

**INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR**

**DEISE DIANA LAVA**

**ESTUDO DE CONFIABILIDADE DO SISTEMA AUXILIAR DE ÁGUA DE  
ALIMENTAÇÃO DE UMA CENTRAL NUCLEAR À ÁGUA LEVE POR ÁRVORE DE  
FALHAS E REDE BAYESIANA**

**Rio de Janeiro**

**2016**

Deise Diana Lava

ESTUDO DE CONFIABILIDADE DO SISTEMA AUXILIAR DE ÁGUA DE  
ALIMENTAÇÃO DE UMA CENTRAL NUCLEAR À ÁGUA LEVE POR ÁRVORE DE  
FALHAS E REDE BAYESIANA

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares do Instituto de Engenharia Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Ciência e Tecnologia Nucleares – Ênfase Acadêmico em Engenharia de Reatores.

Orientador: Dra. Maria de Lourdes Moreira (PPGCTN / IEN / CNEN) e  
Dr. Antonio Cesar Ferreira Guimarães (IEN / CNEN)

Rio de Janeiro

2016

LAVA      Lava, Deise Diana.

ESTUDO DE CONFIABILIDADE DO SISTEMA AUXILIAR DE ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO DE UMA CENTRAL NUCLEAR À ÁGUA LEVE POR ÁRVORE DE FALHAS E REDE BAYESIANA/

Deise Diana Lava – Rio de Janeiro: CNEN / IEN, 2016.

xii, 57f. : il.; 31 cm.

Orientadores: Maria de Lourdes Moreira e Antonio Cesar Ferreira Guimarães.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Nucleares) – Instituto de Engenharia Nuclear, PPGCTN/IEN, 2016.

1. Sistema Auxiliar de Água de Alimentação 2. Árvore de Falhas 3. Rede Bayesiana.

ESTUDO DE CONFIABILIDADE DO SISTEMA AUXILIAR DE ÁGUA DE  
ALIMENTAÇÃO DE UMA CENTRAL NUCLEAR À ÁGUA LEVE POR ÁRVORE DE  
FALHAS E REDE BAYESIANA

Deise Diana Lava

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
CIÊNCIA E TECNOLOGIA NUCLEARES DO INSTITUTO DE ENGENHARIA  
NUCLEAR DA COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIA E TECNOLOGIA NUCLEARES – ÊNFASE ACADÊMICO EM ENGENHARIA  
DE REATORES.

Aprovada por:

---

Prof.<sup>a</sup>. Maria de Lourdes Moreira, D.Sc.

---

Prof. Celso Marcelo Franklin Lapa, D.Sc.

---

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

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JULHO DE 2016

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pela vida e pelas oportunidades que tive de chegar até aqui.

Agradeço aos meus pais, Roseli e Alécio, por todo o apoio e confiança.

Ao meu companheiro Diogo, agradeço por toda paciência e compreensão, por entender que muitas vezes deixei a diversão de lado para me dedicar aos estudos, e por me apoiar em todos os momentos, tanto os bons quanto os ruins.

Aos professores do curso, agradeço por toda dedicação e atenção.

Agradeço em especial à orientadora Malu, por toda ajuda, pela paciência e compreensão. Obrigada por acreditar e confiar em mim. Ao coorientador Antônio Cesar, meu muito obrigada por todo o material indicado, pelas dicas e ensinamentos.

Agradeço também à CNEN pela bolsa de estudos.

*“Ama-se mais o que se conquista com esforço”*

*Benjamin Disraeli*

## RESUMO

Este trabalho tem por objetivo apresentar um estudo de confiabilidade do Sistema Auxiliar de Água de Alimentação (AFWS) através das metodologias de Árvore de Falhas e Rede Bayesiana. Para tanto, o trabalho é composto de uma revisão bibliográfica a respeito da história da energia nuclear e das metodologias utilizadas. O AFWS é o sistema responsável por fornecer água para resfriar o circuito secundário de reatores nucleares do tipo PWR quando o Sistema de Água de Alimentação normal falha. Como este sistema atua somente quando ocorre falha no sistema principal, espera-se que a probabilidade de falha do AFWS seja muito baixa. A probabilidade de falha do AFWS é dividida em dois casos: o primeiro é a probabilidade de falha nas primeiras oito horas de operação e o segundo é a probabilidade de falha após oito horas de operação, considerando que o sistema não falhou nas primeiras oito horas. O cálculo da probabilidade de falha do segundo caso foi feito através do uso de Árvore de Falhas e da Rede Bayesiana, que foi construída a partir da Árvore de Falhas. Os resultados da probabilidade de falha obtidos foram muito próximos, na ordem de  $10^{-3}$ .

Palavras-chave: Sistema Auxiliar de Água de Alimentação; Árvore de Falhas; Rede Bayesiana.

## ABSTRACT

This paper aims to present a study of the reliability of the Auxiliary Feedwater System (AFWS) through the methods of Fault Tree and Bayesian Network. Therefore, the paper consists of a literature review of the history of nuclear energy and the methodologies used. The AFWS is responsible for providing water system to cool the secondary circuit of nuclear reactors of the PWR type when normal feeding water system failure. How this system operates only when the primary system fails, it is expected that the AFWS failure probability is very low. The AFWS failure probability is divided into two cases: the first is the probability of failure in the first eight hours of operation and the second is the probability of failure after eight hours of operation, considering that the system has not failed within the first eight hours. The calculation of the probability of failure of the second case was made through the use of Fault Tree and Bayesian Network, that it was constructed from the Fault Tree. The results of the failure probability obtained were very close, on the order of  $10^{-3}$ .

Keywords: Auxiliary Feedwater System; Fault Tree; Bayesian Network.



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACRS – *Advisory Committee on Reactor Safeguard* (Comitê de Salvaguardas)  
APS – Análise Probabilística de Segurança  
AEC – *Atomic Energy Commission* (Comissão de Energia Atômica)  
AFWS – *Auxiliary Feedwater System* (Sistema Auxiliar de Água de Alimentação)  
ECCS – *Emergency Core System Cooling* (Sistema de Arrefecimento de Emergência do Núcleo)  
FT – *Fault Tree* (Árvore de Falhas)  
gpm – galões por minuto  
LOCA – *Loss of Coolant Accidents* (Acidente de Perda de Refrigerante)  
MIT – *Massachusetts Institute of Technology* (Instituto de Tecnologia de Massachusetts)  
MSVH – *Main Steam Valve Housing* (Casa de Válvulas do Vapor Principal)  
NRC – *Nuclear Regulatory Commission* (Comissão Reguladora Nuclear)  
PRA – *Probabilistic Risk Assessment* (Análise Probabilística de Riscos)  
PWR – *Pressurized Water Reactor* (Reator à Água Pressurizada)  
RB – Rede Bayesiana  
RSS – *Reactor Safety Study* (Estudo de Segurança de Reatores)(WASH-1400)  
SICS – *Safety Injection Control System* (Sistema de Injeção de Controle de Segurança)

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Diagrama Simplificado do AFWS .....	22
Figura 2- Evento Topo ou Intermediário .....	26
Figura 3- Evento Básico .....	27
Figura 4 - Tabela de Eventos Básicos.....	27
Figura 5- Evento Não Desenvolvido .....	27
Figura 6- Portão AND.....	28
Figura 7- Exemplo de Aplicação do Portão AND.....	28
Figura 8- Portão OR .....	29
Figura 9- Exemplo de Aplicação do Portão OR.....	29
Figura 10- Portão TRANSFER .....	29
Figura 11 - Interface do Código Computacional SAPHIRE .....	33
Figura 12 - Interface do Código Computacional Netica .....	41
Figura 13 - Como criar uma Rede Bayesiana no Netica .....	41
Figura 14 - Esquema Simplificado do AFWS .....	42
Figura 15 - Árvore de Falhas do AFWS (primeiras 8 horas de funcionamento) .....	43
Figura 16 - Árvore de Falhas do AFWS (depois de 8 horas de funcionamento) .....	46
Figura 17 - Probabilidade de Falha do AFWS (depois de 8 horas de operação) .....	47
Figura 18 - Cálculo da Probabilidade de Falha do AFWS com o auxílio do software Excel .....	47
Figura 19 - Árvore de Falhas do AFWS Simplificada (depois de 8 horas de funcionamento).....	49
Figura 20 - Probabilidade de Falhas do AFWS depois de 8 horas de operação utilizando a Árvore Simplificada .....	49
Figura 21 - Conversão de um Portão AND.....	50
Figura 22 - Conversão de um Portão OR.....	50
Figura 23 - Rede Bayesiana do AFWS (depois de 8 horas de funcionamento) .....	52
Figura 24 - Tabela de Possibilidades de Estudo do Portão 1 .....	53
Figura 25 - Tabela de Possibilidades de Estudo do Topo .....	53
Figura 26-Probabilidade de Falha dos nós pais para que o nó filho tenha 100% de probabilidade de falha .....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Portões Lógicos traduzidos para a Álgebra Booleana.....	30
Tabela 2 - Leis da Álgebra Booleana .....	31
Tabela 3 - Distribuição Conjunta de Sistema Operacional x Processador .....	37
Tabela 4 - Eventos e Probabilidades de Falhas (depois de 8 horas de funcionamento).....	44
Tabela 5 - Probabilidades de Falhas dos eventos da Árvore Simplificada .....	48

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>5</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>7</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>8</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS</b> .....	<b>9</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>10</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>11</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>12</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1. OBJETIVOS, RELEVÂNCIA E CONTRIBUIÇÃO.....	14
1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	15
<b>2. REVISÃO HISTÓRICA</b> .....	<b>15</b>
2.1. A ORIGEM DA ENERGIA NUCLEAR.....	15
2.2. A ORIGEM DA REGULAMENTAÇÃO DE SEGURANÇA DE REATORES E MÉTODOS PROBABILÍSTICOS .....	16
2.3. HISTÓRICO DAS METODOLOGIAS DO TRABALHO .....	19
<b>3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA</b> .....	<b>21</b>
3.1. BASES DE PROJETO DO AFWS .....	23
3.2. EVENTOS INICIADORES.....	24
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	<b>25</b>
4.1. ÁRVORE DE FALHAS .....	25
4.1.1. <i>Símbolos Lógicos</i> .....	26
4.1.2. <i>Conjunto de Cortes Mínimos</i> .....	30
4.1.3. <i>Código Computacional SAPHIRE</i> .....	31
4.2. REDE BAYESIANA .....	33
4.2.1. <i>Fundamentos de Probabilidade</i> .....	35
4.2.2. <i>Teorema de Bayes</i> .....	38
4.2.3. <i>Código Computacional Netica</i> .....	39
<b>5. RESULTADOS</b> .....	<b>42</b>
5.1. RESULTADO DA ÁRVORE DE FALHAS .....	42
5.2. RESULTADO DA REDE BAYESIANA .....	50
5.2.1. <i>Conversão da Árvore de Falhas para Rede Bayesiana</i> .....	50
5.2.2. <i>Construção da Rede Bayesiana</i> .....	51
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>55</b>
<b>7. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>56</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), composta pelas usinas nucleares Angra I e Angra II, em funcionamento, e Angra III, em construção, possui uma importante participação no desenvolvimento tecnológico e no complemento de fornecimento de energia elétrica à rede nacional brasileira. As usinas integrantes da CNAAA atuam na geração de energia com o uso de reatores nucleares do tipo PWR (*Pressurized Water Reactor*), que é o modelo de reator mais utilizado no mundo para a produção de energia nuclear.

Cada instalação nuclear é projetada afim de garantir altos níveis de confiabilidade durante seu período de vida útil qualificada. Para tal, inúmeras premissas e técnicas de defesa em profundidade (*“defense-in-depth”*) são incorporadas ao projeto da instalação como, por exemplo, o uso de redundâncias, que constituem o meio mais simples para se obter um sistema de alta disponibilidade através do uso de “caminhos operativos”, geralmente através da utilização de componentes físicos que podem ser utilizados em caso de falha de um dos componentes comuns à operação normal de um sistema.

A Análise Probabilística de Segurança - APS (*“Probability Safety Analysis” - PSA*) apresenta-se como uma importante ferramenta para garantir que níveis de confiabilidade estimados no projeto base de uma instalação sejam mantidos. Através do uso desta ferramenta é possível identificar previamente possíveis acidentes decorrentes do ciclo operativo normal de uma instalação. A APS é uma ferramenta para quantificação de risco associada ao ciclo operativo de uma instalação, que pode ser utilizada tanto na fase de projeto quanto na operação da instalação. Através desta análise é possível se obter dados probabilísticos significativos sobre possíveis falhas de sistemas, estruturas e componentes, fornecendo assim uma estimativa numérica sobre os níveis de segurança que uma instalação está submetida. A APS é dividida em três etapas:

- Nível 1: O projeto e a operação da planta são analisados com a finalidade de identificar sequências de eventos que possam causar dano ao núcleo e a frequência de dano no núcleo poderá ser determinada (calculada);
- Nível 2: Progressão cronológica do evento que foi determinado (calculado) no Nível 1 e modelos de falha da contenção com a possibilidade de liberação de radioisótopos;
- Nível 3: Quantifica o risco para a saúde do público e os impactos socioambientais da liberação radiativa.

