

ESTUDO DA INDISPONIBILIDADE DE UM SISTEMA DE SEGURANÇA DE  
UMA CENTRAL NUCLEAR A ÁGUA LEVE POR REDES BAYESIANAS

Lilian Braga Estevão

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Nuclear.

Orientadores: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e  
Melo

José de Jesus Rivero Oliva

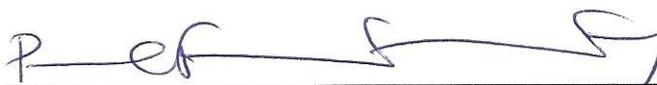
Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2013

ESTUDO DA INDISPONIBILIDADE DE UM SISTEMA DE SEGURANÇA DE  
UMA CENTRAL NUCLEAR A ÁGUA LEVE POR REDES BAYESIANAS

Lilian Braga Estevão

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA  
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Examinada por:



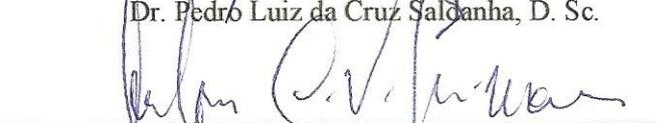
Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, D.Sc.



Prof. José de Jesus Rivero Oliva, D. Sc.



Dr. Pedro Luiz da Cruz Saldanha, D. Sc.



Dr. Antonio Cesar Ferreira Guimarães, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2013

Estevão, Lilian Braga

Estudo da Indisponibilidade de um Sistema de Segurança de uma Central Nuclear a Água Leve por Redes Bayesianas/ Lilian Braga Estevão. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

XII, 55 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

José de Jesus Rivero Oliva

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 33-34.

1. Redes Bayesianas. 2. Árvore de Falhas 3. Mapeamento. 4. Análise de Segurança. I. Melo, Paulo Fernando Ferreira Frutuoso et al. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

“A principal vantagem de raciocínio probabilístico sobre raciocínio lógico é o fato de que agentes podem tomar decisões racionais mesmo quando não existe informação suficiente para se provar que uma ação funcionará.”

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por estar sempre presente, me iluminando e abençoando.

Aos meus pais, Denise e Bernardino, pela confiança e incentivo.

Ao meu namorado, Maxwell, por acreditar em mim quando nem mesmo eu acreditava.

A amiga Dillyane, que trilhou ao meu lado, sorrindo e chorando, brincando e se desesperando em todos os momentos.

Aos meus orientadores, Paulo Fernando e Jesus, por todo ensinamento.

Aos amigos da turma de mestrado 2011 que caminharam juntos, vencendo todos os obstáculos.

Aos queridos Reginaldo e Lili por todo carinho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

## ESTUDO DA INDISPONIBILIDADE DE UM SISTEMA DE SEGURANÇA DE UMA CENTRAL NUCLEAR A ÁGUA LEVE POR REDES BAYESIANAS

Lilian Braga Estevão

Fevereiro / 2013

Orientadores: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

José de Jesus Rivero Oliva

Programa: Engenharia Nuclear

Este trabalho tem por objetivo fazer o mapeamento de árvore de falhas por redes bayesianas, a fim de comparar seus resultados. Os cálculos para árvore de falhas foram realizados através do programa Sapphire, e para redes, o Netica. O presente estudo mostrou que a rede bayesiana é uma técnica adequada para análise de segurança. A possibilidade de tratar eventos dependentes, as incertezas e a atualização das probabilidades, são algumas das vantagens de se utilizar a rede bayesiana. Ela possui muitos aspectos comuns à árvore de falhas, porém sua superioridade foi destacada. Neste contexto, conclui-se que a rede bayesiana é uma ferramenta mais completa que a árvore de falha e possui grande importância em análise de segurança, pois ajuda a prever, de forma mais ampla, eventos desconhecidos que podem causar acidentes.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

UNAVAILABILITY STUDY OF A SAFETY SYSTEM OF A LIGHT WATER  
NUCLEAR POWER PLANT BY BAYESIAN NETWORKS

Lilian Braga Estevão

February / 2013

Advisors: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

José de Jesus Rivero Oliva

Department: Nuclear Engineering

This paper aims to map fault trees by Bayesian networks in order to compare their results. The calculations for fault trees were performed by the Sapphire program, and for Bayesian network, the Netica software was used safety analysis. This present study showed that the Bayesian network is a suitable technique for safety analysis. The possibility of treating dependent events, the uncertainties and updating of probabilities, are some of the advantages of using Bayesian networks. It has many features common to fault trees, but their superiority was highlighted. In this context, it is concluded that the Bayesian network tool is more complete than the fault tree and has great importance in safety analysis, helping to predict, more broadly, unknown events that can cause accidents.

# SUMÁRIO

	Pág.
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISAO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>2</b>
<b>3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>	<b>5</b>
3.1 ÁRVORE DE FALHAS.....	5
3.2 TEOREMA DE BAYES.....	12
3.3 TEORIA DE GRAFOS.....	13
3.4 REDES BAYESIANAS.....	15
<b>4 MAPEAMENTO.....</b>	<b>17</b>
<b>5 ESTUDO DO CASO.....</b>	<b>25</b>
5.1 CÓDIGOS DE IDENTIFICAÇÃO.....	25
5.2 DEFINIÇÕES DOS SISTEMAS.....	26
5.3 MODO DE FALHAS.....	27
5.4 RESULTADOS.....	30
<b>6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>32</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>33</b>
<b>APÊNDICE A – DIAGRAMAS DO SISTEMA DE REMOÇÃO DE CALOR DA CONTENÇÃO.....</b>	<b>35</b>
<b>APÊNDICE B – ÁRVORE DE FALHAS DO CHRS REPRODUZIDA NO SAPHIRE E REDE BAYESIANA REPRODUZIDA NO NETICA.....</b>	<b>44</b>
<b>APÊNDICE C – TABELAS.....</b>	<b>45</b>
<b>APÊNDICE D – RESULTADOS.....</b>	<b>54</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Fig. 2.1</b> Árvore de falhas para o mal funcionamento do sistema de alimentação..	4
<b>Fig. 2.2</b> Rede bayesiana mapeada da árvore de falha da Fig 2.1.....	4
<b>Fig. 3.1</b> Exemplo de portão lógico OU.....	9
<b>Fig. 3.2</b> Exemplo de portão lógico E.....	9
<b>Fig. 3.3</b> Árvore de falhas simples.....	11
<b>Fig. 3.4</b> Grafo direcionado.....	13
<b>Fig. 3.5</b> Grafo não direcionado.....	13
<b>Fig. 3.6</b> Grafo acíclico direcionado.....	14
<b>Fig. 3.7</b> Redes bayesianas.....	15
<b>Fig. 3.8</b> Redes bayesianas.....	16
<b>Fig. 4.1</b> Portão OU da AF.....	17
<b>Fig. 4.2</b> Portão E da AF.....	18
<b>Fig. 4.3</b> Representação dos nós para RB.....	18
<b>Fig. 4.4</b> Parte 1 da árvore de falhas.....	19
<b>Fig. 4.5</b> RB mapeada da parte 1 da AF.....	20
<b>Fig 4.6</b> Parte 2 da árvore de falhas do CHRS.....	21

<b>Fig. 4.7</b>	RB mapeada da parte 2 da AF.....	22
<b>Fig. 4.8</b>	Parte 3 da AF do CHRS, modo comum.....	22
<b>Fig. 4.9</b>	RB mapeada da parte 3 da AF.....	22
<b>Fig. 4.9.1</b>	Parte 4 da AF do CHRS, parte excluída.....	23
<b>Fig. 4.9.2</b>	RB mapeada da parte 4 da AF.....	24
<b>Fig. 5.1</b>	Código de identificação para eventos básicos.....	25
<b>Fig. 5.2</b>	AF para a determinação da Indisponibilidade do Sistema.....	27
<b>Fig. 5.3</b>	Árvore de falhas do CHRS excluindo a falha da energia elétrica.....	28
<b>Fig. 5.4</b>	RB mapeada da AF, excluindo a falha da energia elétrica.....	29

## ÍNDICE DE TABELAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabela 3.1</b> Diferentes eventos básicos.....	6
<b>Tabela 3.2</b> Portas lógicas.....	7
<b>Tabela 3.3</b> Outros símbolos.....	8

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

AF	Árvore de Falhas
AS	Análise de Segurança
APS	Análise Probabilística de Segurança
ET	Evento Topo
EB	Evento Básico
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
FTA	<i>Fault Tree Analysis</i>
FPC	Funções de Probabilidade Condicional
GAD	Grafo Acíclico Direcionado
RB	Rede Bayesiana
TPC	Tabela de Probabilidade Condicional
APR	Avaliação Probabilística de Risco
CEA	Comissão de Energia Atômica
CHRS	<i>Containment Heat Removal System</i>
CSRS	<i>Containment Spray Recirculation System</i>
CLCS	<i>Consequence Limiting Control System</i>
LOCA	<i>Loss of Coolant Accident</i>
FP	Falha Perigosa
FS	Falha Segura

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

As redes bayesianas são utilizadas para representar conhecimentos e tomar decisões racionais em domínios incertos. Elas se tornaram uma ferramenta muito útil para resoluções de problemas em diversas áreas de aplicação. Com esta ferramenta, é possível considerar os eventos que têm dados escassos utilizando a opinião de especialistas. Segundo Gomes (2011), cada especialista pode inferir uma resposta para a probabilidade do evento em questão, mediante informações anteriores e suas próprias opiniões.

O objetivo deste trabalho é apresentar a modelagem da falha de um sistema de segurança de uma usina a água leve típica de segunda geração, o Sistema de Remoção de Calor da Contenção (CHRS), cuja função é resfriar a água do poço da contenção sendo recirculada através do Sistema da Contenção de Recirculação do Spray (CSRS). O CSRS é automaticamente iniciado após um acidente de perda de refrigerante (LOCA) e juntamente com o CHRS resfria a água do reservatório.

A razão para o uso de uma rede bayesiana neste contexto foi avaliar sua capacidade de reproduzir os resultados de análises de árvore de falhas e também verificar a possibilidade de tratar eventos dependentes através do Teorema de Bayes.

Para reproduzir a árvore de falhas do CHRS foi utilizado o software SAPHIRE, realizando os cálculos através deste programa. Após a conclusão do mapeamento da rede bayesiana através da árvore de falhas, a rede foi calculada utilizando o software *Netica*<sup>TM</sup>. Este software foi escolhido por causa de sua facilidade de manuseio e disponibilidade.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

É apresentada, no Capítulo 2 a Revisão Bibliográfica. O Capítulo 3 traz os Fundamentos Teóricos. No Capítulo 4 é realizado o mapeamento da árvore de falhas por redes bayesianas, a fim de comprovar essa modelagem. O Capítulo 5 faz o Estudo do Caso. Em seguida o Capítulo 6 finaliza com as Conclusões e Recomendações. As Referências Bibliográficas consultadas e mencionadas no decorrer deste trabalho estão listadas a seguir.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Bobbio et al. (2001) descrevem o mapeamento de árvore de falhas (AF) por redes bayesianas (RB). Este artigo mostrou a conversão dos portões lógicos OU e E em nós da rede, além de destacar que qualquer AF pode ser mapeada por RB, porém nem toda rede tem uma árvore correspondente.

A RB é aplicável a diversas áreas. Maglogiannis et al. (2006), desenvolveram um estudo sobre o uso da rede em um sistema de monitoração de pacientes. O objetivo deste trabalho está no monitoramento de sinais vitais para o atendimento da medicina em casa, chamado sistema VITAL- Home, desenvolvido e mantido pelo centro de medicina privada (Diagnóstico Médico e Tratamento S.A.). O artigo conduz a comparação da árvore de falhas e das redes bayesianas, disponibilizando os conceitos básicos de ambas.

Lee e Lee (2006) mostram o uso da rede bayesiana para Avaliação Probabilística de Segurança (APS) na eliminação de resíduos nucleares. Propõem uma avaliação quantitativa, combinando a inferência bayesiana com a análise de segurança tradicional. Demonstram que o tratamento de eliminação de resíduos é confiável, em outras palavras, o homem e o ambiente podem ser protegidos.

Langseth e Portinale (2007) citaram o crescente interesse pelo uso da RB em confiabilidade. A partir desta utilização, começaram a surgir comparações entre AF e as RB. A superioridade da rede foi destacada. Os autores definiram a rede como parte qualitativa, Grafos Acíclicos Direcionados (GAD) e parte quantitativa, conjunto de Funções de Probabilidade Condicional (FPC). A construção do modelo segue os seguintes passos: Decidir qual o modelo a ser utilizado; Definir as variáveis; Definir a parte qualitativa; Definir a parte quantitativa; Fazer verificações.

Segundo Kohda e Cui (2007), com a finalidade de evitar acidentes ou avarias em sistemas industriais, o sistema de monitoramento de segurança detecta os sintomas no início de sua fase. Mediante as perturbações externas ou a falha de componentes que não são controladas, o sistema de monitoramento de segurança detecta os sintomas e emite um alarme. A função deste sistema é detectar os sintomas previamente e disparar o alarme sob condições anormais da planta. As Falhas Perigosas (FP) e as Falhas de Seguras (FS) são falhas antagônicas, e devem ser consideradas. Na primeira, o alarme

não funciona em condições anormais. Na segunda, o alarme é acionado em condições normais. A FP pode contribuir a um acidente grave, enquanto que a FS provoca manutenção e custos desnecessários. O objetivo deste trabalho é expressar por redes bayesianas o sistema de monitoração de segurança de uma instalação.

Doguc et al. (2009) definiram a RB como um GAD, onde os nós representam componentes de sistemas e os arcos representam as relações entre eles. Este artigo define um método que utiliza dados históricos sobre o sistema a ser modelado. Construíram uma RB através de um algoritmo chamado K2. O algoritmo fornece resultados precisos, contudo é necessária a intervenção humana durante a construção da rede. O método proposto por este artigo é de fácil aplicabilidade a grandes sistemas.

Segundo Chen et al. (2010), o primeiro a usar RB em inteligência artificial foi Pearl, em 1986. Este artigo abordou os tópicos a seguir como as principais características da análise de segurança de uma usina nuclear: estrutura complicada, rigorosa gestão de segurança e fatores humanos e propõe o uso de RB baseada em FMEA e FTA. Para calcular as probabilidades do nó raiz, foi utilizada Simulação por Monte Carlo.

Segundo Jones et al. (2010), a RB é uma fórmula matemática simples capaz de calcular probabilidades de eventos aleatórios. Neste artigo foi destacada a capacidade da RB de lidar com probabilidades subjetivas através da opinião de especialistas. Dentre as aplicações da RB, os autores realçam a manutenção preventiva, que é uma atividade com o propósito de reduzir a ocorrência de falhas no sistema. Existe também a manutenção corretiva, que é realizada após ocorrer falha de algum ponto do sistema.

Khakzad et al. (2011) destacaram a importância da análise de segurança em instalações a gás. Os autores identificaram duas técnicas que quantificam as probabilidades: árvore de falhas e redes bayesianas. Este trabalho teve como foco principal a comparação entre tais técnicas. Foi realizado um mapeamento de uma AF por RB evidenciando a superioridade da segunda em relação à primeira. As Figuras 2.1 e 2.2 representam este mapeamento.

