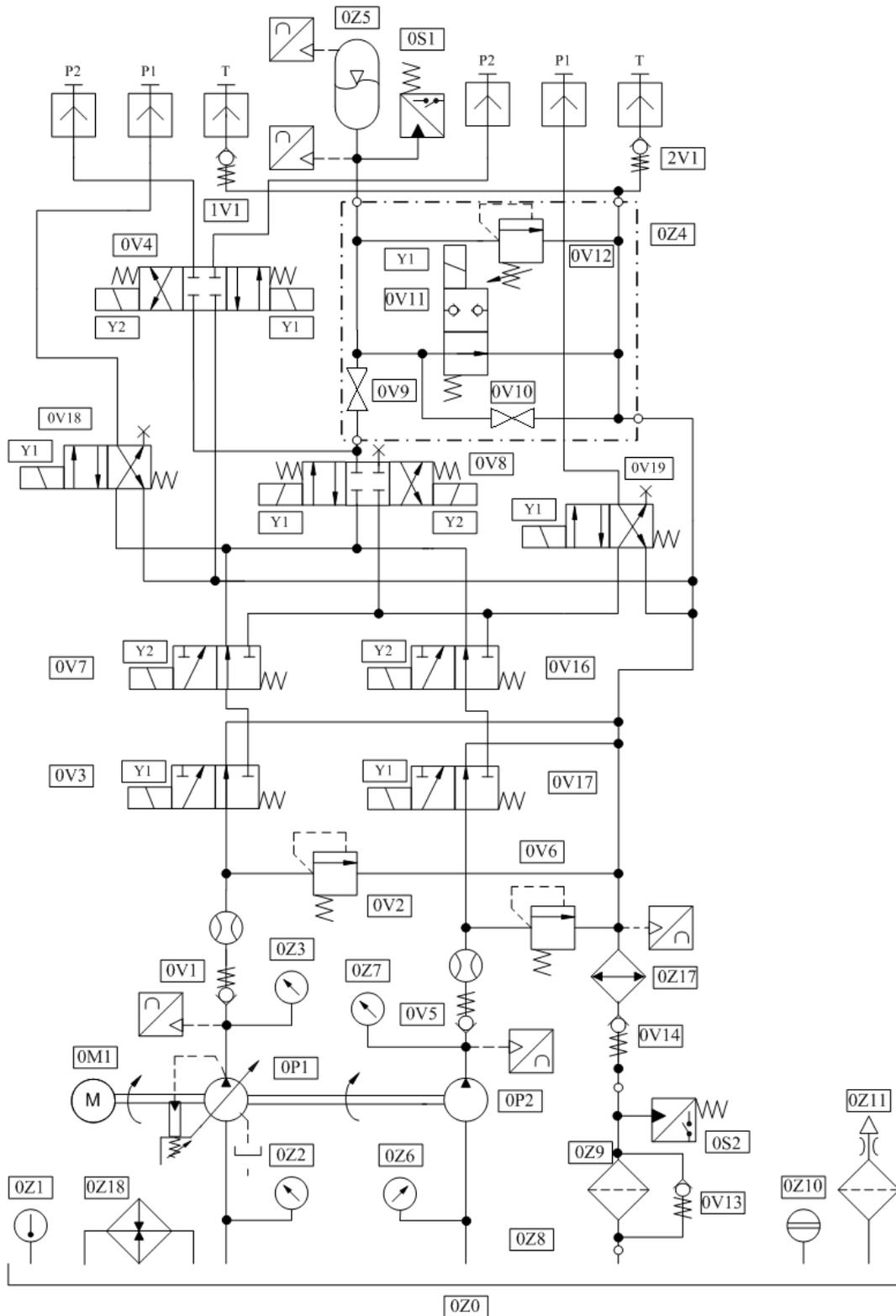


Figura 6.2 - Circuito Hidráulico da UPCH (adaptado de Souto (2005))

Sendo assim, em cada configuração é possível que durante a operação haja situações em que alguns componentes sejam solicitados com grande frequência, enquanto outros permanecem desativados, a maior parte do tempo.

A Tabela 2 apresenta os possíveis estados em que a UPCH pode operar e a quantidade de componentes desativados e ativados em cada estado. A Figura 6.3 apresenta uma análise percentual da utilização dos componentes do circuito hidráulico para esses estados do sistema.

Na análise dos componentes do circuito hidráulico verifica-se que quando se utiliza uma das bombas hidráulicas para suprir um usuário, em torno de 30% dos componentes se mantêm desativados.

Tabela 2 – Análise dos componentes do circuito hidráulico da UPCH

Estados	Configuração operacional	Componentes ativados	Componentes desativados
		quantidade	quantidade
1	Suprir p1 do usuário 1 com BF	31	14
2	Suprir p1 do usuário 2 com BV	30	15
3	Suprir acumulador com BF	38	7
4	Suprir p2 do usuário 1 com acumulador	37	8
5	Suprir 1 usuário com bomba e outro com acumulador	43	2
6	Suprir os dois usuários com BF e BV	34	11

Quando os dois usuários compartilham a UPCH utilizando as duas bombas hidráulicas, 24,44% dos componentes ficam desativados. Quando um usuário faz uso de uma bomba hidráulica e o outro usa o acumulador, apenas 4,44% dos componentes ficam desativados. No apêndice A, apresenta-se as diferentes configurações do circuito hidráulico com as respectivas porcentagens de componentes ativados e desativados.

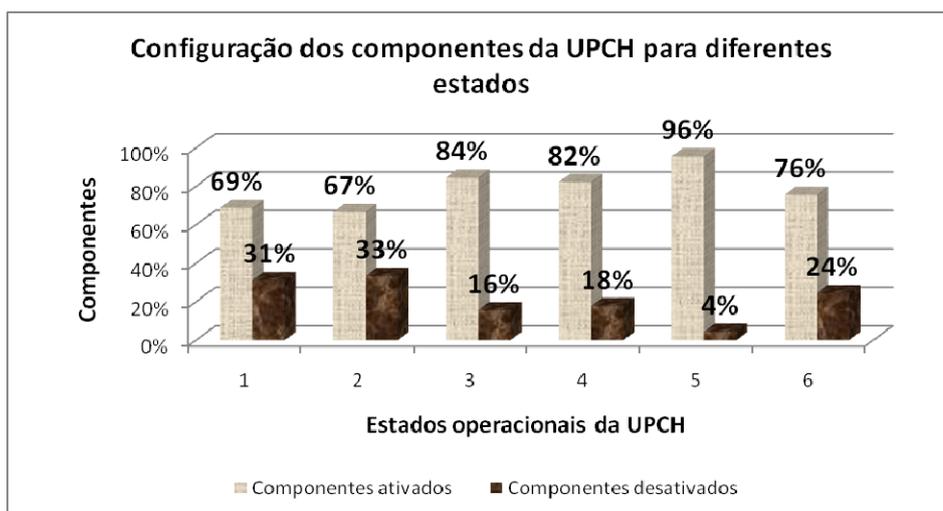


Figura 6.3 – Componentes ativados/desativados para estados operacionais da UPCH

Desta forma, uma avaliação da estimativa de confiabilidade deste sistema para um determinado ciclo de vida, considerando os diferentes estados operacionais e os prováveis

tempos de atuação, fornecerá as informações requeridas pela equipe de projeto facilitando a avaliação da confiabilidade ainda na fase de projeto conceitual do sistema.

6.1.1 Modelagem funcional e estrutural da UPCH

A modelagem da UPCH por meio da Rede C/A possibilita a identificação dos módulos que compõem o sistema, facilitando assim a definição das funções parciais do sistema (Figura 6.4). Esta modelagem define o tipo de relacionamento e a troca de informações, energia e matéria entre os diferentes módulos.

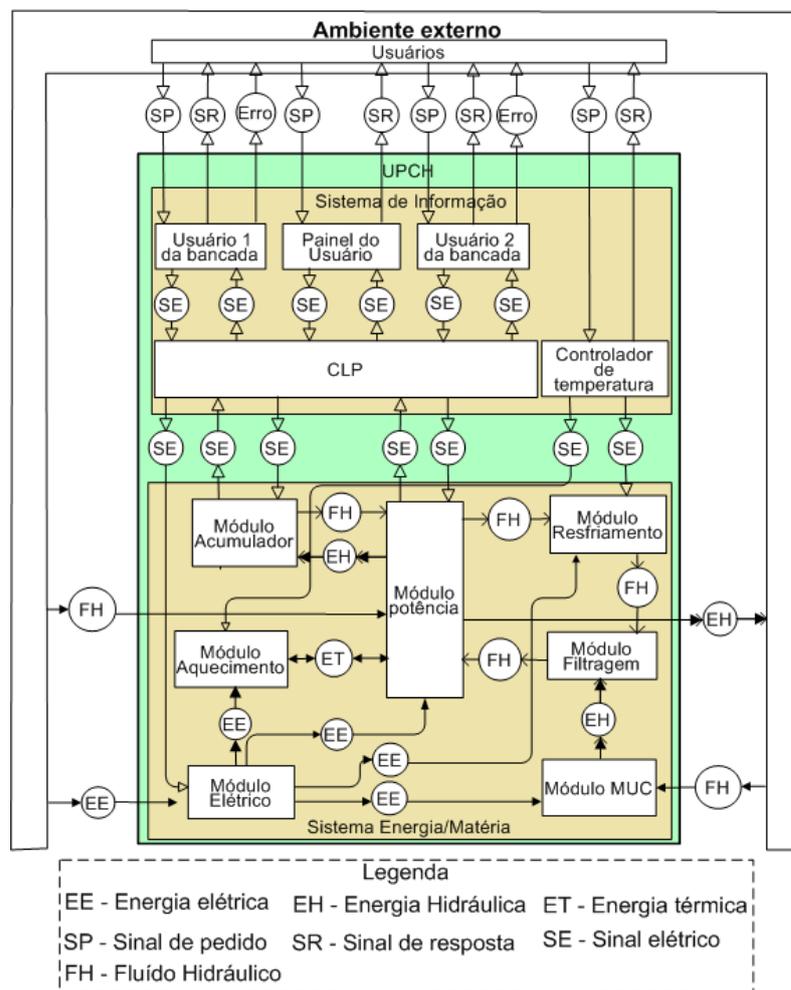


Figura 6.4 - Modelo funcional e estrutural da UPCH

Além disso, o detalhamento destes módulos permite a identificação dos componentes e suas relações para atender a função do sistema. A caracterização destes sistemas facilita a análise funcional, estrutural e comportamental dos mesmos.

6.1.2 Modelagem comportamental da UPCH

A modelagem comportamental do sistema é feita com o Grafcet e implementada no CLP. Dessa forma, o controle da UPCH é feito por meio deste CLP e o programa implementado identifica o estado do sistema por meio de sinais dos sensores, assim como os pedidos do usuário. Posteriormente, providencia a mudança deste estado enviando sinais de atuação, tais como acionamento dos solenóides das válvulas e motores.

Na Figura 6.5, é apresentado um detalhe de modelagem comportamental da UPCH.

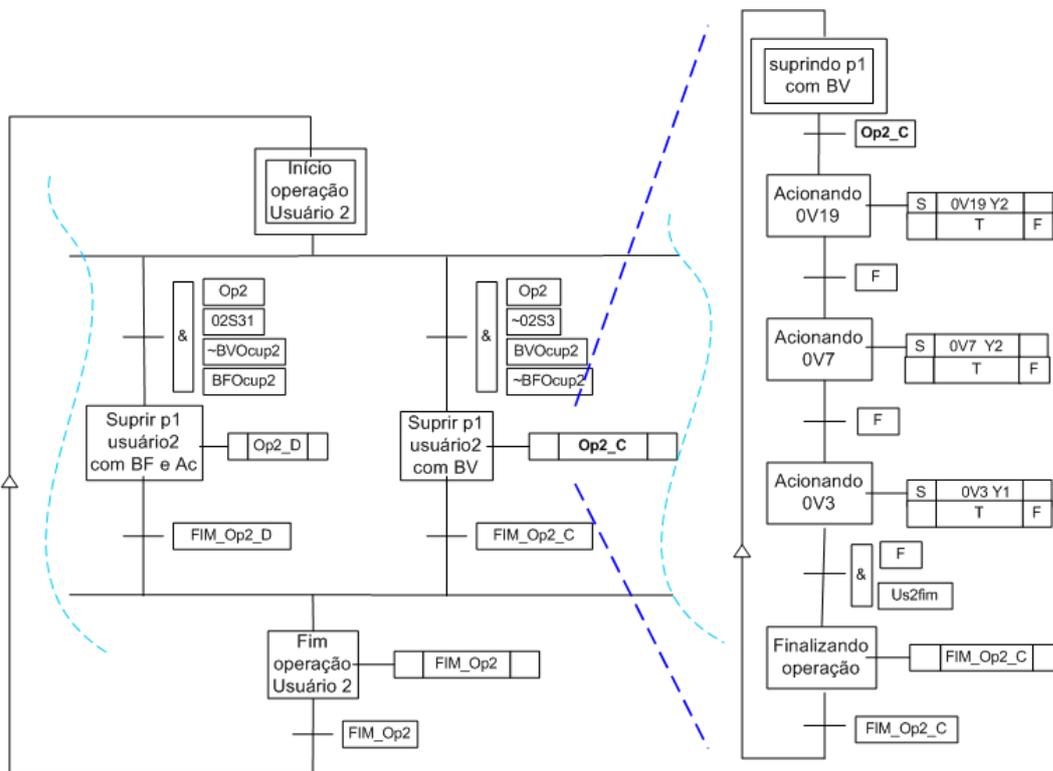


Figura 6.5 – Detalhe da modelagem comportamental da UPCH em Grafcet

Neste detalhe é possível observar que a modelagem está estruturada de forma hierárquica e modular, na qual um modelo Grafcet principal aciona outro Grafcet mais específico por meio de uma ação associada ao seu passo. O segundo Grafcet acionado executa a sua tarefa e volta para o modelo principal.

6.1.3 Circuito simplificado da UPCH

O estudo de caso considerado neste trabalho para demonstrar a aplicação da MACSA será aplicado sobre uma parte da UPCH. A simplificação do circuito do sistema foi aqui adotada para possibilitar a apresentação do estudo, detalhando todas as atividades,

etapas e tarefas da MACSA. No entanto, esta mantém as características essenciais que atendem os requisitos da UPCH original, tais como possibilidade do usuário utilizar uma bomba de deslocamento fixo ou variável e também a possibilidade de suprir dois usuários ao mesmo tempo.

Contudo, ressalta-se que a MACSA não está limitada ao tamanho do circuito hidráulico, já que futuramente deve ser implementado computacionalmente o que irá facilitar a inserção e manipulação dos dados do sistema, independente do número de componentes.

A Figura 6.6 representa o sistema da UPCH simplificada. A representação do detalhamento das funções pode ser verificada na Figura 5.1, onde o diagrama funcional indica que a função global FG da unidade pode ser atendida pelas variantes da função global VFG1, VFG2 ou VFG3. Sendo que, para atender estas diferentes variantes da função global o sistema terá diferentes configurações funcionais/estruturais ativas, e estas serão definidas pelo modelo comportamental do sistema de acordo com as necessidades dos usuários.

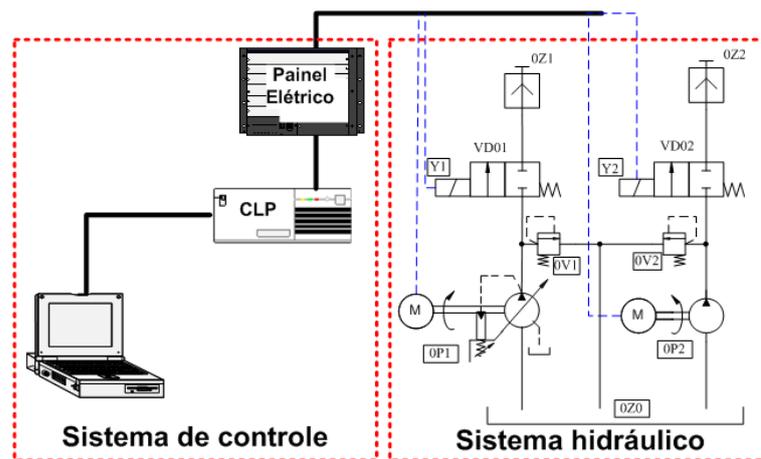


Figura 6.6 – Sistema hidráulico simplificado da UPCH

A Figura 6.7 apresenta a UPCH em um modelo funcional/estrutural, representado por uma Rede C/A. Neste modelo a UPCH é modelada por uma agência $a0$ e quatro canais $C01$, $C02$, $C03$ e $C04$ que fazem a comunicação do sistema com o ambiente externo.

Neste modelo pode-se observar uma função primária da UPCH de transformar EE - energia elétrica em EH - energia hidráulica. Além disso, verifica-se a troca de inf - informação com o meio externo, ou seja, a possibilidade do usuário inferir sobre a função a ser atendida pelo sistema.

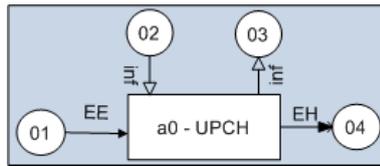


Figura 6.7 - Modelagem funcional/estrutural da UPCH

A Figura 6.8 apresenta a modelagem comportamental da UPCH simplificada. A ferramenta utilizada para essa modelagem é o Grafcet.

A Figura 6.8 (a) mostra o modelo comportamental detalhado onde são apresentados os passos e ações que irão atuar no sistema, já na Figura 6.8 (b) o modelo geral identifica os estados em que o sistema poderá se encontrar durante sua vida útil. De acordo com o modelo comportamental, a UPCH simplificada poderá estar em três estados, *E1 - Vazão variável*, *E2 - vazão constante* ou *E3 - máxima vazão*, nestes estados o sistema estará suprindo o usuário com energia hidráulica, com a bomba de deslocamento variável, com a bomba de deslocamento fixo ou com as duas simultaneamente, respectivamente.

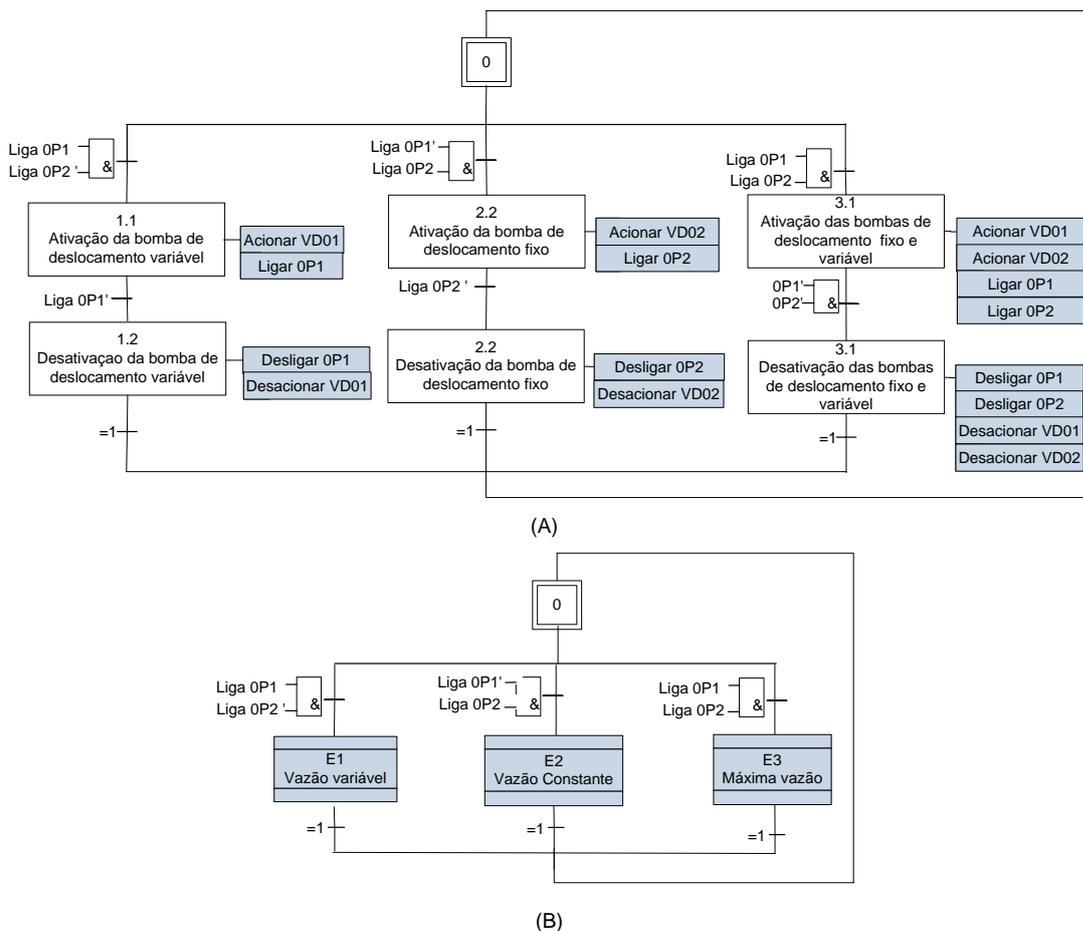


Figura 6.8 - Modelo comportamental em Grafcet : (a) modelo detalhado; (b) modelo geral

6.2 APLICAÇÃO DA MACSA

Neste tópico a aplicação da MACSA será demonstrada passo-a-passo para a unidade simplificada da UPCH. Na análise do estudo de caso serão desenvolvidas as atividades, etapas e tarefas, assim como serão apresentados e analisados os resultados definidos nas atividades da MACSA.