As APS Nível 1, Nível 2 e Nível 3 são análises sequenciais onde os resultados de cada análise normalmente servem como base para a APS do próximo nível.

Neste trabalho trataremos da APS somente no nível 1.

### 1.1. OBJETIVOS, RELEVÂNCIA E CONTRIBUIÇÃO

O objetivo principal do trabalho é apresentar um estudo sobre a probabilidade de falha do Sistema Auxiliar de Água de Alimentação - AFWS (*Auxiliary Feedwater System*) utilizando a Técnica de Árvore de Falhas e Redes Bayesianas. Os objetivos secundários são:

- ❖ Descrever o AFWS;
- ❖ Construir a Árvore de Falhas e a Rede Bayesiana do sistema em questão; e
- ❖ Comparar as metodologias no estudo de caso.

Os prós da metodologia de Análise de Árvore de Falhas são que esta tem se mostrado uma ferramenta eficiente que permite, através de uma representação de fácil interpretação, reconhecer quais os principais eventos que podem contribuir para a ocorrência de determinadas falhas, assim como o desencadeamento destas.

Quanto às Redes Bayesianas, a vantagem é que estas analisam problemas reais através de um mapeamento probabilístico das relações de causa e efeito entre as variáveis. Outro benefício gerado pela metodologia é a representação interpretativa e analítica para o raciocínio probabilista, que pode ser utilizada em diversas áreas como,

por exemplo, estimacão de risco operacional, diagnóstico médico, projeto de jogos computacionais, entre outras.

A relevância deste trabalho e sua principal contribuio se do pela comparao entre duas metodologias capazes de estimar a probabilidade de falha do Sistema Auxiliar de água de Alimentao (Técnica de árvore de Falhas e Rede Bayesiana), além da revisão bibliográfica apresentada, que  uma síntese de várias bibliografias importantes da rea.

## 1.2. ORGANIZAO DO TRABALHO

A organizao deste trabalho foi feita da seguinte forma: o capítulo 2 apresenta, de forma sucinta, a história relacionada com centrais nucleares, a origem da energia nuclear e a origem da regulamentaco de seguranca de reatores e métodos probabilísticos, a fim de subsidiar informaçoes necessárias para a compreensão da origem da utilizao da energia nuclear e suas normas de seguranca, além disso, apresenta o histórico das duas metodologias utilizadas. O terceiro capítulo  composto pela descrio do sistema utilizado como caso de ilustrao para aplicao da metodologia proposta. O capítulo 4 apresenta a metodologia de Análise de árvore de Falhas e a metodologia de Redes Bayesianas. O quinto capítulo apresenta tanto a árvore de Falhas quanto a Rede Bayesiana do AFWS após oito horas de operao sem falhar e os respectivos resultados. O Capítulo 6 apresenta as consideraoes finais e o sétimo as referências bibliográficas.

## 2. REVISÃO HISTÓRICA

### 2.1. A ORIGEM DA ENERGIA NUCLEAR

A regulamentaco nuclear era de responsabilidade da Comissão de Energia Atômica (AEC), até que o Congresso (dos Estados Unidos da América) estabeleceu uma

comissão inicialmente composta de cinco membros como parte da Lei de Energia Atômica de 1946, com objetivo de manter estrito o controle sobre a tecnologia atômica e explorá-la no futuro para usos militares. A Lei de 1946, ocorrida durante relações turbulentas com a União Soviética devido ao início da Guerra Fria, reconheceu de forma implícita o potencial pacífico e benéfico da energia atômica. Esta lei destacou os aspectos militares da energia nuclear e a necessidade de sigilo de informações referentes a mesma. Ela também excluía aplicações comerciais da energia nuclear e garantia que o domínio de conhecimento pertencesse apenas ao governo. (KELLER; MODARRES, 2004)

O Congresso dos EUA posteriormente substituiu a Lei de 1946 pela Lei de Energia Atômica de 1954, que tornou possível o desenvolvimento comercial da energia nuclear. Esta lei também acabou com o monopólio do governo sobre dados técnicos, tornou a necessidade do uso comercial da energia nuclear uma meta nacional para promover seu uso pacífico e forneceu uma garantia razoável de que seu uso não resultaria em riscos indevidos para a saúde e segurança do público. Receosa com os custos envolvidos e com os possíveis riscos da energia nuclear, a indústria elétrica não demonstrou entusiasmo com a Lei de 1954. (KELLER; MODARRES, 2004)

## 2.2.A ORIGEM DA REGULAMENTAÇÃO DE SEGURANÇA DE REATORES E MÉTODOS PROBABILÍSTICOS

Segundo informações do artigo de Keller e Modarres (2004, p. 272 – 275) as considerações iniciais das questões de segurança começaram com o Projeto Manhattan durante a Segunda Guerra Mundial. O Projeto Manhattan incluía várias disciplinas distintas: física experimental e teórica, engenharia química, engenharia mecânica e engenharia elétrica. Cada grupo contribuiu com diferentes métodos de projeto e construção. Utilizando-se de sua experiência em modelos químicos, engenheiros da Du Pont criaram o conceito de dependência funcional e estrutural ao dividir o projeto do reator em subsistemas menores, que posteriormente desencadeou o conceito de “defesa em profundidade”, promovendo camadas de “barreiras” independentes para liberação de substâncias radioativas no meio ambiente.



O conceito de defesa em profundidade teve sua origem em 1940 e devido à falta de conhecimento preciso das margens de projeto, evoluiu para um conjunto de princípios reguladores de concepção e segurança:

- Uso de múltiplas de barreiras artificiais ativas e/ou passivas para afastar eventuais falhas individuais que levam à liberação de materiais radioativos;
- Incorporação de grandes margens de design para superar qualquer falta de conhecimento preciso (incerteza epistêmica) sobre a capacidade de barreiras e magnitude de desafios impostos pelas condições normais ou de acidente;
- Aplicação de garantia da qualidade em projeto e fabricação;
- Operação dentro de limites pré-determinados pelo projeto original;
- Teste contínuo, inspeções e manutenção para preservar as margens do projeto original.

A preocupação com medidas quantitativas de risco e confiabilidade dos reatores não foi um fator primordial no processo de projeto anteriormente. O conceito de confiabilidade nasce com a formação de engenheiros nucleares na Universidade do Estado da Carolina do Norte na década de 50, tendo seu primeiro programa em engenharia nuclear em 1957, seguido pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT) logo depois. O professor do MIT Emst Frankel escreveu o livro *System Reliability and Risk Analysis*, publicado no início da década de 60, que forneceu tanto a estrutura matemática quanto os métodos probabilísticos para sistemas de engenharia.

Em 1957 o Documento Wash-740 foi publicado pela Comissão de Energia Atômica. Este documento caracteriza a primeira perspectiva sobre consequências de um acidente nuclear.

À medida em que os sistemas de segurança dos reatores evoluíram em tamanho e complexidade, tornavam-se necessário novos métodos de análise para produzir estimativas de risco razoavelmente mais precisas. Devido à insistência do Comitê de Salvaguardas - ACRS (*Advisory Committee on Reactor Safeguard*), originária com a chamada Síndrome da China, a AEC estabeleceu uma força-tarefa especial para investigar o problema central de fusão em 1966. O relatório da força-tarefa publicado em 1967 ofereceu garantias sobre a improbabilidade de uma fusão do núcleo e a

confiabilidade do projeto de resfriamento de emergência do núcleo, mas também reconheceu que um acidente de perda de refrigerante - LOCA (*Loss of Coolant Accidents*) poderia causar uma perda de proteção no caso de falha do Sistema de Resfriamento de Emergência do Núcleo (*Emergency Core System Cooling* (ECCS)). Deste ponto em diante, a contenção já não podia ser considerada como uma barreira final infalível contra a radioatividade. Isto representou um marco fundamental na regulação de reatores nucleares. Assim a AEC percebeu que em algumas circunstâncias o prédio de contenção poderia falhar, então a solução para proteger a saúde e segurança do público tornou-se a prevenção de acidentes graves que poderiam impactar na contenção das instalações.

O Relatório Rasmussen, como ficou conhecido o documento “*Reactor Safety Study*” – RSS (WASH-1400) foi criado em um período em que diversas usinas nucleares estavam sendo construídas, fato que levou a análise de segurança de reatores nucleares a se tornar uma questão de segurança pública. O WASH-1400 teve seu início marcado com o envio de uma carta de ajuda do Senador John O. Pastore, presidente da Comissão Mista de Energia Atômica, para o então atual presidente da AEC, James Schlesinger, em 1972.

Como resultado da carta do senador Pastore, a AEC se aproximou Professor Mason Bento, um membro da ACRS e ex-chefe do departamento de engenharia nuclear no MIT, para buscar sua ajuda para iniciar e executar um estudo sobre a avaliação da segurança das centrais nucleares nos Estados Unidos. O professor Bento se recusou a posição, mas recomendou o professor Norman Rasmussen, que, com interesse em técnicas probabilísticas e estatísticas que formam a base de qualquer avaliação de estudo de risco, poderia servir como uma alternativa. A AEC aceitou esta recomendação e começou a RSS em 1972. O pessoal do RSS consistia de cerca de 40 cientistas e engenheiros, vindos da indústria, academia e serviço do governo.

O RSS inicialmente utilizava a Técnica de Árvore de Falhas como base para cálculos de risco de reatores, uma decisão tomada por Rasmussen e Levine em 1972 a pedido do Dr. William Vesely. Embora Árvores de Falhas fossem usadas para quase todos os principais sistemas relacionados com segurança, percebeu-se que sua análise geral para uma usina nuclear inteira era muito complexa, dadas as restrições de tempo e recursos. Isto levou ao desenvolvimento da árvore de eventos. Sua função era

modelar a linha do tempo aproximado dos possíveis cenários de acidentes. Este documento é considerado a primeira Análise Probabilística de Segurança (APS). A partir daí e até o final dos anos 80 foram elaboradas mais de 70 APSs para reatores de potência em todo o mundo a fim de mostrar ao público o baixo risco das Usinas Nucleares.

A utilização da APS é um instrumento de gerenciamento da segurança de centrais nucleares e oferece benefícios imediatos para aqueles que utilizam as suas técnicas no projeto e operação, e para todos aqueles que estão envolvidos no aumento da segurança de reatores. A implementação da APS pode reduzir a frequência de transientes e acidentes, e beneficiar a indústria nuclear como um todo. (HIRATA, 2009, p.14)

Apesar dos inúmeros benefícios de uma APS, seus resultados possuem incertezas que geralmente podem ser atribuídas à falta de conhecimento detalhado da instalação. As principais fontes de incertezas são aquelas devidas aos dados de confiabilidade adotados (confiabilidade dos componentes, falhas de modo comum e erros humanos) e devidas às hipóteses assumidas na análise. Apesar destas incertezas, a APS complementa o método de análise determinístico, pois identifica seus pontos fracos e, desta forma, melhora o nível de segurança da instalação.

### 2.3. HISTÓRICO DAS METODOLOGIAS DO TRABALHO

Um dos primeiros estudos relacionados a área de avaliação probabilística de riscos, o NUREG – 75/014 (WASH 1400), foi a primeira tentativa científica para fornecer uma análise quantitativa de risco associado com usinas nucleares. WASH-1400 utilizou a Análise de Árvore de Falhas para estimar a probabilidade de cada evento no caminho do acidente e, assim, gerar a probabilidade total de vários tipos de acidentes. Portanto, este documento nos fornece importantes dados para o trabalho, apresenta dados dos sistemas e probabilidades de falhas dos componentes.

Segundo Misra (1992, p.897) em 1961, na *Bell Telephone Laboratories*, foi concebida e desenvolvida a Análise de Árvore de Falhas por H. A. Watson. A técnica surgiu da necessidade de avaliar a confiabilidade de um sistema complexo associado ao controle de lançamento de mísseis guiados e de alcance intercontinental. Sua

publicação apareceu pela primeira vez no relatório “*Launch Control Safety Study in Vol.1, section III on Method of Inadvertent Launch Control Analysis*”. Os resultados foram muito próximos aos dados observados e o estudo forneceu confiança suficiente e encorajamento para utilizar esta técnica no projeto de *Minuteman II*.

A Análise de Árvore de Falhas também foi usada na *Boeing Company*, aplicada nas técnicas de simulação de aeronaves tripuladas. Os relatórios de árvore de falhas do *Minuteman II* foram publicados pela Boeing e AVCO em março 1963 e janeiro 1964, respectivamente. Em junho de 1965, em Seattle, a empresa Boeing e Universidade de Washington custearam um simpósio sobre segurança de sistema, onde foram apresentados vários trabalhos sobre Árvore de Falhas. (MISRA; WEBER, 1989, p.195-216)

A técnica de Redes Bayesianas foi criada por Thomas Bayes, um reverendo presbiteriano que viveu no início do século 18 (1701?-1761) na Inglaterra. Bayes publicou um único livro de matemática chamado *The doctrine of fluxions* (A doutrina dos *fluxions*) – o nome *fluxion* foi dado por Isaac Newton para a derivada de uma função contínua (chamada de *fluent*). Com base nesse livro, Bayes foi eleito em 1752 para a Real Sociedade, entidade científica britânica. Dois anos após sua morte, um amigo, o filósofo Richard Price (1723-1791), apresentou à Real Sociedade um artigo que encontrou entre os papéis de Bayes, com o nome “*An essay towards solving a problem in the doctrine of chances*” (‘Ensaio buscando resolver um problema na doutrina das probabilidades’). Neste artigo estava a demonstração do famoso Teorema de Bayes. Após sua publicação, o trabalho caiu no esquecimento, do qual só foi resgatado pelo matemático francês Pierre-Simon Laplace (1749-1827), que o revelou ao mundo. (PENA, 2006, p.24)

### 3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Com base no documento WASH-1400 ou NUREG-75/014 (U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1975, p.II-102), a função do Sistema Auxiliar de Água de Alimentação (AFWS) é fornecer água para o lado secundário para a operação dos geradores de vapor após a perda de água da alimentação principal.