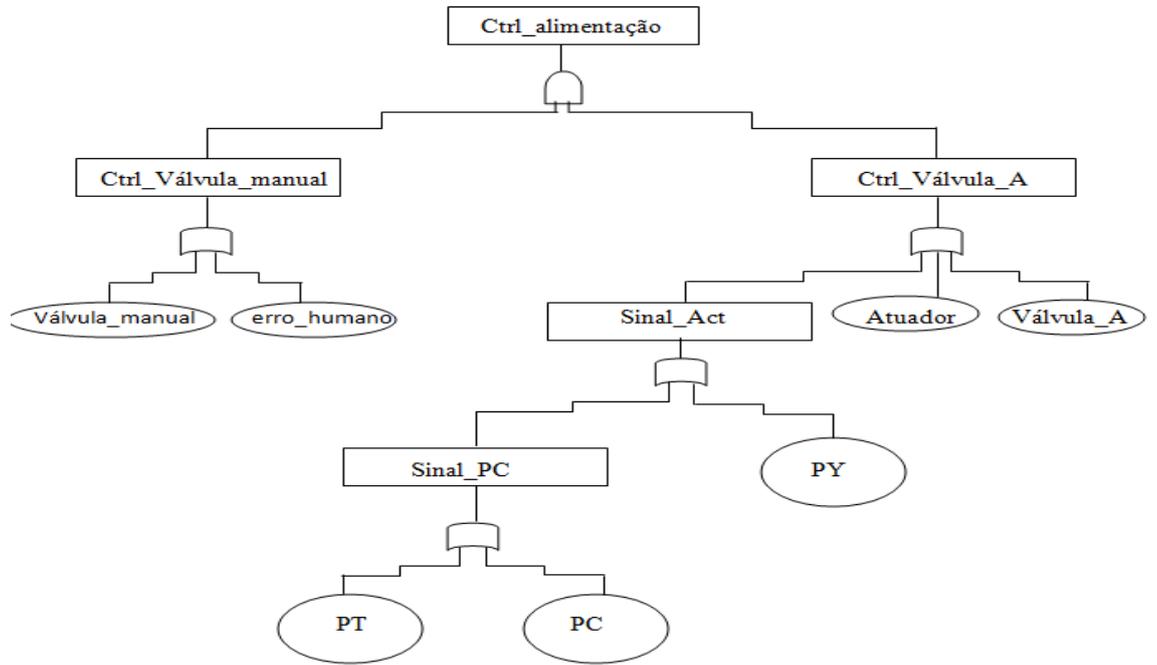


Fig 2.1 – Árvore de falhas para o mal funcionamento do sistema de controle de alimentação de transferência de propano, Khakzad et al. (2011)

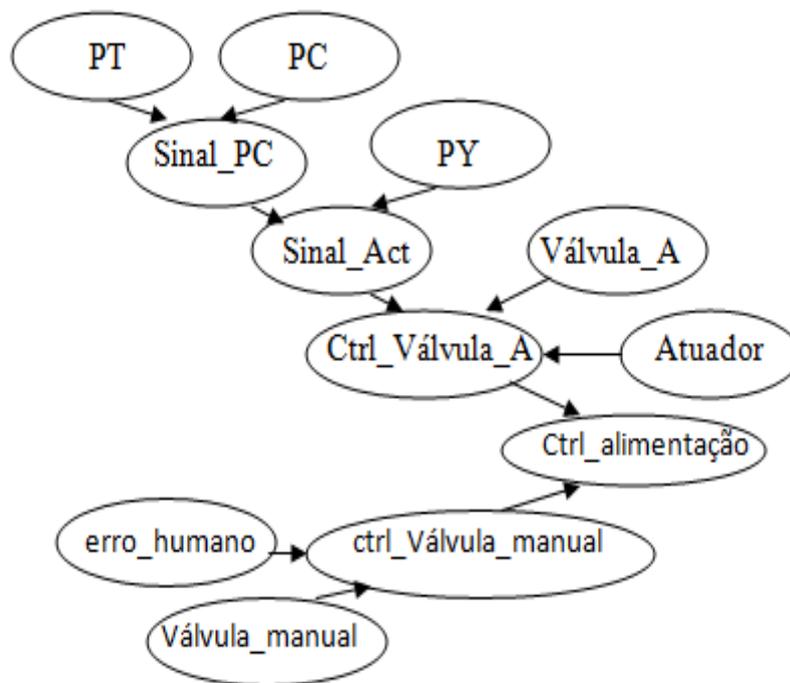


Fig 2.2 – Rede bayesiana mapeada da árvore de falha da Fig 2.1, Khakzad et al. (2011)

## 3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 3.1 ÁRVORE DE FALHAS

A árvore de falhas é uma das técnicas mais populares para a análise de segurança, cuja finalidade é modelar a ocorrência de eventos que possam gerar falhas de sistemas ou acidentes. Sua construção se dá de cima para baixo, dos eventos para as causas. A AF é uma técnica que permite identificar as falhas de um sistema que podem conduzir a um evento indesejado, chamado Evento Topo (ET).

O ET representa uma falha de sistema ou cenário de acidente que constitui um desafio para a segurança. Ele deve ser colocado no topo da árvore de falhas e é chamado nó raiz.

O objetivo da análise da árvore de falhas é estudar as várias combinações possíveis de elementos primários, que podem levar ao evento topo. É importante salientar que uma árvore de falhas não representa necessariamente todas as combinações de falhas possíveis em um sistema. Ela inclui apenas as falhas que o especialista consegue identificar.

Os eventos de uma AF são binários, com dois estados possíveis (funciona/ não funciona), estatisticamente independentes. Suas relações causais são representadas por portões lógicos.

Segundo Khakzad et al. (2011), após a construção da AF ela poderá ser analisada qualitativa e quantitativamente. A análise qualitativa permite determinar o conjunto de cortes mínimos da árvore de falhas. A análise quantitativa, determina a probabilidade de ocorrência do evento topo e dos cortes mínimos mais importantes.

Denomina-se corte mínimo àquele que constitui o menor número possível de eventos básicos, cuja ocorrência simultânea conduz ao evento topo. Ou seja, o corte mínimo é um conjunto de eventos cuja ocorrência é necessária e suficiente para levar ao evento topo sem que haja perda em sua condição de corte.

Para árvores de falhas grandes, com muitos portões lógicos e eventos básicos, a determinação dos cortes mínimos não é trivial. Neste caso, utiliza-se a álgebra booleana.

Assim, o evento topo é representado em termos de combinações de todos os eventos básicos e expresso como a união de todos os cortes mínimos da árvore.

### 3.1.1 Simbologia da árvore de falhas

As Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3 mostram os símbolos utilizados para a construção de uma árvore de falhas, subdivididas em eventos básicos, portões lógicos e outros símbolos.

Tabela 3.1 – Diferentes eventos básicos

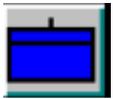
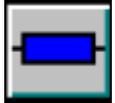
Símbolo	Nomenclatura
	Evento básico
	Evento básico em caixa
	Tabela de evento básico
	Evento básico não desenvolvido
	Evento casa
	Transferência não desenvolvida

Tabela 3.2 – Portas lógicas

	<p>Portão E</p>
	<p>Portão OU</p>
	<p>Portão N/M</p>
	<p>Portão transferência</p>
	<p>Portão de inibição</p>
	<p>Portão não OU</p>
	<p>Portão não E</p>

Tabela 3.3 – Outros símbolos

	<p>Transferência para a esquerda</p>
	<p>Transferência para a direita</p>
	<p>Caixa vertical</p>
	<p>Caixa horizontal</p>

Como mostrado na Tabela 3.1, existem diferentes eventos básicos. Estes são estatisticamente independentes, a não ser quando se trata de falhas de causa comum. O EB é representado por um círculo e indica que a falha não pode mais ser subdividida. O EB em caixa é análogo ao anterior, porém possui espaço para descrever seu evento, o que facilita o entendimento da árvore. A Tabela de EB é conveniente quando houver muitas entradas. O evento não desenvolvido, losango, indica que devida à falta de informações este evento não será desenvolvido em detalhes. A casa permite ligar ou desligar subárvores para modelar cenários em condições operacionais diversas e a transferência permite representar árvores grandes, através da possibilidade de passar parte da árvore para outra página.

Na Tabela 3.2 são mostrados os portões lógicos, que permitem modelar como os eventos devem se combinar para resultar no ET. Para o portão E, a falha na saída ocorrerá apenas se todas as entradas ocorrerem. O portão OU indica que ocorrerá falha na saída se pelo menos uma entrada ocorrer. As Figuras 3.1 e 3.2 exemplificam os Portões OU e E, respectivamente.

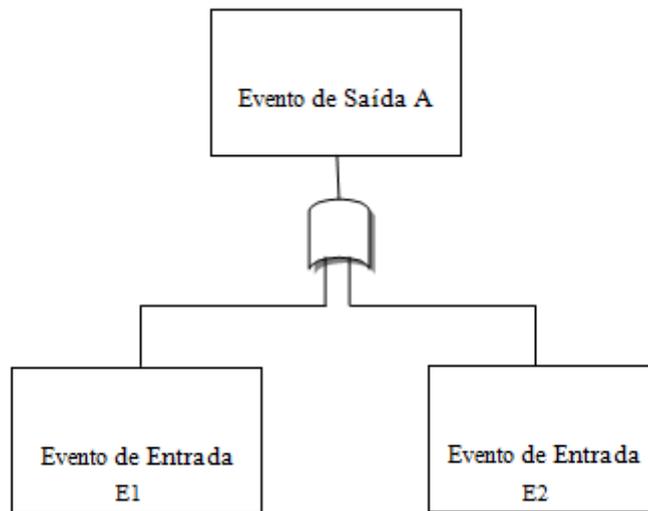


Fig 3.1 –  $A = E1 \cup E2$

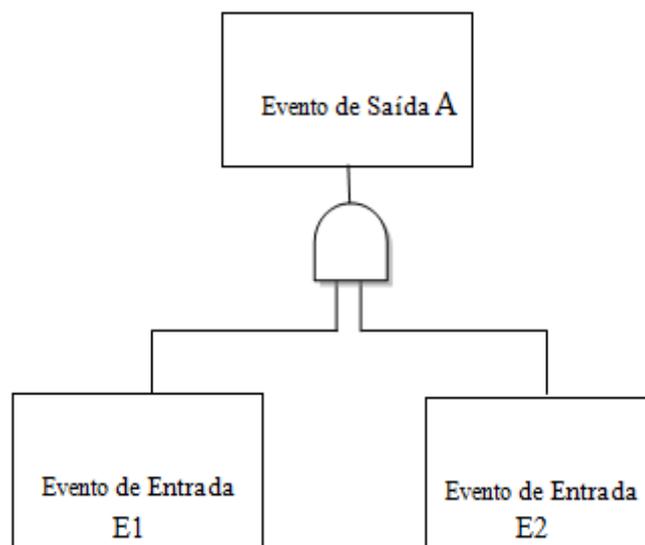


Fig 3.2 –  $A = E1 \cap E2$

O portão M/N representa que pelo menos M das N entradas devem ocorrer. Para que exista falha na saída o portão transferência indica que a árvore terá continuidade em outra página e o de inibição necessita da existência do evento condicional para ocorrer.

A Tabela 3.3 mostra os outros símbolos para a construção de uma árvore de falhas. As transferências para a esquerda e para a direita são utilizadas para manter a árvore mais organizada evitando, assim, duplicações na mesma página. As caixas verticais e horizontais possuem a função de facilitar o entendimento da árvore, visto que, para os cálculos elas não são consideradas.

### **3.1.2 Construção da árvore de falhas**

Para a construção de uma AF, parte-se do evento topo e tentam-se descobrir os possíveis eventos intermediários que contribuem a ele. Este processo se repete sucessivamente para os eventos intermediários até chegar aos eventos básicos. É necessário que o analista compreenda bem o sistema em questão. Após a elaboração do diagrama lógico, aplicam-se os dados para efetuar a análise quantitativa, que serve para determinar a probabilidade de ocorrência do evento topo e dos cortes mínimos mais importantes.

A Figura 3.3 mostra uma árvore de falhas simples, onde o evento topo está conectado com o intermediário e com os básicos através de um portão “OU”. Sendo assim, se um ou mais eventos de entrada ocorrer, ocorrerá a falha do sistema.

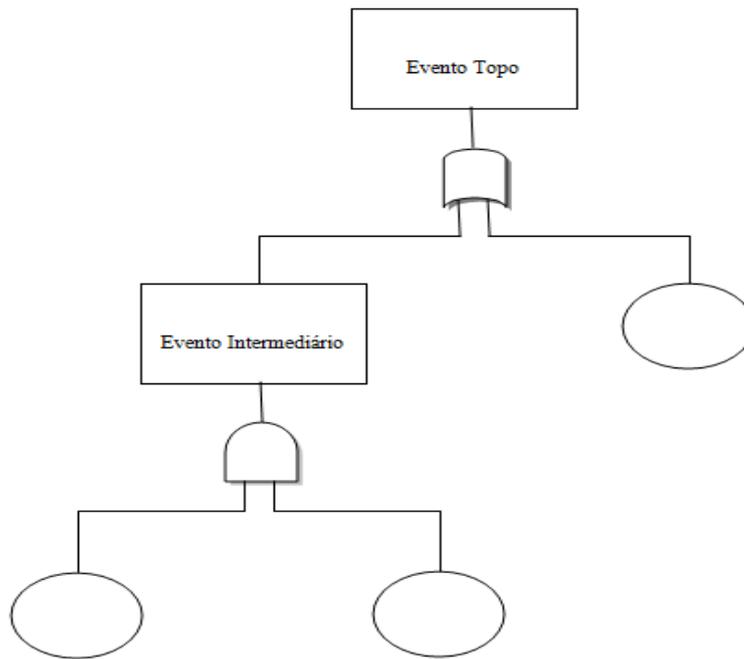


Fig 3.3 –Árvore de falhas simples

O evento intermediário está determinado por dois eventos básicos conectados através de um portão lógico “E”. Portanto, para que aconteça este evento, é necessário que ambos os eventos básicos ocorram.

A fim de facilitar a compreensão acerca das redes bayesianas, seguem abaixo os conceitos básicos do Teorema de Bayes e da Teoria dos Grafos.

### 3.2 TEOREMA DE BAYES

O Teorema de Bayes relaciona as probabilidades de A e B com suas probabilidades condicionais, e é definido como:

$$P(A | B) = \frac{P(B | A)P(A)}{P(B)}$$

Onde,

$P(A)$  é a probabilidade a priori de A, ou seja, antes de considerar o evento condicional B;

$P(B)$  é a probabilidade de B, e atua como uma constante de normalização;

$P(A|B)$  é a probabilidade condicional de A, dado a ocorrência de B. É chamada de probabilidade posterior, pois a ocorrência de A depende da ocorrência de B;

$P(B|A)$  é a probabilidade condicional de B, dado a ocorrência de A.

Se  $P(B) = 0$  então  $P(A|B)$  não estará definido, pois não faz sentido condicionar a ocorrência de um evento A à ocorrência de um evento B impossível.

### 3.3 TEORIA DE GRAFOS

Segundo Barber (2010), um grafo  $G$  consiste de vértices (nós) e linhas entre os vértices. Os grafos podem ser direcionados e não direcionados, dependendo da existência ou não de direção das linhas. As Figuras 3.4 e 3.5 são exemplos.

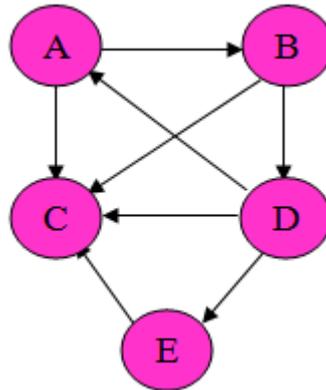


Fig 3.4 –Grafo direcionado

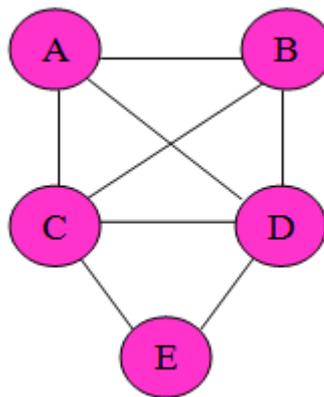


Fig 3.5 –Grafo não direcionado

Um caminho de A para B é uma sequência de nós que conectam A e B. Um ciclo é um caminho que começa e termina no mesmo nó. Vale ressaltar que o ciclo deve necessariamente conter mais de dois nós e caso o grafo não possua ciclo ele é chamado acíclico.

Um Grafo Acíclico Direcionado (GAD) não possui ciclo e suas arestas são direcionadas. O sentido da aresta indica a relação de dependência entre os nós, ou seja, se uma aresta parte de um nó A para um nó B, então A é dito pai de B assim como B é filho de A. Se um determinado nó não possui pai, ele é chamado de nó raiz. As dependências entre os nós são quantificadas pelas probabilidades condicionais, Gomes (2011).

Para exemplificar, a Figura 3.6 ilustra as relações de dependências entre as variáveis. Note-se que os pais de  $A_5$  são  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$ . O pai de  $A_7$  e de  $A_8$  é o  $A_5$ . Em contrapartida,  $A_5$  é filho de  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$ . As variáveis  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$  são chamadas de raiz, pois elas não possuem pais.