Para as duas primeiras atividades da MACSA o desenvolvimento deste estudo de caso será apresentado detalhadamente somente para o estado *E1* do sistema hidráulico, uma vez que os mesmos procedimentos se repetem para os outros dois estados *E2* e *E3* e para o sistema de controle.

Para simplificar a contextualização do estudo de caso, a partir deste ponto o sistema será tratado apenas como UPCH, no entanto, sabe-se que este é uma simplificação do equipamento desenvolvido no LASHIP/EMC/UFSC.

Para iniciar a análise da UPCH, o modelo em Rede C/A apresentado na Figura 6.7 foi detalhado para um segundo nível, no qual foram identificados dois subsistemas, o Sistema de Controle (SC) e o Sistema Hidráulico (SH), conforme Figura 6.9.

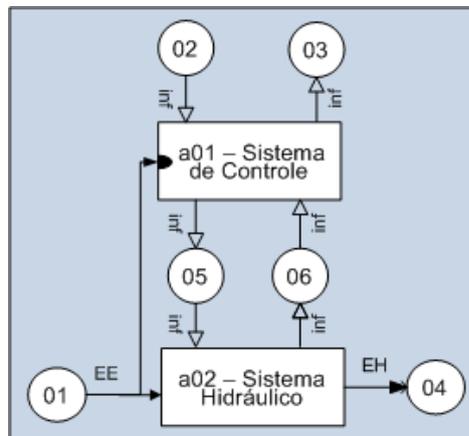


Figura 6.9 – Modelagem segundo nível da UPCH

Posteriormente, para as duas atividades seguintes o sistema de controle e o sistema hidráulico serão detalhados até que seus componentes e a relação entre eles sejam identificadas.

De acordo com a Figura 5.6, a *Atividade 1 - Caracterizar sistema* parte de um modelo funcional/estrutural, em Rede C/A, do respectivo modelo comportamental em Grafcet, e da especificação dos componentes do sistema.

A Figura 6.10 e a Figura 6.11 apresentam a modelagem funcional/estrutural do SH e do SC, respectivamente. Uma vez que os subsistemas foram detalhados, identificam-se as

agências elementares da concepção do sistema e escolhem-se os componentes que atenderão essas agências, conforme Tabela 3.

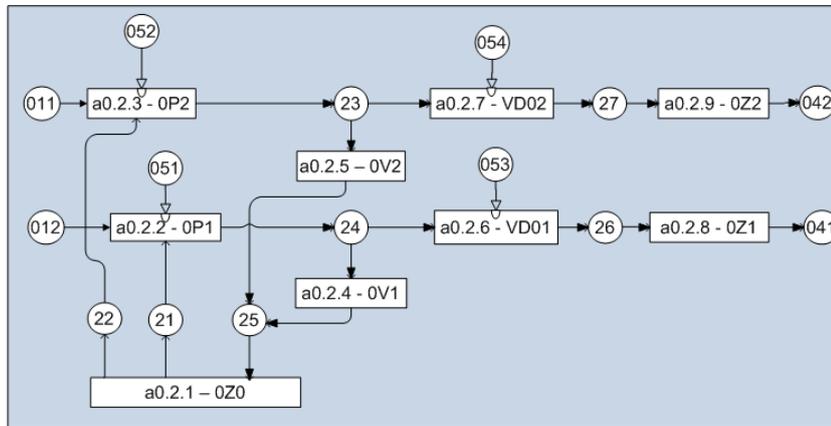


Figura 6.10 - Modelo do desdobramento do SH em Rede C/A

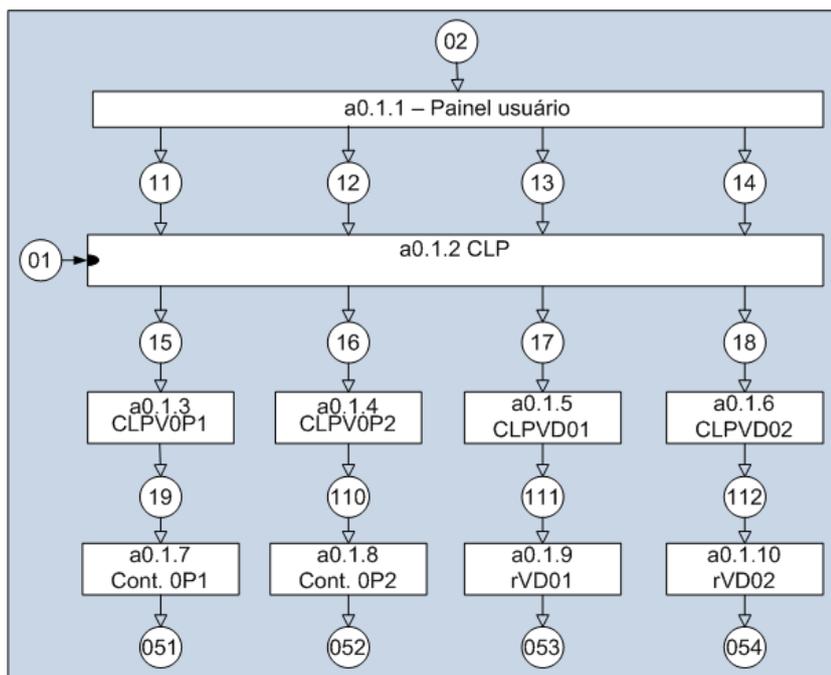


Figura 6.11 - Modelo do desdobramento do SC em Rede C/A

A Tabela 3 apresenta a caracterização das agências do SH, incluindo informações relevantes para análise, tais como: código da agência, símbolo do componente hidráulico, nome, função do componente no sistema e tipo de controle. O tipo de controle definido na Tabela 3 caracteriza se as agências são controláveis ou não. Agências controláveis são definidas como agências que representam componentes que permitem a alteração do seu estado por meio da intervenção do ambiente externo ou de um sistema de controle.

Figura 6.12 – Matrizes K_{pre} e K_{post} do sistema hidráulico

Tarefa 2 - Calcular os vetores VCK_{pre} , VCK_{post} e VLK_{pre} , VLK_{post} .

Os cálculos dos vetores colunas VCK_{pre} e VCK_{post} são feitos a partir de uma operação *OU* entre as colunas das matrizes K_{pre} e K_{post} respectivamente, conforme Equação (6.1).

$$\begin{aligned} VCK_{pre} &= \vee_j K_{pre} [j] \\ VCK_{post} &= \vee_j K_{post} [j] \end{aligned} \tag{6.1}$$

Os cálculos dos vetores linhas VLK_{pre} e VLK_{post} são feitos a partir de uma operação *OU* entre as linhas das matrizes K_{pre} e K_{post} respectivamente, conforme Equação(6.2).

$$\begin{aligned} VLK_{pre} &= \vee_i K_{pre} [i] \\ VLK_{post} &= \vee_i K_{post} [i] \end{aligned} \tag{6.2}$$

Tarefa 3 – Calcular os vetores resultantes VC_{Res} e VL_{Res} conforme Equação (6.3).

$$\begin{aligned} VC_{Res} &= VCK_{pre} - VCK_{post} \\ VL_{Res} &= VLK_{pre} - VLK_{post} \end{aligned} \tag{6.3}$$

A Figura 6.13 apresenta os cálculos dos vetores VC_{Res} (A) e VL_{Res} (B) do sistema hidráulico da UPCH.

VCK_{pre}	VCK_{post}	VC_{Res}			
C011	1	C011	0	C011	1
C012	1	C012	0	C012	1
C051	1	C051	0	C051	1
C052	1	C052	0	C052	1
C21	1	C21	1	C21	0
C22	1	C22	1	C22	0
C23	1	C23	1	C23	0
C24	1	C24	1	C24	0
C25	1	C25	1	C25	0
C053	1	C053	0	C053	1
C054	1	C054	0	C054	1
C26	1	C26	1	C26	0
C27	1	C27	1	C27	0
C041	0	C041	1	C041	-1
C042	0	C042	1	C042	-1

(A)

VLK_{pre}	VLK_{post}	VL_{Res}
a021 a022 a023 a024 a025 a026 a027 a028 a029	1 1 1 1 1 1 1 1 1	-
a021 a022 a023 a024 a025 a026 a027 a028 a029	1 1 1 1 1 1 1 1 1	=
a021 a022 a023 a024 a025 a026 a027 a028 a029	0 0 0 0 0 0 0 0 0	

(B)

Figura 6.13 – Cálculos dos vetores resultantes do sistema hidráulico: (A) VC_{Res} e (B) VL_{Res}

Tarefa 4 – Identificar os canais fornecedores e consumidores de recurso.

Nesta tarefa os vetores resultantes VC_{Res} e VL_{Res} são analisados. No vetor coluna resultante VC_{Res} os canais que estiverem representados por '1' são considerados *canais forne-*

cedores de recursos (C_f) para o sistema e por '-1' são considerados como *canais consumidores de recursos* (C_c) do sistema.

No caso do vetor linha resultante VL_{Res} , as agências que estiverem representadas por '1' são consideradas agências consumidoras e por '-1' são consideradas como agências fornecedoras. Os canais conectados a estas agências devem ser considerados como canais limites. Desta forma, para as agências identificadas como fornecedoras, os canais desta agência devem ser identificados na matriz K_{post} e para as agências identificadas como consumidoras os canais desta agência devem ser identificados na matriz K_{pre} .

O resultado desta tarefa está apresentado na Equação (6.4), explicitando os conjuntos de C_f e C_c do sistema hidráulico.

$$\begin{aligned} C_f &= \{C011, C012, C051, C052, C053, C054\} \\ C_c &= \{C041, C042\} \end{aligned} \quad (6.4)$$

Etapa 2 – Identificar os estados operacionais

Conforme seção 5.2.1, esta etapa tem a função de reunir as informações sobre os estados operacionais do sistema. A Tabela 4 apresenta as informações dos estados da UPCH.

Tabela 4 – Tabela de Informações dos estados da UPCH

Código	Nome do estado	Função Relacionada ao estado	Probabilidade de utilização P(Ej)
E1	Vazão variável	Fornecer energia hidráulica com vazão variável	0,4
E2	Vazão constante	Fornecer energia hidráulica com vazão constante	0,5
E3	Máxima vazão	Fornecer energia hidráulica com vazão máxima	0,1

Etapa 3 – Caracterizar as agências controláveis

Conforme seção 5.2.1 esta etapa tem a função de definir os modelos lógicos das agências controláveis, sendo detalhada em quatro tarefas:

- Tarefa 1. *Identificar componentes controláveis*
- Tarefa 2. *Identificar agências controláveis*
- Tarefa 3. *Identificar modelos lógicos dos componentes*
- Tarefa 4. *Definir modelos lógicos das agências*

A Figura 6.14 mostra os resultados dessas tarefas e representa a caracterização das agências controláveis da UPCH.

Rede C/A	Modelo funcional dos componentes	Modelo lógico dos componentes	Modelo lógico das agências
		$EH = SE \wedge EE \wedge FH$	$C24 = C051 \wedge C012 \wedge C21$
		$EH = SE \wedge EE \wedge FH$	$C23 = C052 \wedge C011 \wedge C22$
		$EP_2 = SE \wedge EP_1$	$C29 = C053 \wedge C25$
		$EP_2 = SE \wedge EP_1$	$C212 = C054 \wedge C28$

Figura 6.14 - Caracterização das agências controláveis do SH da UPCH

Etapa 4 - Analisar o fluxo de recursos nas agências controláveis

Conforme seção 5.2.1 , esta etapa tem a função de identificar os fluxos de recursos nas agências controláveis , sendo detalhada em quatro tarefas.

Tarefa 1 - Identificar os vetores canais de controle C_{conEj}

A Figura 6.15 (A) apresenta os vetores canais de controle C_{conEj} , do SH para cada estado do sistema.

No caso da UPCH , os canais de controle do SH são canais fornecedores e os recursos são oriundos do SC. Por outro lado os canais de controle do SC são canais internos e os recursos são oriundos do CLP.

Tarefa 2 - Identificar recursos nos canais pre.

A Figura 6.15(B) apresenta uma tabela que sistematiza esta análise para o estado $E1$ do SH. Analisando a segunda coluna do corpo da tabela, representada pela agência $a023$, observa-se que esta agência é precedida por três canais $C011$, $C052$ e $C22$, onde $C052$ pertence ao conjunto de canais de controle e $C011$ e $C22$ são canais precedentes não controláveis. Sen-

do assim, o canal $C052$ define a ativação ou desativação da agência, a partir da presença ou ausência de recurso no mesmo de acordo com o vetor C_{conEj}

Análise das Agências controláveis do SH da UPCH															
C051 C052 C053 C054				Análise de fluxo de recurso das agências controláveis											
C_{conE1}	1	0	1	0	Estado E1	a022			a023			a026		a027	
C051 C052 C053 C054				Canais pre	C012	C051	C21	C011	C052	C22	C053	C24	C054	C23	
C_{conE2}	0	1	0	1	Recurso	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0
C051 C052 C053 C054				Canais post	C24			C23			26		27		
C_{conE3}	1	1	1	1	Recurso	1			0			1	0		
(A)				(B)											

Figura 6.15 - (A) Vetores canais de controle e (B) Fluxo de recurso nas agências controláveis do SH.

Tarefa 3 – Identificar recursos nos canais post.

Para isso a tabela da Figura 6.15 (B) auxilia nessa análise onde os canais posteriores de cada agência são relacionados com seus respectivos canais precedentes de acordo com o modelo lógico de cada agência apresentada na quarta coluna da tabela da Figura 6.14.

Analisando novamente a agência $a023$, observa-se que no canal $C22$ não existirá recurso ($C22=0$) para o estado $E1$ da UPCH.

Tarefa 4 – Identificar conjunto de canais sem recursos.

De acordo com Figura 6.15 (B), que apresenta a análise de recursos nas agências controláveis do SH para o $E1$, e considerando também os resultados que são encontrados para os estados $E2$ e $E3$, a Equação (6.5) apresenta os conjuntos de canais sem recurso C_{srEj} do SH da UPCH.

$$\begin{aligned}
 C_{srE1} &= \{C052, C054, C23, C27\} \\
 C_{srE2} &= \{C051, C053, C24, C26\} \\
 C_{srE3} &= \{ \}
 \end{aligned}
 \tag{6.5}$$

A Figura 6.16 apresenta os resultados encontrados na Atividade 1 da MACSA para o sistema hidráulico e os que são encontrados aplicando o método para o sistema de controle.

Saídas da Atividade 1 - Caracterizar sistema	
Canais fornecedores e canais consumidores:	Canais sem recursos:
Subsistema Hidráulico	
$C_f = \{C011, C012, C051, C052, C053, C054\}$	$C_{\sigma E1} = \{C052, C054, C23, C27\}$
$C_c = \{C041, C042\}$	$C_{\sigma E2} = \{C051, C053, C24, C26\}$
	$C_{\sigma E3} = \{ \}$
Subsistema de Controle	
$C_f = \{C01, C02\}$	$C_{\sigma E1} = \{C16, C18, C110, C112\}$
$C_c = \{C051, C052, C053, C054\}$	$C_{\sigma E2} = \{C15, C17, C19, C111\}$
	$C_{\sigma E3} = \{ \}$

Figura 6.16 - Saída da atividade 1 – Caracterizar SH e SC

6.2.2 Atividade 2 - Definir configurações do sistema hidráulico

Conforme apresentado na seção 5.2.2 o objetivo da atividade 2 é definir as diferentes configurações operacionais do sistema.

Etapa 1 – Reduzir as matrizes K_{pre} e K_{post} para cada estado do sistema.

Conforme seção 5.2.2, esta etapa tem a função de eliminar da análise da confiabilidade os canais e as agências que não participam de determinado estado operacional.

A Figura 6.17 apresenta as matrizes $K_{preRED1}$ e $K_{postRED1}$ do sistema hidráulico para o estado $E1$ da UPCH. Nessa figura estão ilustradas nas abas parcialmente encobertas as matrizes reduzidas para os estados $E2$ e $E3$, indicando que as mesmas também foram definidas para esses estados. Essa representação com abas parcialmente encobertas será apresentada em figuras posteriores e terá o mesmo significado.

Estado E3		Estado E2		Estado E1 – Matrizes K_{pre} e K_{post} reduzidas do SH				
$K_{preRED1}$				$K_{postRED2}$				
	a021	a022	a023	a024	a025	a026	a028	a029
C011	0	0	1	0	0	0	0	0
C012	0	1	0	0	0	0	0	0
C051	0	1	0	0	0	0	0	0
C21	0	1	0	0	0	0	0	0
C22	0	0	1	0	0	0	0	0
C24	0	0	0	1	0	1	0	0
C25	1	0	0	0	0	0	0	0
C053	0	0	0	0	0	1	0	0
C26	0	0	0	0	0	0	1	0
C041	0	0	0	0	0	0	0	0
C042	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 6.17 - Matrizes K_{pre} e K_{post} reduzidas para o estado $E1$

Etapa 2 – Analisar o fluxo de recurso do sistema reduzido.

Conforme seção 5.2.2 , esta etapa tem a função de verificar se, após a redução dos canais e agências do sistema, os recursos que restaram percorrem o sistema de forma coerente , sendo detalhada em quatro tarefas.

Para sistematizar este procedimento propõe-se a utilização de uma tabela de fluxo de recurso. As tarefas para desenvolver esta etapa são as seguintes:

Tarefa 1 – Identificar os canais fornecedores e consumidores de recursos restantes.

A Equação (6.6) apresenta os conjuntos de canais fornecedores do C_{fRed} e canais consumidores C_{CRed} que restaram do sistema hidráulico.

$$\begin{aligned} C_{fRed} &= \{ C011, C012, C051, C053 \} \\ C_{CRed} &= \{ C041, 042 \} \end{aligned} \tag{6.6}$$

Tarefa 2 – Definir a tabela base de fluxo de recurso.

A Figura 6.18 (A) apresenta a tabela base de fluxo de recurso do sistema hidráulico. Verifica-se que na primeira linha da tabela deve-se alocar em cada coluna um canal fornecedor pertencente ao conjunto C_{fRed} .

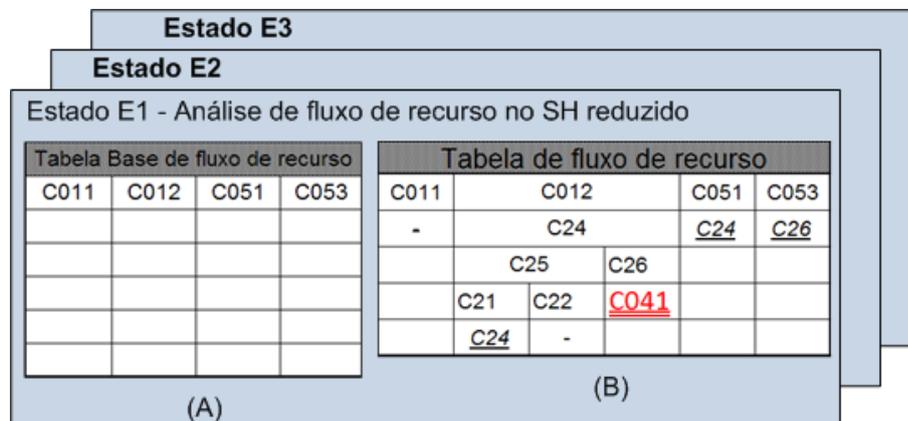


Figura 6.18 - Tabelas de análise do fluxo de recurso do SH

Tarefa 3 – Analisar a coerência de fluxo de recurso.

Nesta tarefa para cada canal fornecedor alocado em uma coluna da tabela verifica-se na matriz $K_{preREDj}$ as agências as quais este canal precede. Uma vez identificada, esta agência deve ser encontrada na matriz $K_{postREDj}$, e anotado na tabela os canais posteriores a esta agência. Nos casos em que foram encontrados canais posteriores às agências, segue-se na ma-

triz $K_{preREDj}$ identificando as agências que estes precedem. Definindo um processo iterativo entre as matrizes $K_{preREDj}$ e $K_{postREDj}$.

A Figura 6.18 (B) apresenta a tabela de fluxo de recurso do sistema hidráulico da UPCH para o estado E1.

Tarefa 4 – Identificar o conjunto de canais de fluxo coerente.

A Equação (6.7) apresenta o conjunto de canais de fluxo coerente do sistema hidráulico reduzido.

$$C_{Fc} = \{C011, C012, C051, C053, C21, C22, C24, C25, C26, C041\} \quad (6.7)$$

Etapa 3 – Definir as configurações operacionais.

Conforme seção 5.2.2, esta etapa tem a função de definir o novo arranjo funcional/estrutural para o sistema em análise de acordo com cada estado operacional.