O sistema deve ser concebido para assegurar que o fluxo requerido possa ser fornecido quando necessário e durante o tempo que é necessária a função do sistema. Isso inclui a seleção de características adequadas da bomba principal e prestação de um fornecimento suficiente de água de alimentação auxiliar. O projeto do sistema e seleção da bomba deverá também abordar limites superiores de fluxo que podem ser impostas para mitigar os efeitos de massa e energia liberadas dentro de contenção e evitar o arrefecimento do sistema do reator a uma taxa excessiva. (AMERICAN NUCLEAR SOCIETY, 1991)

A Fig.1 é um diagrama simplificado do Sistema Auxiliar de Água de Alimentação. Devido à necessidade do AFWS, as três bombas, duas elétricas e uma turbo bomba, podem ser iniciadas automaticamente ou manualmente. As bombas elétricas são iniciadas automaticamente quando:

1. Aparecer um sinal do SICS (Sistema de Injeção de Controle de Segurança);
2. É detectada a perda de energia externa;
3. As bombas de água principal se desligam;
4. Baixo nível de água é detectado em um gerador de vapor.

A turbo bomba é iniciada automaticamente quando um baixo nível de água é detectado em um gerador de vapor ou a perda de energia externa é detectada. Todas as bombas estão alinhadas com o tanque do condensador de 110.000 galões (aproximadamente 416.395 litros) por meio de linhas de sucção separadas sempre, exceto quando a manutenção está sendo realizada em uma bomba. As três bombas fornecem água para dois conectores que penetram na contenção. Dentro da contenção, cada gerador de vapor pode receber o condensado de qualquer conector.

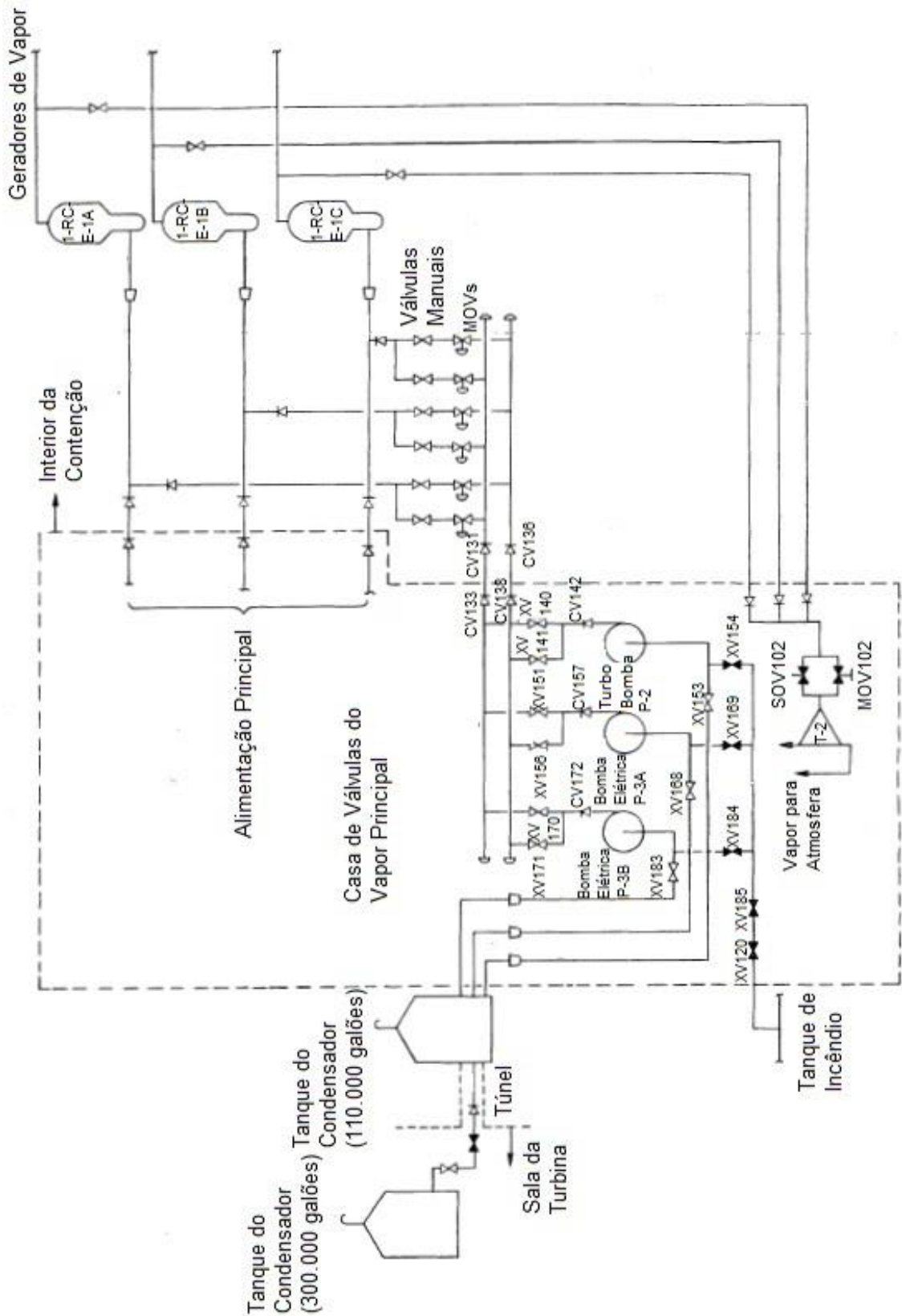


Figura 1- Diagrama Simplificado do AFWS

Fonte: Nureg-75/014

Todo o calor de decaimento produzido pode ser removido por qualquer uma das três bombas que entrega água de alimentação para qualquer um dos três geradores de vapor. A quantidade de água de alimentação necessária diminui com o tempo, e o operador pode diminuir o fluxo para os geradores de vapor desligando as bombas redundantes, e então, utilizando as válvulas de motor operados dentro da contenção, diminuir o fluxo conforme o necessário para igualar o vapor produzido e o liberado.

O tanque do condensador de 110.000 galões contém água suficiente para manter o resfriamento contínuo por aproximadamente oito horas. Se o AFWS é exigido por um longo período, o operador deve tomar medidas para ativar fontes de água adicionais. Existem duas fontes disponíveis, um tanque de armazenamento de 300.000 galões (aproximadamente 1.135.620 litros), e o de incêndio que torna disponível pelo menos 400.000 galões (aproximadamente 1.514.165 litros) com até 400 galões por minuto a partir do poço da contenção. Cada uma destas fontes de água adicionais requer operação por válvulas manuais. Como indicado no diagrama de fluxo, a válvula de incêndio é ativada pela operação de válvulas manuais na casa de válvulas do vapor principal (*Main Steam Valve Housing – MSVH*), enquanto o tanque de armazenamento de 300.000 galões é ativado através da operação de uma válvula manual no prédio da turbina.

### 3.1. BASES DE PROJETO DO AFWS

O AFWS é projetado nas seguintes bases:

- a) O calor de decaimento pode ser removido pelo sistema primário fornecendo pelo menos 350 gpm (saindo por qualquer uma das bombas) para o lado secundário de qualquer um dos três geradores de vapor.
- b) Três bombas auxiliares de água de alimentação estão disponíveis, uma movida a vapor e duas movidas à eletricidade. As duas bombas elétricas utilizam trem de emergência separados.
- c) Condensado suficiente para oito horas de resfriamento do calor de decaimento está disponível, através da canalização (normalmente aberta) com válvulas,

para todas as três bombas. O abastecimento de água de segurança está disponível para uma operação prolongada.

### 3.2. EVENTOS INICIADORES

O AFWS foi analisado a partir de três eventos iniciadores separados:

- Uma pequena ruptura de tubulação (SPB) ou transientes envolvendo perda de fluxo de água de alimentação principal para o qual o AFWS é necessário, mas excluindo a perda de energia externa;
- Perda de rede (energia externa);
- Pausa de alta energia (vapor principal ou água de alimentação ou válvulas) na casa de válvulas do vapor principal.

Para os dois primeiros eventos, as probabilidades de falha do sistema foram estimados para as primeiras oito horas após o acidente, incluindo a indisponibilidade do sistema, e para as próximas 24 horas se a operação for bem sucedida para as primeiras oito horas. O terceiro evento foi estimado como um começo ou valor de demanda para a falha.

Usando informações do projeto detalhado da planta do AFWS, uma Árvore de Falhas pode ser construída para determinar como o sistema pode falhar em termos de falhas de componentes básicos do AFWS. Falhas postuladas incluíram a avaliação de modos de falha de tubos, válvulas, componentes do circuito de controle, bombas e energia elétrica. Adicionalmente às falhas dos componentes, erros humanos que poderiam resultar em falhas de componentes também foram considerados. Antes de contruir a Árvore do sistema, vamos falar um pouco da técnica.



## 4. METODOLOGIA

Neste trabalho serão utilizadas a metodologia de Árvore de Falhas, amplamente utilizada nos estudos de confiabilidade em diversos setores industriais, e a metodologia de Redes Bayesianas, que é um método de modelagem e de decisão alternativo aos métodos comumente utilizados. Ambas as metodologias serão direcionadas para o Sistema Auxiliar de Água de Alimentação (*Auxiliary Feedwater System*) denotado pela sigla AFWS.

### 4.1. ÁRVORE DE FALHAS

A Análise de Árvore de Falhas é um processo dedutivo que consiste na construção de um diagrama lógico (árvore de falhas), partindo de um evento indesejado, chamado de “evento topo”, e busca as possíveis causas de tal evento. O processo consiste de investigar as sucessivas combinações de falhas dos componentes até atingir as chamadas falhas básicas (ou eventos básicos), as quais constituem o limite de resolução da análise.

A principal função de uma Árvore de Falhas é traduzir um processo físico em um diagrama lógico estruturado, em que eventos simples, os eventos básicos, conduzem a um evento mais complexo, o evento topo.

Várias vantagens são encontradas ao utilizar a Análise de Árvore de Falhas, como:

- Apresenta uma estrutura gráfica que permite análises qualitativas e quantitativas;
- Fornece um registro detalhado de todos os eventos que contribuem para a falha;
- Ressalta os pontos fracos do sistema;
- Identificar as principais falhas que conduzem ao evento topo.

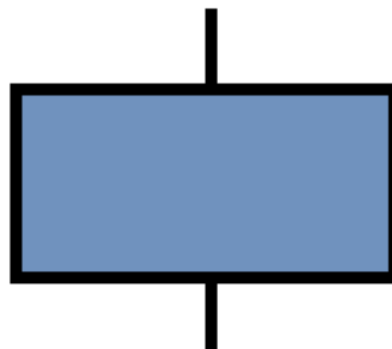
A estrutura da Árvore de Falhas pode considerar a probabilidade de cada falha ocorrer. Além disso, podemos calcular o quanto a probabilidade de ocorrência do evento topo é afetada pela probabilidade dos vários fatores contribuintes.

Utilizando procedimentos da Álgebra Booleana é possível calcular a probabilidade de falha do evento topo a partir das probabilidades dos eventos básicos. Para isso, é preciso entender os símbolos lógicos que constituem a Árvore de Falhas do sistema estudado.

#### 4.1.1. Símbolos Lógicos

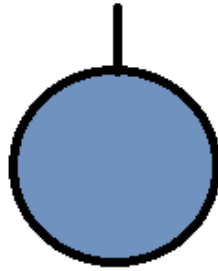
A combinação entre eventos básicos de uma Árvore de Falhas forma uma estrutura lógica. Esta estrutura é composta de operações matemáticas entre os eventos. Tais operações e eventos são representados por símbolos. Estão representados a seguir os símbolos utilizados na Árvore de Falhas do Sistema Auxiliar de Água de Alimentação com base no documento NUREG-0492:

- Evento Topo ou Intermediário: Evento ou falha que ocorre porque um ou mais eventos antecedentes ocorreram, ou seja, evento que pode ser decomposto em eventos básicos. É representado por um retângulo.



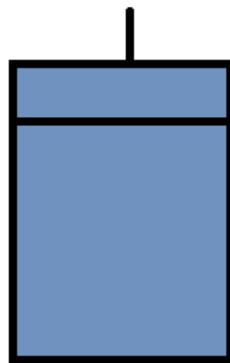
**Figura 2- Evento Topo ou Intermediário**

- Evento Básico: O círculo descreve um evento básico ou uma falha inicial, não requer desenvolvimento. Em outras palavras, o círculo representa o limite de resolução da FT.