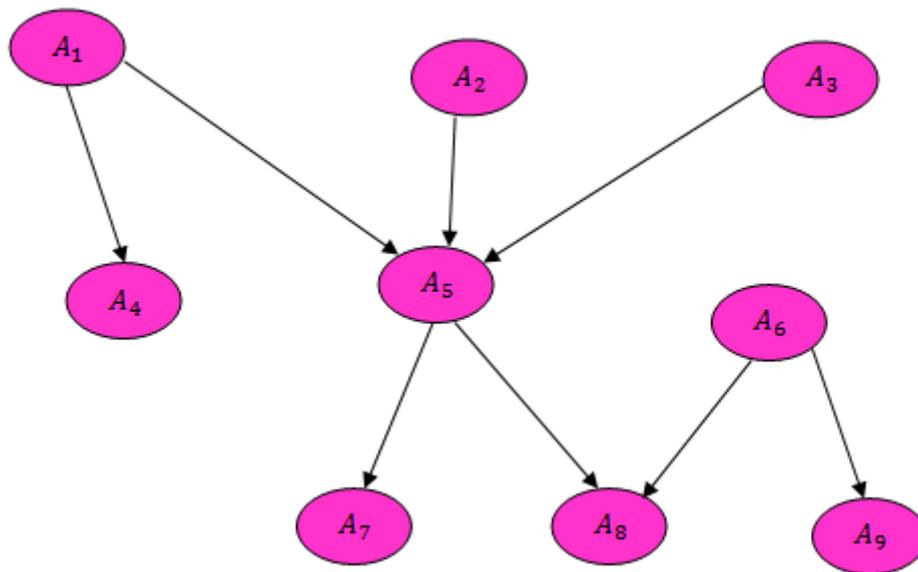


Fig 3.6 –Grafo Acíclico Direcionado

### 3.4 REDES BAYESIANAS

As redes bayesianas (RB) são grafos acíclicos direcionados (GAD) onde os nós representam as variáveis (discretas ou contínuas), e entre elas existem linhas que as conectam, gerando relações entre as variáveis, Khakzad et al. (2011).

Segundo Jones et al. (2010), uma RB é uma ferramenta de inteligência artificial, com a finalidade de modelar incertezas. Tais incertezas podem ser provenientes do entendimento inadequado do sistema, seu conhecimento incompleto e de seu comportamento aleatório.

As redes bayesianas consistem de um conjunto de variáveis e um conjunto de linhas direcionadas entre as variáveis, Jensen (2001).

As redes bayesianas são adequadas para situações de dados escassos, para isto utilizam a opinião de especialistas. Elas são capazes de reduzir incertezas através da atualização das probabilidades, assim como visualizar as dependências entre as variáveis. Outra vantagem das RB é a possibilidade de se adicionar novos objetos, pois seu modelo é flexível, permitindo a modificação dos nós.

O campo de aplicação de uma RB é amplo. Seu modelo é capaz de lidar com sistemas de alta complexidade. A Figura 3.7 exemplifica uma rede bayesiana.

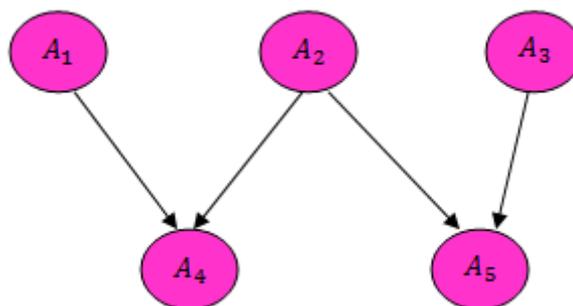


Fig 3.7 –Redes bayesianas

Assim como a AF, a RB consiste de parte qualitativa e quantitativa. Segundo Bobbio et al. (2001), a parte qualitativa é representada pelo grafo acíclico direcionado e a quantitativa, pela probabilidade condicional. A Figura 3.8 mostra a parte qualitativa de uma RB, onde  $A_1$  e  $A_2$  são nós raízes e pais de  $B$ . As probabilidades de  $A_1$  e  $A_2$  devem ser dadas, pois elas são incondicionais.

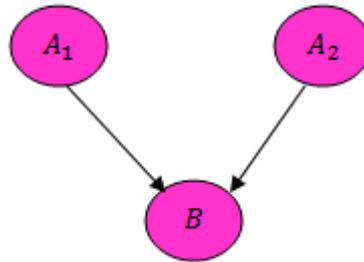


Fig 3.8 –Redes bayesianas

## 4 MAPEAMENTO

Conforme citado por Bobbio et al. (2001), qualquer AF pode ser mapeada por uma RB seguindo os passos abaixo:

- Para cada evento primário ou sistemas de componentes da AF, deve-se criar um nó raiz para a RB;
- Atribuir o valor da probabilidade a priori para RB, que corresponde ao valor do portão da árvore;
- Para cada portão na AF criar um respectivo nó na rede;
- Destacar o evento topo da AF como nó falho na RB;
- Conectar os nós na rede da mesma forma que os portões são conectados na árvore;
- Para cada portão da AF atribuir a Tabela de Probabilidade Condicional (TPC) ao nó correspondente.

Este procedimento será aplicado ao mapeamento da árvore de falhas do CHRS para a obtenção da rede bayesiana correspondente. Será realizado em partes, subdividindo a árvore, com a finalidade de evitar erros, visto que não será utilizado um algoritmo.

As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 representam a passagem dos portões E e OU para um nó da rede. Vale ressaltar que o evento topo (A) da AF se torna o nó filho na RB. Assim como, os eventos primários (B e C) passam a serem os nós pais.

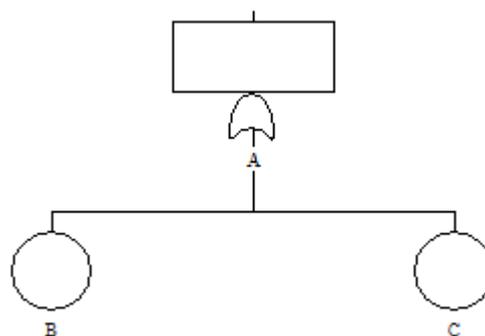


Fig 4.1 – Portão OU da AF

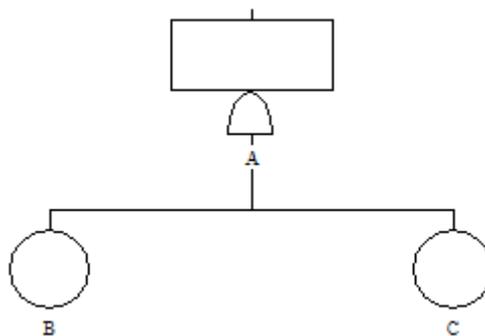


Fig 4.2 – Portão E da AF

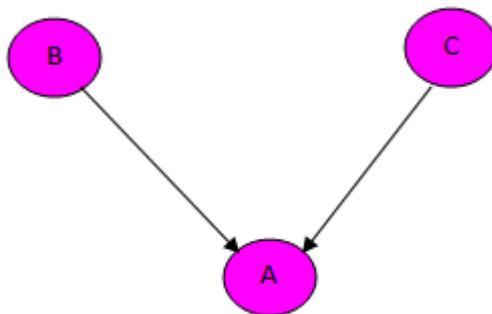


Fig 4.3 – Representação dos nós para RB

Conforme citado, a árvore de falhas do CHRS será subdividida. A parte 1 representará a falha de 3 de 4 trocadores de calor quando ocorre falha de energia, o chamado G\_02; a parte 2 indica água insuficiente no canal de entrada, G\_17; a parte 3 representa o modo de falha, Falha\_01 e, finalmente, a parte 4 é a falha de 3 de 4 trocadores de calor quando não ocorre falha da energia elétrica, G\_09. Estas divisões estão representadas nas Figuras 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.9.1 e 4.9.2 e as descrições dos eventos aparecem no Apêndice C, Tabela C6.

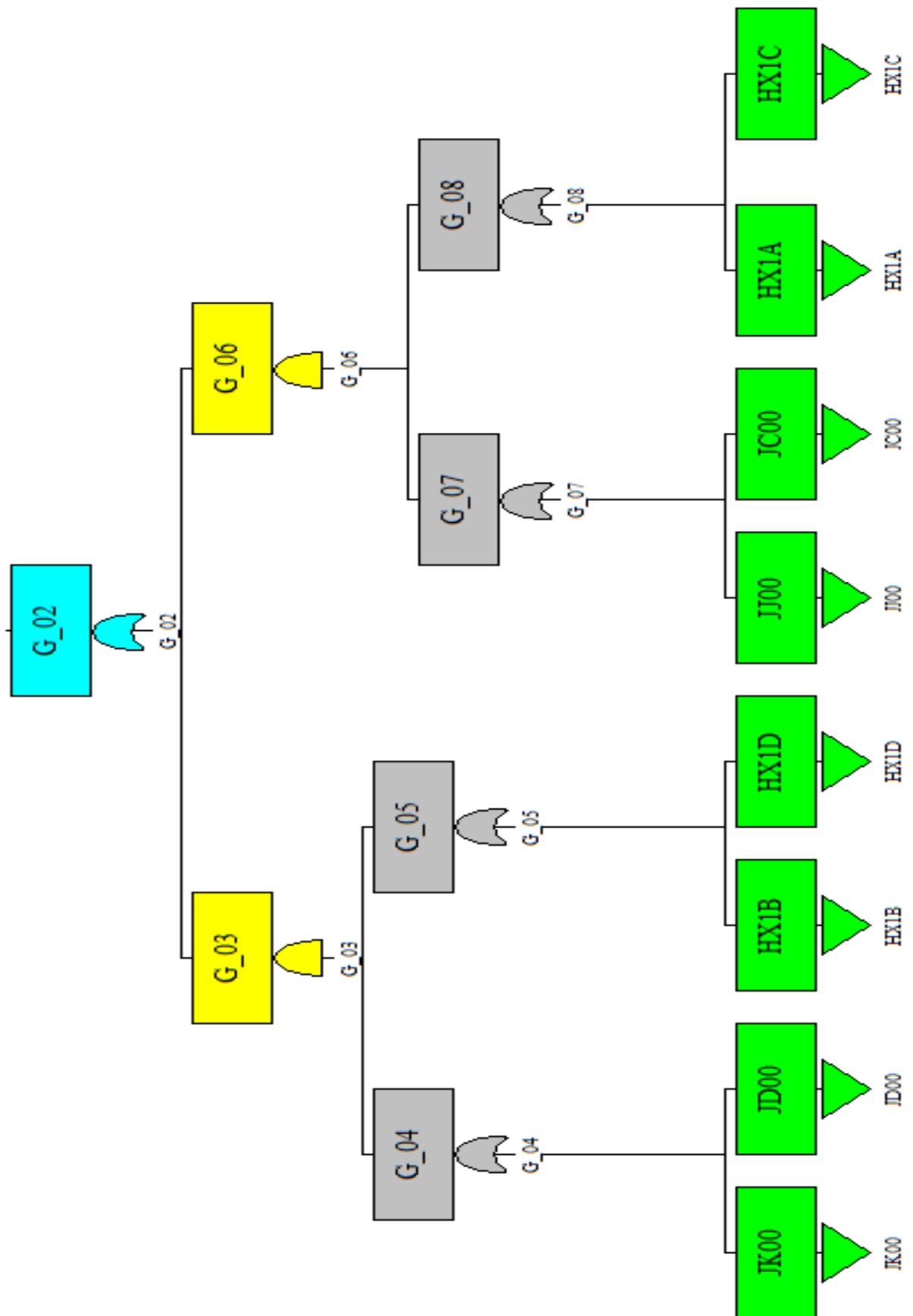


Fig 4.4 – Parte 1 da árvore de falhas, falha tripla.