A partir da manipulação das matrizes reduzidas têm-se as matrizes K_{preEj} e K_{postEj} . A Figura 6.19 e a Figura 6.20 apresentam essas matrizes juntamente com os modelos estrutural e funcional do SH e do SC para o estado E1.

A configuração do SH para o estado E1 está representada pelas matrizes K_{preE1} e K_{postE1} , pelo modelo estrutural/funcional em Rede C/A e pelo diagrama hidráulico, na Figura 6.19 (A), (B) e (C), respectivamente.

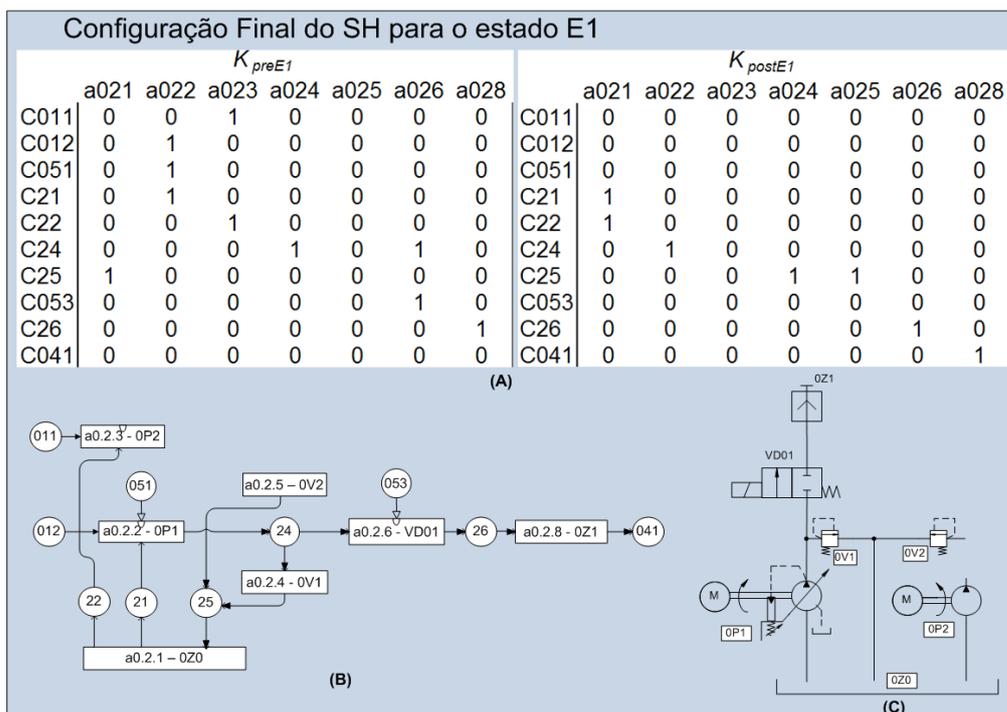


Figura 6.19 - Configuração final do sistema hidráulico para o estado E1

A configuração do SC para o estado $E1$ está representada pelas matrizes K_{preE1} e K_{postE1} , e pelo modelo estrutural/funcional, na Figura 6.20 (A) e (B), respectivamente.

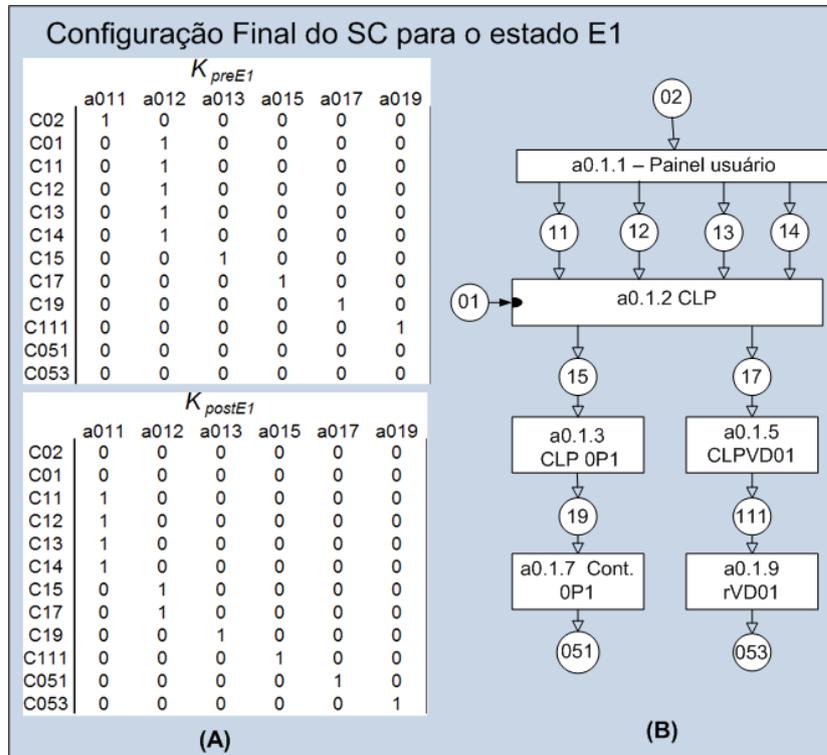


Figura 6.20 - Configuração final do sistema de controle para o estado $E1$

Etapa 4 – Definir os vetores agências.

Conforme seção 5.2.2 esta etapa tem a função de definir os vetores com as agências que restaram no sistema para cada estado, sendo detalhada em três tarefas.

Para o estudo de caso em questão, este vetor representa as agências que definirão os componentes que influenciam a operação do sistema em cada estado operacional da UPCH.

Tarefa 1 – Definir os vetores agência das matrizes K_{preEj} e K_{postEj} .

Aplicar a operação OU entre as linhas da matriz K_{preE1} e K_{postE1} , apresentadas na Figura 6.21 de acordo com a Equação(6.8). Assim definem-se os vetores $Va02_{preE1}$ e $Va02_{postE1}$ para o SH.

$$\begin{aligned}
 Vax_{preEj} &= \vee_i K_{pre} [i] \\
 Vax_{postEj} &= \vee_i K_{post} [i]
 \end{aligned}
 \tag{6.8}$$

Tarefa 2 – Definir os vetores agência resultante Vax_{resEj} .

Aplicar operação *OU* entre os vetores $Va02_{preE1}$ e $Va02_{postE1}$ encontrar o vetor $Va02_{resE1}$, conforme Equação (6.9). A Figura 6.21 representa estas operações para o sistema hidráulico.

$$Vax_{resEj} = Vax_{postEj} \vee Vax_{preEj} \tag{6.9}$$

Estado E3							
Estado E2							
Estado E1 - Cálculo do vetor agência resultante do SH							
	a021	a022	a023	a024	a025	a026	a028
$Va02_{preE1}$	1	1	1	1	0	1	1
				\vee			
	a021	a022	a023	a024	a025	a026	a028
$Va02_{postE1}$	1	1	0	1	1	1	1
				$=$			
	a021	a022	a023	a024	a025	a026	a028
$Va02_{ResE1}$	1	1	1	1	1	1	1

Figura 6.21 - Representação do cálculo do vetor $Va2_{resE1}$ do sistema hidráulico

Tarefa 3 – Definir os vetores agência do sistema para cada estado.

O vetor agência do estado *E1* do SH é representado pela transposta negativa do vetor $Va02_{resE1}$, conforme Equação (6.10)

$$Vax_{Ej} = -Vax_{resEj}^T \tag{6.10}$$

A Figura 6.22 (A), (B) e (C) mostra os vetores agências da UPCH, SH e SC respectivamente.

Saídas da Atividade 2 – Definir configurações

Vetor Agencia da UPCH

$$Va0 = \begin{matrix} a01 & -1 \\ a02 & -1 \end{matrix}$$

(A)

Vetores Agencias do SH:

$$Va02_{E1} = \begin{matrix} a021 & -1 \\ a022 & -1 \\ a023 & -1 \\ a024 & -1 \\ a025 & -1 \\ a026 & -1 \\ a028 & -1 \end{matrix}$$

(B)

$$Va02_{E2} = \begin{matrix} a021 & -1 \\ a022 & -1 \\ a023 & -1 \\ a024 & -1 \\ a025 & -1 \\ a027 & -1 \\ a029 & -1 \end{matrix}$$

$$Va02_{E3} = \begin{matrix} a021 & -1 \\ a022 & -1 \\ a023 & -1 \\ a024 & -1 \\ a025 & -1 \\ a026 & -1 \\ a027 & -1 \\ a028 & -1 \\ a029 & -1 \end{matrix}$$

Vetores Agencias do SC:

$$Va01_{E1} = \begin{matrix} a011 & -1 \\ a012 & -1 \\ a013 & -1 \\ a015 & -1 \\ a017 & -1 \\ a019 & -1 \end{matrix}$$

$$Va01_{E2} = \begin{matrix} a011 & -1 \\ a012 & -1 \\ a014 & -1 \\ a016 & -1 \\ a018 & -1 \\ a0110 & -1 \end{matrix}$$

$$Va01_{E3} = \begin{matrix} a011 & -1 \\ a012 & -1 \\ a013 & -1 \\ a014 & -1 \\ a015 & -1 \\ a016 & -1 \\ a017 & -1 \\ a018 & -1 \\ a019 & -1 \\ a0110 & -1 \end{matrix}$$

(C)

Figura 6.22 – Saída da atividade 2 – Definir configurações

6.2.3 Atividade 3 - Definir modelos de confiabilidade da UPCH

Conforme apresentado na seção 5.2.3 o objetivo da atividade 3 é definir os modelos de confiabilidade para cada configuração operacional do sistema, sendo detalhada em três etapas.

Etapa 1 – Definir os vetores subsistemas.

Conforme a seção 5.2.3 , esta etapa tem a função de definir os *vetores subsistema* (S_{naxEj}), os quais são baseados nos vetores agência gerados na Atividade 2.

A Figura 6.23 apresenta os vetores subsistemas para o estado *E1* da UPCH.

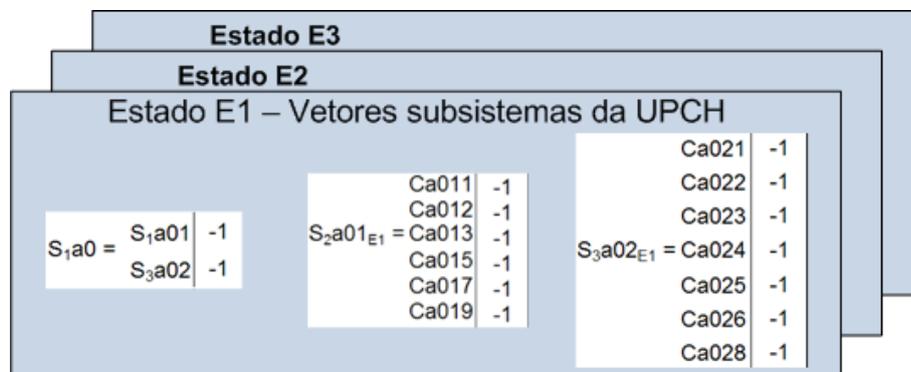


Figura 6.23 - Vetores subsistemas do estado E1 da UPCH

Etapa 2 – Definir as matrizes de incidência das árvores de sucesso.

Conforme a seção 5.2.3 , esta etapa tem a função de definir as matrizes de incidência das árvores de sucesso do sistema, sendo detalhada em três tarefas.

Tarefa 1 – Definir uma matriz $M_{m \times nsb}$.

Neste estudo de caso, para o estado E1, de acordo com os S_{naxE1} a UPCH está representada por 13 componentes e 3 subsistemas. Observa-se que mesmo que $Sa0$ represente o sistema global (UPCH), este também é contabilizado como um subsistema. A matriz (6.13) representa a $M_{m \times nsb}$ para o do estado *E1* da UPCH.

$$M_{18 \times 3} = \begin{vmatrix} 1_{1,1} & \dots & 0_{1,3} \\ \dots & \dots & \dots \\ 0_{16,1} & \dots & 0_{16,3} \end{vmatrix} \tag{6.11}$$

Tarefa 2 – Concatenar os vetores subsistema na Matriz $M_{m \times nsb}$.

Na seção 5.2.3 a Equação (5.1) apresenta a regra para definição das posições de concatenação dos S_{naxE1} .

A Figura 6.24 representa esta definição e a posição de cada vetor na matriz para o estado $E1$ da UPCH.

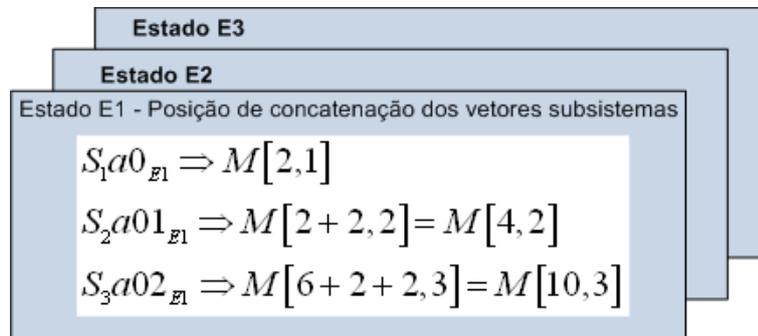


Figura 6.24 - Definição da posição dos vetores subsistemas na $M_{m \times nsb}$, para o estado $E1$ da UPCH

Tarefa 3 – Definir as matrizes de incidência das árvores de sucesso.

Para Definir as matrizes de incidência (MI_{Ej}) deve-se inserir na matriz $M_{m \times nsb}$ os S_{naxE1} nas posições definidas na tarefa anterior, conforme Figura 6.24 e identificar as colunas e linhas da mesma, definindo os lugares e transições das árvores de sucesso do sistema. A Figura 6.25 apresenta as MI_{Ej} das árvores de sucesso da UPCH para os três estados operacionais do sistema.

		T1	T2	T3			T1	T2	T3			T1	T2	T3
$MI_{E1} =$	S_1a0	1	0	0	$MI_{E2} =$	S_1a0	1	0	0	$MI_{E3} =$	S_1a0	1	0	0
	S_2a01	-1	1	0		S_2a01	-1	1	0		S_2a01	-1	1	0
	S_3a02	-1	0	1		S_3a02	-1	0	1		S_3a02	-1	0	1
	$Ca011$	0	-1	0		$Ca011$	0	-1	0		$Ca011$	0	-1	0
	$Ca012$	0	-1	0		$Ca012$	0	-1	0		$Ca012$	0	-1	0
	$Ca013$	0	-1	0		$Ca014$	0	-1	0		$Ca013$	0	-1	0
	$Ca015$	0	-1	0		$Ca016$	0	-1	0		$Ca014$	0	-1	0
	$Ca017$	0	-1	0		$Ca018$	0	-1	0		$Ca015$	0	-1	0
	$Ca019$	0	-1	0		$Ca0110$	0	-1	0		$Ca016$	0	-1	0
	$Ca021$	0	0	-1		$Ca021$	0	0	-1		$Ca017$	0	-1	0
	$Ca022$	0	0	-1		$Ca022$	0	0	-1		$Ca018$	0	-1	0
	$Ca023$	0	0	-1		$Ca023$	0	0	-1		$Ca019$	0	-1	0
	$Ca024$	0	0	-1		$Ca024$	0	0	-1		$Ca0110$	0	-1	0
	$Ca025$	0	0	-1		$Ca025$	0	0	-1		$Ca021$	0	0	-1
$Ca026$	0	0	-1	$Ca027$	0	0	-1	$Ca022$	0	0	-1			
$Ca028$	0	0	-1	$Ca029$	0	0	-1	$Ca023$	0	0	-1			
								$Ca024$	0	0	-1			
								$Ca025$	0	0	-1			
								$Ca026$	0	0	-1			
								$Ca027$	0	0	-1			
								$Ca028$	0	0	-1			
								$Ca029$	0	0	-1			

Figura 6.25 - Matrizes de incidência das árvores de sucesso da UPCH

Etapa 3 – Representação gráfica das árvores de sucesso.

Conforme seção 5.2.3 esta etapa tem a função de representar as Árvores de Sucesso na forma gráfica.

A partir da definição das MI_{Ej} obtêm-se os modelos de confiabilidade do sistema para cada estado operacional da UPCH, conforme apresentado na Figura 6.26. A representação destes modelos de confiabilidade em árvore de sucesso permite a aplicação de análises qualitativas ao sistema.

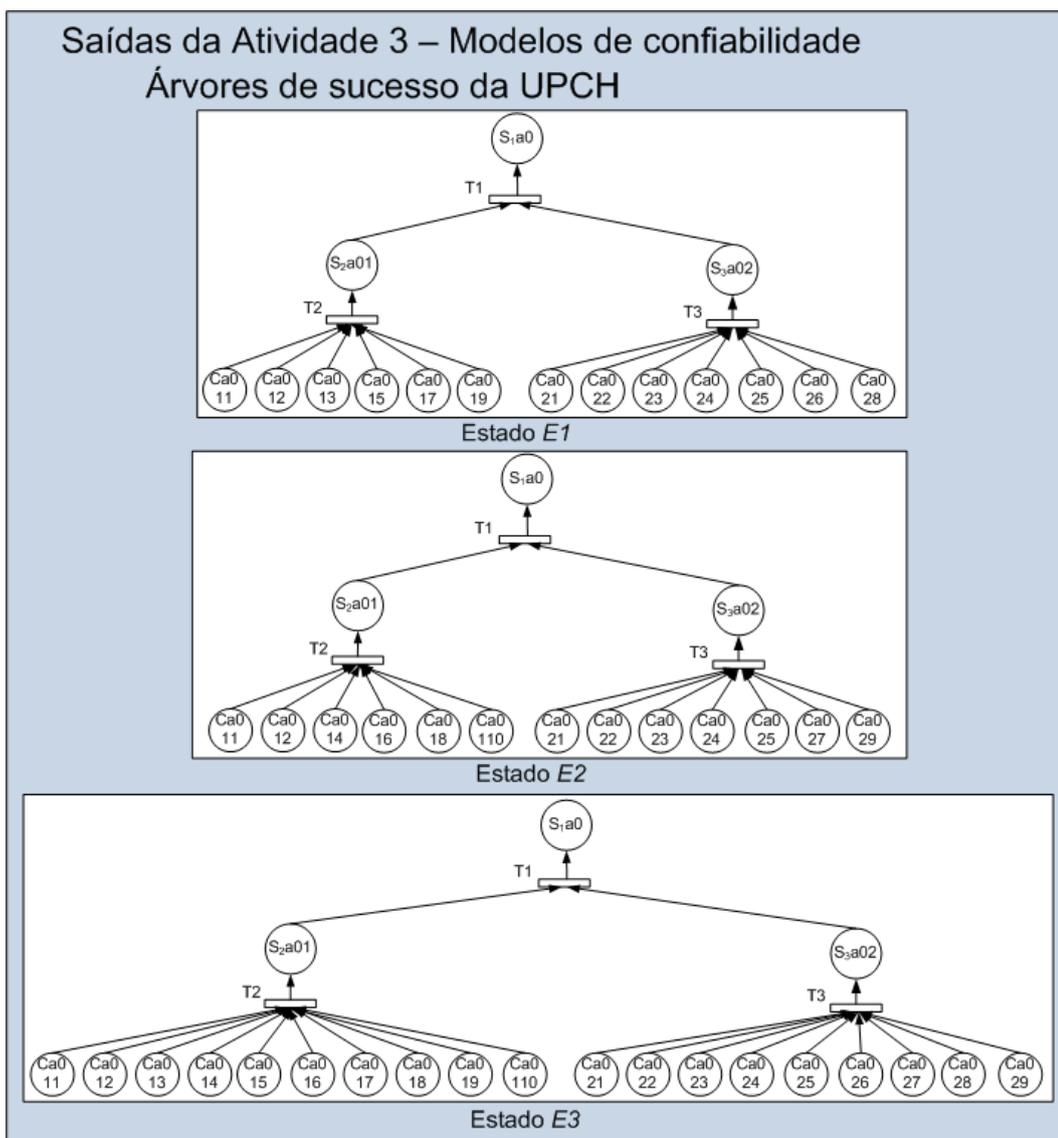


Figura 6.26 – Árvores de sucesso da UPCH para os estados E1, E2 e E3

6.2.4 Atividade 4 - Estimar confiabilidade da UPCH

Conforme apresentado na seção 5.2.4 o objetivo da atividade 4 é estimar a confiabilidade do sistema, sendo detalhada em três etapas.

Etapa 1 – Definir dados dos componentes.

Conforme seção 5.2.4 , esta etapa tem a função de gerar a tabela de componentes do sistema, com suas respectivas características e valores de taxas de falhas.

A Tabela 5 apresenta os dados dos componentes para a análise da confiabilidade da UPCH.