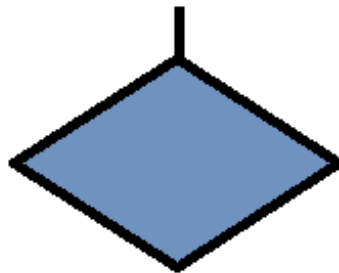
**Figura 3- Evento Básico**

- Tabela de Eventos Básicos: Representa um conjunto de eventos básicos. Esse símbolo é utilizado quando se deseja agrupar muitas entradas de eventos básicos para um portão específico, sendo assim, esse símbolo é utilizado para que se tenha uma estrutura mais organizada para um portão.



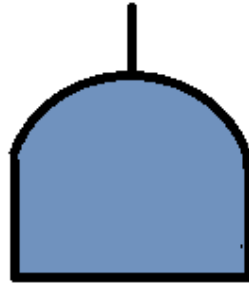
**Figura 4 - Tabela de Eventos Básicos**

- Evento Não Desenvolvido: O losango representa um evento ou falha específica que não é desenvolvido, ou porque o evento tem consequência insuficiente ou porque informações relevantes para o evento não estão disponíveis.



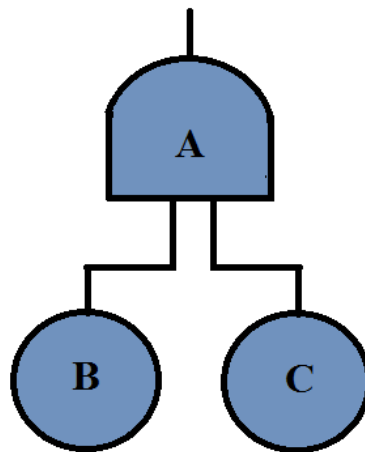
**Figura 5- Evento Não Desenvolvido**

- Portão AND: Este portão é usado para representar que a falha de saída ocorre somente se todas as falhas de entrada ocorrerem. Na teoria de conjuntos, esse portão indica que o resultado é uma interseção dos conjuntos de entrada.



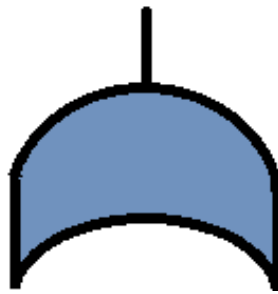
*Figura 6- Portão AND*

Para ilustrar, na figura abaixo (Fig. 7) o evento A ocorre somente se ambos os eventos B e C ocorrerem.



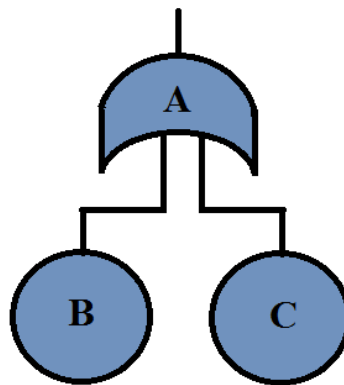
*Figura 7- Exemplo de Aplicação do Portão AND*

- Portão OR: Este portão é utilizado para representar que a falha de saída ocorre somente se uma ou mais falhas de entrada ocorrerem. Na teoria de conjuntos, esse portão indica que o resultado é uma união dos conjuntos de entrada.



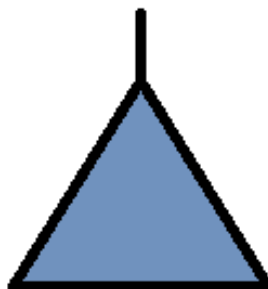
*Figura 8- Portão OR*

A Fig. 9 exemplifica o uso do portão OR. O evento A ocorre se o evento B ocorrer, se o evento C ocorrer ou se ambos os eventos B e C ocorrerem.



*Figura 9- Exemplo de Aplicação do Portão OR*

- Portão TRANSFER: Os triângulos são usados como símbolos de transferência por questão de conveniência para evitar duplicações e indica que a continuação da lógica da árvore principal encontra-se em outra página. O portão TRANSFER do local onde parte da árvore foi transferida deve se encontrar no topo e conter o mesmo nome do portão TRANSFER que se encontra na árvore principal.



*Figura 10- Portão TRANSFER*

Depois de construir a Árvore de Falhas do sistema, é possível, através de regras da álgebra booleana, efetuarmos avaliações qualitativas e quantitativas para um melhor entendimento a respeito do evento indesejado. Para FT pequenas e simples isto pode ser feito manualmente, para sistemas grandes e complexos são necessários códigos computacionais. Utilizaremos o código computacional SAPHIRE.

#### 4.1.2. Conjunto de Cortes Mínimos

Uma análise qualitativa da FT apresenta informações sobre a importância de alguns eventos, além de identificar as combinações de eventos básicos que levam ao evento topo. Convertendo a Árvore de Falhas em equações, por meio da álgebra booleana, podemos identificar o menor “caminho” de eventos que levam ao evento topo.

Um Conjunto de Cortes (*Cut Set*) é um conjunto de eventos básicos tal que, se todos estes eventos ocorrerem, implicarão na ocorrência do evento topo. Um Conjunto de Cortes Mínimos (*Minimal Cut Sets – MCS*) é uma combinação mínima de eventos que implica na ocorrência do evento topo. Um conjunto de cortes é considerado mínimo se não puder ser reduzido sem deixar de ser conjunto de cortes.

A técnica dos conjuntos de cortes mínimos é uma das técnicas mais utilizadas na análise de Árvores de Falhas, pois geram árvores mais simples e equivalentes às construídas anteriormente. Para aplicar tal técnica, precisamos traduzir os portões lógicos através das seguintes regras:

**Tabela 1- Portões Lógicos traduzidos para a Álgebra Booleana**

Portões Lógicos	Teoria de Conjuntos	Álgebra Booleana
A AND B	$A \cap B$	$A \cdot B$
A OR B	$A \cup B$	$A + B$

O evento topo pode ser escrito como uma equação que depende do portão lógico que o conecta com seus eventos antecedentes, por sua vez, os eventos antecedentes podem ser escritos em função também dos seus eventos antecedentes, usando regras adequadas para os portões lógicos que os conectam a estes eventos, e assim

por diante, até que o evento topo seja descrito em uma equação que só contenha eventos básicos.

Podemos então simplificar a equação encontrada através das leis da álgebra booleana:

**Tabela 2 - Leis da Álgebra Booleana**

Leis	Representação
Comutativa	$A \cdot B = B \cdot A$ $A + B = B + A$
Associativa	$A \cdot (B \cdot C) = (A \cdot B) \cdot C$ $A + (B + C) = (A + B) + C$
Distributiva	$A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C$
Inalterabilidade	$A \cdot A = A$ $A + A = A$
Absorção	$A + A \cdot B = A$ $A \cdot (A + B) = A$
Complementaridade	$A + A' = \Omega$ $(A')' = A$
De Morgan	$(A \cdot B)' = A' + B'$ $(A + B)' = A' \cdot B'$

#### 4.1.3. Código Computacional SAPHIRE

Segundo informações do documento NUREG-6952 (U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 2008, p.iii), o SAPHIRE é um código computacional desenvolvido para a realização de uma Análise Probabilística de Riscos (PRA) completa usando um computador pessoal com sistema operacional *Windows*. O código é financiado principalmente pela Comissão Reguladora Nuclear (NRC) dos Estados Unidos da América e desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Idaho (*Idaho National Laboratory - INL*). O papel principal deste laboratório é desenvolver e testar o código,

porém desempenha uma importante função de transferência de tecnologia através de interface e suporte aos usuários do SAPHIRE.

SAPHIRE pode ser usado para modelar a resposta de um sistema complexo de eventos iniciadores e quantificar as frequências de resultados consequentes associados. Especificamente, para aplicações em usinas nucleares, o código pode identificar importantes contribuintes para danos núcleo (Nível 1 PRA) e insuficiência de contenção durante um acidente grave que levam a vazamentos (Nível 2 PRA). Ele pode ser usado para uma PRA quando o reator está na potência máxima, baixo consumo de energia, ou em condições de desligamento. Além disso, pode ser utilizado para analisar eventos iniciadores internos e externos e têm características especiais para a transformação de um modelo de eventos internos para um modelo de eventos externos, tais como as inundações e análise de fogo. Ele também pode ser usado de forma limitada para quantificar o risco de consequências em termos de vazamento para o público e ambiente (Nível 3 PRA).

O código computacional também inclui um módulo separado chamado de Módulo de Avaliação Gráfica (GEM). GEM é uma interface especial vinculada ao SAPHIRE que automatiza as etapas do processo para avaliar eventos operacionais em usinas nucleares comerciais. Usando GEM, um analista pode estimar o risco associado a eventos operacionais (por exemplo, para calcular a probabilidade condicional de danos núcleo) de forma muito eficiente.

Em suma, através deste código computacional

[...] é possível calcular a probabilidade de falha de um sistema, obter dados referente à Medidas de Importância, modelar o esquema de operação de um sistema, aplicar o Método de Monte Carlo, utilizar as apresentações gráfica e literal da Técnica de Árvore de Falhas, utilizar a Técnica da Árvore de Eventos, além de apresentar diversas outras ferramentas práticas para se obter dados referentes à Análises Probabilísticas de Risco (PRAs). (BORGES, 2014, p.51)





*Figura 11 - Interface do Código Computacional SAPHIRE*

## 4.2. REDE BAYESIANA

A medida que a quantidade de variáveis aumenta, torna-se mais difícil responder questões sobre a distribuição de probabilidade conjunta de um domínio de dados.

Na utilização do teorema de Bayes, a ocorrência de independência condicional entre variáveis aleatórias que descrevem os dados pode simplificar os cálculos para responder perguntas e também reduzir consideravelmente o número de probabilidades condicionais que precisam ser especificadas. A estrutura de dados chamada redes bayesianas representa a dependência entre as variáveis e dá uma especificação concisa da distribuição de probabilidade conjunta. (LUNA, 2004, p.21)

Segundo Russell e Norvig (1995, p.436-437) uma rede bayesiana é um grafo com as seguintes características:

1. Um conjunto de variáveis aleatórias são os nós da rede;

2. Um conjunto de setas ou arcos orientados conecta pares de nós. O significado intuitivo de uma seta a partir de um nó X para um nó Y é que X tem influência direta sobre Y;
3. Cada nó tem uma tabela de probabilidade condicional que quantifica os efeitos que os pais têm sobre o nó. Os pais de um nó são todos aqueles nós que possuem setas apontando para ele;
4. O gráfico não tem ciclos dirigidos, ou seja, é um gráfico dirigido, porém acíclico.

Resumidamente, redes bayesianas são grafos acíclicos dirigidos que representam dependências entre variáveis em um modelo probabilístico. Por ser fundamentado na teoria da probabilidade, o raciocínio probabilístico é uma das grandes vantagens das redes bayesianas, ou seja, é possível tomar decisões racionais mesmo quando não há informações suficientes para se provar que aquela ação funcionará.

Conforme consta em Nassar (2012, p.40):

A base de conhecimento de um sistema especialista probabilístico é chamada de Rede Bayesiana, nela o conhecimento é representado esquematicamente na forma de um grafo acíclico direcionado. Os nodos representam dois tipos de variáveis: as variáveis de entrada (sinais ou evidências) e a variável de saída (conjunto de hipóteses diagnósticas). A força da ligação entre as variáveis é expressa no valor das probabilidades condicionais, que representam uma relação causal para a regra "Se A então B". A arquitetura da rede bayesiana é chamada de parte qualitativa da base de conhecimento. E os valores das probabilidades constituem a parte quantitativa da base de conhecimento.

A autora coloca que uma rede bayesiana é composta de duas partes que se complementam, a parte qualitativa e a parte quantitativa. Na parte qualitativa, a arquitetura da rede, a relação causal para a regra "Se A então B" indica que 'B' depende de 'A', ou seja, para que 'B' ocorra, 'A' deve ocorrer primeiro, então 'A' e 'B' estão ligados por uma seta direcionada de 'A' para 'B' ( $A \rightarrow B$ ). Já a parte quantitativa de uma rede bayesiana é probabilística, e composta por três classes de probabilidade:

- o conjunto de probabilidades condicionais associadas aos arcos existentes no modelo gráfico da parte qualitativa;
- as probabilidades estimadas *a priori* das hipóteses diagnósticas (nó de saída);
- as probabilidades de cada nó de entrada.

Como consta em Almeida (2006, p.17), as probabilidades condicionais e as probabilidades do nó de saída devem ser fornecidas. Já as probabilidades de cada nó de entrada são calculadas utilizando a teoria da probabilidade a partir dos valores já explicitados. Em uma rede bayesiana pode-se observar a propagação de um dado de entrada em toda a rede, permitindo constatar a quantidade de informação daquele dado específico.

Segundo Luna (2004), a propagação de evidências sobre uma rede bayesiana permite obter estimativas de probabilidades quando são acrescentadas informações à essa rede. A propagação de evidência consiste no cálculo das probabilidades *a posteriori* para cada variável. A função da probabilidade *a posteriori* mede a influência da evidência sobre cada variável.