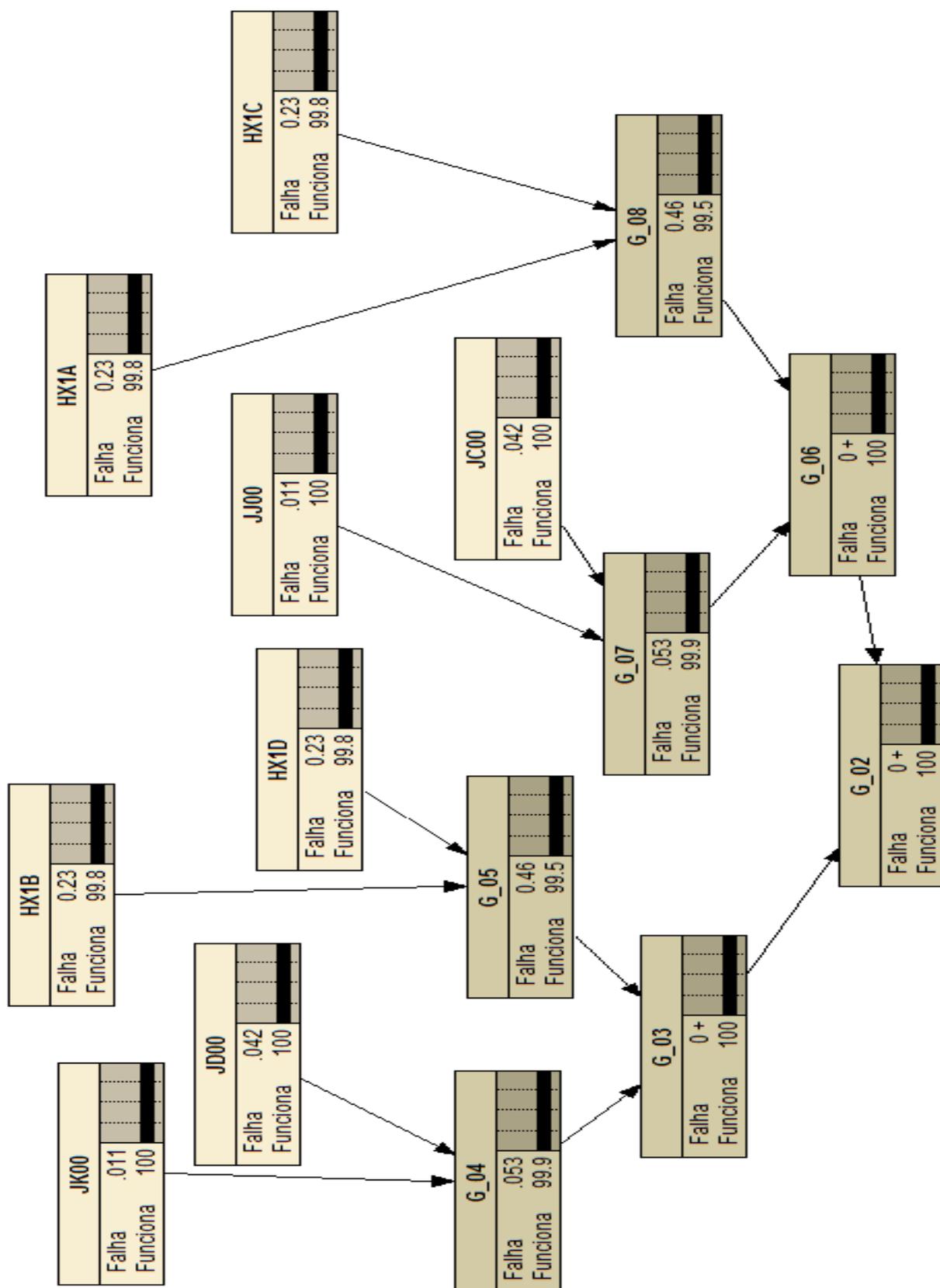


Fig 4.5 – RB mapeada da parte 1 da AF

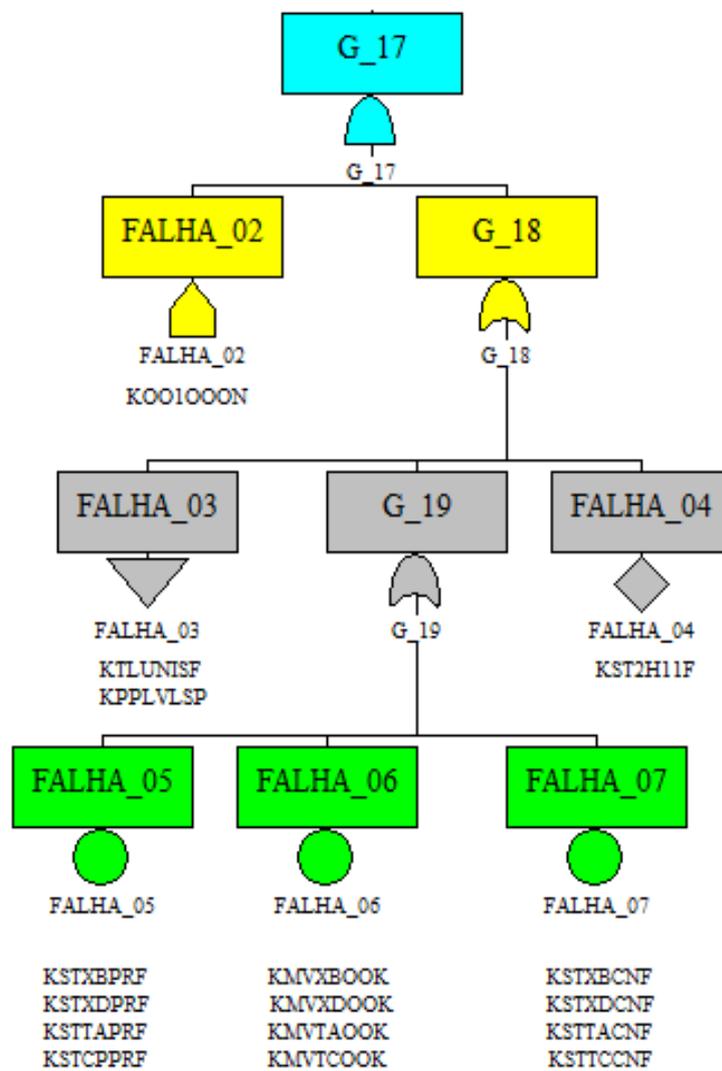


Fig. 4.6 –Parte 2 da árvore de falhas do CHRS, falha dupla

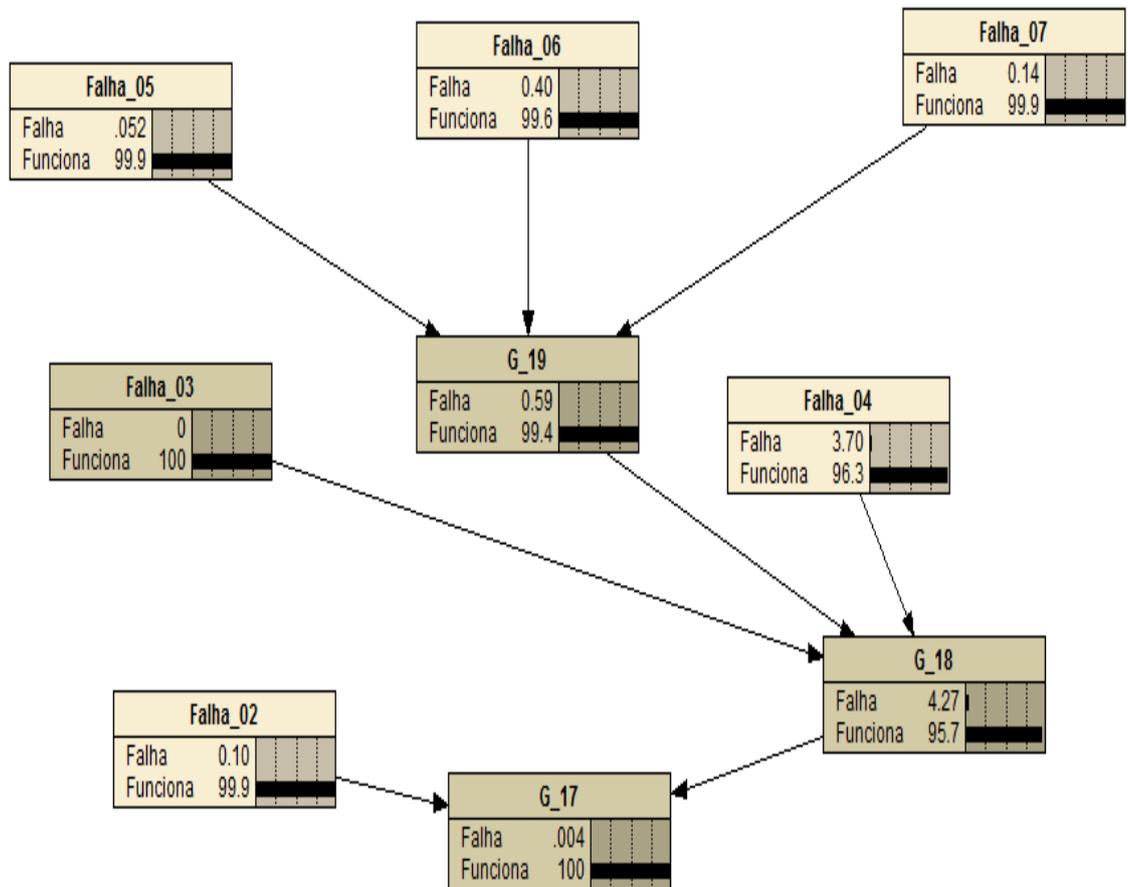


Fig. 4.7 – RB mapeada da parte 2 da AF

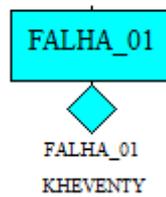


Fig. 4.8 – Parte 3 da árvore de falhas do CHRS, modo comum

Falha_01	
Falha	.001
Funciona	100

Fig. 4.9 – RB mapeada da parte 3 da AF

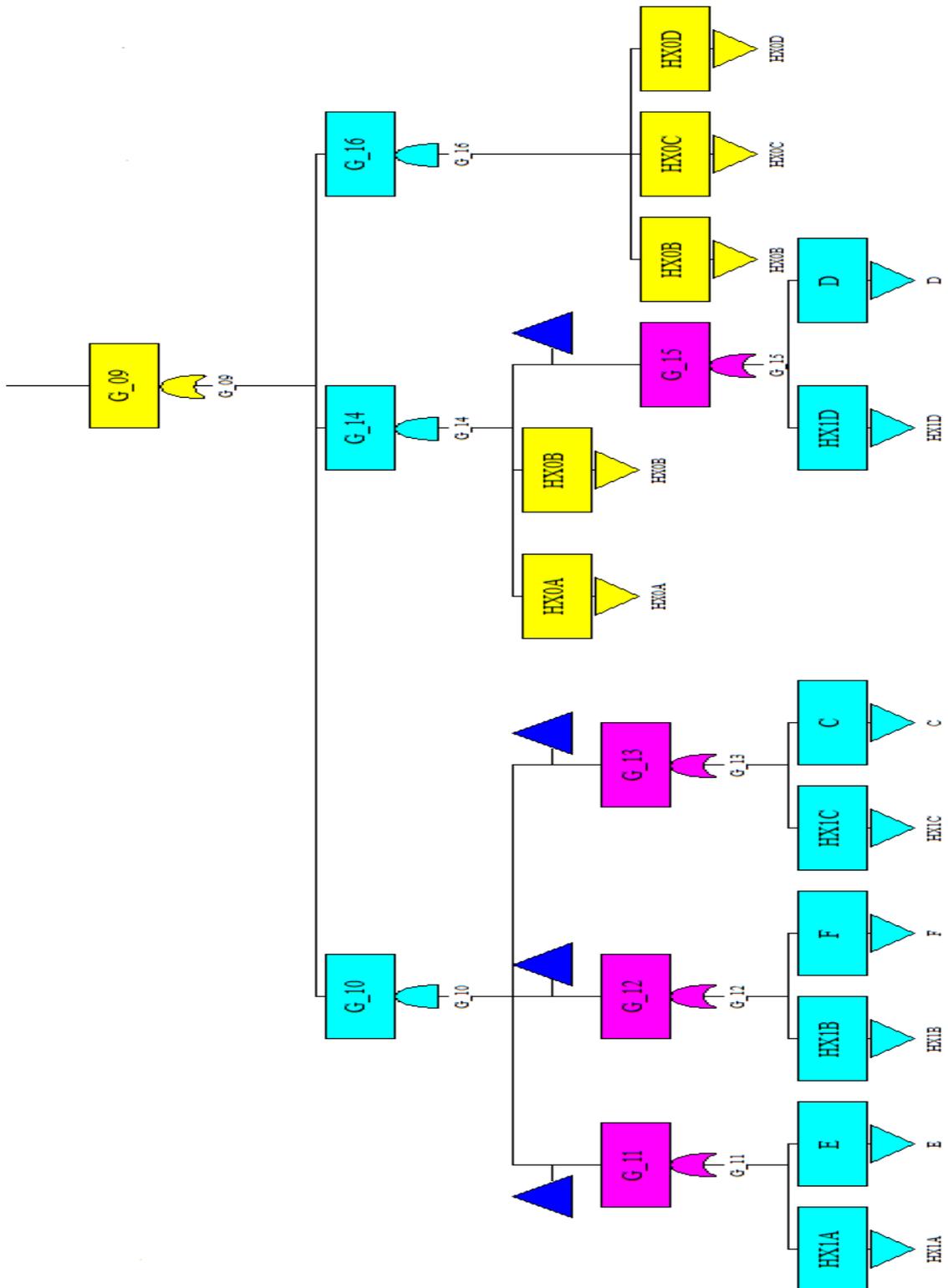


Fig. 4.9.1 – Parte 4 da AF do CHRS, parte excluída.

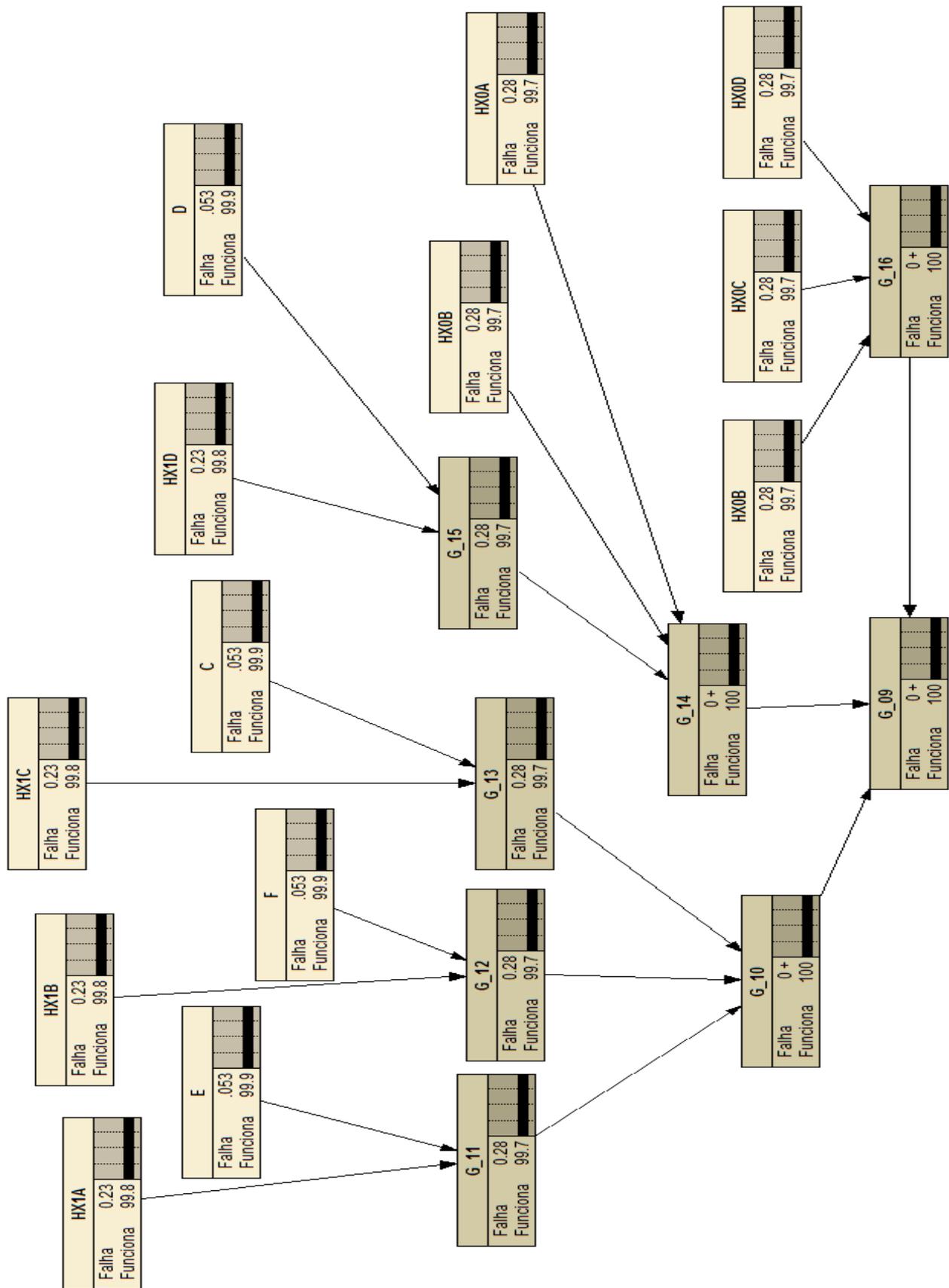


Fig. 4.9.2 – RB mapeada da parte 4 da AF

## 5 ESTUDO DO CASO

Neste capítulo será estudado os resultados obtidos após o mapeamento realizado no capítulo anterior. Conforme citado anteriormente os cálculos da árvore de falhas do CHRS foram reproduzidos pelo software SAPHIRE. Mediante a conclusão do mapeamento, a rede foi calculada utilizando o software *Netica<sup>TM</sup>*.

### 5.1 CÓDIGOS DE IDENTIFICAÇÃO

Os Códigos de Identificação dos eventos de entrada (losango e círculo) são compostos por oito caracteres. Desta forma se facilita a descrição e interpretação dos eventos da árvore de falhas. Estes códigos são separados conforme mostra a Figura 5.1.

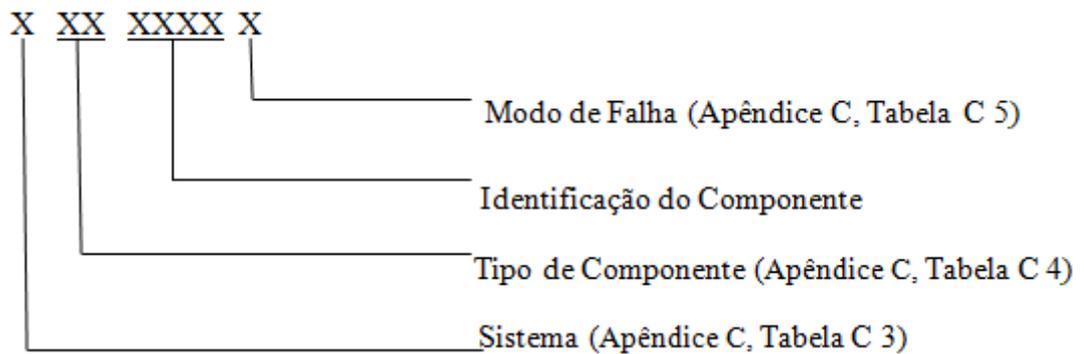


Fig. 5.1 – Código de identificação para eventos básicos

Tomando como exemplo a Falha\_06 da árvore de falhas. Os códigos para este evento são:

KMVXBOOK

KMVXDOOK

KMVT AOOK

KMVT COOK

De acordo com a Figura 5.1 é possível deduzir que a primeira letra K se refere ao Sistema de Remoção de Calor da Contenção. O MV representa uma válvula, operada por motor. A identificação do componente fica a cargo das próximas quatro letras. Isto ocorre para cada um dos quatro eventos. A última letra, K, representa o modo de falha.

## 5.2 DEFINIÇÕES DOS SISTEMAS

A Árvore de Falhas utilizada neste trabalho corresponde ao *Containment Heat Removal System* (CHRS), cuja função é resfriar água do poço da contenção, recirculando através do *Containment Spray Recirculation System* (CSRS). Este último é iniciado automaticamente após um acidente de perda de refrigerante (LOCA) e em conjunto com o CHRS disponibiliza meios para remover o calor da água do poço da contenção.

O *Consequence Limiting Control System* (CLCS) possui a função de medir a pressão de contenção e se ocorrer excesso nos níveis pré-estabelecidos de pressão, é iniciada a operação do equipamento destinado ao controle da pressão.

Para um melhor entendimento do sistema, devem ser observadas as informações abaixo, retiradas do apêndice II (WASH 1400) e comparada com os Diagramas de Fluxos Simplificados, Apêndice A, Figura A1 e A2.

- As válvulas MOV-SW-103 são automaticamente abertas pelos sinais CLCS HI HI;
- O fluxo de água passa pelas válvulas normalmente abertas MOV-SW-104, pelos trocadores de calor e pelas válvulas MOV-SW-105, seguindo a direção do canal de descarga;
- Os Monitores de radiação (RM-SW-114, RM-SW-115, RM-SW-116 e RM-SW-117) recebem uma amostra da água da descarga de cada trocador de calor. Estes monitores são automaticamente iniciados pelos sinais CLCS HI HI. Se for detectada alguma anomalia nas linhas de descarga, os operadores fecham as válvulas MOV-SW-104 e MOV-SW-105, que vedam o trocador de calor;
- As saídas de ar estão localizadas no alto, em cada ponto do serviço de suprimento de água;

- As linhas de descarga, denotadas por PP1B20, PP1A20, PP2A20, PP2B20, para a entrada e, PP1A21, PP1B21, PP2A21, PP2B21, para a saída possuem 2 polegadas de diâmetro e incluem válvulas manuais e válvulas de retenção;
- Para este sistema há oito bombas circulando água, mantendo o nível do canal de entrada com água do rio (não mostrado na figura). A alimentação elétrica destas bombas depende de uma fonte de energia externa. Caso ocorra perda desta energia, as válvulas de saída (MOV-CW-106 e MOV-CW-100) são automaticamente fechadas e os condensadores da Unidade 1 desligados. Os condensadores da Unidade 2 também são desligados, nestas mesmas condições.