Tabela 5 - Tabela de componentes para análise da confiabilidade da UPCH

Componentes			Taxas de falha
Agência	Simbolo	Nome	
CCa011	PU	Painel do usuário	9,00E-10
Ca012	CLP	Controlador lógico programável	9,00E-10
Ca013	CLP0P1	Contato do conjunto bomba 1 no CLP	1,87E-06
Ca014	CLP0P2	Contato do conjunto bomba 2 no CLP	1,87E-06
Ca015	CLPVDO1	Contato da Válvula Direcional VD01 no CL	1,87E-06
Ca016	CLPVDO2	Contato da Válvula Direcional VD02 no CL	1,87E-06
Ca017	rVD01	Circuito do relé da Válvula Direcional VD01	3,00E-07
Ca018	rVD02	Circuito do relé da Válvula Direcional VD02	3,00E-07
Ca019	Cont. 0P1	Contato régua do conjunto bomba 1	1,87E-06
Ca0110	Cont. 0P2	Contato régua do conjunto bomba 2	1,87E-06
Ca021	0Z0	Reservatório de Óleo	3,13E-06
Ca022	0P1	Conjunto bomba hidráulica variável	2,08E-05
Ca023	0P2	Conjunto bomba hidráulica constante	7,52E-06
Ca024	0V1	Válvula de alívio 1	8,68E-07
Ca025	0V2	Válvula de alívio 2	8,68E-07
Ca026	VD01	Válvula Direcional VD01	1,89E-05
Ca027	VD02	Válvula Direcional VD02	1,89E-05
Ca028	0Z1	Engate rápido p1	1,78E-05
Ca029	0Z2	Engate rápido p2	1,78E-05

Etapa 2 – Definir probabilidade de utilização dos estados operacionais.

Conforme seção 5.2.4 , esta etapa tem a função de definir a probabilidade de utilização do estado $P(E_j)$ para os componentes do sistema, sendo detalhada em duas tarefas.

Tarefa 1 – Gerar uma coluna para cada estado operacional na tabela de dados dos componentes.

Tarefa 2 – Atribuir os valores da probabilidade de utilização de cada estado $P(E_j)$.

A Tabela 6 apresenta a análise de confiabilidade da UPCH com as respectivas $P(E_j)$ dos componentes para cada estado operacional do sistema.

Tabela 6 Tabela de probabilidade de utilização dos estados operacionais da UPCH

Componentes				Probabilidade de utilização		
Agência	Símbolo	Nome	Taxas de falha	Estado 1 P(E1)	Estado 2 P(E2)	Estado 3 P(E3)
CCa011	PU	Painel do usuário	9,00E-10	0,4	0,5	0,1
Ca012	CLP	Controlador lógico programável	9,00E-10	0,4	0,5	0,1
Ca013	CLP0P1	Contato do conjunto bomba 1 no CLP	1,87E-06	0,4		0,1
Ca014	CLP0P2	Contato do conjunto bomba 2 no CLP	1,87E-06		0,5	0,1
Ca015	CLPVDO1	Contato da Válvula Direcional VD01 no CL	1,87E-06	0,4		0,1
Ca016	CLPVDO2	Contato da Válvula Direcional VD02 no CL	1,87E-06		0,5	0,1
Ca017	rVD01	Circuito do relé da Válvula Direcional VD01	3,00E-07	0,4		0,1
Ca018	rVD02	Circuito do relé da Válvula Direcional VD02	3,00E-07		0,5	0,1
Ca019	Cont. 0P1	Contato régua do conjunto bomba 1	1,87E-06	0,4		0,1
Ca0110	Cont. 0P2	Contato régua do conjunto bomba 2	1,87E-06		0,5	0,1
Ca021	0Z0	Reservatório de Óleo	3,13E-06	0,4	0,5	0,1
Ca022	0P1	Conjunto bomba hidráulica variável	2,08E-05	0,4	0,5	0,1
Ca023	0P2	Conjunto bomba hidráulica constante	7,52E-06	0,4	0,5	0,1
Ca024	0V1	Válvula de alívio 1	8,68E-07	0,4	0,5	0,1
Ca025	0V2	Válvula de alívio 2	8,68E-07	0,4	0,5	0,1
Ca026	VD01	Válvula Direcional VD01	1,89E-05	0,4		0,1
Ca027	VD02	Válvula Direcional VD02	1,89E-05		0,5	0,1
Ca028	0Z1	Engate rápido p1	1,78E-05	0,4		0,1
Ca029	0Z2	Engate rápido p2	1,78E-05		0,5	0,1

Etapa 3 – Estimar confiabilidade.

Conforme seção 5.2.4 , esta etapa tem a função de apresentar o cálculo de estimativa da confiabilidade e a avaliação do tempo de uso efetivo de cada componente do sistema, sendo detalhada em duas tarefas.

Tarefa 1 – Calcular o tempo de uso efetivo.

Nesta tarefa calcula-se o tempo de uso efetivo (t_{ef}) de cada componente do sistema durante o tempo de uso considerado, conforme Equação (6.13).

$$t_{ef(i)} = 2500 \times \sum_j P(E_{ij}) \tag{6.12}$$

Tarefa 2 – Calcular a estimativa da confiabilidade.

Neste estudo de caso, o tempo de uso (t) utilizado foi de 2500 horas, conforme Equação (6.12).

$$R[t, P(E_{ij})] = exp \left\{ \left[\sum_i -\lambda_i \cdot \left(\sum_j P(E_{ij}) \right) \cdot 2500 \right] \right\} \tag{6.13}$$

A Tabela 7 apresenta os cálculos de confiabilidade da UPCH realizada por meio da MACSA. Na última coluna da tabela apresenta-se a estimativa da confiabilidade desconside-

rando o parâmetro $P(E_j)$, ou seja, neste cálculo todos os componentes são considerados ativados durante todo o tempo de uso, independente do estado operacional do sistema.

Tabela 7 - Tabela de cálculo da confiabilidade da UPCH

Componentes			Taxas de falha	Probabilidade de utilização			Tempo de uso efetivo (horas)	confiabilidade MACSA $\left(\lambda_i \times \sum P(E_i)\right)$	confiabilidade (Estado único) λ_i
Agência	Símbolo	Nome		Estado 1 P(E1)	Estado 2 P(E2)	Estado 3 P(E3)			
CCa011	PU	Painel do usuário	9,00E-10	0,4	0,5	0,1	2500	-9,00E-10	-9,00E-10
Ca012	CLP	Controlador lógico programável	9,00E-10	0,4	0,5	0,1	2500	-9,00E-10	-9,00E-10
Ca013	CLP0P1	Contato do conjunto bomba 1 no CLP	1,87E-06	0,4		0,1	1250	-9,35E-07	-1,87E-06
Ca014	CLP0P2	Contato do conjunto bomba 2 no CLP	1,87E-06		0,5	0,1	1500	-1,12E-06	-1,87E-06
Ca015	CLPVDO1	Contato da Válvula Direcional VD01 no CL	1,87E-06	0,4		0,1	1250	-9,35E-07	-1,87E-06
Ca016	CLPVDO2	Contato da Válvula Direcional VD02 no CL	1,87E-06		0,5	0,1	1500	-1,12E-06	-1,87E-06
Ca017	rVD01	Circuito do relé da Válvula Direcional VD01	3,00E-07	0,4		0,1	1250	-1,50E-07	-3,00E-07
Ca018	rVD02	Circuito do relé da Válvula Direcional VD02	3,00E-07		0,5	0,1	1500	-1,80E-07	-3,00E-07
Ca019	Cont. 0P1	Contato régua do conjunto bomba 1	1,87E-06	0,4		0,1	1250	-9,35E-07	-1,87E-06
Ca0110	Cont. 0P2	Contato régua do conjunto bomba 2	1,87E-06		0,5	0,1	1500	-1,12E-06	-1,87E-06
Ca021	OZ0	Reservatório de Óleo	3,13E-06	0,4	0,5	0,1	2500	-3,13E-06	-3,13E-06
Ca022	0P1	Conjunto bomba hidráulica variável	2,08E-05	0,4	0,5	0,1	2500	-2,08E-05	-2,08E-05
Ca023	0P2	Conjunto bomba hidráulica constante	7,52E-06	0,4	0,5	0,1	2500	-7,52E-06	-7,52E-06
Ca024	0V1	Válvula de alívio 1	8,68E-07	0,4	0,5	0,1	2500	-8,68E-07	-8,68E-07
Ca025	0V2	Válvula de alívio 2	8,68E-07	0,4	0,5	0,1	2500	-8,68E-07	-8,68E-07
Ca026	VD01	Válvula Direcional VD01	1,89E-05	0,4		0,1	1250	-9,45E-06	-1,89E-05
Ca027	VD02	Válvula Direcional VD02	1,89E-05		0,5	0,1	1500	-1,13E-05	-1,89E-05
Ca028	OZ1	Engate rápido p1	1,78E-05	0,4		0,1	1250	-8,90E-06	-1,78E-05
Ca029	OZ2	Engate rápido p2	1,78E-05		0,5	0,1	1500	-1,07E-05	-1,78E-05
Somatório do Exponente $\sum (\lambda_i \times \sum P(E_i)) \times t$							-2,00E-01	-2,96E-01	
Confiabilidade $\exp \left[\sum (\lambda_i \times \sum P(E_i)) \times t \right]$							0,819	0,744	

6.2.5 Atividade 5 - Avaliar confiabilidade da UPCH

Conforme apresentado na seção 5.2.5 o objetivo da atividade 5 é avaliar a análise de confiabilidade do sistema.

Neste estudo de caso, considerou-se o valor de confiabilidade estimado dentro dos padrões necessários para a aplicação deste equipamento hidráulico. Salienta-se ainda que não houve alteração na concepção do sistema, sendo assim considera-se que os custos do produto não foram afetados para garantir essa confiabilidade do equipamento.

Desta forma, considera-se que a concepção da UPCH está aprovada do ponto de vista do atributo confiabilidade, e direciona-se os dados de análise para a atividade 6 para documentação.

6.2.6 Atividade 6 – Documentar a análise de confiabilidade da UPCH

Conforme apresentado na seção 5.2.6 o objetivo da atividade 6 é registrar os resultados da análise de confiabilidade do sistema.

Resultados da análise de confiabilidade da UPCH

A análise de confiabilidade da UPCH foi realizada para um tempo de uso $t = 2500$ horas, dentro de um ambiente adequado para o equipamento desempenhar suas funções.

Além disso, considerou-se os diferentes estados operacionais da UPCH distribuiu-se da seguinte forma, durante o tempo t : E1 - 40%, E2 - 50% e E3 - 10%.

Para as condições citadas acima a função de confiabilidade da UPCH está representada no gráfico da Figura 6.27. Neste gráfico apresenta-se uma curva da função confiabilidade estimada pela MACSA e outra que foi estimada considerando a UPCH em estado único, ou seja, considerando que todos os componentes ficaram ativados durante todo o tempo t .

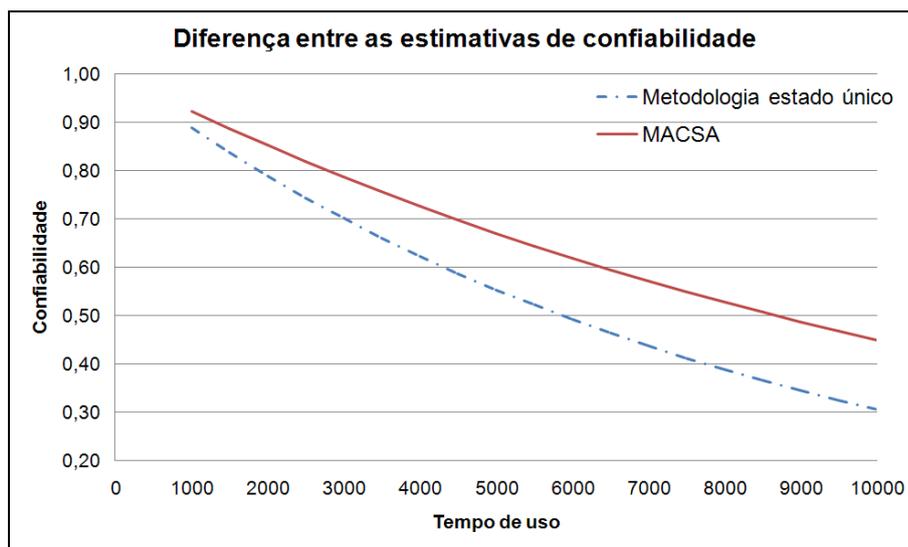


Figura 6.27 – Gráfico comparativo de resultados da estimativa de confiabilidade da UPCH

A Figura 6.28 apresenta um gráfico que permite uma análise sobre a porcentagem de componentes ativados e desativados na UPCH durante o tempo t .

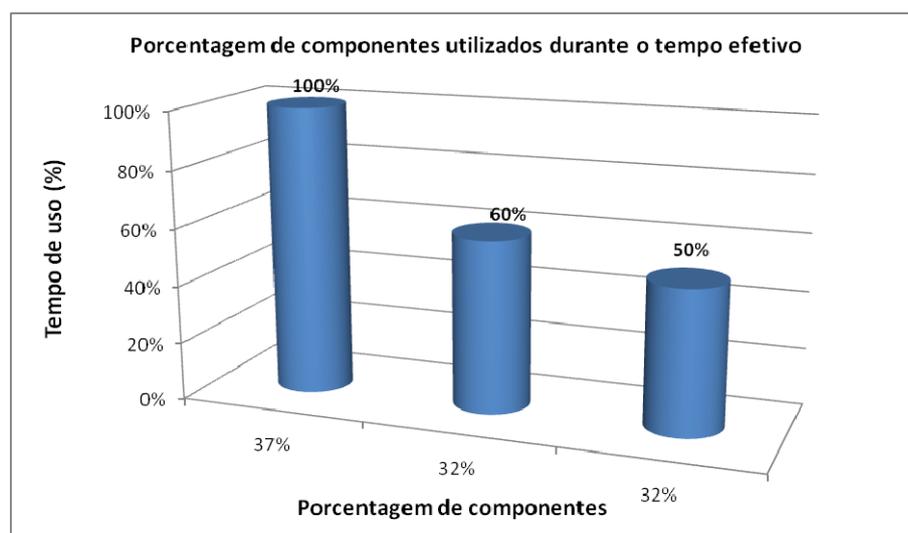


Figura 6.28 – Gráfico de porcentagem de componentes x tempo de uso efetivo

Neste gráfico percebe-se que apenas 37% dos componentes são considerados ativos durante todo o tempo de uso do sistema, ou seja, em torno de 63% dos componentes ficam desativados em algum momento desse tempo. Além disso, em torno de 32% dos componentes ficam ativados apenas metade do tempo de uso do sistema.

A Figura 6.29 apresenta um gráfico que permite uma análise sobre o tempo de uso efetivo de cada componente da UPCH durante o tempo t .

Nesta análise ressaltam-se as duas válvulas direcionais, componentes relevantes nos sistemas hidráulicos e que apresentam uma taxa de falha relativamente alta e um valor de aquisição elevado, se mantêm ativas em torno de 50 a 60 % do tempo de uso.

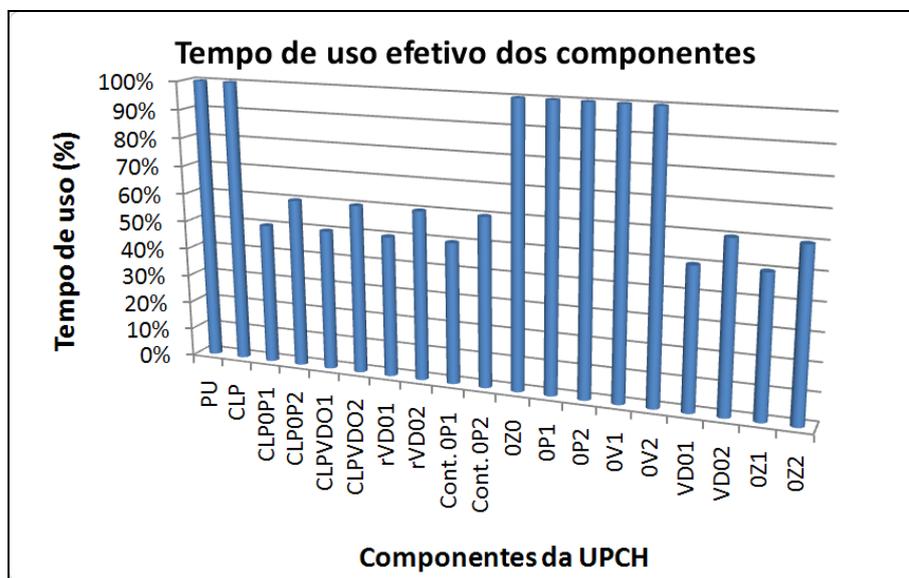


Figura 6.29 – Gráfico componentes da UPCH x tempo de uso efetivo

6.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A aplicação da MACSA no estudo da UPCH simplificada mostrou-se eficiente na análise da confiabilidade de sistemas automáticos. Neste tópico alguns resultados desta análise são comentados.

As Figura 6.19 (C) e Figura 6.20 (B) mostram a modificação estrutural e funcional na estrutura física do sistema hidráulico e na estrutura do modelo em Rede C/A do sistema de controle, respectivamente. No caso do SH observa-se que a válvula direcional (VD02) e o engate rápido da “linha dois” (OZ2) são eliminados do diagrama hidráulico, pois os mesmos não são solicitados para atender a função do estado E1, além disso, eles ficam isolados, ou seja, nenhum recurso acessa esses componentes. Desta forma, apenas os componentes que restaram nos modelos funcional/estrutural do sistema estão relacionados com o atendimento

da função do estado, neste caso $E1$. Isso significa que apenas estes componentes irão compor o modelo de confiabilidade para este estado do sistema.

A definição do modelo de confiabilidade é uma tarefa fundamental para análise quantitativa e qualitativa do atributo de confiabilidade do sistema. Isso corresponde à atividade 3 da MACSA, e nesta tese, propôs-se desenvolver o modelo de confiabilidade de forma automática. Tal feito pode ser constatado na Figura 6.26, na qual apresenta-se as Árvore de Sucesso para cada estado operacional da UPCH.

As diferentes configurações definidas para cada estado do sistema pode mascarar o tempo efetivo de uso dos componentes do sistema, para isso a MACSA propõe este cálculo para todos os componentes do sistema. Conforme apresentado na Figura 6.28, na qual o gráfico possibilitou uma análise sobre a porcentagem de componentes ativados e desativados durante o tempo de uso considerado. Além disso, a Figura 6.29 apresenta a avaliação do tempo de uso para cada componente da UPCH.

A estimativa da confiabilidade proposta pela MACSA foi desenvolvida considerando os diferentes estados operacionais que a UPCH poderá assumir durante sua vida útil. Também foi calculada a confiabilidade considerando o sistema em estado único. A Figura 6.27 mostra a diferença entre as estimativas de confiabilidade para os dois métodos, nessa análise percebe-se que a diferença entre as duas estimativas varia em função do tempo de uso considerado.

O resultado da estimativa da confiabilidade proposta pela MACSA é de $R[t, P(E_{ij})] = 0,819$, enquanto a estimativa de confiabilidade, onde não é considerado o parâmetro probabilidade de utilização de cada estado operacional do sistema $P(E_{ij})$, ou seja a UPCH é tratada como um sistema de estado único, é de $R(t) = 0,744$, conforme Tabela 7.

CAPÍTULO 7 - ESTUDO DE CASO 2 - SPCS

Neste capítulo é apresentado um segundo estudo de caso para verificar a aplicação da MACSA, agora em um sistema pneumático automatizado. A SPCS (*System for the Pneumatic Circuits Sizing*) é uma bancada didática para dimensionamento de sistemas pneumáticos desenvolvida no LASHIP/EMC/UFSC. Além do objetivo didático acerca do dimensionamento de componentes, a SPCS também contempla o estudo de automação de processos e programação de CLPs.

A aplicação da MACSA baseou-se nos documentos desenvolvidos durante o processo de projeto do sistema, tais como, modelo funcional/estrutural em Rede C/A, modelo comportamental em Grafset, diagramas pneumáticos e elétricos.

7.1 DESCRIÇÃO DA SPCS

A SPCS é uma bancada que apresenta um sistema de manipulação de peça composta por quatro estações de trabalho, as quais podem trabalhar de forma totalmente ou parcialmente integrada. A função da bancada é transportar e manipular cubos de diferentes materiais mediante a ação dos atuadores pneumáticos. A Figura 7.1 apresenta uma foto da SPCS



Figura 7.1 - Bancada didática para dimensionamento de sistemas pneumáticos - SPCS

O caráter multidisciplinar, modular, de flexibilidade e de automação da SPCS vem ao encontro da tendência de sistemas automáticos ou sistemas multifuncionais cada vez mais solicitados pelo mercado. A aplicação da MACSA nesta bancada tem como objetivo mostrar

a versatilidade de aplicação da metodologia para esses sistemas, que utilizam como atuação sistemas hidráulicos, pneumáticos e elétricos.

Para estimar a confiabilidade do sistema utilizando a MACSA considerou-se que a SPCS pode fazer o transporte da peça a partir de quatro diferentes estados operacionais, nos quais as estações trabalham de forma integrada em diferentes cenários.

O sistema de transporte da SPCS utiliza as estações de forma integrada. O ciclo de operação começa na estação 1, passando pelas estações 2 e 3 e encerrando na estação 4. O transporte do cubo, o qual simula a carga no sistema, de uma estação para outra, é feito mediante a ação dos atuadores pneumáticos.