#### 4.2.1. Fundamentos de Probabilidade

Antes de enunciar o teorema de Bayes propriamente dito, precisamos de alguns conceitos de probabilidade.

“Um experimento é um ensaio científico para a verificação de um fenômeno. Todas as vezes que se estudam fenômenos de observação, cumpre-se distinguir o próprio fenômeno e o modelo matemático (determinístico ou probabilístico) que melhor o explique.” (LUNA, 2004, p.22)

O conjunto de todos os resultados possíveis de um experimento aleatório é chamado de espaço amostral e denotaremos por  $S$ . Um evento  $A$  é um subconjunto do espaço amostral. Para ilustrar, se nosso experimento for “arremessar um dado e verificar o número da face superior”, nosso espaço amostral será  $S = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ . Qualquer subconjunto de  $S$  é um evento, inclusive  $S$ , e por exemplo,  $A = \{1, 3, 5\}$  e  $A' = \{2, 4, 6\}$ .

#### 4.2.1.1. Axiomas da Probabilidade

Dado um experimento aleatório qualquer, com espaço amostral  $S$ , a teoria da probabilidade está baseada em uma função  $P$  que, a cada evento  $A$  de  $S$  associa um número real no intervalo  $[0, 1]$ , representado por  $P(A)$ , denominado probabilidade do evento  $A$ , que satisfaz as seguintes propriedades:

- a)  $P(S) = 1$ ;
- b) Se  $A$  e  $B$  são eventos disjuntos de  $S$ , então  $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$ ;
- c) Se  $A_1, A_2, \dots, A_n$  é uma família de eventos de  $S$ , dois a dois disjuntos, então  $P(A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n) = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n)$ ;
- d)  $P(\emptyset) = 0$ ;
- e) Se  $A \subseteq B \subseteq S$ , então  $P(A) \leq P(B)$ ;
- f) Se  $A, B \subseteq S$ , então  $P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$ ;
- g) Se  $A \subseteq S$ , então  $0 \leq P(A) \leq 1$ .

#### 4.2.1.2. Distribuição Conjunta, Marginal e Condicional

Seja  $X$  uma variável aleatória e  $D_X$  seu domínio. Os valores  $P(X = x)$ , para todas as instâncias  $x$ , constituem a distribuição de probabilidade de  $X$ . Por exemplo, seja  $X$  o resultado de lançar um dado não viciado, então  $D_X = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$  é o domínio de  $X$ . A distribuição de probabilidade de  $X$  é dada por  $P(X = x) = 1/6$ , para todo  $x$  em  $D_X$ .

Dadas duas variáveis aleatórias  $X$  e  $Y$ , a distribuição de probabilidade de  $X$  e  $Y$  constitui uma distribuição conjunta. Por exemplo, considere os computadores pessoais de uma empresa. Seja  $X$  o tipo operacional,  $D_X = \{Windows, Linux\}$  o domínio de  $X$ ,  $Y$  a marca do processador e  $D_Y = \{AMD, Intel\}$  o domínio de  $Y$ . A parte interna da tabela a seguir mostra a distribuição conjunta de  $X$  e de  $Y$ .

**Tabela 3 - Distribuição Conjunta de Sistema Operacional x Processador**

Y	X		Marginal de Y
	Windows	Linux	
AMD	0,18	0,12	0,30
Intel	0,42	0,28	0,70
Marginal de X	0,60	0,40	1,00

A distribuição marginal é a distribuição de uma das variáveis do conjunto, que na Tab. 3 fica em uma das margens. Podemos observar que a distribuição marginal de  $Y$  é dada pela última coluna:  $P(Y = AMD) = 0,30$  e  $P(Y = Intel) = 0,70$ . A distribuição marginal de  $X$  é dada pela última linha:  $P(X = Windows) = 0,60$  e  $P(X = Linux) = 0,40$ .

A expressão  $X|Y$  representa a variável  $X$  condicionada ao conhecimento de um valor para  $Y$ , e  $P(X = x|Y = y) = P(x|y)$ , para todo  $x$  em  $D_x$ , representa a distribuição de probabilidade condicional de  $X$  dado que  $Y = y$ . A equação abaixo confirma que a distribuição de  $X$  fica restrita a  $Y = y$ , já que  $P(y)$  atua como um fator de normalização:

$$P(x|y) = P(x, y)/P(y) \quad (1)$$

Por exemplo, usando os valores da Tab.3, podemos calcular a probabilidade de um computador ter sistema operacional *Windows* sabendo que o processador é *Intel*:

$$P(Windows|Intel) = \frac{P(Windows, Intel)}{P(Intel)} = \frac{0,42}{0,70} = 0,60$$

Dada a equação (1), podemos expressar a probabilidade conjunta como o produto da probabilidade condicional pela probabilidade marginal:

$$P(x, y) = P(x|y) \cdot P(y) \quad (2)$$

A equação (2) é chamada de regra do produto.

Em resumo, a probabilidade conjunta é a probabilidade de duas ou mais variáveis aleatórias ocorrerem simultaneamente; a probabilidade marginal é a probabilidade de

uma das variáveis ocorrer, ou seja, é a soma de todas as probabilidades conjuntas que contém tal variável; por fim, a probabilidade condicional é a probabilidade de ocorrer uma segunda variável, sabendo que uma primeira já ocorre.

Diz-se que duas variáveis  $X$  e  $Y$  são independentes se

$$P(x|y) = P(x) \quad (3)$$

sempre que  $P(y) > 0, \forall x \in D_X, y \in D_Y$ . Se  $X$  e  $Y$  são independentes, então  $Y$  não é informativa para  $X$ . Isso significa que conhecer  $Y$  não altera a probabilidade de  $X$ .

A partir da regra do produto (equação 2) e da equação 3, podemos expressar essa independência em termos da distribuição conjunta:

$$P(x, y) = P(x) \cdot P(y) \quad (4)$$

#### 4.2.2. Teorema de Bayes

O coração da teoria Bayesiana é a fórmula da inversão, também chamada de Teorema de Bayes, que é dado pela equação abaixo.

**Teorema de Bayes:**

$$P(H|e) = \frac{P(e|H) \cdot P(H)}{P(e)} \quad (5)$$

onde  $P(H)$  é a probabilidade *a priori* de  $H$ ;  $P(H|e)$  é a probabilidade *a posteriori* de  $H$ , isto é, a probabilidade de  $H$  após conhecer a evidência  $e$ ;  $P(e|H)$  é a *verossimilhança* da evidência  $e$  dada a hipótese  $H$ , e  $P(e)$  é um fator de normalização.

*Demonstração:* A partir da equação (2) podemos escrever que  $P(H, e) = P(H|e) \cdot P(e)$ . Da mesma forma,  $P(e, H) = P(e|H) \cdot P(H)$ . Como estas probabilidades conjuntas são iguais, ou seja,  $P(H, e) = P(e, H)$ , obtemos que

$$P(H|e) \cdot P(e) = P(e|H) \cdot P(H)$$

Isolando a probabilidade *a posteriori* obtemos

$$P(H|e) = \frac{P(e|H) \cdot P(H)}{P(e)}$$

como queríamos. ■

O raciocínio bayesiano considera probabilidade *a priori*, probabilidade condicional e probabilidade *a posteriori*. Multiplicando a probabilidade *a priori* pela condicional, obtemos a probabilidade conjunta, que depois de normalizada, se torna a probabilidade *a posteriori*.

### 4.2.3. Código Computacional Netica

Netica é um poderoso código computacional, fácil de usar e completo para trabalhar com redes bayesianas. Ele tem uma interface de usuário intuitiva e suave para desenhar as redes, e as relações entre variáveis podem ser introduzidas como probabilidades individuais, sob a forma de equações, ou a partir de arquivos de dados (que pode ser delimitado por tabulação comum e ter "dados ausentes").

Uma vez que uma rede é criada, o conhecimento que ele contém pode ser transferido para outras redes recortando e colando, ou salvo em formato modular, criando uma biblioteca de nós com ligações desconectadas. As redes e bibliotecas podem ser salvas em arquivos ou impressas.

O código computacional pode usar as redes para realizar vários tipos de inferência usando os algoritmos mais rápidos e modernos. Dado um novo caso de que temos conhecimento limitado, Netica vai encontrar os valores ou probabilidades apropriadas para todas as variáveis desconhecidas. Estes valores ou probabilidades podem ser exibidos em vários modos diferentes, incluindo gráficos de barras e medidores. O caso pode ser convenientemente salvo em um arquivo, e depois trazido de volta para a rede (ou uma rede diferente) para mais consultas, ou para levar em conta novas informações sobre o caso. Netica pode usar diagramas de influência para encontrar as melhores decisões que maximizem os valores esperados de variáveis

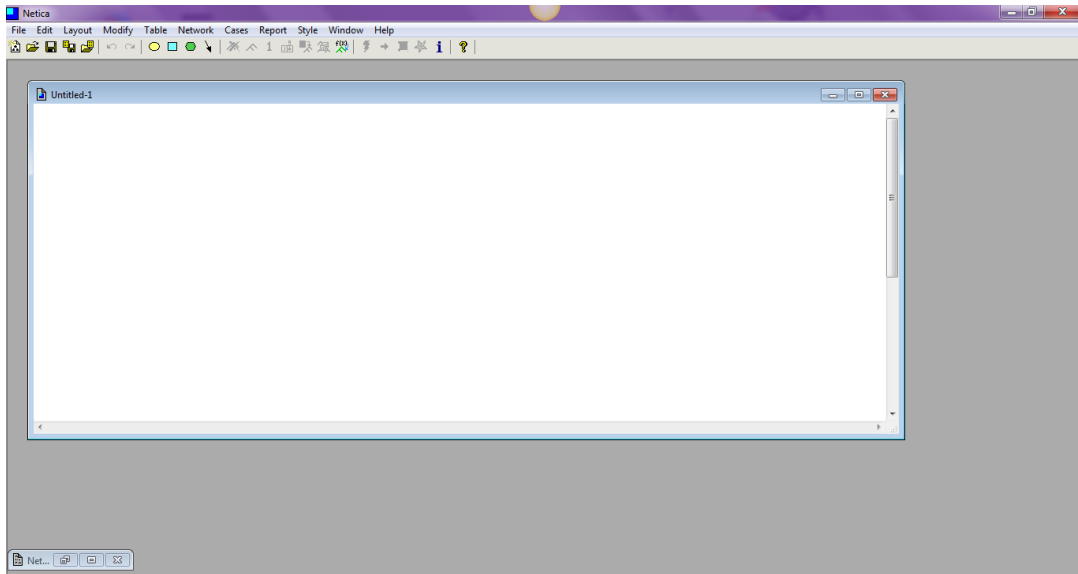
especificadas. Também constroeu planos condicionais, já que as decisões no futuro podem depender de observações ainda a ser feitas.

Netica pode ser utilizado para transformar uma rede em um número de maneiras. Variáveis que não são mais de interesse podem ser removidas sem alterar as relações globais entre as variáveis remanescentes (tecnicamente, as probabilidades são "somadas" quando não sabemos o valor da variável, e uma operação mais complexa é usada quando o fazemos). Modelos probabilísticos podem ser explorados por operações, como reverter links individuais da rede, removendo ou adicionando influências causais, otimizando uma decisão no momento, etc. Essas operações podem ser feitas com apenas um clique do mouse, o que torna o Netica muito fácil de ser explorado, e ótimo para o ensino de conceitos de redes bayesianas.

Vantagens:

- Gera uma apresentação gráfica de qualidade, que pode ser incorporada dentro de outros documentos;
- Encontra decisões ótimas para problemas de decisão sequencial;
- Soluciona diagramas de influência;
- Pode aprender relações probabilísticas através de dados;
- Permite atualização fácil da rede bayesiana e dos diagramas de influência, incluindo: excluir, colar e duplicar nós da rede bayesiana e dos diagramas de influência;
- Mantém diagramas complexos ordenados;
- Permite comentários;
- Permite desfazer e refazer comandos ilimitadamente;
- Permite a entrada de relações probabilísticas através de equações, com uma extensa biblioteca de funções probabilísticas e funções matemáticas;
- Tem facilidade para realizar a discretização de variáveis contínuas.