### 5.3 MODO DE FALHAS

A indisponibilidade do CHRS é calculada a partir dos tipos de falha que pode experimentar este sistema: falha de modo comum, falha dupla e falha tripla. A falha de modo comum, considerada como um evento único de erro do operador. No fechamento de todas as saídas de ar dos trocadores de calor. A falha dupla se deve a uma quantidade insuficiente de água no canal de entrada, originada pela perda da energia externa em conjunto com a falha para fechar qualquer uma das linhas do condensador. A falha tripla é causada pelo mal funcionamento de quaisquer dois dos trocadores de calor no CHRS. Isto resulta da falha de duas pernas do CSRS em conjunto com a falha de outros dois trocadores de calor. A Figura 5.2 representa a árvore de falhas básica do CHRS, onde estes eventos aparecem como contribuintes à indisponibilidade do sistema.

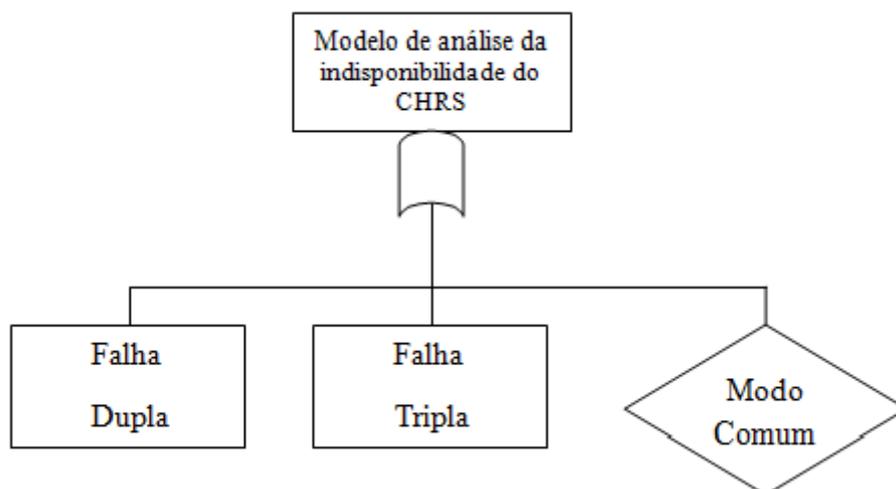


Figura 5.2 – Árvore de Falhas para a determinação da Indisponibilidade do Sistema.

As combinações de falhas triplas de 3 trocadores de calor ou de uma perna do CSRS e de dois trocadores de calor, foram consideradas insignificantes devido a sua probabilidade muito pequena. A Figura 5.3 ilustra a árvore de falhas a ser calculada.

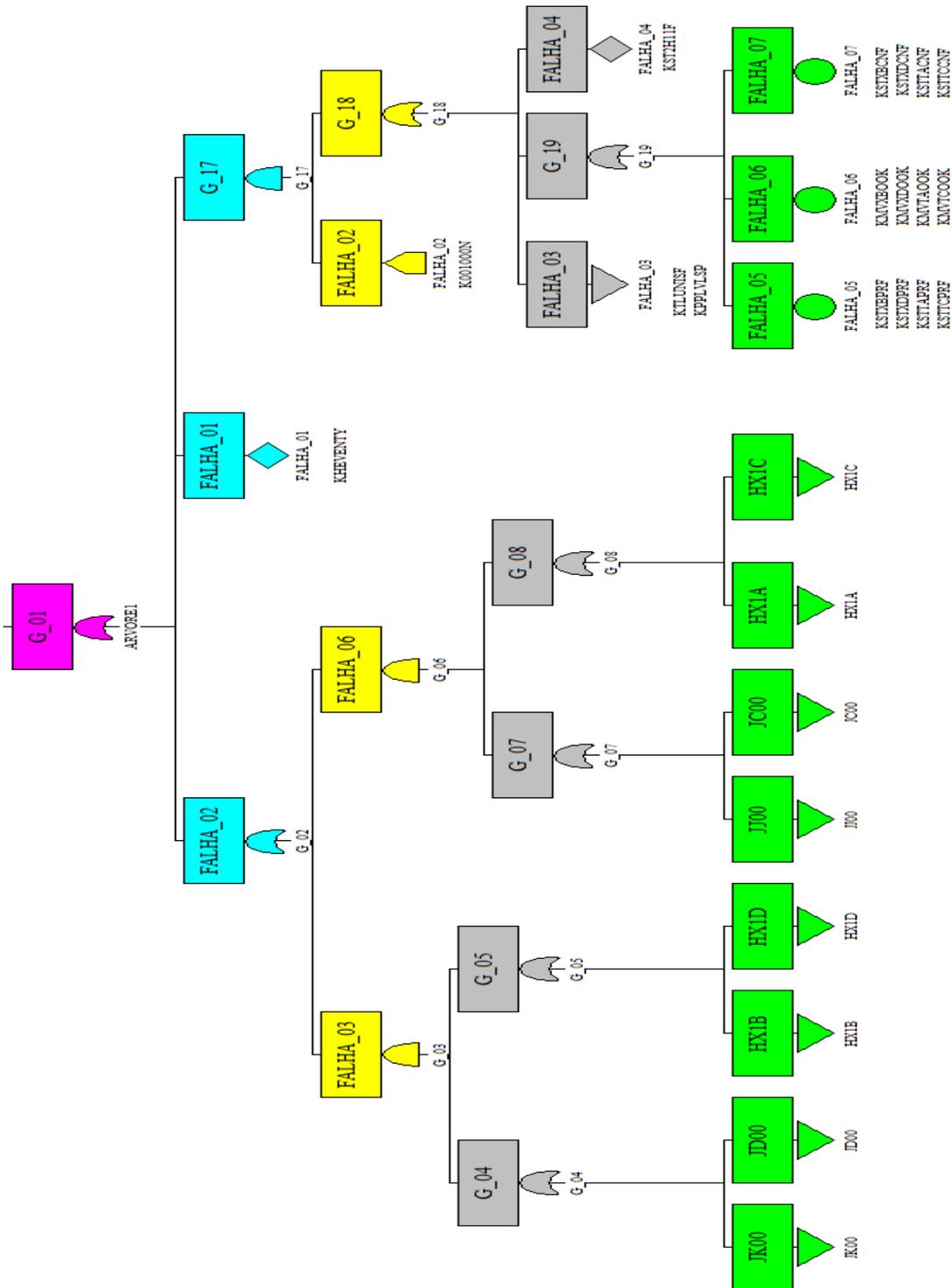


Fig. 5.3 – Árvore de falhas do CHRS excluindo a falha da energia elétrica

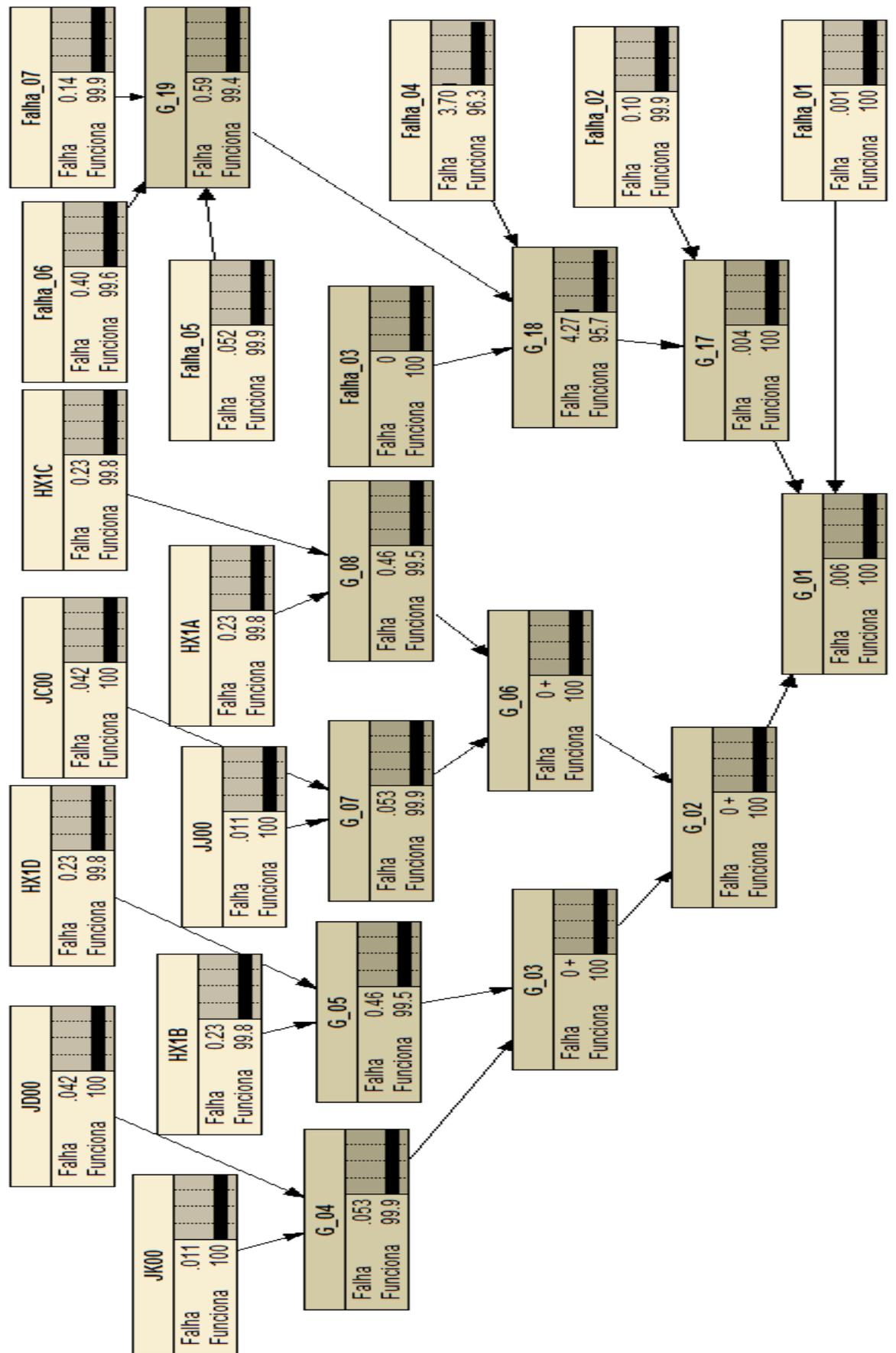


Fig. 5.4 – RB mapeada da AF, excluindo a falha da energia elétrica

## 5.4 RESULTADOS

Utilizando os valores de probabilidades para os eventos básicos, dispostos no Apêndice C Tabela C6, pode-se encontrar a indisponibilidade do Sistema de Remoção de Calor da Contenção. Os cálculos serão realizados baseando-se na Figura 5.3, onde é excluído o fato do sistema possuir falha na energia.

A falha do trocador de calor (HX1A, HX1B, HX1C e HX1D) Figura B3 Apêndice B, é calculada a partir da soma dos valores de cada probabilidade encontrados na Tabela C1, Apêndice C. Os códigos são identificados no Apêndice C, Figuras C3, C4 e C5. Segue abaixo a resolução do HX1A, os outros três são análogos.

$$\text{KXV1A20X} \quad 3 \times 10^{-5}$$

$$\text{KCV1A20C} \quad 1 \times 10^{-4}$$

$$\text{KXV1A21X} \quad 3 \times 10^{-5}$$

$$\text{KCV1A21C} \quad 1 \times 10^{-4}$$

$$\text{KCS4A43X} \quad 1 \times 10^{-3}$$

$$\text{KCS04A3C} \quad \varepsilon$$

$$\text{KCN04A4C} \quad \varepsilon$$

$$\text{KCS5A43X} \quad 1 \times 10^{-3}$$

$$\text{KCS05A3C} \quad \varepsilon$$

$$\text{KCN05A4C} \quad \varepsilon$$

A soma das probabilidades resultam em  $2,3 \times 10^{-3}$ . Logo,  $\text{HX1A} = \text{HX1B} = \text{HX1C} = \text{HX1D} = 2,3 \times 10^{-3}$ , considerando o valor de  $\varepsilon$  uma probabilidade desprezível.

As falhas das pernas do CSRS são representadas pelas letras C, D, E e F. A soma do JD00 com JK00 resulta nas falhas das pernas C e E, e a soma de JC00 com JJ00 resulta nas falhas das pernas D e F.

A união da falha dos trocadores de calor com as falhas das pernas do CSRS permite calcular a probabilidade dos eventos HX0A, HX0B, HX0C E HX0D.

A Falha\_05 e Falha\_07 são subárvores encontradas no Apêndice B, Figura B.4. Como exemplo, o cálculo para a Falha\_07 será realizado abaixo.

KTRWA00F	$5.6 \times 10^{-5}$
KCNWAT1O	$2.8 \times 10^{-6}$
KCNWAT2O	$2.8 \times 10^{-6}$
KWRWACSQ	$8.4 \times 10^{-6}$
KWRWACSO	$8.4 \times 10^{-5}$
KCSWA04S	$2.8 \times 10^{-7}$
KLSWA08O	$8.4 \times 10^{-7}$
KQSWA17O	$8.4 \times 10^{-7}$
KQSWA17F	$1 \times 10^{-4}$
KLSWA01O	$8.4 \times 10^{-7}$
KCSWA02O	$8.4 \times 10^{-7}$
KRSWA52F	$1 \times 10^{-4}$

A soma de todas as probabilidades anteriores permite determinar a probabilidade do evento Falha\_07, cujo valor é  $3,5 \times 10^{-4}$ .

O resultado obtido para a falha do sistema foi  $5,78 \times 10^{-5}$  com a árvore de falhas e  $5,756 \times 10^{-5}$  para a rede bayesiana, Apêndice D, Figura D1. Conforme previsto, os resultados são muito próximos, descontando erros de aproximação.

O software Netica é de fácil manuseio. Os nós são interligados com linhas direcionadas, que representam a relação de dependência entre eles. O nó raiz recebe as probabilidades, que devem ser utilizadas em porcentagem. A cada nó filho deve-se distinguir o portão. O valor do nó falho é encontrado clicando no botão compilar. Através do CTRL + B é possível visualizar uma tabela de probabilidades de todos os nós.

## 6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Como destacado na literatura (Bobbio et al. 2001) foi confirmado que redes bayesianas equivalentes podem ser obtidas mediante o mapeamento das árvores de falhas correspondentes. Para a realização do mapeamento é necessário seguir algumas etapas que foram expostas neste trabalho.

Foi comprovado que a rede bayesiana é uma ferramenta capaz de modelar adequadamente árvores de falhas com grande número de eventos. Desta forma é possível aproveitar a capacidade das redes bayesianas para tratar eventos dependentes através do Teorema de Bayes. Esta característica é particularmente importante em análise de segurança de instalações em sistemas de alto grau de redundância onde os eventos dependentes são determinantes.

O objetivo deste trabalho foi mostrar que, com o uso das redes bayesianas, é possível modelar e calcular as falhas de um sistema de segurança de uma usina a água leve típica de segunda geração. Como o caso estudo, foi avaliado qualitativa e quantitativamente o Sistema de Remoção de Calor da Contenção.

Como previsto, os resultados obtidos foram muito próximos, descontando erros de aproximações. Vale ressaltar que os softwares utilizados auxiliaram adequadamente, para a resolução deste trabalho, permitindo então, modelar a indisponibilidade do CHRS satisfatoriamente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amyotte, P., Khakzad, N., Khan, F., “Safety analysis in process facilities: comparison of fault tree and bayesian network approaches”, *Reliability Engineering and System Safety*, v.96, pp 925-932, 2011.

Argüelles, A., Martín, J.E., Rivas, T., Matías, J.M., Taboada, J., , “A bayesian network analysis of workplace accidents caused by falls from a height”, *Safety Science*, vol. 47, pp. 206-214, 2009.

Barber, D., *Bayesian Reasoning and Machine Learning*, University College London, Draft, 2010.

Bobbio, A., Ciancamerla, E., Minichino, M., Portinale, L., “Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into bayesian networks”, *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 71, pp. 249 – 260, 2001.

Chen, G., Yang, Z., Sun J., “Applying bayesian networks in nuclear power plant safety analysis”, *Science Direct*, vol. 7, pp. 81-87, 2010.