A estação 1 compreende o uso dos seguintes atuadores: cilindro giratório, garra e cilindro linear. A Figura 7.2 (A) apresenta o diagrama pneumático dessa estação de trabalho. A estação 2 compreende o uso de dois atuadores, mas de apenas um tipo: cilindro linear. Porém, usam-se esses atuadores em duas posições distintas, um na vertical e outro na horizontal ou inclinado, Figura 7.2 (B).

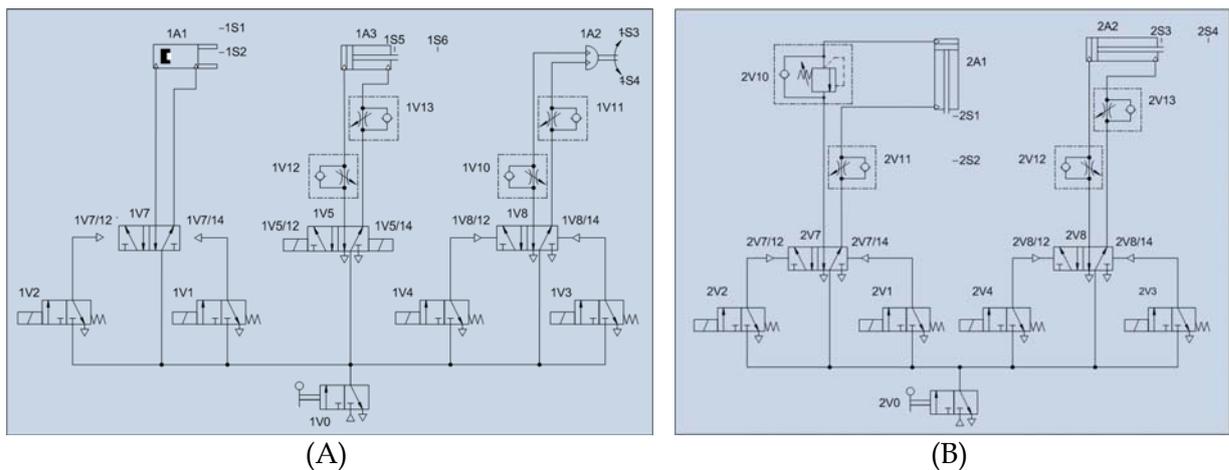


Figura 7.2 – Diagramas pneumáticos da SPCS: (A) Estação 1 (B) Estação 2

A estação 3 está equipada com dois atuadores, uma ventosa e um cilindro linear, conforme Figura 7.3 (A). A estação 4 compreende o uso de dois atuadores, mas de apenas um tipo, cilindro linear. Cada cilindro pneumático está acoplado a um cilindro hidráulico, visando aplicar uma carga contrária ao movimento do cilindro pneumático. A Figura 7.3 (B) apresenta o diagrama pneumático da estação 4.

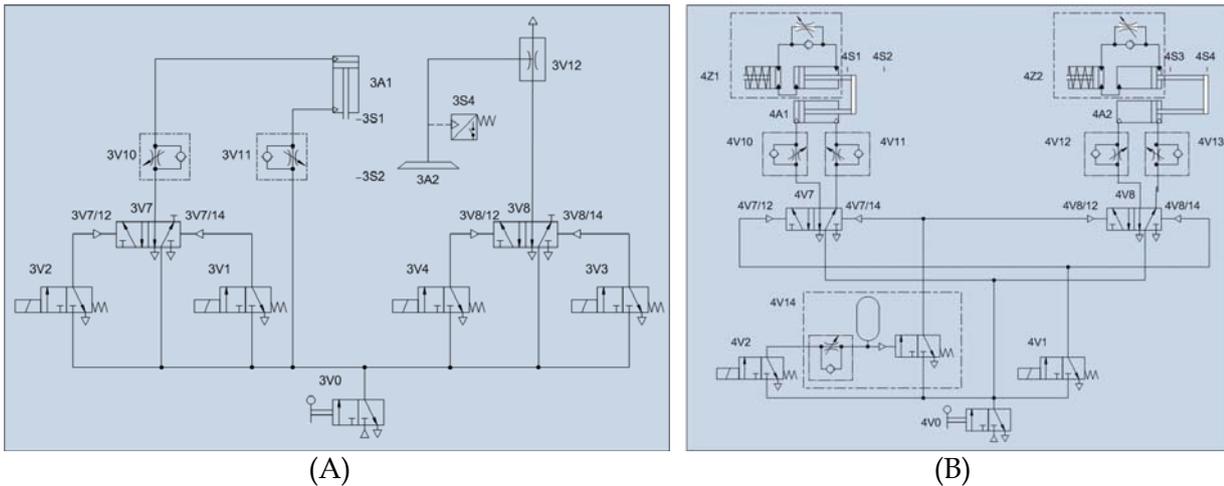
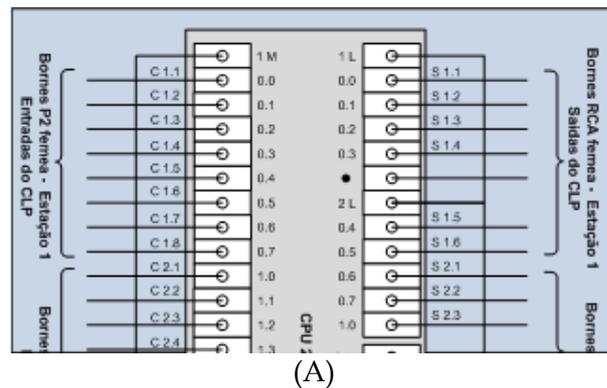
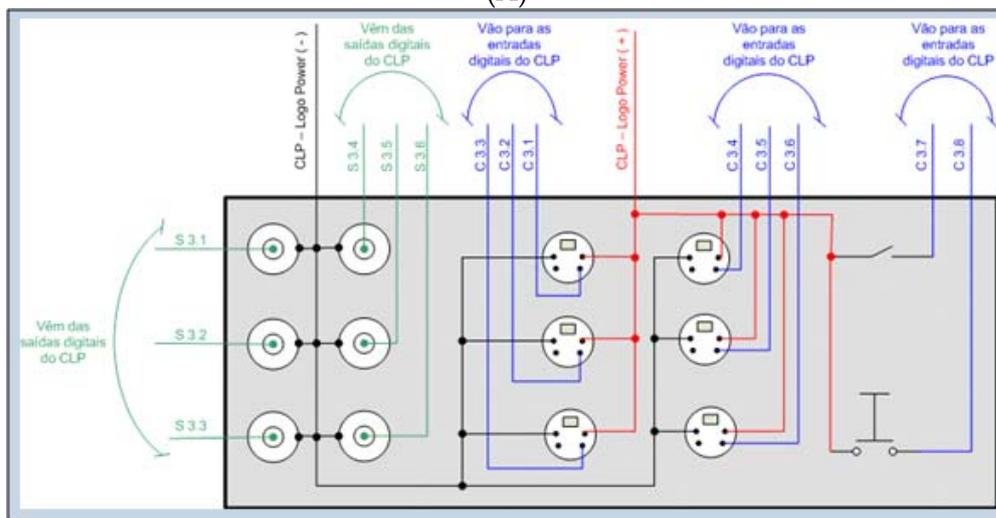


Figura 7.3 - Diagramas pneumáticos da SPCS (A) Estação 3 (B) Estação 4

O sistema de controle da SPCS é composto por um CLP e por caixas de contatos elétricos para cada estação. A Figura 7.4 (A) apresenta os diagramas das ligações de entradas e saídas do CLP para a estação 1. A Figura 7.4 (B) mostra o diagrama dos contatos elétricos da estação 3 que recebem e enviam informações da estação para o CLP.



(A)



(B)

Figura 7.4 - Diagrama elétrico parcial da estação 1 (A) ligações no CLP (B) contatos elétricos da estação 3

7.2 APLICAÇÃO DA MACSA

A aplicação da MACSA neste estudo de caso tem como objetivo estimar a confiabilidade da SPCS. Desta forma, seguem-se os procedimentos atividades, etapas e tarefas, apresentadas nos capítulos 5 e 6, suficientes para a estimativa da confiabilidade. Neste estudo de caso não serão geradas as árvores de sucesso do sistema.

Devido ao grande número de componentes da SPCS, alguns elementos considerados acessórios do sistema, tais como válvulas de controle de vazão e válvulas de controle de pressão serão desconsideradas na análise. No entanto, cabe salientar que esta simplificação será adotada apenas para facilitar a demonstração da aplicação da MACSA, pois a metodologia não está limitada ao tamanho do sistema, uma vez que a mesma está formalizada para ser implementada computacionalmente.

A primeira atividade da MACSA, **Caracterizar sistema**, parte da definição das matrizes K_{pre} e K_{post} do sistema e para isso foram utilizados os modelos funcionais/estruturais desenvolvidos durante a fase de projeto da SPCS. A Figura 7.5 (A) apresenta o modelo da SPCS em Rede C/A e a Figura 7.5 (B) mostra as respectivas matrizes K_{pre} e K_{post} para o segundo nível de desdobramento do sistema, onde são definidos os sistemas de controle e o sistema de transporte da SPCS.

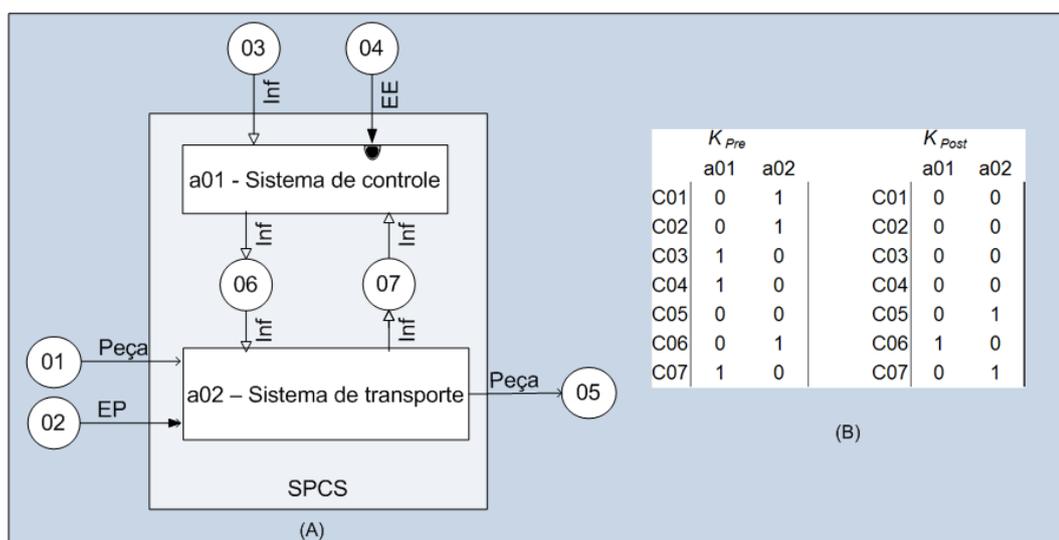


Figura 7.5 – Modelo da SPCS (A) diagrama Rede C/A (B) matrizes K_{pre} e K_{post}

A Figura 7.6 apresenta o detalhamento do sistema de transporte, onde são identificadas as estações de trabalho da UPCH.

Para avaliar a confiabilidade da SPCS para os diferentes cenários citados anteriormente, cada estação de trabalho foi detalhada para que seus componentes fossem identificados e a interação entre os mesmos definidas.

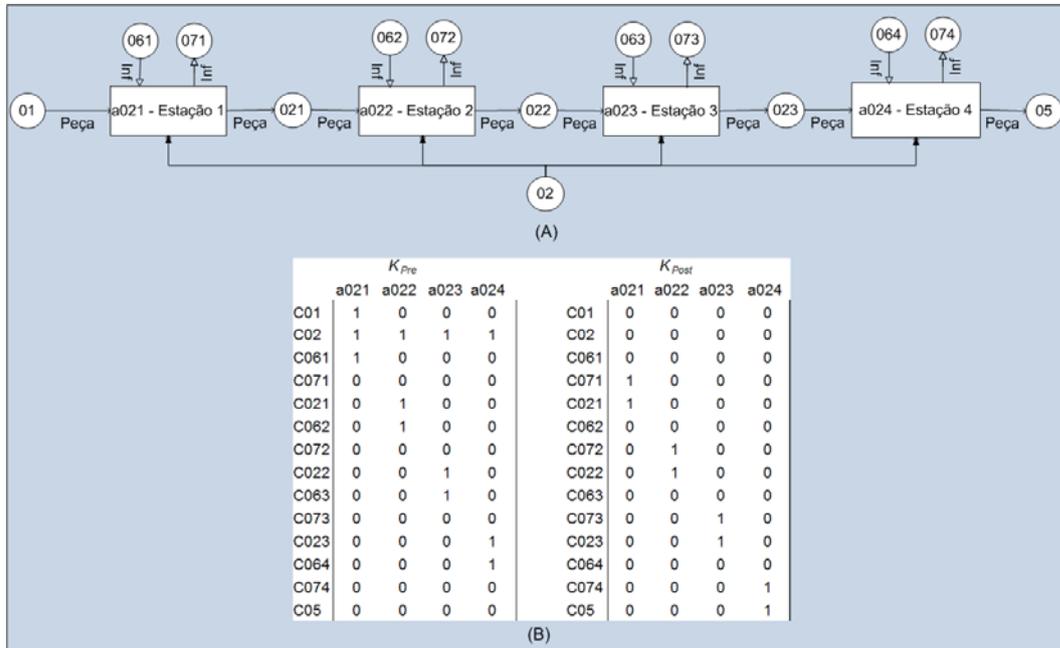


Figura 7.6 - Modelo do sistema de transporte: (A) diagrama Rede C/A (B) matrizes K_{pre} e K_{post}

O sistema de controle foi detalhado, foram identificados seus componentes e a interação entre os mesmos. A Figura 7.7 apresenta o modelo do sistema em Rede C/A, derivado do circuito elétrico da SPCS.

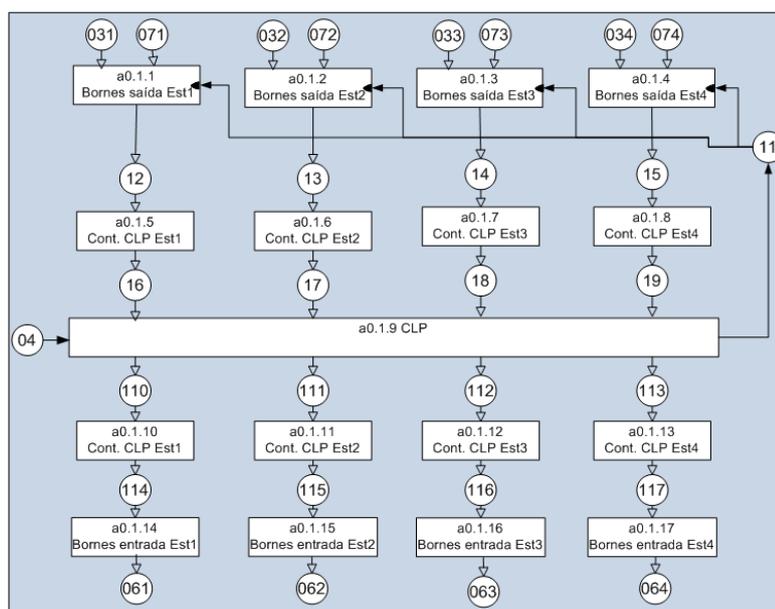


Figura 7.7 - Modelo funcional/estrutural do sistema de controle da SPCS

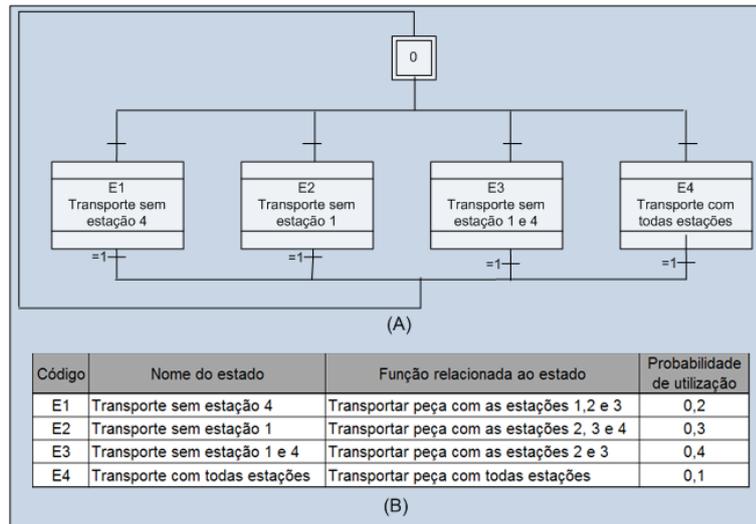


Figura 7.9 – Estados operacionais da SPCS: (A) modelo comportamental; (B) estados operacionais

A definição das funções de cada estado assim como os valores de probabilidade de utilização, $P(E_j)$, são situações e valores hipotéticos, já que a SPCS é uma bancada didática e não tem a função real de transporte dentro de um sistema produtivo.

A Tabela 8 apresenta a caracterização das agências controláveis da SPCS, onde estão definidos os modelos lógicos de cada agência.

Tabela 8 – Caracterização das agências controláveis da SPCS

Componentes controláveis da SPCS			
Símbolos	Nome	Agência	Lógica Funcional da agência
Bs1	Bornes saída estação 1	a015	$C12=C11 \wedge C031 \wedge C071$
Bs2	Bornes saída estação 2	a016	$C13=C11 \wedge C032 \wedge C072$
Bs3	Bornes saída estação 3	a017	$C14=C11 \wedge C033 \wedge C073$
Bs4	Bornes saída estação 4	a018	$C15=C11 \wedge C034 \wedge C074$
CsCLP1	Contato saída do CLP estação 1	a0114	$C114=C110$
CsCLP2	Contato saída do CLP estação 2	a0115	$C115=C111$
CsCLP3	Contato saída do CLP estação 3	a0116	$C116=C112$
CsCLP4	Contato saída do CLP estação 4	a0117	$C117=C113$
1V0	Válvula pneumática 2/3 solenoide	a0211	$C211=C02 \wedge C0611$
1V1	Válvula pneumática 2/3 solenoide	a0212	$C212=C0612 \wedge C211$
1V2	Válvula pneumática 2/3 solenoide	a0213	$C213=C0613 \wedge C211$
1V3	Válvula pneumática 2/3 solenoide	a0214	$C214=C0614 \wedge C211$
1V4	Válvula pneumática 2/3 solenoide	a0215	$C215=C0615 \wedge C211$
1V5	Válvula pneumática 2/5 duplo solenoide	a0216	$C2110=(C0616 \wedge C211) \vee (\text{não}(C0617) \wedge C211)$ $C2111=(C0617 \wedge C211) \vee (\text{não}(C0616) \wedge C211)$
2V0	Válvula pneumática 2/3 solenoide	a0221	$C221=C02 \wedge C0621$
2V1	Válvula pneumática 2/3 solenoide	a0222	$C222=C0622 \wedge C221$
2V2	Válvula pneumática 2/3 solenoide	a0223	$C223=C0623 \wedge C221$
2V3	Válvula pneumática 2/3 solenoide	a0224	$C224=C0624 \wedge C221$
2V4	Válvula pneumática 2/3 solenoide	a0225	$C225=C0625 \wedge C221$
3V0	Válvula pneumática 2/3 solenoide	a0231	$C231=C02 \wedge C0631$
3V1	Válvula pneumática 2/3 solenoide	a0232	$C232=C0632 \wedge C231$
3V2	Válvula pneumática 2/3 solenoide	a0233	$C233=C0633 \wedge C231$
3V3	Válvula pneumática 2/3 solenoide	a0234	$C234=C0634 \wedge C231$
3V4	Válvula pneumática 2/3 solenoide	a0235	$C235=C0635 \wedge C231$
4V0	Válvula pneumática 2/3 solenoide	a0241	$C241=C02 \wedge C0641$
4V1	Válvula pneumática 2/3 solenoide	a0242	$C242=C0642 \wedge C241$
4V2	Válvula pneumática 2/3 solenoide	a0243	$C243=C0643 \wedge C241$

A partir da aplicação das etapas e tarefas da **Atividade 1 - Caracterizar sistema** chegou-se na definição dos C_f e C_c e na identificação dos C_{srEj} das estações de trabalho e do sistema de controle da SPCS. A Figura 7.10 apresenta os resultados da caracterização desses sistemas.