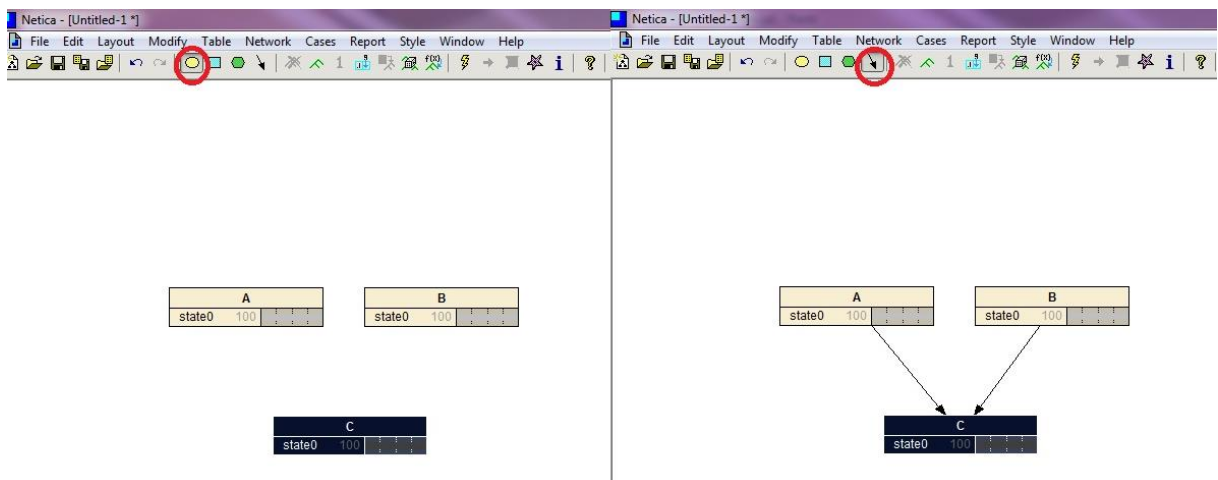




**Figura 12 - Interface do Código Computacional Netica**

O código computacional Netica pode ser utilizado gratuitamente, porém de forma limitada, e está disponível a partir da versão *Windows 95*, *Windows NT 4.0* e *Macintosh*; e a versão para *UNIX*.

Criar uma rede bayesiana no Netica é muito simples, basta clicar sobre o ícone “*Add Nature Node*” e depois clicar sobre a janela em branco. A cada clique será criado um nó da rede. Após criar os nós, basta clicar sobre o ícone “*Add Link*” para criar as setas. Na janela, para ligar dois nós precisamos clicar primeiro no nó pai e depois no nó filho. Ao ligar todos os nós a rede bayesiana está pronta, basta adicionar as características de cada nó (nome, estado, tabela de probabilidades, entre outras) clicando duas vezes sobre o mesmo.



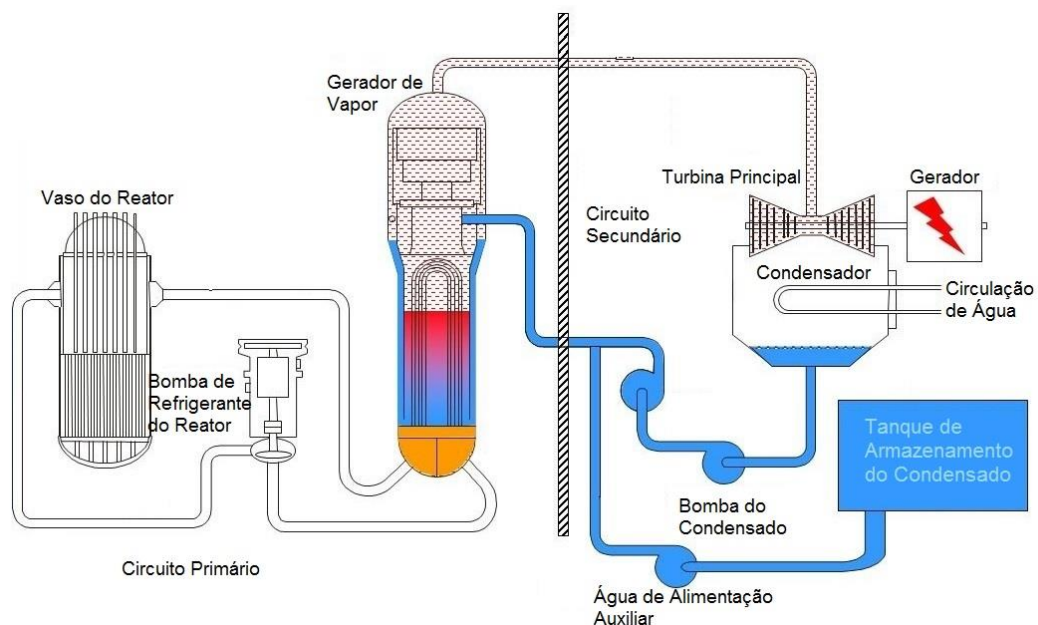
**Figura 13 - Como criar uma Rede Bayesiana no Netica**

## 5. RESULTADOS

Neste capítulo serão aplicadas as metodologias de Árvore de Falhas e Rede Bayesiana ao Sistema Auxiliar de Água de Alimentação de uma central nuclear comercial, cujo reator é um PWR. A aplicação foi direcionada para reatores do tipo PWR, pois é justamente este o tipo de reator em funcionamento no Brasil nas usinas de Angra I e Angra II.

### 5.1. RESULTADO DA ÁRVORE DE FALHAS

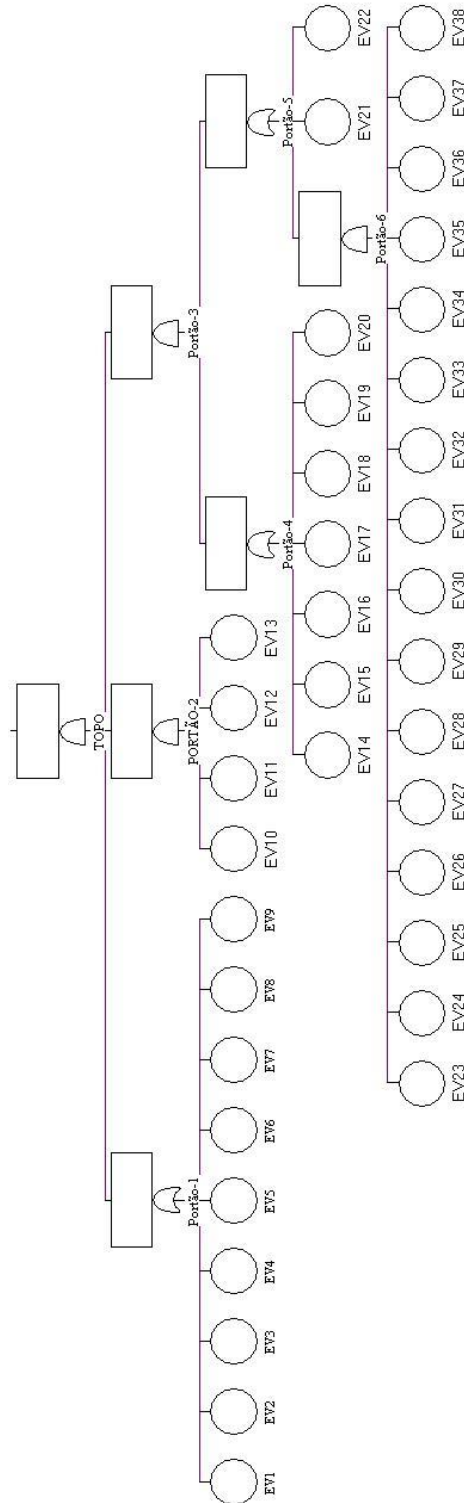
O AFWS assume o papel de refrigerar o sistema secundário ao ligar o reator e também caso o sistema de operação de água de alimentação normal falhe. São construídas então duas Árvore de Falhas para este sistema, a primeira calcula a probabilidade de que o sistema falhe nas primeiras oito horas de operação, e a segunda leva em consideração que o sistema obteve êxito nas primeiras oito horas de operação e calcula a probabilidade de falhar após estas oito horas. A Fig. 13 mostra um esquema simplificado do AFWS.



**Figura 14 - Esquema Simplificado do AFWS**

Fonte: Lochbaum (2015)

Como a probabilidade de falha do AFWS nas primeiras oito horas de funcionamento é muito baixa,  $1,08 \times 10^{-25}$  (valor calculado pelo código computacional SAPHIRE) usaremos a Árvore de Falhas do segundo caso para estudo. Para ilustrar, a Fig. 14 apresenta a Árvore do primeiro caso gerada pelo código computacional SAPHIRE.



**Figura 15 - Árvore de Falhas do AFWS (primeiras 8 horas de funcionamento)**

Para construir a Árvore de Falhas do segundo caso do AFWS, precisamos das probabilidades de falha de cada evento. Para facilitar a construção, os eventos foram renomeados. A tabela a seguir apresenta os eventos, suas descrições e suas probabilidades de falhas para o segundo caso. Estes valores foram consultados na Nureg-75/014 (U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1975).

**Tabela 4 - Eventos e Probabilidades de Falhas (depois de 8 horas de funcionamento)**

EVENTO	DESCRIÇÃO	PROBABILIDADE DE FALHA
EV1	Eventos associados à falha da bomba elétrica A	$\varepsilon$
EV2		$2,4 \times 10^{-4}$
EV3		$5,4 \times 10^{-4}$
EV4		$\varepsilon$
EV5		$\varepsilon$
EV6		$3,7 \times 10^{-2}$
EV7	Eventos associados à falha da bomba elétrica B	$\varepsilon$
EV8		$2,4 \times 10^{-4}$
EV9		$5,4 \times 10^{-4}$
EV10		$5,4 \times 10^{-4}$
EV11		$\varepsilon$
EV12		$3,7 \times 10^{-2}$
EV13	Eventos associados à falta de água no tanque de combate a incêndio	$\varepsilon$
EV14		$\varepsilon$
EV15		$5,4 \times 10^{-4}$
EV16		$5,4 \times 10^{-4}$
EV17		$\varepsilon$
EV18	Falha na linha de vapor principal ou quebra de tubulação no MSVH	$7,5 \times 10^{-5}$
EV19	Falha na solda da tubulação nº 2 (lado da contenção)	$1,0 \times 10^{-7}$
EV20	Falha na solda da tubulação nº 2 (lado do MSVH)	$1,0 \times 10^{-7}$
EV21	Falha na solda da tubulação nº 1 (lado da contenção)	$1,0 \times 10^{-7}$

**Continuação da Tabela 4 - Eventos e Probabilidades de Falhas (depois de 8 horas de funcionamento)**

<b>EVENTO</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>	<b>PROBABILIDADE DE FALHA</b>
EV22	Falha na solda da tubulação nº 1 (lado do MSVH)	$1,0 \times 10^{-7}$
EV23	Ruptura da tubulação nº 2 de 6"	$3,6 \times 10^{-8}$
EV24	Ruptura da tubulação nº 1 de 6"	$3,6 \times 10^{-8}$

Os eventos que apresentam probabilidade de falha  $\varepsilon$  não contribuem significativamente para a indisponibilidade do sistema. Nesse caso,  $\varepsilon$  representa um valor muito próximo de 0.

Na Árvore de Falhas do AFWS (depois de 8 horas de funcionamento), cada um dos eventos 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 e 24 é um Conjunto de Cortes Mínimos, pois é o menor conjunto de eventos básicos que contribui diretamente para a ocorrência do Evento Topo, já que o Portão 2 é um portão OR e o Evento Topo também é um portão OR.

Os eventos que mais contribuem para a indisponibilidade do sistema são os eventos 15, 16 e 18, pois estes eventos são os Conjuntos de Cortes Mínimos com maior probabilidade de falha. Apesar dos eventos 6 e 12 ter probabilidade de falha maior, eles estão conectados a um portão AND com 12 eventos, ou seja, os 12 eventos precisam ocorrer para que ocorra a indisponibilidade do sistema, assim os portões 6 e 12 não influenciam significativamente para a indisponibilidade do sistema.

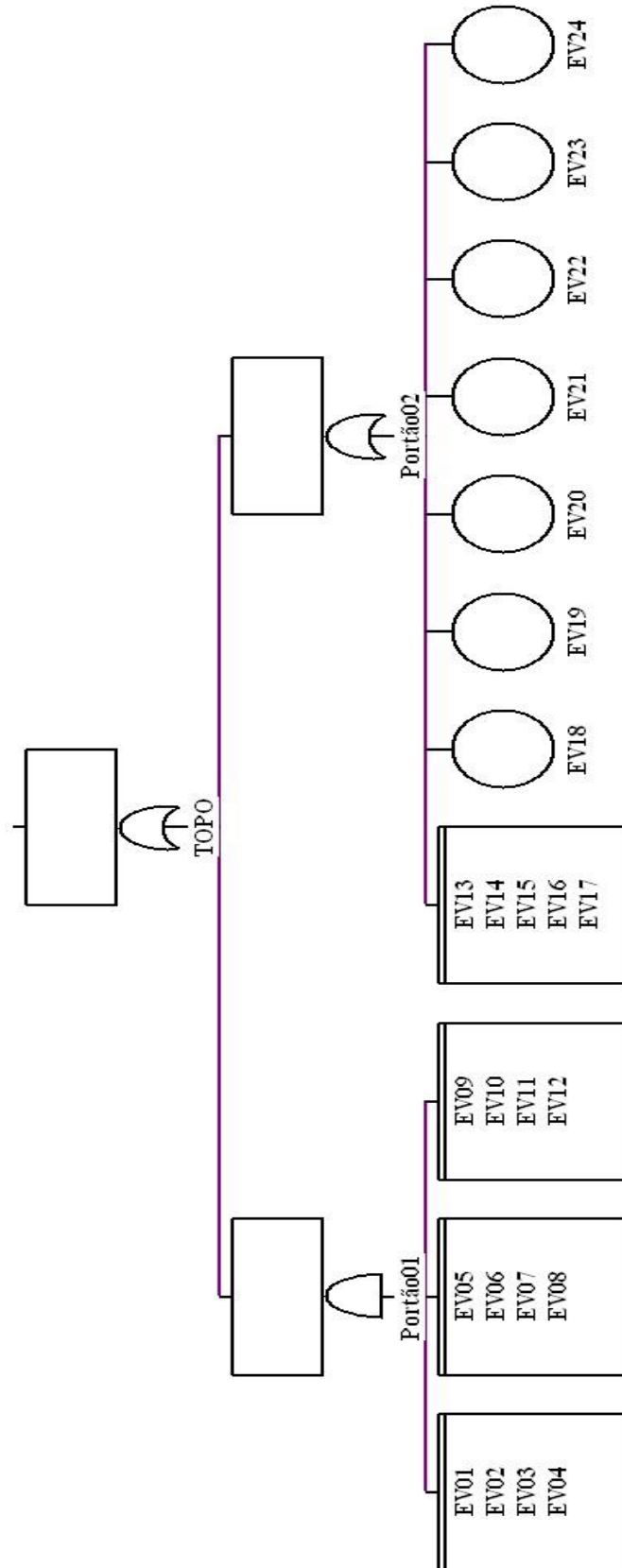


Figura 16 - Árvore de Falhas do AFWS (depois de 8 horas de funcionamento)

O código computacional SAPHIRE gerou como resultado que a probabilidade de que o sistema falhe depois de oito horas de funcionamento é  $1,155 \times 10^{-3}$ , como podemos ver na Fig. 16.