Doguc, O., Marquez, J.E.R, “A generic method for estimating system reliability using bayesian networks”, *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 94, pp. 542-550, 2009.

Gomes, E. C., “Análise de confiabilidade humana de procedimentos de radioterapia via redes bayesianas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

Jenkinson, I., Jones, B., Yang, Z., Wang, J., “The use of bayesian network modeling for maintenance planning in a manufacturing industry”, *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 95, pp. 267- 277, 2010.

Jensen, F. V., *Bayesian Networks and Decision Graphs*, New York, Springer, 2001.

Jurkiewicz, S., Netto, P.O.B., “Grafos: introdução e prática”, Ed. Blucher, São Paulo, 2009.

Lambrinouidakis, C., Maglogiannis, I., Platis, A., Zafiropoulos, E., “Risk analysis of a patient monitoring system using bayesian network modeling”, *Journal of Biomedical Informatics*, vol. 39, pp. 637-647, 2006.

Langseth, H., Portinale, L., “Bayesian network in reliability”, *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 92, pp. 92-108, 2007.

Lee, C.J. e Lee, K.J., “Application of bayesian network to the probabilistic risk assessment of nuclear waste disposal”, *Engineering and System Safety*, vol. 91, pp. 515-532, 2006.

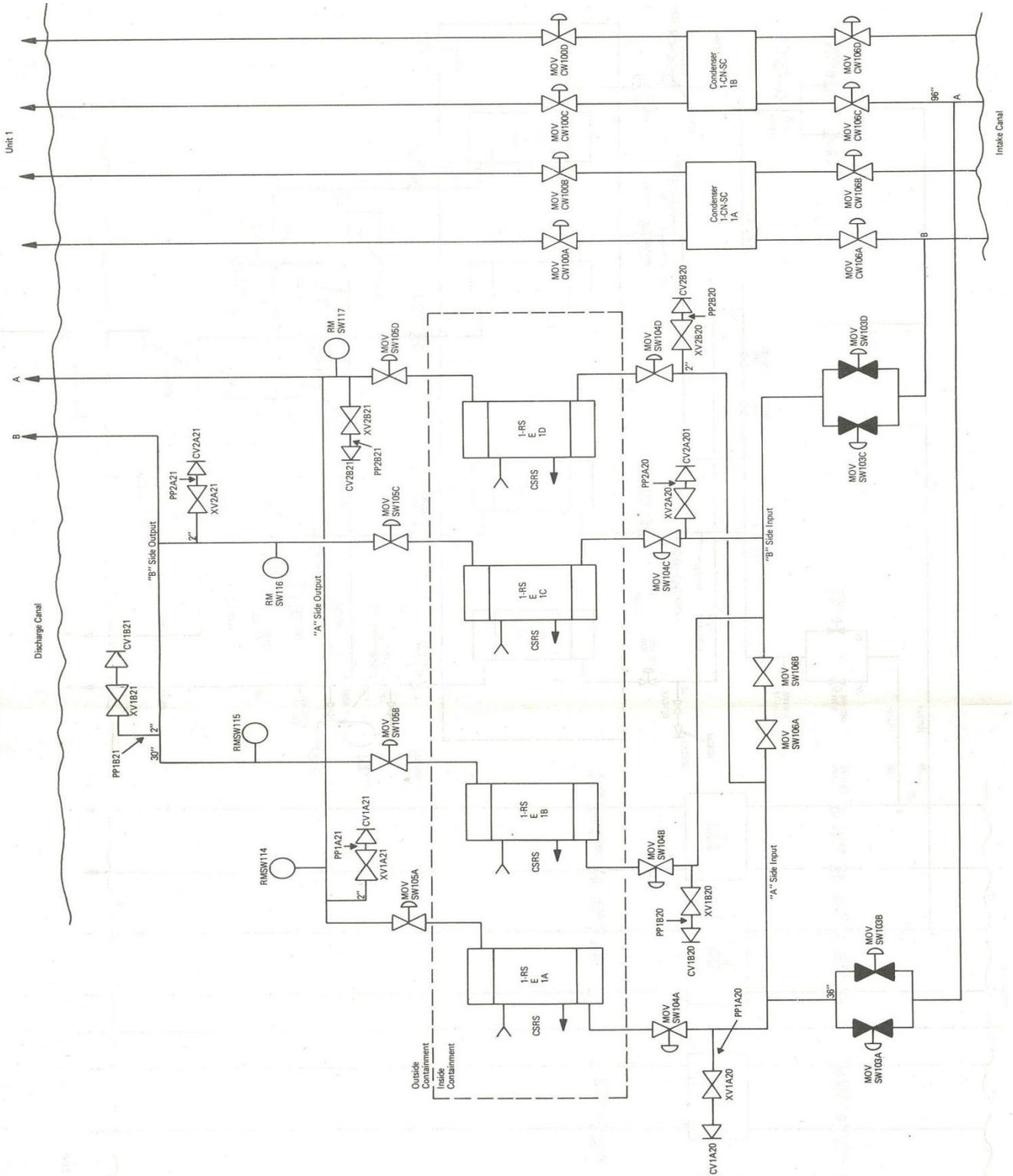
Mahadevan, S., Smith, N., Zhang, R., “Bayesian network for system reliability reassessment”, *Structural Safety*, vol. 23, pp. 231-251, 2001.

U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION “An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants “- WASH-1400, October, 1975 (NUREG 75/014).

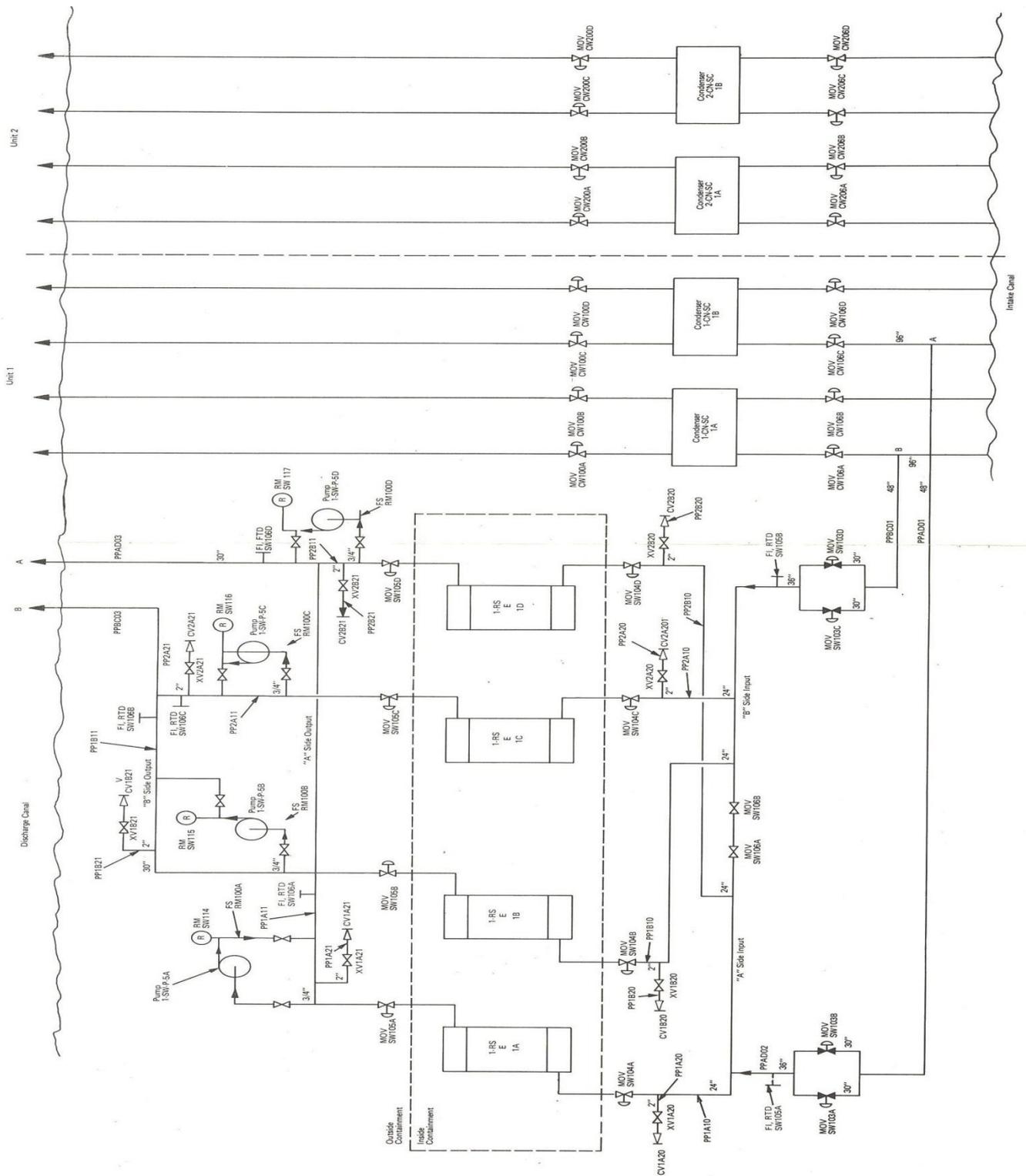
INEL Idaho National Engineering Laboratory. Systems Analysis Programs for Hands-on Integrated Reliability Evaluations (SAPHIRE), version 6.75, USA, 1998.

# APÊNDICE A – DIAGRAMAS DO SISTEMA DE REMOÇÃO DE CALOR DA CONTENÇÃO

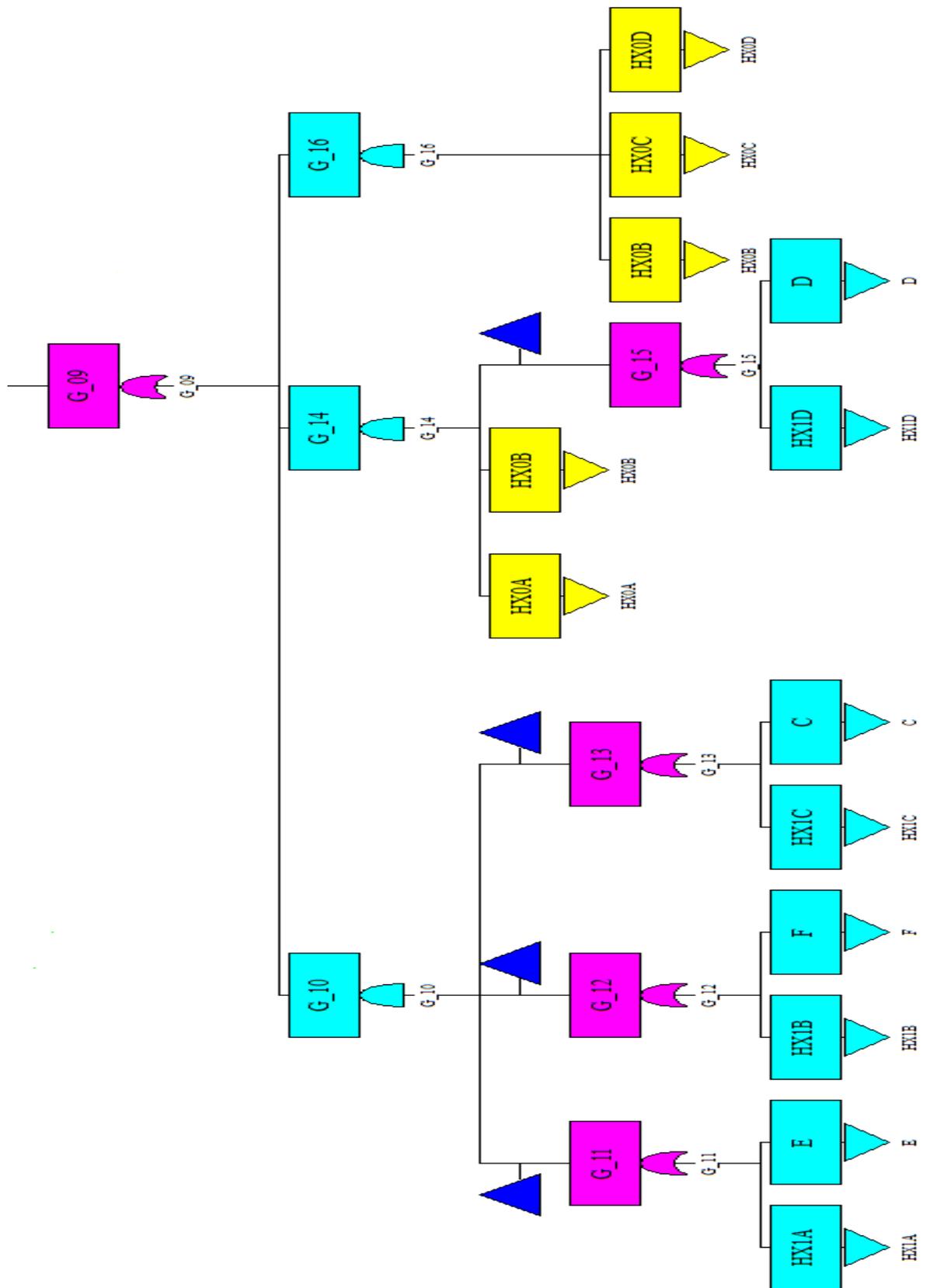
## A.1 DIAGRAMAS DE FLUXO SIMPLIFICADO DO CHRS



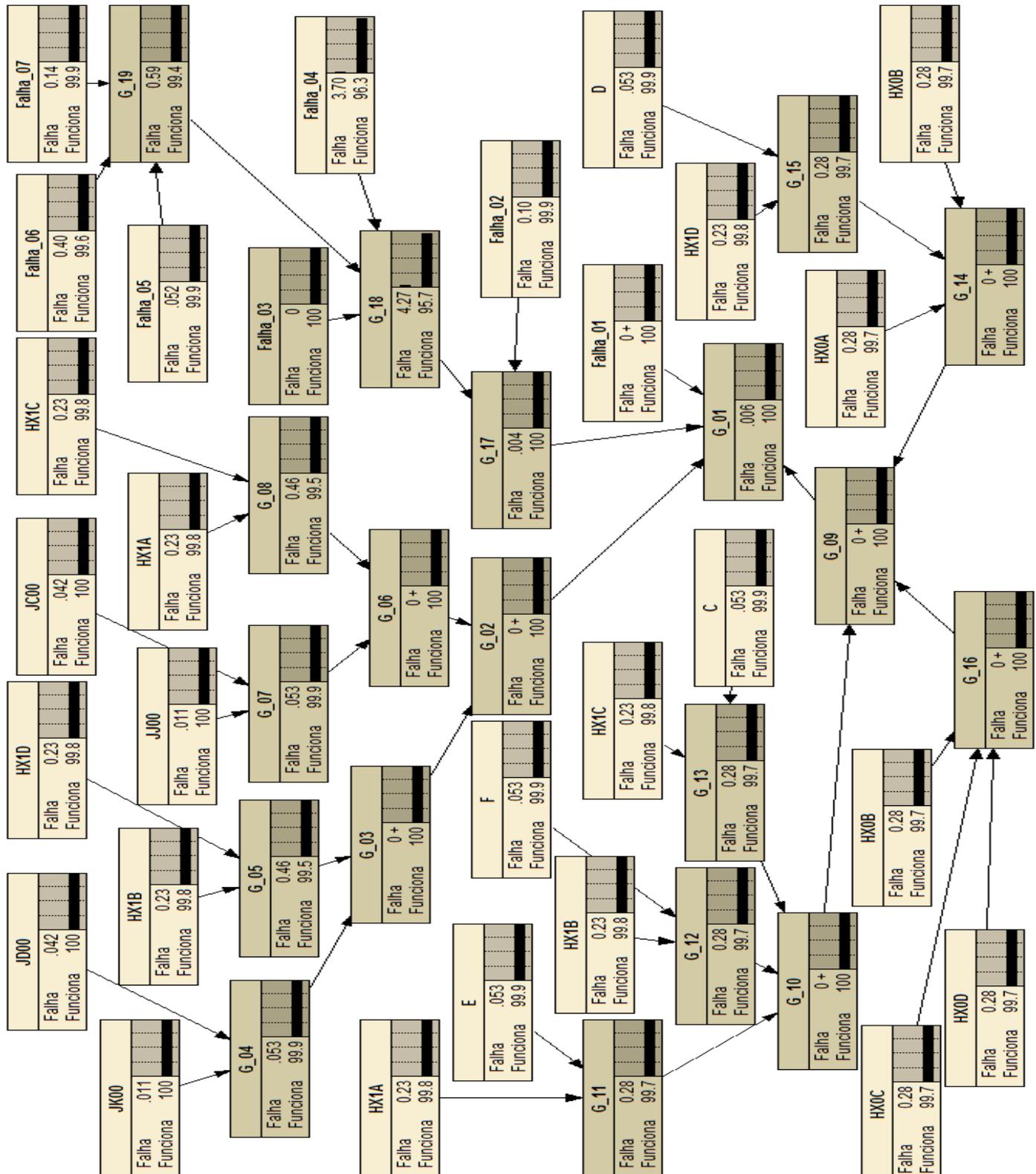
## A.2 DIAGRAMAS DE FLUXO SIMPLIFICADO DO CHRS