Saídas da Atividade 1 - Caracterizar sistema	
Canais fornecedores e canais consumidores	Canais sem recursos:
Estação 1 $C_f = \{C02, C0611, C0612, C0613, C0614, C0615, C0616, C0617\}$ $C_c = \{C0711, C0712, C0713\}$	$C_{srE1} = ()$ $C_{srE2} = (C0611, C0612, C0613, C0614, C0615, C0616, C0617, C211, C212, C213, C214, C215, C2110)$ $C_{srE3} = (C0611, C0612, C0613, C0614, C0615, C0616, C0617, C211, C212, C213, C214, C215, C2110)$ $C_{srE4} = ()$
Estação 2 $C_f = \{C02, C0621, C0622, C0623, C0624, C0625\}$ $C_c = \{C0721, C0722\}$	$C_{srE1} = ()$ $C_{srE2} = ()$ $C_{srE3} = ()$ $C_{srE4} = ()$
Estação 3 $C_f = \{C02, C0631, C0632, C0633, C0634, C0635\}$ $C_c = \{C0731, C0732\}$	$C_{srE1} = ()$ $C_{srE2} = ()$ $C_{srE3} = ()$ $C_{srE4} = ()$
Estação 4 $C_f = \{C02, C0641, C0642, C0643\}$ $C_c = \{C0741, C0742\}$	$C_{srE1} = (C0641, C0642, C0643, C241, C242, C243)$ $C_{srE2} = ()$ $C_{srE3} = (C0641, C0642, C0643, C241, C242, C243)$ $C_{srE4} = ()$
Sistema de controle $C_f = \{C04, C031, C032, C033, C034, C071, C072, C073, C074\}$ $C_c = \{C061, C062, C063, C064\}$	$C_{srE1} = (C034, C113, C15, C117)$ $C_{srE2} = (C031, C110, C12, C114)$ $C_{srE3} = (C031, C034, C110, C113, C12, C15, C114, C117)$ $C_{srE4} = ()$

Figura 7.10 – Saída da Atividade 1 – Caracterizar sistema SPCS

A partir da caracterização da SPCS, aplicou-se as etapas e tarefas da **Atividade 2 - Definir configurações operacionais**, onde foram definidas as diferentes configurações que atendem os cenários definidos para cada estado operacional da SPCS.

A Figura 7.11 apresenta os resultados encontrados para as configurações finais do sistema, a partir dos $VaxEj$ das estações e do sistema de controle da SPCS para o estado E3.

Estado E3 – Saídas da Atividade 2 – Vetores Agências											
Estação 1		Estação 2			Estação 3			Estação 4		Sistema de controle	
$Va021_{E3} = a0211$	-1	a0221	-1	a0222	-1	a0223	-1	$Va021_{E3} = a0241$	-1	a011	-1
		a0224	-1	a0225	-1	a0226	-1			a012	-1
		a0227	-1	a0228	-1	a0229	-1			a013	-1
		a02210	-1	a02211	-1	a0231	-1			a014	-1
						a0232	-1			a015	-1
						a0233	-1			a016	-1
						a0234	-1			a017	-1
						a0235	-1			a018	-1
						a0236	-1			a019	-1
						a0237	-1			a0110	-1
						a0238	-1			a0111	-1
						a0239	-1			a0112	-1
						a02310	-1			a0113	-1
						a02311	-1			a0114	-1
										a0115	-1
										a0116	-1

Figura 7.11 – Saída da atividade 2 – Definir configurações operacionais da SPCS

Analisando os resultados finais das configurações, os quais apresentam as agências que restaram nas configurações para o estado E3, mostrados na Figura 7.11 e comparando

com a Figura 7.8 e a Figura 7.7, que apresentam a configuração inicial da estação 1 e do sistema de controle, respectivamente. Observa-se que houve uma redução do número de agências presentes na configuração desses sistemas.

A Figura 7.12 apresenta o diagrama pneumático da SPCS para o estado E3, por exemplo. A estação 1, que na sua configuração inicial (Figura 7.2 (A)) era composta por 15 componentes, para o estado E3 será composta apenas pela válvula de bloqueio da estação, a qual isola os outros componentes desta estação para o atendimento desse estado. Resultado idêntico acontece com a estação 4 da SPCS, enquanto as estações 2 e 3 mantêm todos os componentes ativados para atender o estado E3.

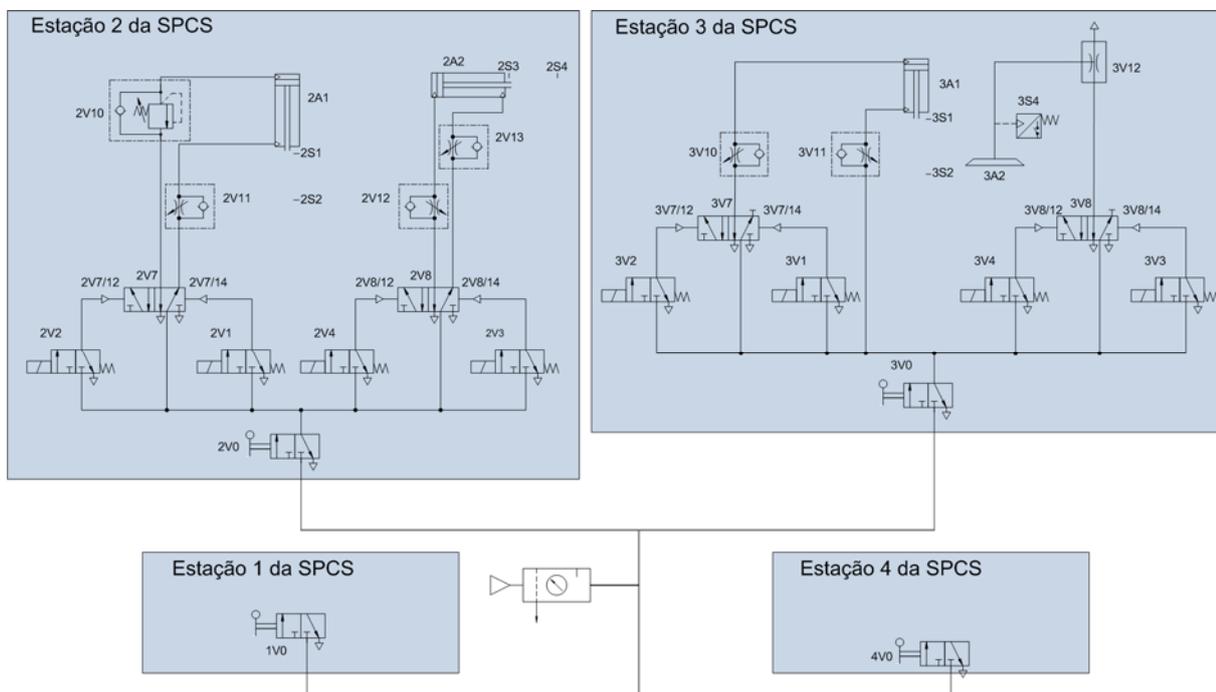


Figura 7.12 - Configuração final da SPCS para o estado E3 - diagrama pneumático

Definidas as configurações das estações de trabalho e do sistema de controle da SPCS para os quatro SPCS para os quatro estados de interesse aplicaram-se as etapas e tarefas da **Atividade 4 - Estimar Estimar confiabilidade**, onde calculou-se a estimativa de confiabilidade do sistema para um tempo de tempo de uso de 2500 horas. Os valores de taxas de falha atribuídos aos componentes da SPCS foram SPCS foram obtidos no banco de dados do software Relx (2007). A

Tabela 9 apresenta os parâmetros e resultados da estimativa de confiabilidade da SPCS.

Tabela 9 - Tabela de cálculo da confiabilidade da SPCS

Código	Símbolos	Componentes Nome	Taxas de falha	Probabilidade de utilização P(Ej)				Tempo de uso efetivo (horas)	confiabilidade MACSA	confiabilidade Metodologia estado único
				Estado 1 P(E1)	Estado 2 P(E2)	Estado 3 P(E3)	Estado 4 P(E4)			
a011	Bs1	Bornes saída estação1	1,46E-06	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-1,46E-06	-1,46E-06
a012	Bs2	Bornes saída estação2	1,46E-06	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-1,46E-06	-1,46E-06
a013	Bs3	Bornes saída estação3	1,46E-06	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-1,46E-06	-1,46E-06
a014	Bs4	Bornes saída estação4	1,46E-06	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-1,46E-06	-1,46E-06
a015	CcCLP1	Contato entrada do CLP estação 1	1,87E-06	0,1			0,1	500	-3,74E-07	-1,87E-06
a016	CcCLP2	Contato entrada do CLP estação 2	1,87E-06	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-1,87E-06	-1,87E-06
a017	CcCLP3	Contato entrada do CLP estação 3	1,87E-06	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-1,87E-06	-1,87E-06
a018	CcCLP4	Contato entrada do CLP estação 4	1,87E-06		0,4		0,1	1250	-3,35E-07	-1,87E-06
a019	CLP	Controlador lógico programável	9,00E-10	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-9,00E-10	-9,00E-10
a0110	CsCLP1	Contato saída do CLP estação 1	1,87E-06	0,1			0,1	500	-3,74E-07	-1,87E-06
a0111	CsCLP2	Contato saída do CLP estação 2	1,87E-06	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-1,87E-06	-1,87E-06
a0112	CsCLP3	Contato saída do CLP estação 3	1,87E-06	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-1,87E-06	-1,87E-06
a0113	CsCLP4	Contato saída do CLP estação 4	1,87E-06		0,4		0,1	1250	-3,35E-07	-1,87E-06
a0114	Be1	Bornes entrada estação1	3,26E-07	0,1			0,1	500	-6,52E-08	-3,26E-07
a0115	Be2	Bornes entrada estação2	3,26E-07	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-3,26E-07	-3,26E-07
a0116	Be3	Bornes entrada estação3	3,26E-07	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-3,26E-07	-3,26E-07
a0117	Be4	Bornes entrada estação4	3,26E-07		0,4		0,1	1250	-1,63E-07	-3,26E-07
a0211	IV0	Válvula pneumática 2/3 solenoide	3,13E-06	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-3,13E-06	-3,13E-06
a0212	IV1	Válvula pneumática 2/3 solenoide	3,13E-06	0,1			0,1	500	-6,25E-07	-3,13E-06
a0213	IV2	Válvula pneumática 2/3 solenoide	3,13E-06	0,1			0,1	500	-6,25E-07	-3,13E-06
a0214	IV3	Válvula pneumática 2/3 solenoide	3,13E-06	0,1			0,1	500	-6,25E-07	-3,13E-06
a0215	IV4	Válvula pneumática 2/3 solenoide	3,13E-06	0,1			0,1	500	-6,25E-07	-3,13E-06
a0216	IV5	Válvula pneumática 2/5 duplo solenoide	3,85E-06	0,1			0,1	500	-7,70E-07	-3,85E-06
a0217	IV7	Válvula pneumática 2/5acionamento pneumático	3,85E-06	0,1			0,1	500	-7,70E-07	-3,85E-06
a0218	IV8	Válvula pneumática 2/5acionamento pneumático	3,85E-06	0,1			0,1	500	-7,70E-07	-3,85E-06
a0219	IA1	Garra pneumática	1,15E-05	0,1			0,1	500	-2,30E-06	-1,15E-05
a02110	IA2	Cilindro linear	8,58E-06	0,1			0,1	500	-1,72E-06	-8,58E-06
a02111	IA3	Cilindro oscilador	7,51E-06	0,1			0,1	500	-1,50E-06	-7,51E-06
a02112	IS12	Sensores da garra pneumática	2,33E-05	0,1			0,1	500	-4,65E-06	-2,33E-05
a02113	IS34	Sensores do cilindro linear	2,33E-05	0,1			0,1	500	-4,65E-06	-2,33E-05
a02114	IS56	Sensores do cilindro oscilador	2,33E-05	0,1			0,1	500	-4,65E-06	-2,33E-05
a0221	2V0	Válvula pneumática 2/3 solenoide	3,13E-06	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-3,13E-06	-3,13E-06
a0222	2V1	Válvula pneumática 2/3 solenoide	3,13E-06	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-3,13E-06	-3,13E-06
a0223	2V2	Válvula pneumática 2/3 solenoide	3,13E-06	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-3,13E-06	-3,13E-06
a0224	2V3	Válvula pneumática 2/3 solenoide	3,13E-06	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-3,13E-06	-3,13E-06
a0225	2V4	Válvula pneumática 2/3 solenoide	3,13E-06	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-3,13E-06	-3,13E-06
a0226	2V7	Válvula pneumática 2/5acionamento pneumático	3,85E-06	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-3,85E-06	-3,85E-06
a0227	2V8	Válvula pneumática 2/5acionamento pneumático	3,85E-06	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-3,85E-06	-3,85E-06
a0228	2A1	Cilindro linear vertical	8,58E-06	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-8,58E-06	-8,58E-06
a0229	2A2	Cilindro linear horizontal	8,58E-06	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-8,58E-06	-8,58E-06
a02210	2S12	Sensores do cilindro linear vertical	2,33E-05	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-2,33E-05	-2,33E-05
a02211	2S34	Sensores do cilindro linear horizontal	2,33E-05	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-2,33E-05	-2,33E-05
a0231	3V0	Válvula pneumática 2/3 solenoide	3,13E-06	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-3,13E-06	-3,13E-06
a0232	3V1	Válvula pneumática 2/3 solenoide	3,13E-06	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-3,13E-06	-3,13E-06
a0233	3V2	Válvula pneumática 2/3 solenoide	3,13E-06	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-3,13E-06	-3,13E-06
a0234	3V3	Válvula pneumática 2/3 solenoide	3,13E-06	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-3,13E-06	-3,13E-06
a0235	3V4	Válvula pneumática 2/3 solenoide	3,13E-06	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-3,13E-06	-3,13E-06
a0236	3V7	Válvula pneumática 2/5acionamento pneumático	3,85E-06	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-3,85E-06	-3,85E-06
a0237	3V8	Válvula pneumática 2/5acionamento pneumático	3,85E-06	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-3,85E-06	-3,85E-06
a0238	3A1	Cilindro linear vertical	8,58E-06	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-8,58E-06	-8,58E-06
a0239	3A2	Ventosa	3,59E-05	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-3,59E-05	-3,59E-05
a02310	3S12	Sensores do cilindro linear vertical	2,33E-05	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-2,33E-05	-2,33E-05
a02311	3S34	Sensores da ventosa	2,33E-05	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-2,33E-05	-2,33E-05
a0241	4V0	Válvula pneumática 2/3 solenoide	3,13E-06	0,1	0,4	0,4	0,1	2500	-3,13E-06	-3,13E-06
a0242	4V1	Válvula pneumática 2/3 solenoide	3,13E-06		0,4		0,1	1250	-1,56E-06	-3,13E-06
a0243	4V2	Válvula pneumática 2/3 solenoide	3,13E-06		0,4		0,1	1250	-1,56E-06	-3,13E-06
a0244	4V7	Válvula pneumática 2/5acionamento pneumático	3,85E-06		0,4		0,1	1250	-1,93E-06	-3,85E-06
a0245	4V8	Válvula pneumática 2/5acionamento pneumático	3,85E-06		0,4		0,1	1250	-1,93E-06	-3,85E-06
a0246	4A1	Cilindro linear	8,58E-06		0,4		0,1	1250	-4,29E-06	-8,58E-06
a0247	4A2	Cilindro linear	8,58E-06		0,4		0,1	1250	-4,29E-06	-8,58E-06
a0248	3S12	Sensores do cilindro linear A1	2,33E-05		0,4		0,1	1250	-1,16E-05	-2,33E-05
a0249	3S34	Sensores do cilindro linear A2	2,33E-05		0,4		0,1	1250	-1,16E-05	-2,33E-05

Confiabilidade $\exp\left[-\sum(\lambda \times P(E_j)) \times t\right]$	0,517	0,385
---	--------------	--------------

Definida a estimativa de confiabilidade da SPCS a análise foi avaliada na **Atividade 5 - Avaliar confiabilidade**, na qual se considerou os dados da análise compatíveis com o projeto do sistema. Sendo assim, os resultados da análise foram registrados na **Atividade 6 - Documentar a análise de confiabilidade**, conforme apresentado abaixo:

Resultados da análise de confiabilidade da SPCS

A análise de confiabilidade da SPCS foi realizada para um tempo de uso $t = 2500$ horas, dentro de ambiente adequado para o equipamento desempenhar suas funções. Além

disso, considerou-se os diferentes estados operacionais da SPCS distribuindo-se da seguinte forma, durante o tempo t : E1 - 20%, E2 - 30%, e E3 - 40% e E4 - 10%.

Para as condições citadas acima a função de confiabilidade da SPCS está representada no gráfico da Figura 7.13. Neste gráfico apresenta-se uma curva da função confiabilidade estimada pela MACSA e outra foi estimada considerando a SPCS como estado único, ou seja, considera-se que todos os componentes ficaram ativados durante todo o tempo t , neste caso as estações integradas e ativadas durante as 2500 horas.

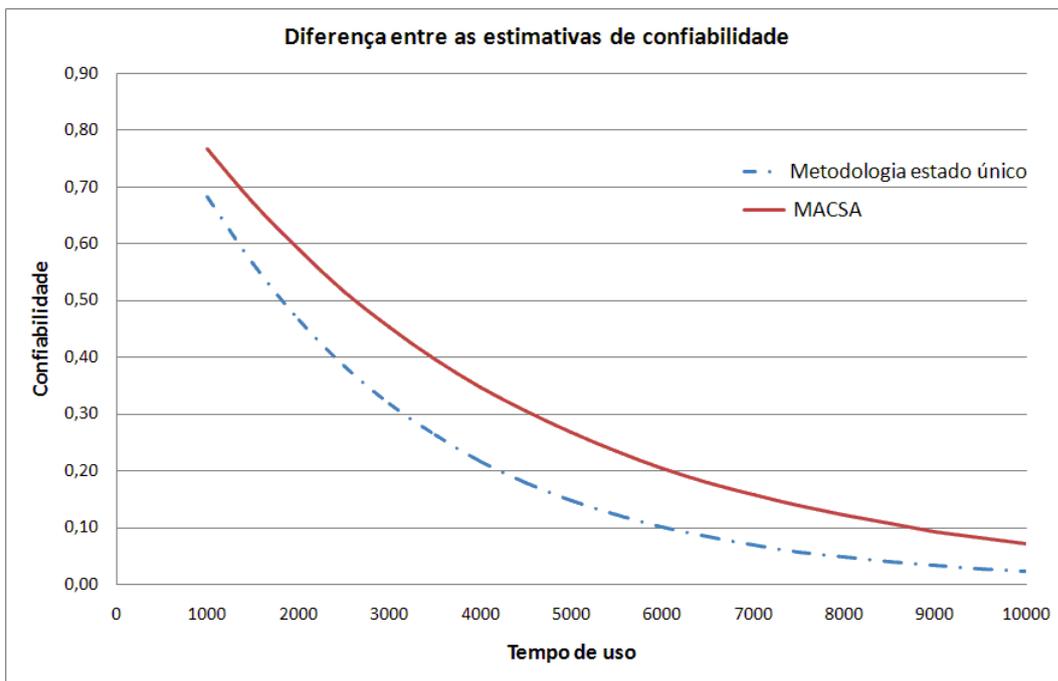


Figura 7.13 - Gráfico comparativo de resultados da estimativa de confiabilidade da SPCS

A Figura 7.14 apresenta um gráfico que permite uma análise sobre a porcentagem de componentes ativados e desativados na SPCS durante o tempo t .

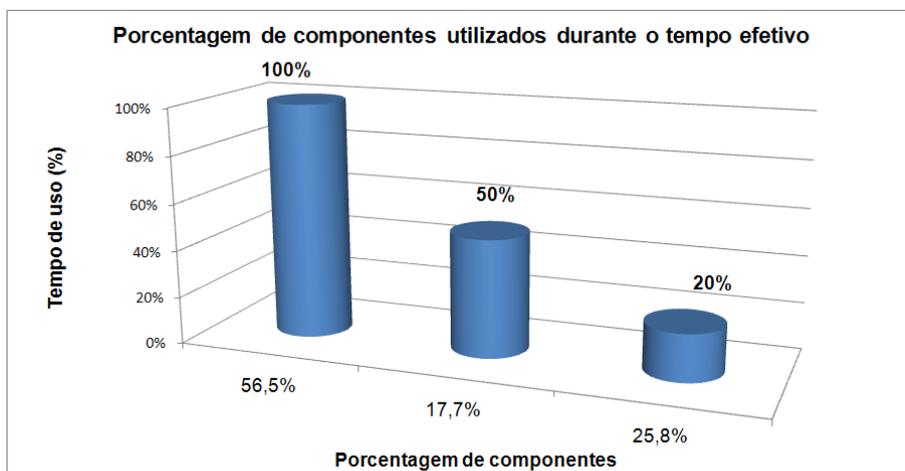


Figura 7.14 - Gráfico de porcentagem de componentes x tempo de uso efetivo da SPCS

Neste gráfico percebe-se que apenas 56,5% dos componentes são considerados ativados durante todo o tempo de uso do sistema, ou seja, em torno de 43% dos componentes ficam desativados em algum momento desse tempo.

A Figura 7.15 apresenta um gráfico que permite uma análise sobre o tempo de uso efetivo de cada componente da SPCS durante o tempo t .

Nesta avaliação percebe-se que uma quantidade razoável de componentes da SPCS se mantiveram ativados apenas em torno de 20% e outros 50 % do tempo de uso.