**Figura 17 - Probabilidade de Falha do AFWS (depois de 8 horas de operação)**

Este mesmo resultado foi obtido calculando manualmente a indisponibilidade do sistema utilizando as regras da Álgebra Booleana com o auxílio do software *Microsoft Excel*.

F13													
=F11+F5													
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Ev1	Ev2	Ev3	Ev4	Ev5	Ev6	Ev7	Ev8	Ev9	Ev10	Ev11	Ev12	
2	1,00E-99	2,40E-04	5,40E-04	1,00E-99	1,00E-99	3,70E-02	1,00E-99	2,40E-04	5,40E-04	5,40E-04	1,00E-99	3,70E-02	
3													
4													
5					Portão 1	0							
6													
7	E13	Ev14	Ev15	Ev16	Ev17	Ev18	Ev19	Ev20	Ev21	Ev22	Ev23	Ev24	
8	1,00E-99	1,00E-99	5,40E-04	5,40E-04	1,00E-99	7,50E-05	1,00E-07	1,00E-07	1,00E-07	1,00E-07	3,60E-08	3,60E-08	
9													
10													
11					Portão 2	1,155E-03							
12													
13					Topo	1,155E-03							
14													

**Figura 18 - Cálculo da Probabilidade de Falha do AFWS com o auxílio do software Excel**

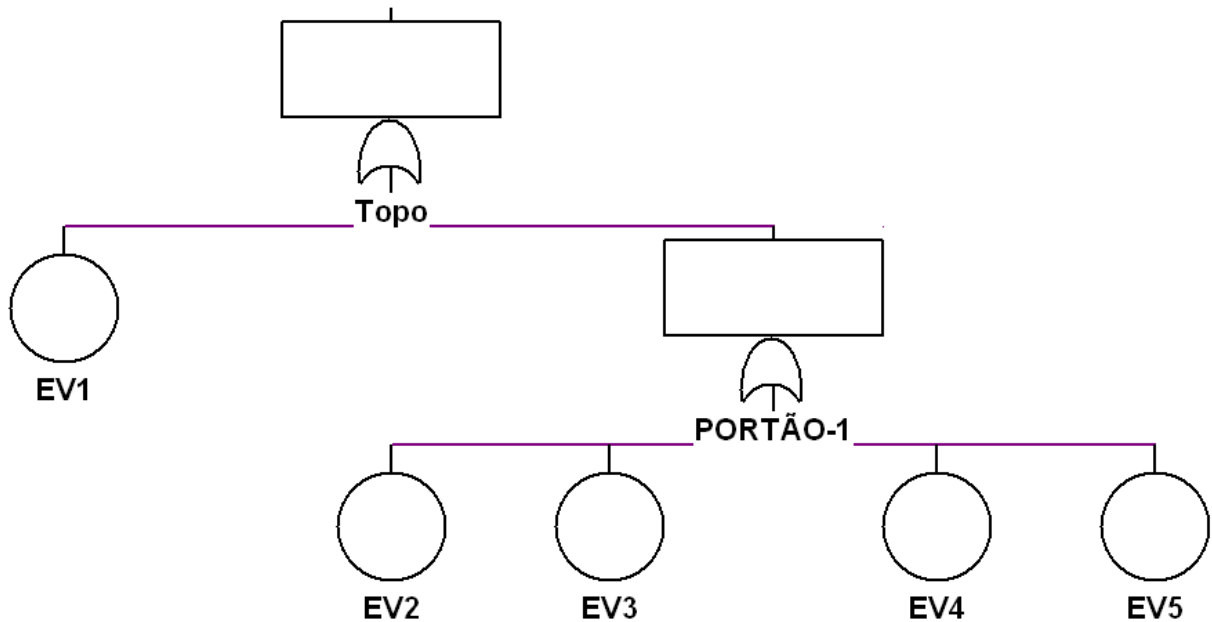
A Árvore de Falhas do AFWS pode ser simplificada agrupando-se alguns eventos com falhas de mesmo tipo, utilizando as regras da Álgebra Booleana para obter as probabilidades de falha dos novos eventos, conforme a tabela abaixo.

Tabela 5 - Probabilidades de Falhas dos eventos da Árvore Simplificada

EVENTOS AGRUPADOS	NOVO EVENTO	DESCRIÇÃO	PROBABILIDADE DE FALHA
EV1	EV1	Eventos associados à falta de fluxo das bombas elétricas A e B	$\varepsilon$
EV2			
EV3			
EV4			
EV5			
EV6			
EV7			
EV8			
EV9			
EV10			
EV11			
EV12			
EV13	EV2	Falta de Água no tanque de combate a incêndio	$1,08 \times 10^{-3}$
EV14			
EV15			
EV16			
EV17			
EV18	EV3	Falha na linha de vapor principal ou quebra de tubulação no MSVH	$7,5 \times 10^{-5}$
EV19	EV4	Falha na solda da tubulação principal	$4,0 \times 10^{-7}$
EV20			
EV21			
EV22			
EV23	EV5	Ruptura da tubulação principal de 6"	$7,2 \times 10^{-8}$
EV24			



A Árvore de Falhas simplificada apresenta o mesmo resultado da Árvore anterior, como podemos observar na Fig. 19. Nesta nova Árvore, cada evento básico é um Conjunto de Cortes Mínimos.



**Figura 19 - Árvore de Falhas do AFWS Simplificada (depois de 8 horas de funcionamento)**

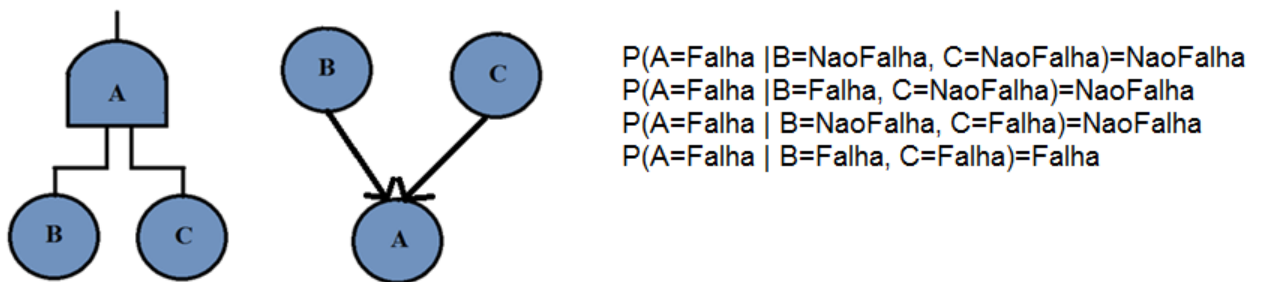
Uncertainty Results			
Name	TOPO		
Random Seed	28097	Events	4
Sample Size	1000	Cut Sets	4
Point estimate	1.155E-003		
Mean Value	1.155E-003		
5th Percentile Value	1.155E-003		
Median Value	1.155E-003		
95th Percentile Value	1.155E-003		
Minimum Sample Value	1.155E-003		
Maximum Sample Value	1.155E-003		
Standard Deviation	7.452E-012		
Skewness	-5.455E+010		
Kurtosis	2.776E+019		
Elapsed Time	00:00:00.050		
OK			

**Figura 20 - Probabilidade de Falhas do AFWS depois de 8 horas de operação utilizando a Árvore Simplificada**

## 5.2. RESULTADO DA REDE BAYESIANA

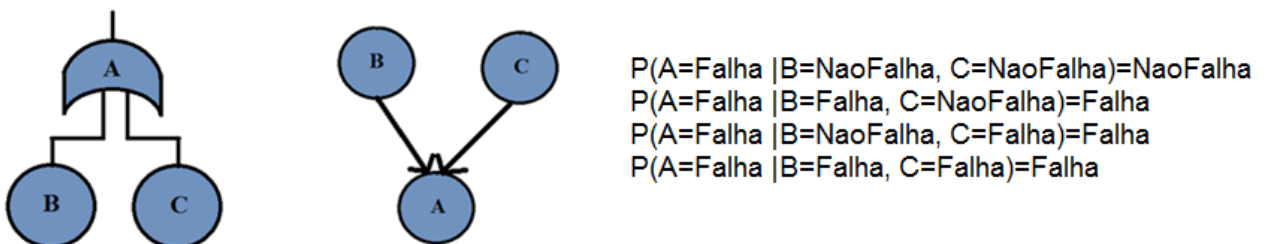
### 5.2.1. Conversão da Árvore de Falhas para Rede Bayesiana

Para converter uma FT em uma Rede Bayesiana precisamos criar um nó para cada elemento da FT, como eventos e portões lógicos. Na Rede Bayesiana cada elemento deve ser representado uma única vez. Após criar os nós, precisamos conectá-los de acordo com os portões da Árvore de Falhas. Depois dos nós criados e conectados por arcos, precisamos criar uma tabela de probabilidades condicionais para cada portão. Esta tabela depende do portão lógico da FT, se é um portão AND ou OR. O exemplo da Fig. 7 pode ser convertido da seguinte forma:



**Figura 21 - Conversão de um Portão AND**

Os portões representam relações determinísticas entre os nós, então suas entradas são Falha ou Não Falha. No caso de um portão AND (Fig. 20), como o evento A só ocorre se B e C ocorrerem simultaneamente, A só falha se B e C falharem.



**Figura 22 - Conversão de um Portão OR**

No caso de um portão OR (Fig. 9), para que o Evento A ocorra, é preciso que um dos eventos, B ou C, ocorra ou que ambos ocorram, ou seja, A falha se B falhar, se C falhar ou se A e B falharem simultaneamente, como mostra a Fig. 21.

Podemos observar que a aparência da Rede Bayesiana é a mesma tanto para o portão AND quanto para o portão OR. O que vai interferir no resultado é a tabela de probabilidades de cada portão.

Para completar a Rede Bayesiana, os nós pais devem ser completados com as probabilidades *a priori*, as mesmas dos eventos básicos da Árvore de Falhas.

### 5.2.2. Construção da Rede Bayesiana

Para nosso estudo, será construída a RB baseada na FT simplificada do AFWS depois de 8 horas de funcionamento. Devido a quantidade de eventos básicos que cada portão da Árvore de Falhas possuía antes da simplificação, a construção da Rede Bayesiana seria muito trabalhosa, já que cada evento tem duas possibilidades: falhar ou não falhar, e como eram doze eventos para cada portão, a tabela de probabilidades de cada portão teria  $2^{12}$  combinações possíveis, ou seja, 4.096 possibilidades de combinações dos eventos falharem ou não.

A seguir, na Fig. 22, está a Rede Bayesiana Simplificada do Sistema Auxiliar de Água de Alimentação, após 8 horas de funcionamento, construída no código computacional Netica. As probabilidades estão representadas na forma de porcentagem, assim, a probabilidade do sistema falhar é de 0,12%, ou seja, a probabilidade é de 0,0012 que em notação científica pode ser representada por  $1,2 \times 10^{-3}$ , resultado muito parecido com o encontrado pela Árvore de Falhas,  $1,155 \times 10^{-3}$ . A ínfima diferença se deve pelo arredondamento que o Netica faz em valores muito pequenos.

Em seguida, a Fig. 23 mostra a tabela de probabilidades do Portão1, que é um portão OR, e a Fig. 24 mostra a tabela de probabilidades do Topo, que também é um portão OR na Árvore de Falhas.