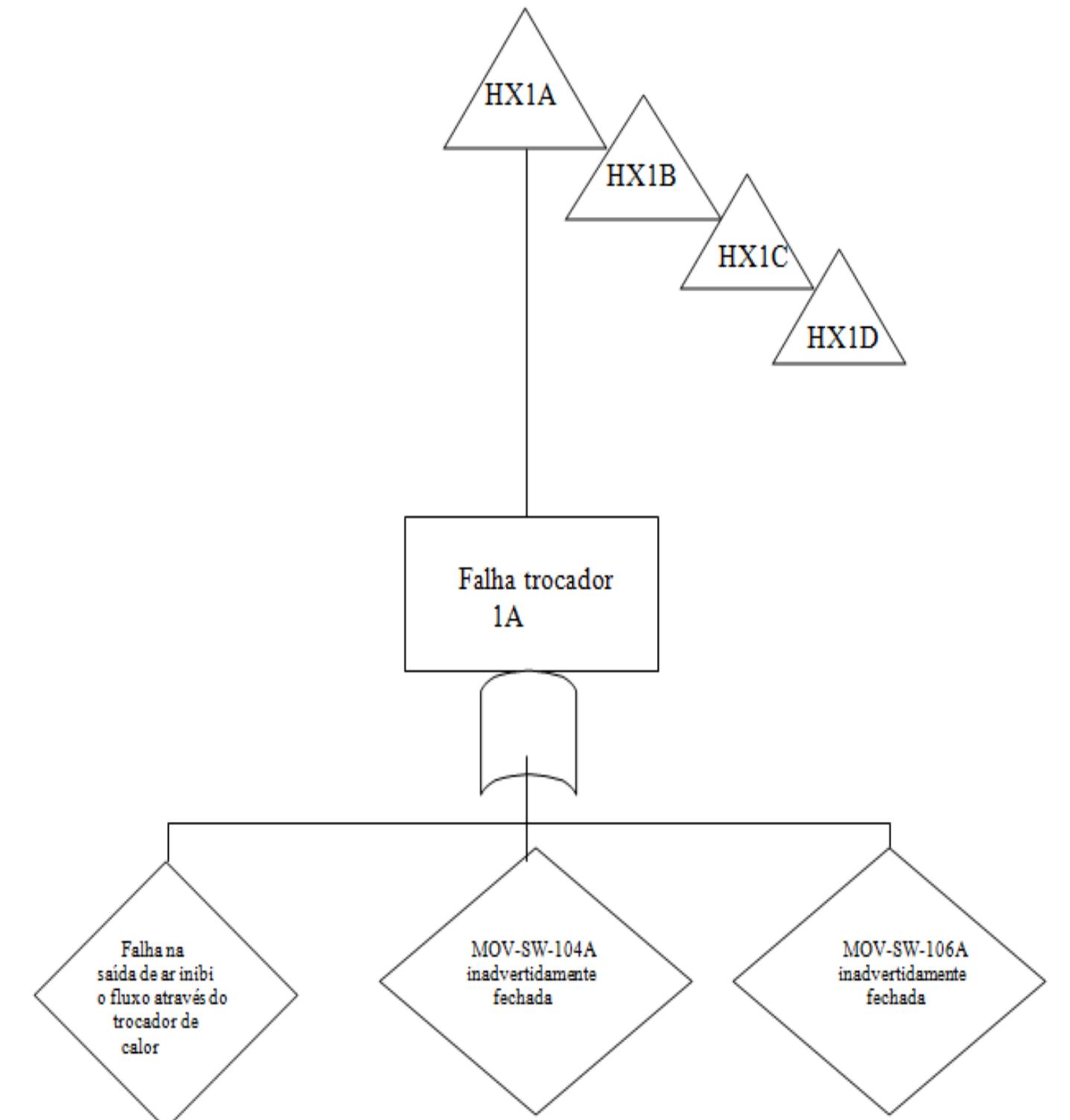




## B.2 REDE BAYESIANA

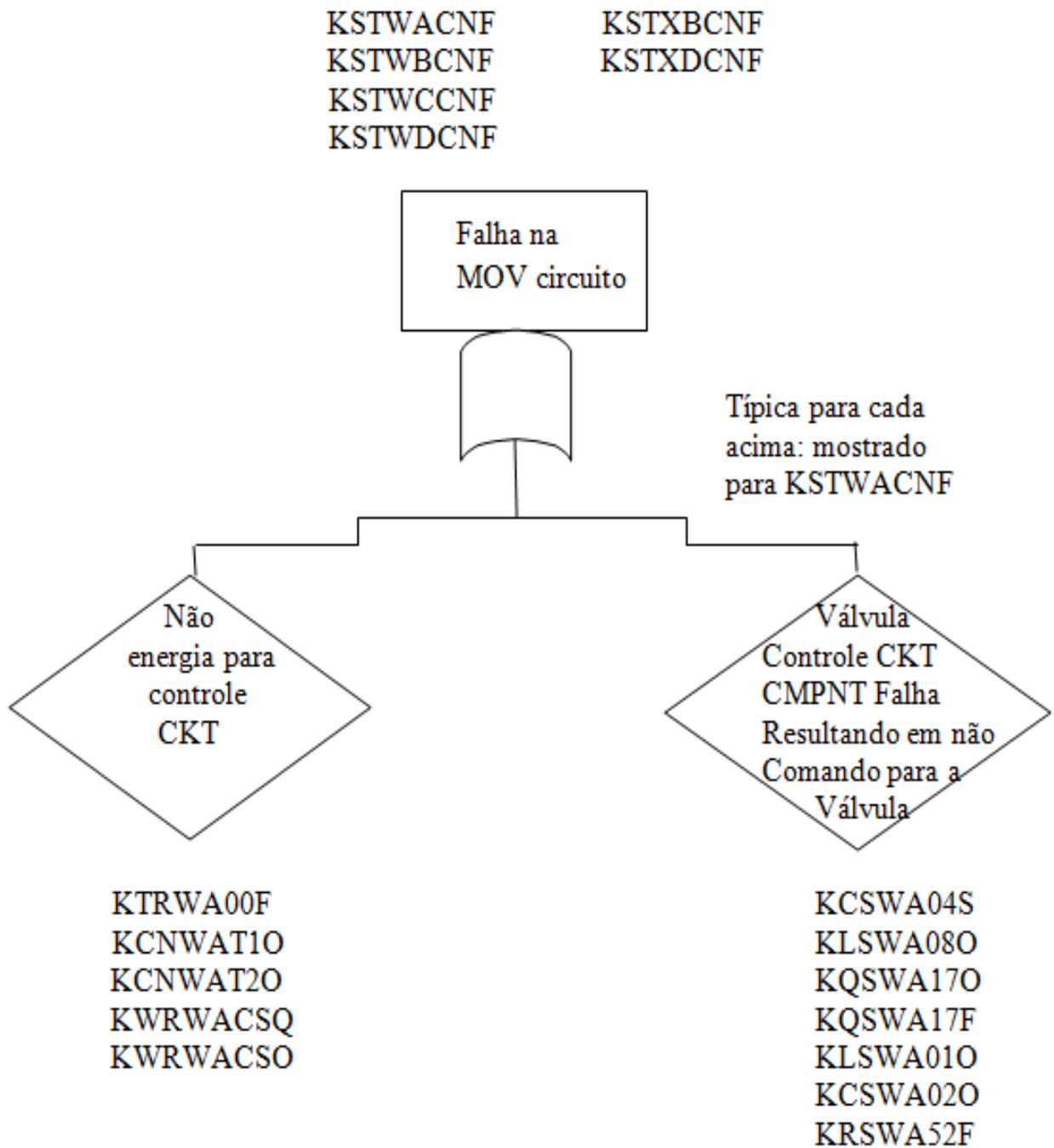


### B.3 SUBÁRVORE DE FALHAS PARA O CÁLCULO DO HX1A, HX1B, HX1C E HX1D



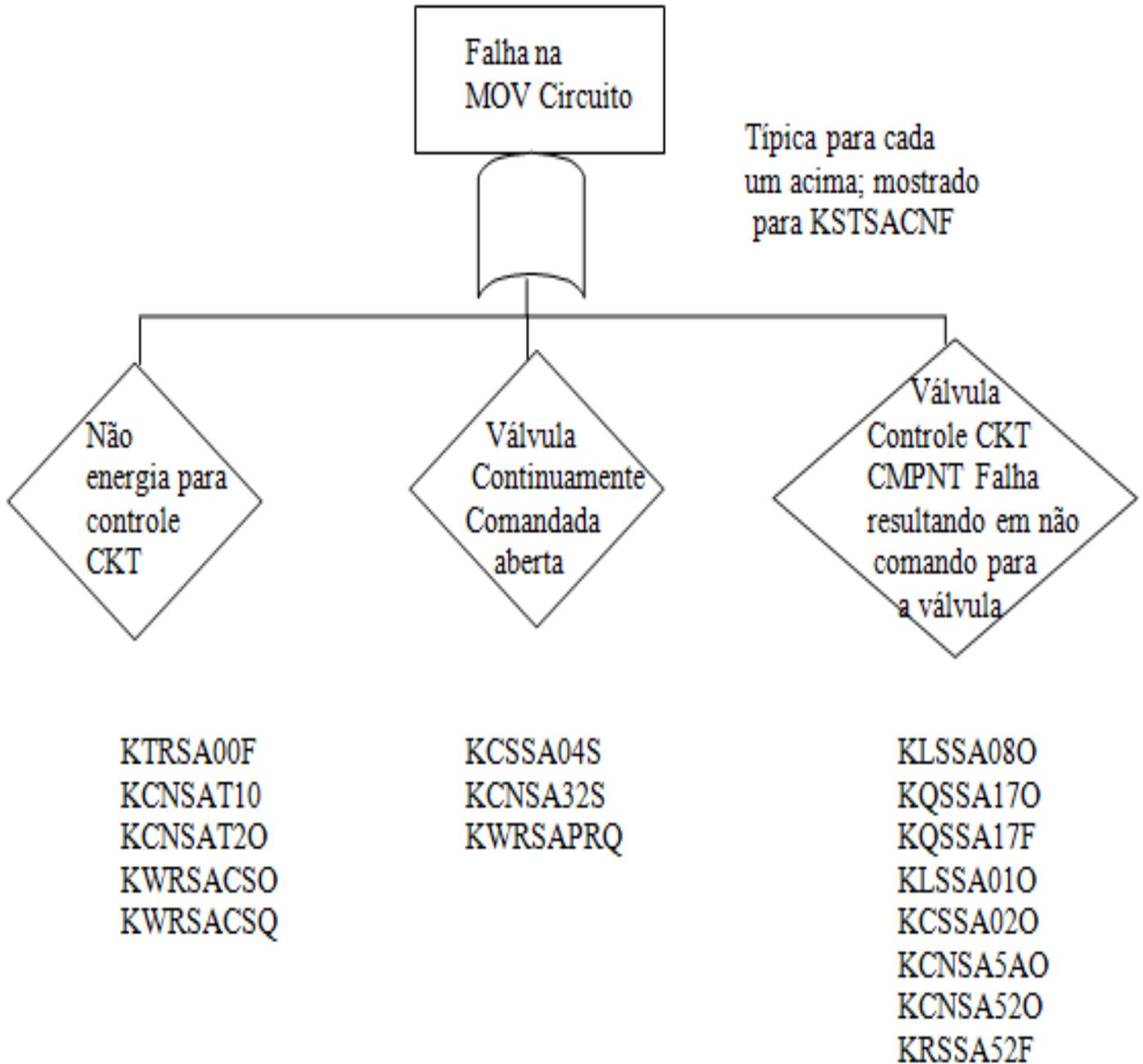
(HX1A)	(HX1B)	(HX1A)	(HX1B)	(HX1A)	(HX1B)
KXV1A20X	KXV1B20X	KCS4A43X	KCS4B43X	KCS5A43X	KCS5B3C
KCV1A20C	KCV1B20C	KCS04A3C	KCS04B3C	KCS05A3C	KCS05B3C
KXV1A21X	KXV1B21X	KCN04A4C	KCN04B4C	KCN05A4C	KCN05B4C
KCV1A21C	KCV1B21C	(HX1C)	(HX1D)	(HX1C)	(HX1D)
(HX1C)	(HX1D)	KCS4C43X	KCS4D43X	KCS5C43X	KCS5D43X
KXV1C20X	KXV1D20X	KCS04C3C	KCS04D3C	KCS05C3C	KCS5DC3C
KCV1C20C	KCV1D20C	KCN04C4C	KCN04D4C	KCN05C4C	KCN05D4C
KXV1C21X	KXV1D21X				
KCV1C21C	KCV1D21C				

## B.4 SUBÁRVORES (FALHA5 E FALHA7)

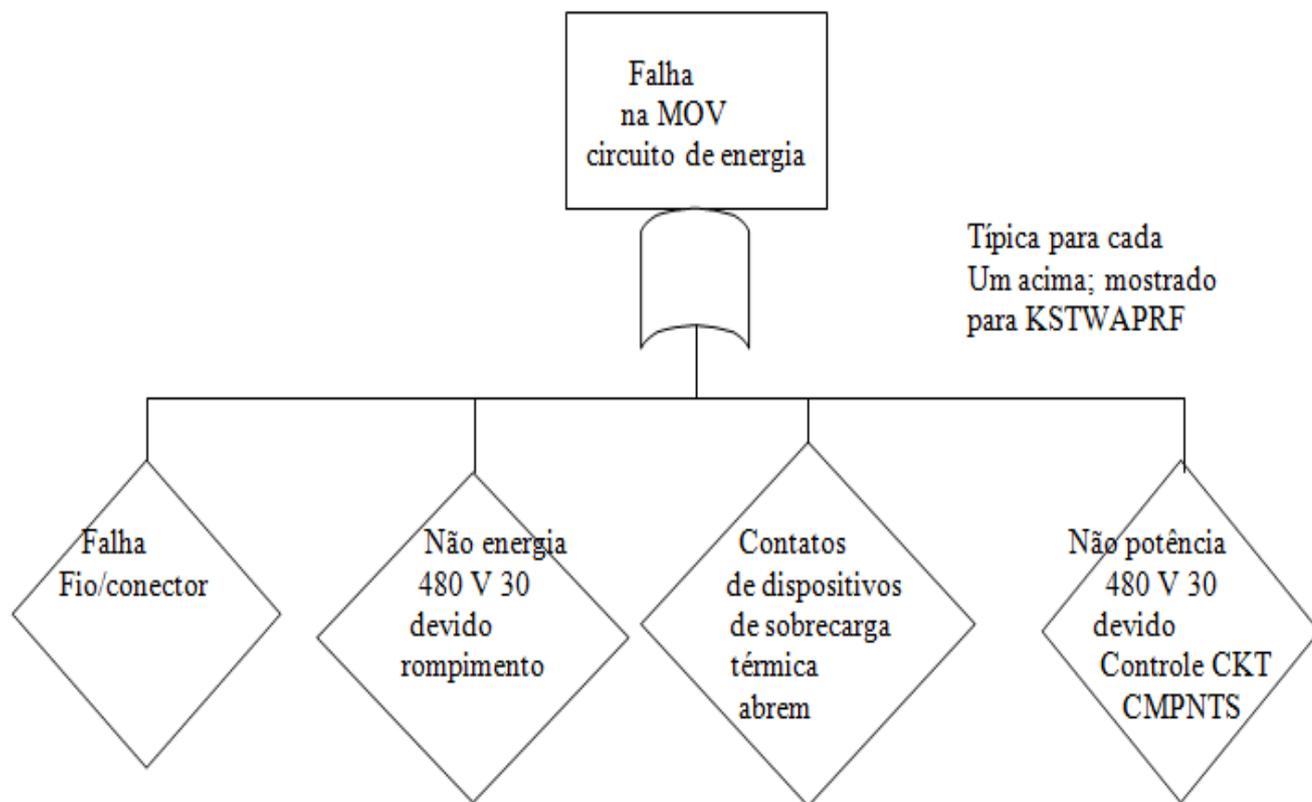


KSTSACNF  
KSTSBCNF  
KSTSCCNF  
KSTSDCNF

KSTTACNF  
KSTTCCNF



KSTXBPRF      KSTSAPRF  
 KSTXDPRF      KSTSBPRF  
 KSTTAPRF      KSTSCPRF  
 KSTTCPRF      KSTSCPRF  
 KSTWAPRF  
 KSTWBPRF  
 KSTWCPRF  
 KSTWDPRF