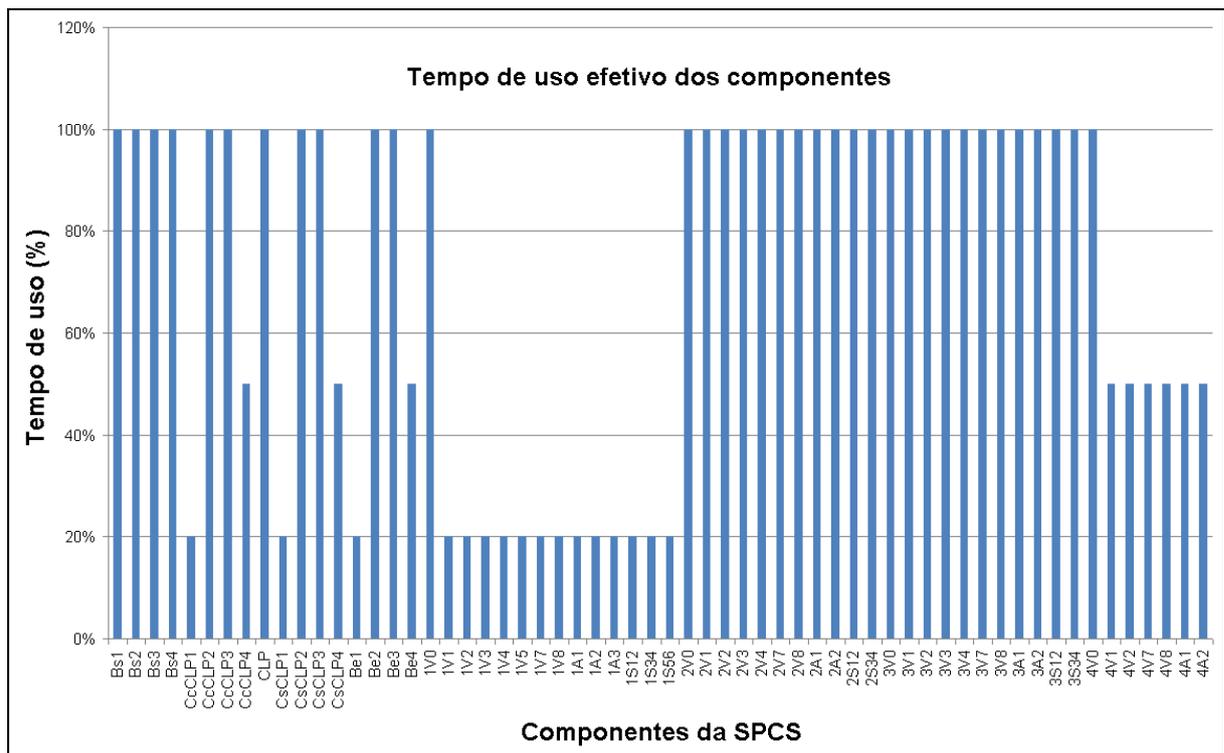


Figura 7.15 - Gráfico componentes da SPCS x tempo de uso efetivo

7.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A aplicação da MACSA no estudo de caso da SPCS mostrou-se eficiente, ratificando a utilização do método para sistemas automáticos para diferentes áreas tecnológicas, tais como, hidráulica, pneumática e elétrica.

Novamente, nesse estudo de caso verificou-se a importância da definição do tempo efetivo de uso dos componentes durante a vida útil do sistema. A Figura 7.13 apresenta a diferença entre as estimativas de confiabilidade para a SPCS considerando as duas metodologias de cálculo. Novamente verifica-se que a diferença entre as duas estimativas varia em função do tempo de uso considerado.

A estimativa da confiabilidade resultante da MACSA é de $R[t, P(E_{ij})] = 0,517$, considerando os diferentes estados operacionais em que a SPCS poderá assumir durante sua vida útil. Por sua vez, a estimativa de confiabilidade quando não é considerado o parâmetro probabilidade de utilização de cada estado operacional do sistema $P(E_{ij})$, ou seja, a SPCS é tratada como um sistema de estado único, é de $R(t) = 0,385$, conforme

Tabela 9. Novamente neste estudo de caso verifica-se que se não for considerado o $P(E_{ij})$, a estimativa da confiabilidade pode direcionar o projetista para uma tomada de decisão equivocada em relação a concepção do sistema.

CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia para análise de confiabilidade de sistemas automáticos. Para o desenvolvimento desta metodologia foi realizada uma pesquisa sobre o estado da arte dos sistemas automáticos, seus conceitos e características, que estão apresentados nos capítulos iniciais do texto.

Discutiu-se o processo de projeto de produtos, optando-se por um modelo de referência para o processo de desenvolvimento integrado de produtos no qual se identificou que a metodologia proposta deveria ser implementada na fase de projeto conceitual, na etapa de avaliação da concepção.

Por meio do levantamento do estado da arte, verificou-se que na análise de confiabilidade dos sistemas automáticos estes são em geral tratados como um sistema de estado único, com diferentes configurações operacionais ou são analisados com métodos estocásticos.

Nesse estudo observou-se que tratar a análise de confiabilidade de sistemas automáticos, considerando estes como um sistema de estado único, na maioria das vezes a confiabilidade teórica não condiz com a confiabilidade real do sistema, isso porque os modelos de confiabilidade do sistema são compostos por todos os componentes, independente do estado operacional do sistema, o que nem sempre acontece na prática. Em outras palavras, a análise em si é facilmente executável, contudo a medição do tempo de utilização de cada um dos componentes num determinado ciclo de vida fica limitado.

A análise da confiabilidade por meio de métodos estocásticos, tais como Método de Markov e Simulação de Monte Carlo, têm sido utilizados com algumas ressalvas quando se trata de sistemas complexos e/ou com um número considerável de componentes. Isto decorre da explosão de estados e do considerável tempo de processamento que podem ocorrer no método de Markov e na simulação de Monte Carlo, respectivamente.

Por outro lado, a definição das diferentes configurações operacionais tende a aproximar a estimativa da confiabilidade do sistema para valores mais realistas se forem considerados as probabilidades de utilização dessas configurações durante a vida útil do sistema. Além disso a definição dessas configurações poderá auxiliar a análise da confiabilidade por meio de métodos estocásticos, pois direciona a análise para o atendimento de funções específicas do sistema, o que pode amenizar a explosão de estados e/ou tempo de simulação desses métodos.

O resultado da tese foi uma metodologia que permite a identificação automática das configurações do sistema nos seus potenciais estados operacionais, sendo a estimativa da

confiabilidade do sistema baseada em modelos de confiabilidade que foram definidos a partir dessas configurações.

A Metodologia para Análise de Confiabilidade de Sistemas Automáticos (MACSA) apresentada neste trabalho é aplicável às fases iniciais do processo de projeto onde há maior flexibilidade na tomada de decisão e torna possível ao projetista tratar de forma mais adequada atributos como confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade do sistema. Atualmente o atributo confiabilidade é tratado nas fases finais do processo de projeto, geralmente quando a estrutura do sistema já está totalmente definida e as tomadas de decisão ficam rígidas a esta estrutura.

A estimativa da confiabilidade realizada pela MACSA contempla a avaliação qualitativa e quantitativa deste atributo, além de determinar o uso efetivo de cada componente do sistema.

A avaliação qualitativa está baseada na geração das árvores de sucesso do sistema representada por Rede de Petri, a qual proporciona a utilização de técnicas de análise estrutural da rede que possibilitam a determinação da *path set* do sistema, ou seja, os caminhos da rede que levaram o sistema ao sucesso no atendimento de suas funções. A avaliação quantitativa considera a probabilidade de utilização de cada estado operacional do sistema durante sua vida útil. A análise do uso efetivo dos componentes dá subsídios aos agentes de projeto sobre a necessidade de sobressalentes destes componentes durante a operação do sistema.

Analisando os resultados¹¹ obtidos nos dois estudos de caso verifica-se que se o sistema for considerado em estado único, o valor estimado indica que o sistema será menos confiável que a provável confiabilidade real do sistema. O cálculo proposto pela MACSA considera situações mais realistas para a estimativa da confiabilidade, pois neste são consideradas as diferentes configurações estruturais, assim como, a probabilidade de utilização das mesmas durante a vida útil do sistema.

Os gráficos das Figuras 6.27 e 7.13 mostram a diferença entre as estimativas de confiabilidade utilizando a MACSA e a metodologia que considera o sistema automático em estado único. Nessas figuras verifica-se que a diferença varia conforme o tempo de uso considerado. Além disso, se aumentar o número de componentes, mesmo mantendo todas as

¹¹ Valores da estimativa de confiabilidade da UPCH: $R[t, P(E_{ij})] = 0,819$, $R(t) = 0,744$

Valores da estimativa de confiabilidade da SPCS: $R[t, P(E_{ij})] = 0,517$, $R(t) = 0,385$

outras características do sistema, essa diferença aumenta quase proporcionalmente ao aumento do número de componentes.

Considerando-se que os sistemas automáticos, tais como sistemas hidráulicos e pneumáticos, têm uma vida útil longa e são geralmente compostos por vários componentes, as considerações sobre a diferença entre a estimativa da confiabilidade de sistemas automáticos por meio das metodologias MACSA e a metodologia para estado único, podem ser relevantes nas tomadas de decisão durante o processo de projeto desses sistemas.

Verificou-se também que as informações utilizadas foram extraídas diretamente dos modelos funcional, estrutural e comportamental do sistema e essas são suficientes para a aplicação da MACSA. Além disso, a utilização da Rede C/A para representar os modelos funcional/estrutural permite que uma gama de sistemas técnicos possam ser analisados pela metodologia, independente da área tecnológica do mesmo.

Esta abordagem não só facilita a análise das estruturas do sistema, como também evita a interferência do agente de projeto na análise, conduzindo a tomadas de decisão mais rápidas, livre de erros e vícios.

Neste aspecto, a implementação computacional da MACSA poderá proporcionar um ganho de tempo razoável para o projetista, além de aumentar a confiança nos resultados de estimativa da confiabilidade dos sistemas automáticos.

Além da estimativa da confiabilidade, é possível identificar e quantificar o número de ciclos ou horas de operação para cada um dos componentes do sistema automático, diante das diferentes funções que um sistema desses pode desempenhar. Este é um dos resultados relevantes desta análise, que se constitui na identificação do tempo de uso efetivo de cada componente no sistema. Uma análise desses resultados poderá contribuir não só para a definição da concepção final do sistema, assim como na tomada de decisão sobre a escolha adequada dos componentes e a necessidade de prever sobressalentes durante a vida útil do sistema.

O fato da MACSA utilizar a Rede C/A e o Grafcet, os quais podem ser representados na forma matricial, faz com que a metodologia possa ser implementada computacionalmente, possibilitando a utilização futura da metodologia como uma ferramenta de auxílio aos projetos de sistemas automáticos.

Como esta pesquisa sugere a MACSA implementada na fase do projeto conceitual e as informações que abastecem a metodologia são provenientes de modelos técnicos desenvolvidos nesta mesma fase do processo de projeto, isso facilita a utilização da metodologia e conseqüentemente diminui o tempo de análise. Uma alteração na concepção do produto, o

que deve sempre ocorrer na fase inicial do projeto, será feita nos modelos técnicos e que irão alterar diretamente os dados de entrada na MACSA.

A metodologia apresentada neste trabalho não está limitada ao tamanho do sistema em análise, no entanto para tratar sistemas mais complexos dos que os apresentados nos estudos de caso, necessita-se implementar computacionalmente o método. Para isso, no estudo de caso da UPCH o método foi detalhado e exemplificado passo-a-passo direcionando a implementação para trabalhos futuros.

A continuação desta pesquisa poderá ocorrer no tratamento de alguns pontos que ficaram em aberto, e que poderão melhorar a metodologia proposta, tais como:

⇒ Implementação computacional da MACSA

O desenvolvimento de uma implementação computacional da MACSA, na qual o projetista poderia desenvolver os modelos funcional/ estrutural e comportamental de forma gráfica no próprio aplicativo. Com isso o próprio aplicativo geraria as matrizes para serem manipuladas posteriormente e facilitaria a inserção de dados na metodologia e, consequentemente, diminuiria a possibilidade de erros na entrada de dados do sistema.

⇒ Incluir a avaliação de novos atributos de projeto

A inserção da avaliação de novos atributos de projeto na MACSA, tais como, manutenibilidade, disponibilidade e segurança. Esta implementação seria providencial para melhorar a análise dos sistemas automáticos e consequentemente apurarem as tomadas de decisão durante o processo de projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMYAN, A. e HE, D. Analysis of sequential failures for assessment of reliability and safety of manufacturing systems. **Reliability Engineering & system Safety**, 2002, v 76, p 227-236.
- AMORIM, J. L. S. Manutenção Preventiva e Preditiva em Equipamentos Hidráulicos. Apostila, TCT - Treinamento e Consultoria Técnica, Florianópolis, 2003.
- ATTIÉ, S. S. **Automação hidráulica e pneumática empregando a teoria de sistemas a eventos discretos..** 1998. 191 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Ufsc, Florianópolis, 1998.
- AVONTUUR, G. C. e WERFF K. V. An implementation of reliability analysis in the conceptual design phase of drive trains. **Reliability Engineering & System Safety**, 2001 v 73, p 155-156.
- AZARON, A., KATAGIRI, H., KATO, K. e SAKAWA, M. Reliability evaluation of multi-component cold-standby redundant systems. **Applied Mathematics an Computation**, 2006 v 173, p 137-149.
- BACK, N. **Metodologia de projeto de produtos industriais**. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois, 1983. 389 p.
- BACK, N., OGLIARI, A., DIAS, A., JONNY, C. S. **Projeto Integrado de Produtos: planejamento, concepção e modelagem**. Baueri, SP: Ed. Manole, 2008. 647 p.
- BARACOS, P. Grafcet step by step - A tutorial and reference guide to the Grafcet automation language - Famic, Canadá, 1992.
- BASTOS, B. C. SAKURADA, E. Y. DE NEGRI, V. J. HADDAD L. A. Análise de Falhas de uma Válvula Direcional Proporcional. In CONGRESSO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA, 11, 2004, Nova Friburgo.
- BELAN H. C.. **Formalização da Rede de Petri Canal/Agência para Projeto de Equipamentos Industriais**. 2007. 168 f Dissertação (Mestrado) Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Ufsc, Florianópolis, 2007.

BENARD, V., CAUFFRIEZ, L. e RENAUX, D. The Safe-SADT method for aiding designers to choose and improve dependable architectures for complex automated systems. **Reliability Engineering & System Safety**, 2008 v 93, p 179-196.

BILLINTON, R e ALLAN, R.N., **Reliability evaluation of engineering systems: Concepts and techniques**. New york. Ed. Plenum Press, 1983. 350 p.

BLANCHARD, B. S. e FABRYCKY, W. J., **Systems Engineering and Analysis**, Prentice-Hall, 1990.

BLANCHARD, B. S.; VERNA, D.; PETERSON, E. **Maintainability a Key to Effective Serviceability and Maintenance Management**. Ed. Wiley Interscience, 1995.

BLISCHKE, W. R. e MURTHY, D. N. P., **Reliability: Modeling, Prediction, and Optimization**. New York. Ed. Wiley Interscience, 2000.

CARDOSO, J., VALETTE, R., **Redes de Petri**. Florianópolis: Ed. Da UFSC, 1997. 212 p.

CONRARD, B., THIRIET, J. M. e ROBERT, M.. Distributed system design based on dependability evaluation: a case study on a pilot thermal process. **Reliability Engineering & System Safety**, 2005, v 88, p 109-119.

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) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Ufsc, Florianópolis, 1996.

DE NEGRI, V. J., VIEIRA, A. D. Integração de tecnologias para a automação industrial com sistemas hidráulicos e pneumáticos. In Seminário nacional de hidráulica e pneumático: automação e controle industrial, Florianópolis, 5 , 1997, Anais... SENAI/CTAI, 1997. p. 81-101.

DE NEGRI, V. J.; PAES, F. H. S. Sistematização do projeto de automação de sistemas mecatrônicos com aplicação às pequenas centrais hidroelétricas. III SEMINÁRIO NACIONAL DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO, 2003.

DE NEGRI, V. J. et al. Plataforma de hidráulica proporcional: Plataforma de projeto e comprovação experimental de sistemas eletro-hidráulicos proporcionais. Florianópolis: Laship, 2005. 26 p.

DE NEGRI, V. J. ; SANTOS, E. A. P.. Projeto de sistemas de automação da manufatura. In: AGUIRRE, Luis Antonio et al. **Enciclopédia de Automática: Controle e Automação**. Vol. 1 São Paulo: Blucher, 2007. Cap. 15, p. 382-417.

DIMITROV, B., RYKOV, V. e STANCHEV P.. On multi-state reliability systems. In: THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATHEMATICAL METHODS IN RELIABILITY, 2002, Trondheim.

DISTEFANO, S. e PULIAFITO, A.. Reliability and availability analysis of dependent-dynamic systems with DRBDs. **Reliability Engineering & System Safety**, 2009, In Press, Corrected Proof.

FERREIRA, M. G. G.. **Utilização de modelos para a representação de produtos no projeto conceitual**. 1997. 140 f.. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, - Departamento de Engenharia Mecânica, Ufsc, Florianópolis, 1997.

FONSECA, A. J. H., **Sistematização do Processo de Obtenção das Especificações de Projeto de Produtos Industriais e Sua Implementação Computacional**. 2000. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Ufsc, Florianópolis, 2000.

HUANG, C. Y. e CHANG, Y. R.. An improved decomposition scheme for assessing the reliability of embedded systems by using dynamic fault trees. **Reliability Engineering & System Safety**, 2007, v92, p 1403-1412.

HUBKA, V. e EDER, W. E.. **Theory of Technical Systems: a total concept theory for engineering design**. Springer-Verlag, Germany, 1988. 275p

IEC - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60848**. GRAFCET specification language for sequential function charts. Switzerland, 2002. 104p.

JINGY, Z., ZHUORU, C., YIQUN, W., BAOHAI, M., CHENGYU Y. The development and prospect of hydraulic reliability engineering. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLUID POWER TRANSMISSION AND CONTROL, 5, 2001, Hangzhou, China.

JOHNSSON, C.. **A graphical language for batch control**. Lund: Automatic control, 1999. 294p.

- KAUFMAN, J. J. e WOODHEAD, R. **Stimulating Innovation in Products and Services: With function analysis and mapping**. Ed. Wiley Interscience, 2006.
- KNEZEVIC, J., ODOOM E. R., Reliability modelling of repairable systems using Petri nets and fuzzy Lambda-Tau methodology. **Reliability Engineering and System Safety**, 2001, v 73, p 1-17.
- LI, W. e ZUO, M. J.. Reliability evaluation of multi-state weighted k -outof- n systems. **Reliability Engineering & System Safety**, 2008, v93, p 160-167.
- LINHARES, J. C. **Uma abordagem computacional baseada na descrição de funções e formas de peças para projeto preliminar de produto**. 2005. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 2005
- LINSINGEN, I.V. **Fundamentos de sistemas hidráulicos**. 2. ed. Florianópolis: UFSC, 2003. 399 p.
- LISNIANSKI, A., Extended block diagram method for a multi-state system reliability assessment. **Reliability Engineering & System Safety**, 2007, v92, p 1601-1607.
- LIU, T. S., CHIOU, S. B.. The application of Petri nets to failure analysis. **Reliability Engineering and System Safety**, 1997, v 57, p129-142.
- MACHADO, A. N. e GORGA, E.H.V., Confiabilidade e disponibilidade em sistemas de automação de usinas hidrelétricas. In SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2003, Minas Gerais.
- MACHADO NETO, V. N. **Metodologia para a garantia da confiabilidade no desenvolvimento de produtos**. 2002. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 2002.
- MAZETTO, G. M. **Desenvolvimento de um sistema modular para mecanização agrícola conservacionista em pequenas propriedades**. 2000. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 2000 .
- MENDIGUTXIA, J. et al. Fault tolerance in automated manufacturing systems. **Expert Systems With Applications**, 1995 v 8, p 275-285.

MOURA, M. J. C. **Processos semi markovianos e redes bayesianas para avaliação de indicadores de desempenho de confiabilidade de sistemas complexos tolerantes à falha.**

2006 125 f Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Departamento de Engenharia de Produção, UFPE, Recife, 2006.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5462: Confiabilidade - Terminologia.** ABNT, Rio de Janeiro, 1994.

O'CONNOR, Patrick D. T. **Practical reliability engineering.** 2. ed. Chichester: J. Wiley, c1985. 398p.

OGLIARI, A. **Sistematização da concepção de produtos auxiliada por computador com aplicações no domínio de componentes de plástico injetados.** 1999. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 1999.

PAES, F. H. S. **Projeto da automação de centrais hidrelétricas aplicando princípios mecatrônicos.** 2001. 120p Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Ufsc, Florianópolis, 2001.

PAHL, G. e BEITZ, W., **Engineering Design: A systematic approach,** Springer-Verlag, New York, 1988.

PAPADOPOULOS, Y. e MARUHN, M., Model-based automated synthesis of fault trees from Simulink models. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEPENDABLE SYSTEMS AND NETWORKS, 2001, Göteborg, pp. 77-82.

PAPADOPOULOS, Y. e GRANTE, C.. Evolving car designs using model-based automated safety analysis and optimisation techniques. **The journal of systems and Software**, 2004, v 76, p77-89.