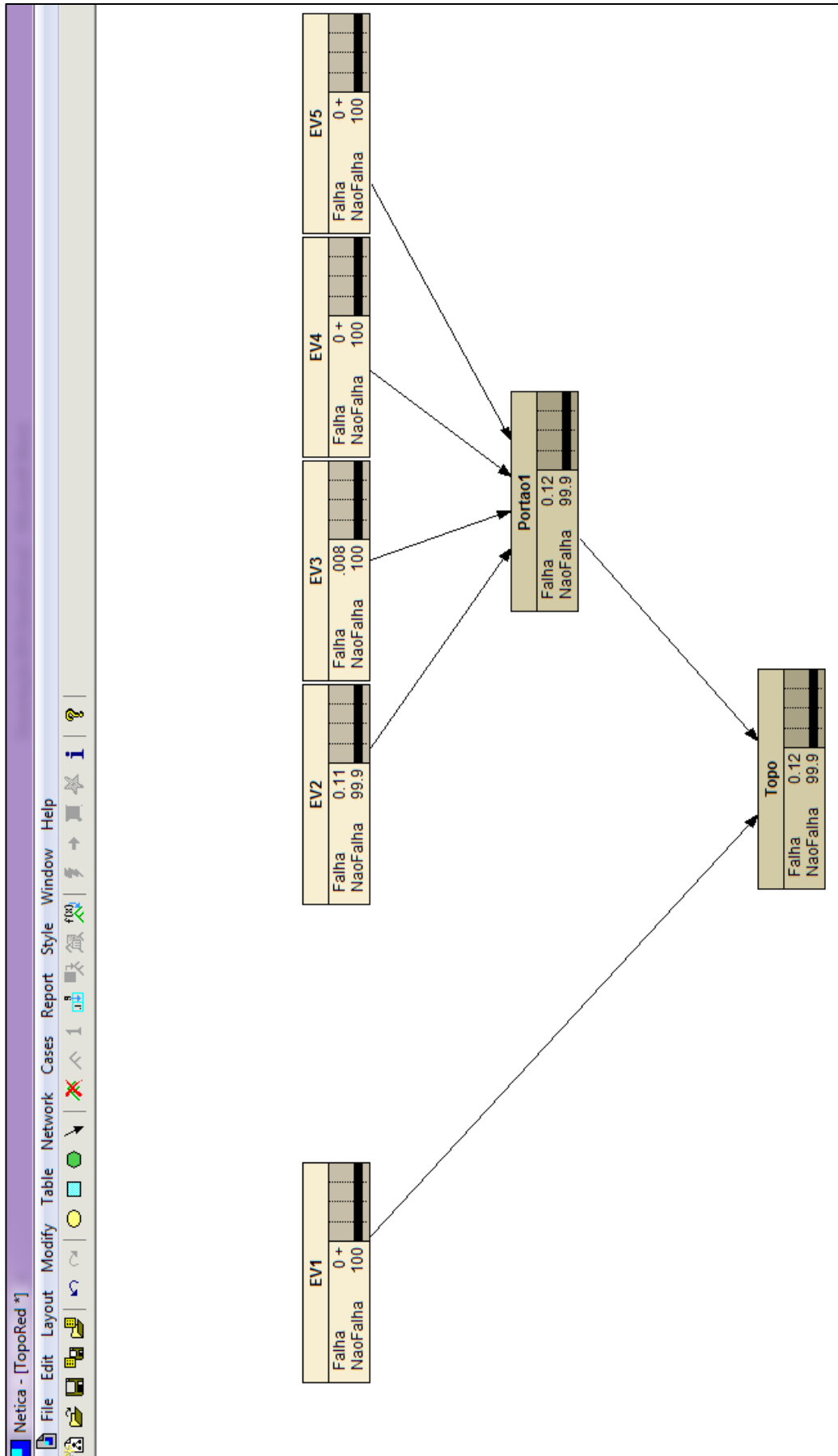


Figura 23 - Rede Bayesiana do AFWS (depois de 8 horas de funcionamento)

Netica - [Portao1 Table (in Bayes net TopoRed)]

File Edit Table Window Help

Node: Portao1 Apply OK

Deterministic Function Reset Close

EV2	EV3	EV4	EV5	Portao1
Falha	Falha	Falha	Falha	Falha
Falha	Falha	Falha	NaoFalha	Falha
Falha	Falha	NaoFalha	Falha	Falha
Falha	Falha	NaoFalha	NaoFalha	Falha
Falha	NaoFalha	Falha	Falha	Falha
Falha	NaoFalha	Falha	NaoFalha	Falha
Falha	NaoFalha	NaoFalha	Falha	Falha
Falha	NaoFalha	NaoFalha	NaoFalha	Falha
NaoFalha	Falha	Falha	Falha	Falha
NaoFalha	Falha	Falha	NaoFalha	Falha
NaoFalha	Falha	NaoFalha	Falha	Falha
NaoFalha	Falha	NaoFalha	NaoFalha	Falha
NaoFalha	NaoFalha	Falha	Falha	Falha
NaoFalha	NaoFalha	Falha	NaoFalha	Falha
NaoFalha	NaoFalha	NaoFalha	Falha	Falha
NaoFalha	NaoFalha	NaoFalha	NaoFalha	NaoFalha

**Figura 24 - Tabela de Possibilidades de Estudo do Portão 1**

Netica - [Topo Table (in Bayes net TopoRed)]

File Edit Table Window Help

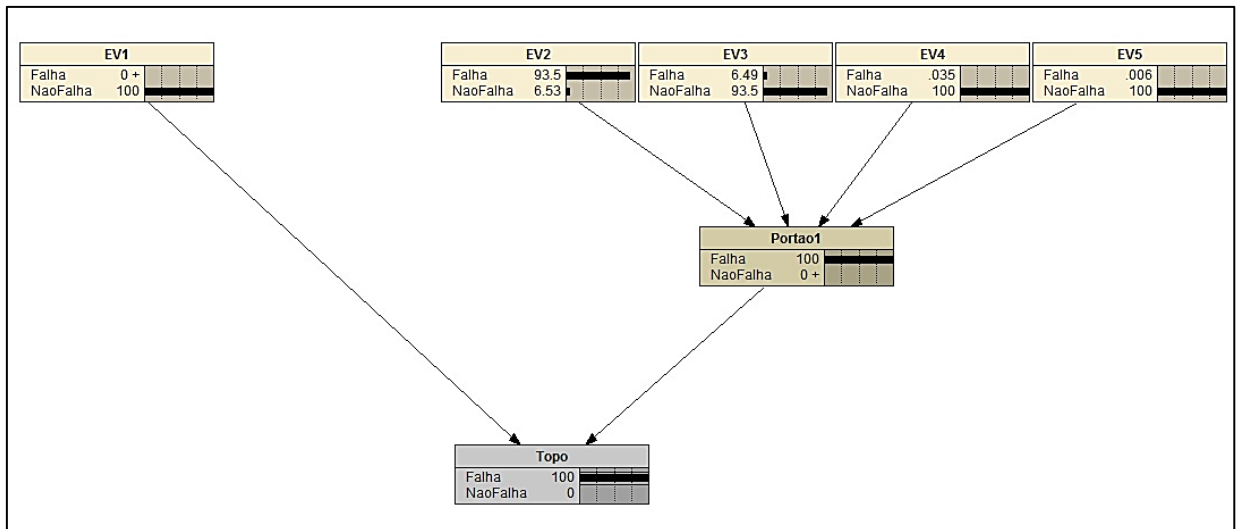
Node: Topo Apply OK

Deterministic Function Reset Close

Portao1	EV1	Topo
Falha	Falha	Falha
Falha	NaoFalha	Falha
NaoFalha	Falha	Falha
NaoFalha	NaoFalha	NaoFalha

**Figura 25 - Tabela de Possibilidades de Estudo do Topo**

Na Rede Bayesiana, ao clicar em “Falha” no nó filho “Topo” é possível ver quais devem ser as probabilidades de falha (em porcentagem) de cada nó pai (evento básico) para que o Topo tenha 100% de probabilidade de falhar, Fig. 25.



**Figura 26-Probabilidade de Falha dos nós pais para que o nó filho tenha 100% de probabilidade de falha**

Também é possível observar o que ocorre com a probabilidade de falha do Topo se considerarmos que certo nó pai (evento básico) tem probabilidade de falha ou não falha de 100%. Para verificar isso, basta clicar em “Falha” ou em “Não Falha” em cada nó pai. A Rede Bayesiana se atualizará automaticamente. Como na Árvore de Falhas Simplificada utilizada para elaborar a Rede Bayesiana cada evento básico é um Conjunto de Cortes Mínimos, ao considerarmos que um dos nós pai tem 100% de probabilidade de falhar, acarreta em 100% de falha do Topo.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho possibilitou o estudo de duas metodologias muito utilizadas nos dias atuais devido às suas facilidades de compreensão e precisão de resultados e, por fim, aplica-las ao Sistema Auxiliar de Água de Alimentação.

Foi confirmado que é possível obtermos uma Rede Bayesiana equivalente à Árvore de Falhas, desde que sejam construídas as devidas tabelas de probabilidades para cada portão lógico correspondente.

Verificou-se que tanto a Árvore de Falhas quanto a Rede Bayesiana apresentaram resultados muito próximos, divergindo apenas na quarta casa decimal da probabilidade de falha do sistema em questão, a FT apresentou como resultado que a probabilidade de falha do sistema é de  $1,155 \times 10^{-3}$ , já a RB apresentou como resultado  $1,2 \times 10^{-3}$ .

É possível observar que a Árvore de Falhas é a metodologia mais simples de trabalhar quando se dispõe das probabilidades de falha de cada evento básico, já que os portões lógicos distintos já são bem definidos. A Rede Bayesiana, por não ter portões lógicos, mas simplesmente nós que representam tanto eventos básicos como portões, eventos intermediários e topo, é mais trabalhosa neste caso, pois precisamos definir a tabela de probabilidades para cada portão lógico correspondente da Árvore de Falhas, o que pode demandar em um imenso trabalho, dependendo da quantidade de eventos de cada portão. No caso da Árvore de Falhas do AFWS após oito horas de operação, antes de ser simplificada, possuía doze eventos em cada um dos dois portões lógicos, o que demandaria numa tabela de probabilidades de 4.096 linhas cada, simplesmente para “ensinar” o código computacional a combinar as probabilidades de falha dos eventos básicos.

Por outro lado, a Rede Bayesiana possibilita estimar a probabilidade de falha dos nós pais se considerar que o Topo (nó filho) tem 100% de probabilidade de falha.

Trabalhos futuros podem utilizar redes bayesianas para estimar a probabilidade de algum evento que não possui dados através de uma pesquisa com valores sugeridos por especialistas da área.

## 7. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Ricardo I. M. de. **Redes Bayesianas e sua Aplicação em um Modelo de Interface Adaptativa para uma Loja Virtual**. Trabalho de conclusão do curso de Sistemas de Informação apresentado ao Centro Universitário Luterano de Palmas – ULBRA. Palmas, 2006.

AMERICAN NUCLEAR SOCIETY. **American National Standard Auxiliary Feedwater System for Pressurized Water Reactors**. La Grange Park, 1991.

BORGES, Diogo da S. **Estudo de Envelhecimento em Sistemas de Borrifo da Contenção de Reatores Nucleares Através da Técnica de Árvore de Falhas**. Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de pós-graduação em Ciência e Tecnologias Nucleares do Instituto de Engenharia Nuclear – IEN. Rio de Janeiro, 2014.

HIRATA, Daniel M. **Estimativa da Frequência de Danos ao Núcleo Devido a Perda de Refrigerante Primário e Bloqueio de Canal de Refrigeração do Reator de Pesquisas IEA-R1 do IPEN-CNEN/SP – APS Nível 1**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN. São Paulo, 2009.

LOCHBAUM, Dave. **Millstone Unit 3 Reactor's AFW Near-Miss**. All Things Nuclear. United States of America, 2015. Disponível em: <<http://allthingsnuclear.org/dlochbaum/millstone-unit-3-reactors-afw-near-miss-to-be-continued>>. Acesso em fev. 2016.

LUNA, José E. O. **Algoritmos EM para Aprendizagem de Redes Bayesianas a Partir de Dados Incompletos**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Departamento de Computação e Estatística da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS. Campo Grande, 2004.

MISRA, K. B. **Reliability Analysis and Prediction: A Methodology Oriented Treatment**. vol. 11, no. 3–4, Elsevier Science B.V, p. 897, 1992.

MISRA, K. B.; WEBER, G. G. **A New Method for Fuzzy Fault Tree Analysis**. Microelectron. Reliab., vol. 29, no. 2, pp. 195–216, 1989.

PENA, Sérgio Danilo. Thomas Bayes: o 'cara'! **Ciência Hoje**, v. 38, n.228, jul. 2006. *Filosofia da Ciência*, p. 22-29.

RUSSEL, Stuart J.; NORVIG, Peter. **Artificial Intelligence: A Modern Approach**. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1995.

SILVA, Clarysson A. M. da. **Tecnologia dos Reatores Nucleares de Potência e de Pesquisa**. In: I SENCIR – Semana de Energia Nuclear e Ciências das Radiações.



Belo Horizonte, maio, 2012. Disponível em: <http://www.cctn.nuclear.ufmg.br/>. Acesso em out. 2015.

U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **Nureg-0492: Fault Tree Handbook**. Washington, D.C., 1981.

U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **Nureg-6952: System Analysis Programs for Hands-on Integrated Reliability Evaluations (SAPHIRE) Vol. 1 Summary Manual**. Idaho Falls, 2008.

U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **Nureg-75/014: Wash-1400 Reactor Safety study: An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants. Appendix II**. Estados Unidos, 1975.