Típica para cada Um acima; mostrado para KSTWAPRF

KWRWAVPQ  
 KWRWAVPO

KCBWAVPY  
 KCBWAPAO  
 KCBWAPBO  
 KCBWAPCO  
 KCBWAVPF

KCNWAPO  
 KCNWABPO  
 KCNWACPO

KCNWAPAO  
 KCNWAPBO  
 KCNWAPCO  
 KCNWAPAC  
 KCWNAPCC

## APÊNDICE C – TABELAS

### C.1 PROBABILIDADE DE EVENTOS UTILIZADOS NA AVALIAÇÃO DA ÁRVORE DE FALHAS DO CHRS

PROBABILIDADES DE EVENTOS UTILIZADOS NA AVALIAÇÃO DE ÁRVORES DE FALHAS DO CHRS				
Evento	Taxa de Falha (Hr <sup>-1</sup> )	Tempo de exposição de falha (Hr)	Indisponibilidade q	EF <sup>(a)</sup>
KCV1A20C			$1 \times 10^{-4}$	3
KCV1A21C			$1 \times 10^{-4}$	3
KCS04A3C			$\varepsilon$	Desprezível
KCN04A4C			$\varepsilon$	Desprezível
KCS05B3C			$\varepsilon$	Desprezível
KCN05A4C			$\varepsilon$	Desprezível
KXV1A20X			$3 \times 10^{-5}$	3
KXV1A21X			$3 \times 10^{-5}$	3
KCS4A43X			$1 \times 10^{-3}$	3
KCS4B43X			$1 \times 10^{-3}$	3
KHEVENTY			$1 \times 10^{-5}$	3
K001000N			$1.0 \times 10^{-3}$	3
KTLUNISF			$\varepsilon$	Desprezível
KPPLVLSP			$\varepsilon$	Desprezível
KST2H11F			$3.7 \times 10^{-2}$	3
KMVXBOOK			$1 \times 10^{-3}$	3
KMVXDOOK			$1 \times 10^{-3}$	3
KMVT AOOK			$1 \times 10^{-3}$	3
KMVT COOK			$1 \times 10^{-4}$	3
KSTXBPRF			$1.3 \times 10^{-4}$	10
KSTXDPRF			$1.3 \times 10^{-4}$	10
KSTTAPRF			$1.3 \times 10^{-4}$	10
KSTTCPRF			$1.3 \times 10^{-4}$	10
KSTXBCNF			$3.5 \times 10^{-4}$	10
KSTXDCNF			$3.5 \times 10^{-4}$	10
KSTTACNF			$3.5 \times 10^{-4}$	10
KSTTCCNF			$3.5 \times 10^{-4}$	10
JJOO			$1.1 \times 10^{-4}$	3
JKOO			$1.1 \times 10^{-4}$	3
JCOO			$4.2 \times 10^{-4}$	3
JDOO			$4.2 \times 10^{-4}$	3

## C.2 PROBABILIDADE DE EVENTOS UTILIZADOS NA AVALIAÇÃO DA SUBÁRVORE KSTXBPRF

PROBABILIDADES DOS EVENTOS UTILIZADOS NA AVALIAÇÃO DE SUBÁRVORES KSTXBPRF <sup>(a)</sup>				
Evento	Taxa de Falha (Hr <sup>-1</sup> )	Tempo de exposição de falha (Hr)	Indisponibilidade q	EF
KCBWAVPF	$1.0 \times 10^{-6}$	28	$2.8 \times 10^{-5}$	3
KWRWAVPQ	$3.0 \times 10^{-7}$	28	$8.4 \times 10^{-6}$	10
KWRWAVPO	$3.0 \times 10^{-6}$	28	$8.4 \times 10^{-5}$	3
KCBWAVPY	$\epsilon$		$\epsilon$	Desprezível
KCBWAPAO	$1.0 \times 10^{-8}$	28	$2.8 \times 10^{-5}$	3
KCBWAPBO	$1.0 \times 10^{-8}$	28	$2.8 \times 10^{-5}$	3
KCBWAPCO	$1.0 \times 10^{-8}$	28	$2.8 \times 10^{-5}$	3
KCNWAAPO	$3.0 \times 10^{-8}$	28	$8.4 \times 10^{-7}$	10
KCNWABPO	$3.0 \times 10^{-8}$	28	$8.4 \times 10^{-7}$	10
KCNWACPO	$3.0 \times 10^{-8}$	28	$8.4 \times 10^{-7}$	10
KCNWAPAO	$3.0 \times 10^{-8}$	28	$8.4 \times 10^{-7}$	10
KCNWAPBO	$3.0 \times 10^{-8}$	28	$8.4 \times 10^{-7}$	10
KCNWAPCO	$3.0 \times 10^{-8}$	28	$8.4 \times 10^{-7}$	10
KCNWAPAC	$1 \times 10^{-8}$	28	$2.8 \times 10^{-7}$	10
KCNWAPCC	$1 \times 10^{-8}$	28	$2.8 \times 10^{-7}$	10

(a) Esta lista de probabilidades de eventos é idêntica à dos FSTXDPRF, KSTTAPRF, e KSTTCPRF.

PROBABILIDADES DOS EVENTOS UTILIZADOS NA AVALIAÇÃO DE SUBÁRVORES KSTXBCNF <sup>(a)</sup>				
Evento	Taxa de Falha (Hr <sup>-1</sup> )	Tempo de exposição de falha (Hr)	Indisponibilidade q	EF
KREWA52F			$1.0 \times 10^{-4}$	3
KTRWA00F (2)	$2.0 \times 10^{-6}$	28	$5.6 \times 10^{-5}$	3
KCNWAT10	$1.0 \times 10^{-7}$	28	$2.8 \times 10^{-6}$	3
KCNWAT20	$1.0 \times 10^{-7}$	28	$2.8 \times 10^{-6}$	3
KWRWACSQ	$3.0 \times 10^{-7}$	28	$8.4 \times 10^{-6}$	10
KWRWACSO	$3.0 \times 10^{-6}$	28	$8.4 \times 10^{-5}$	3
KCSWA04S	$1.0 \times 10^{-8}$	28	$2.8 \times 10^{-7}$	10
KLSWA080	$3.0 \times 10^{-8}$	28	$8.4 \times 10^{-7}$	3
KQSWA170	$3.0 \times 10^{-8}$	28	$8.4 \times 10^{-7}$	3
KQSWA17F			$1.0 \times 10^{-4}$	3
KLSWA010	$3.0 \times 10^{-8}$	28	$8.4 \times 10^{-7}$	3
KCSWA020	$3.0 \times 10^{-8}$	28	$8.4 \times 10^{-7}$	10

(a) Esta lista de probabilidades de eventos é idêntica à dos KSTXDCNF, KSTTACNF, e KSTTCCNF.

### C.3 CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA PWR

CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA PWR	
<u>Código</u>	<u>Nome do sistema</u>
A	Acumulador (ACC)
G	Vazamento da Contenção (CL)
N	Sistema de Controle de Limitação de Consequência (CLCS)
K	Sistema de Remoção de Calor da Contenção (CHRS)
C	Sistema de Injeção da pulverização da Contenção (CSIS)
D	Sistema de Recirculação do Spray da Contenção (CSRS)
J	Energia Elétrica (EPS)
F	Sistema de Injeção de Alta Pressão (HPCIS)
H	Sistema de Recirculação de Alta Pressão (HPCRS)
B	Sistema de Injeção de Baixa Pressão (LPIS)
E	Sistema de Recirculação de Baixa Pressão (LPRS)
L	Sistema de Adição de Hidróxido de Sódio (SHAS)
I	Sistema de Proteção do Reator (RPS)
M	Sistema de Controle da Injeção de Segurança (SICS)
P	Água de Alimentação Auxiliar (AF)

## C.4 CÓDIGO DE COMPONENTE

CÓDIGO DE COMPONENTE			
<u>Componentes Mecânicos</u>			
Acumulador	AC	Comporta	SL
Ventilador	BL	Reservatório	SP
Unidade de Controle de Acionamento da Vareta	CD	Subárvore	ST
Placa de Cobertura	FA	Tanque	TK
Amortecedor	DM	Tubulação	TG
Diesel	DL	Turbina	TB
Junta de Expansão	XJ	Válvula de Retenção	CV
Filtro ou Coador	FL	Válvula de Operação Explosiva	EV
Garrafa de Gás	GB	Válvula de Operação Hidráulica	HV
Vedação	GK	Válvula Manual	XV
Trocador de Calor	HE	Válvula de Operada por Motor	MV
Bico	NZ	Válvula de Operação Pneumática	AV
Orifício	OR	Válvula de Alívio	RV
Tubo	PP	Válvula de Segurança	SV
Tubo de Tampa	CP	Válvula de Operada por Solenoide	KV
Vaso de Pressão	PV	Válvula de Interromper Verificação	DV
Bomba	PM	Válvula de Alívio no Vácuo	VV
Barra de Controle do Reator	ED	Vent	VT
Unidade de Refrigeração	RF	Fonte	WL

Componentes Elétricos

Amplificador	AM	Interruptor Terra	GS
Anunciador	BN	Relé	RE
Bateria	BY	Relé ou Contato do Interruptor	CN
Carregador de Bateria	BC	Botão de Reinício	RS
Barramento	BS	Resistor, Dispositivo de Temp.	RT
Cabo	CA	Comparador de Sinal	AD
Disjuntor	CB	Interruptor de Pressão	OS
Embreagem	CL	Interruptor de Torque	QS
Interruptor de Controle	CS	Interruptor de Temperatura	TS
Bobina	CO	Junta do Terminal	TM
Detector	DI	Diodo ou Retificador	DE
Fonte de Alimentação DC	DC	Fusível	FU
Chave de Vazão	FS	Gerador	GE
Resistência de Aquecimento	HG	Heat Tracing	HT
Módulo de Entrada	IM	Botão de Teste	SB
Inversor (estado sólido)	IV	Sobrecarga Térmica	OL
Interruptor de Nível	ES	Cronômetro	TI
Luz	LT	Transformador de Corrente	CT
Interruptor Limite	LS	Transformador de Potência	OT
Interruptor Manual	SW	Transformador de Energia	TR
Motor	MO	Transmissor de Fluxo	TF
Motor de Arranque	MS	Transmissor de Nível	TL
Detector de Nêutrons	ND	Transmissor de Pressão	TP
Potenciômetro	PT	Transmissor de Temperatura	TT
Gravador	RC	Fio	WR
Pára-raios	LA	Evento (onde não há componente envolvido)	OO

## C.5 CÓDIGO DE MODO DE FALHA

CÓDIGO DE MODOS DE FALHA	
<u>Modos de Falha</u>	
Fechado	C
Desengatado	G
Não fecha	K
Não abre	D
Não inicia	A
Engatado	E
Excede o limite	M
Vazamento	L
Perda da função	F
Falta de manutenção	Y
Nenhuma entrada	N
Abrir	O
Circuito aberto	B
Falha operacional	X
Sobrecarga	H
Conectado	P
Ruptura	R
Curto circuito	Q
Curto para terra	S
Falha de transferência	T

## C.6 DIFERENTES EVENTOS DA ÁRVORE DE FALHAS DO CHRS

	Componente	Símbolo	Probabilidade
1	3 de 4 trocadores de calor não removem calor suficiente do fluido do spray	G_01	Portão OU
2	3 de 4 trocadores de calor falham o sistema quando ocorre falha da energia	G_02	Portão OU
3	Falha da energia 1H e 1A e trocador de calor 1B e 1D	G_03	Portão E
4	Falha na energia Bus CSRS	G_04	Portão OU
5	Insuficiente voltagem (125 V DC) do Bus 1A para o circuito de controle	JK00	0.00011
6	Insuficiente voltagem (480 V AC) do Bus 1H para a bomba	JD00	0.00042
7	Falha do trocador 1B ou 1D	G_05	Portão OU
8	Falha no trocador de calor 1B	HX1B	0.0023
9	Falha no trocador de calor 1D	HX1D	0.0023
10	Falha da energia 1J e 1B e trocador de calor 1A e 1C	G_06	Portão E
11	Falha na energia Bus CSRS	G_07	Portão OU
12	Insuficiente voltagem (125 V DC) do Bus 1B para o circuito de controle	JJ00	0.00011
13	Insuficiente voltagem (480 V AC) do Bus 1J para a bomba	JC00	0.00042
14	Falha do trocador 1A ou 1C	G_08	Portão OU
15	Falha no trocador de calor 1A	HX1A	0.0023
16	Falha no trocador de calor 1C	HX1C	0.0023
17	Erro do operador- Toda saída de ar a esquerda do trocador de calor é fechada	Falha_01	0.00001
18	Sistema falha com 3 de 4 trocadores de calor (excluindo falha na energia elétrica)	G_09	Portão OU
19	Falha no trocador 1A, 1B e 1C	G_10	Portão E
20	Falha no trocador 1A	G_11	Portão OU
21	Falha no trocador 1A	HX1A	0.0023
22	Bomba CSRS 1 RS-P. Perna fria 1A	E	0.00053
23	Falha no trocador 1B	G_12	Portão OU
24	Falha no trocador 1B	HX1B	0.0023
25	Bomba CSRS 1 RS-P. Perna fria 1B	F	0.00053
26	Falha no trocador 1C	G_13	Portão OU
27	Falha no trocador 1C	HX1C	0.0023
28	Bomba CSRS 1 RS-P. Perna fria 2A	C	0.00053
29	Falha no trocador 1A, 1B e 1D	G_10	Portão E
30	Falha no trocador 1A	HX0A	0.00283
31	Falha no trocador 1B	HX0B	0.00283
32	Falha no trocador 1D	G_15	Portão OU

33	Falha no trocador 1D	HX1D	0.0023
34	Bomba CSRS 1 RS-P. Perna fria 2B	D	0.00053
35	Falha no trocador 1A, 1B e 1D	G_16	Portão E
36	Falha no trocador 1B	HX0B	0.00283
37	Falha no trocador 1C	HX0C	0.00283
38	Falha no trocador 1D	HX0D	0.00283
39	Água insuficiente no canal de entrada	G_17	Portão E
40	Perda da energia externa	Falha_02	0.001
41	Falha sozinha e dupla que permite a entrada do canal para drenar	G_18	Portão OU
42	Falha no sensor do nível do canal	Falha_03	<i>Epsilon</i>
43	Falha no MOV-CW-200B para fechar	G_19	Portão OU
44	Insuficiente 480 V 30 PWR sobre Bus 2H1-1. Depois da perda da energia externa	Falha_04	0.037
45	Falha no MOV energia CKT (São Subárvores)	Falha_05	0.00052
46	Falha na válvula para fechar	Falha_06	0.004
47	Falha no MOV CONT CKT (São Subárvores)	Falha_07	0.0014

## APÊNDICE D – RESULTADOS

### D.1 RESULTADOS DA REDE BAYESIANA CALCULADA NO NETICA

Falha_01	
Falha	1e-005
Funciona	0.99999
Falha_02	
Falha	0.001
Funciona	0.999
Falha_03	
Falha	0
Funciona	1
Falha_04	
Falha	0.037
Funciona	0.963
Falha_05	
Falha	0.00052
Funciona	0.99948
Falha_06	
Falha	0.004
Funciona	0.996
Falha_07	
Falha	0.0014
Funciona	0.9986
G_01	
Falha	5.7562e-005
Funciona	0.99994
G_02	
Falha	4.87e-006
Funciona	1
G_03	
Falha	2.435e-006
Funciona	1
G_04	
Falha	0.00052995
Funciona	0.99947
G_05	
Falha	0.0045947
Funciona	0.99541
G_06	
Falha	2.435e-006
Funciona	1
G_07	
Falha	0.00052995
Funciona	0.99947
G_08	
Falha	0.0045947
Funciona	0.99541

G_17	
Falha	4.2693e-005
Funciona	0.99996
G_18	
Falha	0.042693
Funciona	0.95731
G_19	
Falha	0.0059116
Funciona	0.99409
HX1A	
Falha	0.0023
Funciona	0.9977
HX1B	
Falha	0.0023
Funciona	0.9977
HX1C	
Falha	0.0023
Funciona	0.9977
HX1D	
Falha	0.0023
Funciona	0.9977
JC00	
Falha	0.00042
Funciona	0.99958
JD00	
Falha	0.00042
Funciona	0.99958
JJ00	
Falha	0.00011
Funciona	0.99989
JK00	
Falha	0.00011
Funciona	0.99989