PERKUSICH, A. ; LIMA, A. M. N.. Redes de Petri. In: AGUIRRE, Luis Antonio et al. **Enciclopédia de Automática: Controle e Automação.** Vol. 1 São Paulo: Blucher, 2007. Cap. 12, p. 313-332.

PORCIÚNCULA, G. S.; DE NEGRI, V. J.; DIAS, A. - **Reliability of electro-hydraulic equipment: systematization and analysis** - 18th International Congress of Mechanical Engineer-

ing, November 2005, also in **ABCM Symposium Series in Mechatronics**, 2006, v2 p 393-400.

RAC. Reliability Analysis Center, Automated Data book. Department of Defense (DoD). CD-ROM, New York, 1999

RAMIREZ-MARQUEZ, J. E. e COIT, D. W.. Multi-state component criticality analysis for reliability improvement in multi-state systems. **Reliability Engineering & System Safety**, 2007, v92, p 1608-1619.

RELEX, Architect. **Relex Reliability Studio 2007**. Relex Software Corporation, 2007.

RIASCOS L. A. M., **Deteção e tratamento de falhas em sistemas de manufaturas através de redes de petri**. Tese - Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP. 2002, 160p.

RIASCOS, L. A. M.; COZMAN, F. G. e MIYAGI, P. E. Detection and Treatment of Faults in Automated Machines Based on Petri Nets and Bayesian Networks. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2003, Rio de Janeiro.

ROCHDI, Z., DRISS, B. e MOHAMED, T.. Industrial systems maintenance using Petri nets. **Reliability Engineering & System Safety**, 1999, v65, p 119-124.

ROMANO, L. N. **Modelo de referência para o processo de desenvolvimento de máquinas agrícolas**. 2003. 265 f.. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Ufsc, Florianópolis, 2003.

SANTOS, E. A. P. **Contribuições ao projeto conceitual de sistemas de manipulação e montagem automatizados**. 2003. 194 f.. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Ufsc, Florianópolis, 2003.

SOUTO, R. B., **Projeto de Sistemas Automáticos com Modelagem e Controle da Comunicação com o Ambiente Externo**.. 2005. 188 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SOUZA, A. D. C. **Desenvolvimento de um Sistema para Dimensionamento e Controle de Posicionadores hidráulicos**.. 2005. 135 f Dissertação (Mestrado) Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Ufsc, Florianópolis, 2005.

TAKEDA, H., SHIMOMURA Y., UMEDA, Y., TOMIYAMA, T.. Function modeling: Confluence of process modeling and object modeling, Nara Institute of Science and Technology, Takayama, Ikoma, Japan, 1994;

VINADÉ, C. A. C. **Sistematização do processo de projeto para confiabilidade e manutenibilidade aplicado a sistemas hidráulicos e implementação de um sistema especialista**. 2003. 217 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Ufsc, Florianópolis, 2003.

YU, H., CHU, C., CHÂTELET, E. e YALAOUI, F.. Reliability optimization of a redundant system with failure dependencies. **Reliability Engineering & System Safety**, 2007, v92, p 1627-1634.

YUCHANG, M., HONGWEI, L. e XIAOZONG, Y.. Efficient fault tree analysis of complex fault tolerant multiple-phased systems. **Tsinghua Science and Technology**, 2007, v12, p 122-127.

VESELY, W., DUGAN J., FRAGOLE J., MINARICK J. e RAILSBACK J., **Fault tree handbook with aerospace applications**, Washington: NASA Office of Safety and Mission Assurance, 2002. 218p.

WANG, Y., TEAGUE, T., WEST, H. e MANNAN, S.. A new algorithm for computer-aided fault tree synthesis. **Journal of Loss Prevention: In the process industries**, 2002, v 15, p 265-277.

APÊNDICE A

CONFIGURAÇÕES DO CIRCUITO HIDRÁULICO DA UPCH

As diferentes configurações apresentadas pelo circuito hidráulico da UPCH completa são definidas de acordo com o sistema de controle da unidade, sendo que este é previamente programado para definir configurações que atendam as necessidades do usuário. Para compor essas diferentes configurações, os grupos de componentes são definidos como: 1) componentes ativados, que participam do atendimento da função solicitada pelo usuário e 2) componentes desativados, que ficam isolados e não participam do atendimento da função solicitada pelo usuário.

As Figuras A1, A2, A3, A4, A5 e A6 representam as porcentagem de componentes ativados e desativados nas configurações do circuito hidráulico da UPCH para os diferentes estados do sistema .

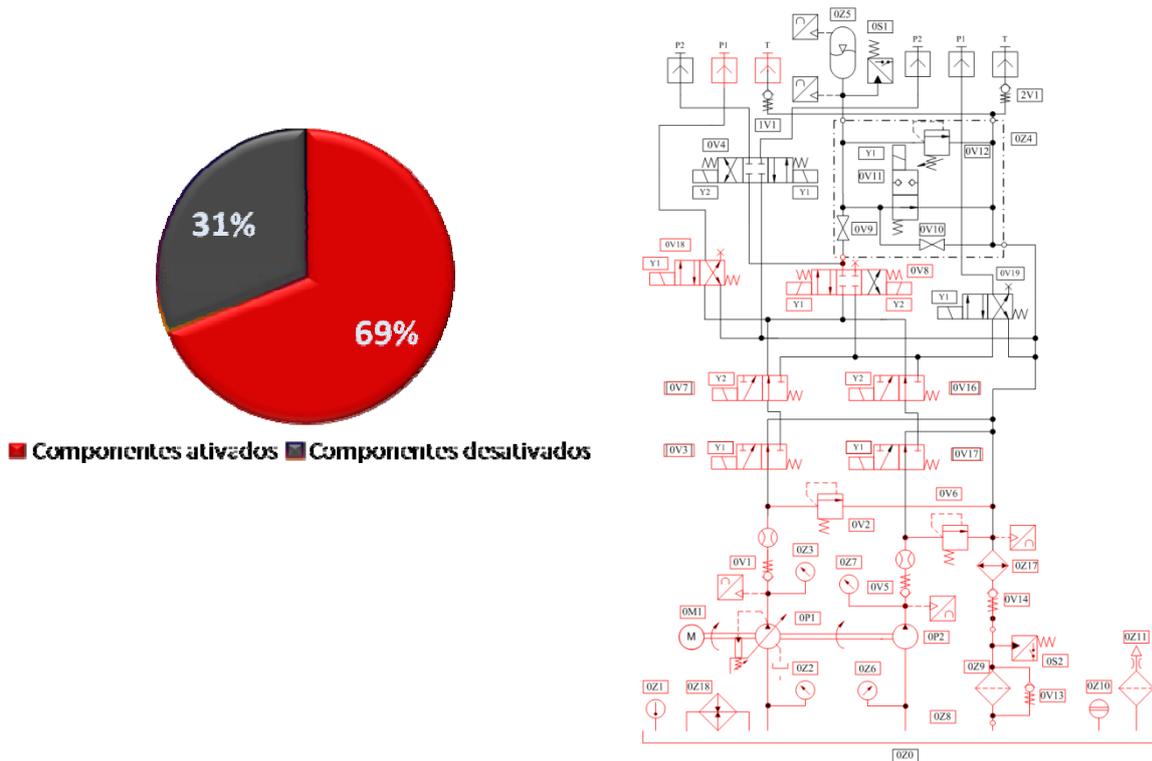


Figura A.1 - Estado 1 - Suprir p1 do usuário 1 com BF ou BV

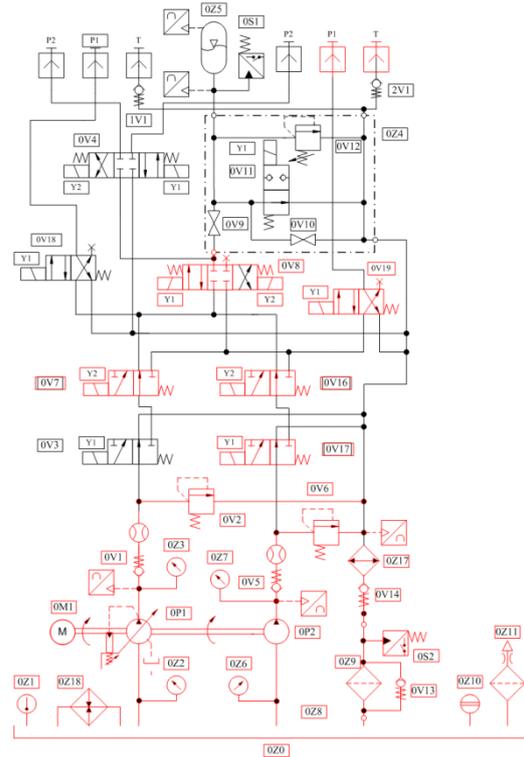
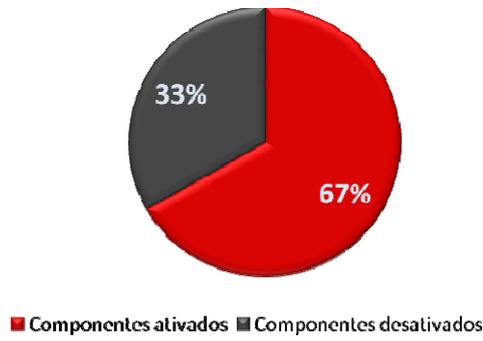


Figura A.2 - Estado 2 - Suprir p1 do usuário 2 com BF ou BV

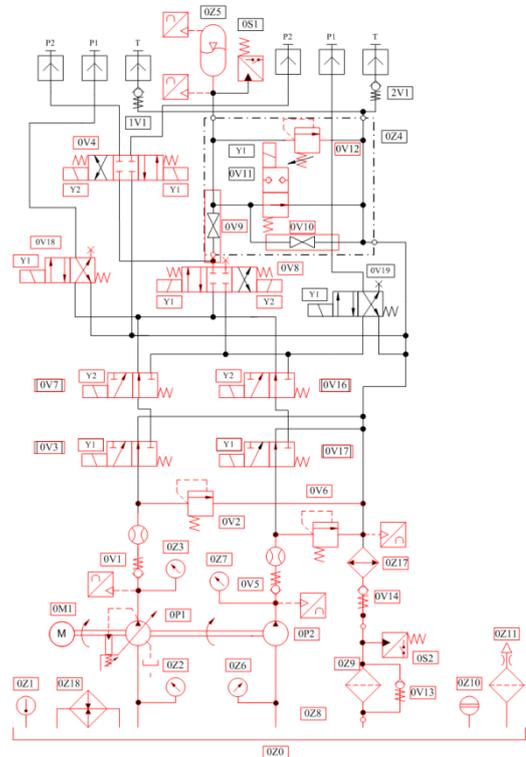
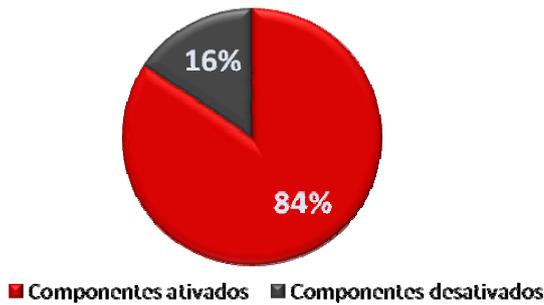


Figura A.3 - Estado 3 - Suprir acumulador com BF ou BV

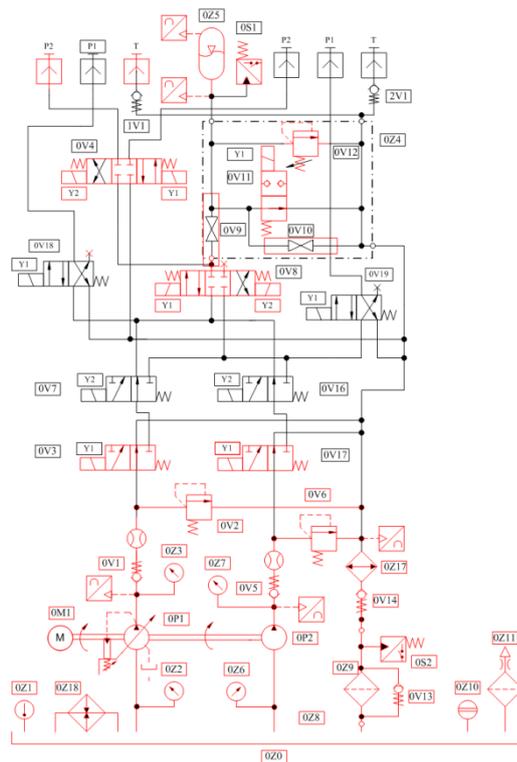
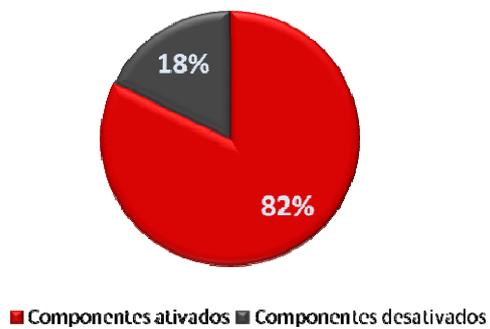


Figura A.4 - Estado 4 - Suprir p2 do usuário 1 com acumulador

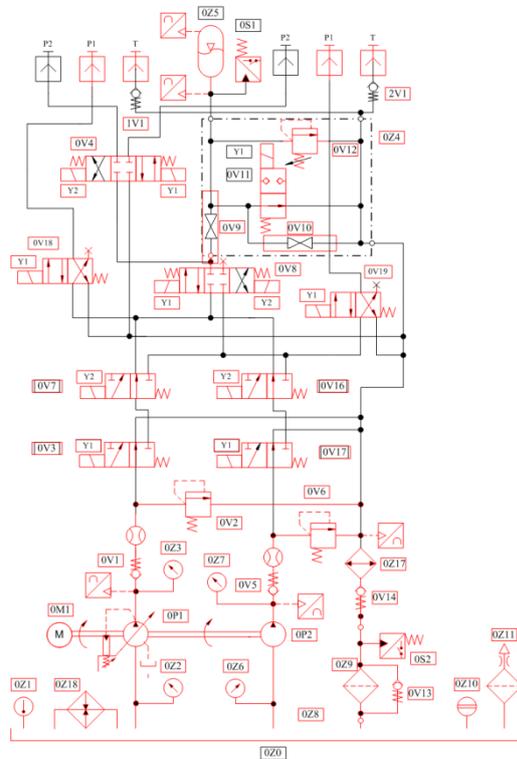
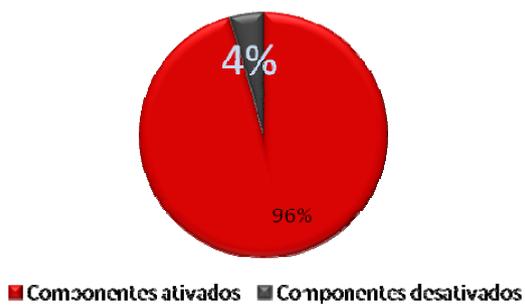


Figura A.5 - Estado 5 - Suprir 1 usuário com bomba e outro com acumulador

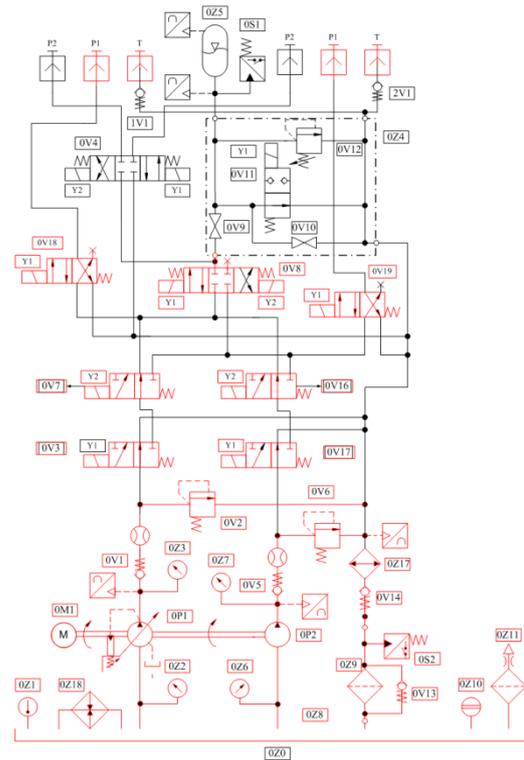
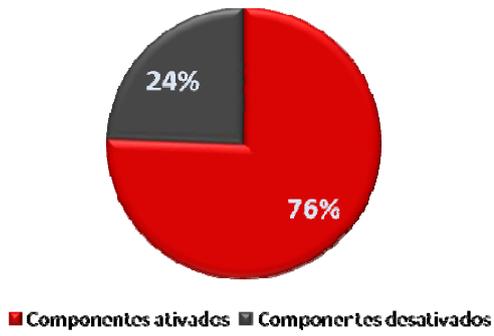


Figura A.6 - Estado 6 - Suprir os dois usuários com BF e BV

APÊNDICE B

REPRESENTAÇÃO DAS ÁRVORES DE SUCESSO

Para representar as árvores de sucesso, utiliza-se a estrutura de Rede de Petri, onde os lugares dessa rede estão relacionados às agências da Rede C/A e as transições definem o tipo de relacionamento entre estas agências. Para facilitar a manipulação matricial das árvores de sucesso, os lugares serão definidos de acordo com a nomenclatura das agências das Redes C/A. No entanto, os lugares serão diferenciados por dois tipos: *S* - subsistema e *C* - componente, quando o lugar for vinculado a um subsistema ou a um componente, respectivamente.

A determinação da representação do lugar, que pode ser de um subsistema ou componente, segue a forma presente na Rede C/A correspondente, ou seja, se a agência sofreu detalhamento, a mesma será representada por um subsistema, caso contrário será representada por um componente.

Além disso, os lugares que representam subsistemas terão um índice no qual indica uma sequência lógica dos subsistemas na estrutura da árvore de sucesso de acordo com os níveis e o desdobramento do sistema. A nomenclatura dos lugares terá uma estrutura de acordo com a Figura B.1.

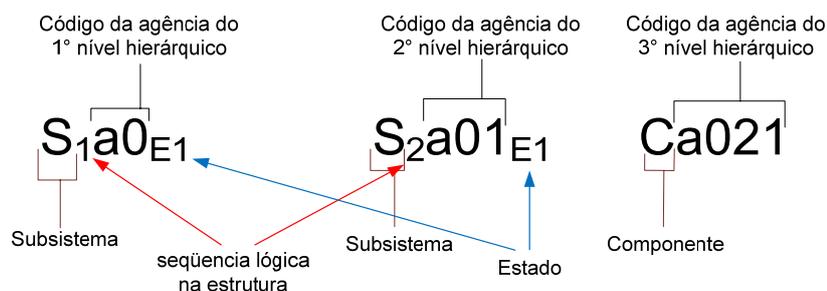


Figura B.1 – Estruturas da nomenclatura dos lugares das árvores de sucesso

Desta forma, as árvores de sucesso representarão o relacionamento de dependência entre os subsistemas e componentes para o atendimento com sucesso de uma determinada função solicitada em cada estado operacional do sistema. Sendo assim, para definir cada árvore de sucesso é necessário reunir em uma única representação todos os subsistemas que foram desdobrados durante a análise do sistema.

A geração das árvores de sucesso de cada estado operacional está baseada na manipulação dos vetores agência definidos na **Atividade 2 - Definir configurações operacionais**.

Os vetores agência são renomeados como vetores subsistema, os quais são compostos por componentes do sistema ou subsistemas de níveis inferiores.

Como exemplo, para um determinado Sistema Automático (SA) o detalhamento para um nível hierárquico abaixo apresenta dois subsistemas, o Sistema de Informação (SI) e o Sistema Energia/Matéria (SEM) conforme Figura 2.4. As agências envolvidas são representadas por a_0 , a_{01} e a_{02} . Os lugares das árvores de sucesso para este desdobramento terão a seguinte denominação S_1a_0 , S_2a_{01} e S_3a_{02} , respectivamente, e a estrutura desta árvore será representada de acordo com a Figura B.2.

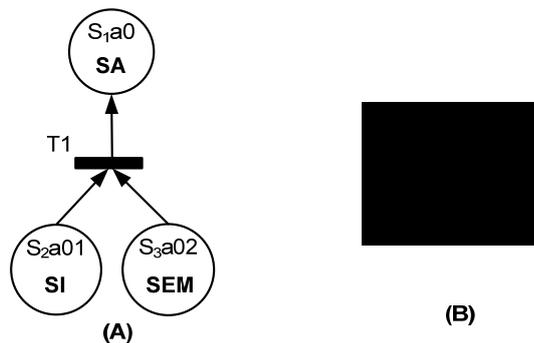


Figura 8.1 - Representação de uma Árvore de Sucesso de sistema automático na forma de: (a) Rede e (b) Matricial

Analisando a árvore de sucesso percebe-se que o SA depende do sucesso dos subsistemas SI e SEM e na representação matricial a relação com os lugares precedentes à transição são representados por '-1' e os posteriores por '1'. Desta forma, ao se detalhar os SI e SEM, duas colunas seriam adicionadas na matriz e nestas a relação com os subsistemas seriam representados por '1' e os componentes dos quais dependeriam seriam representados por '-1'.