

**TOMADA DE DECISÃO NA MANUTENÇÃO DE GERADORES DIESEL DE
EMERGÊNCIA DE CENTRAIS NUCLEARES POR REDES BAYESIANAS**

Dillyane Petizero Dionizio

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.

Orientador: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e
Melo

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2014

TOMADA DE DECISÃO NA MANUTENÇÃO DE GERADORES DIESEL DE
EMERGÊNCIA DE CENTRAIS NUCLEARES POR REDES BAYESIANAS

Dillyane Petizero Dionizio

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.

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

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

Dr. Antônio Cesar Ferreira Guimarães, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2014

Dionizio, Dillyane Petizero

Tomada de Decisão na Manutenção de Geradores Diesel de Emergência de Centrais Nucleares por Redes Bayesianas/ Dillyane Petizero Dionizio. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

XII, 52 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo
Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 45-48.

1. Redes Bayesianas. 2. Regra da Manutenção. 3. Análise de Segurança. 4. Extensão da Vida Qualificada. I. Melo, Paulo Fernando Ferreira Frutuoso. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

“A experiência não permite nunca atingir a certeza absoluta. Não devemos procurar obter mais que uma probabilidade.”

Bertrand Russell

AGRADECIMENTOS

A Deus (Àquele que é capaz de fazer infinitamente mais do que tudo o que pedimos ou pensamos. Efésios 3:20), que me deu vida e inteligência, e que me dá força para continuar a caminhada em busca dos meus objetivos.

Ao meu orientador Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo e ao Dr. Pedro Luiz da Cruz Saldanha por toda a orientação e ensinamentos.

Aos meus pais, Antonio e Juscelene, que me ensinaram a não temer desafios e a superar os obstáculos com humildade.

Ao meu esposo Denis por todo o amor, paciência e incentivo.

À minha irmã Thaís por toda ajuda e companhia ao longo da construção deste trabalho.

Ao meu cunhado Luciano pelo auxílio computacional.

Às minhas queridas avós Idaléia e Anna, por estarem sempre presentes em minha vida.

À minha amiga Lilian, que caminhou comigo nesta jornada, me apoiando e incentivando em todos os momentos.

Aos queridos Pedro, Jô, Reginaldo e Lili por todo carinho e disposição em ajudar.

E aos demais, que de alguma forma contribuíram para a elaboração desta dissertação.

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

TOMADA DE DECISÃO NA MANUTENÇÃO DE GERADORES DIESEL DE EMERGÊNCIA DE CENTRAIS NUCLEARES POR REDES BAYESIANAS

Dillyane Petizero Dionizio

Fevereiro / 2014

Orientador: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Programa: Engenharia Nuclear

Este trabalho tem por objetivo modelar um sistema, dentro do escopo do Programa de Monitoração da Eficácia da Manutenção, utilizando redes bayesianas, a fim estimar sua confiabilidade pela análise das probabilidades de falha envolvidas, identificar quais são as variáveis mais influentes e averiguar, com base na rede modelada, a possibilidade de extensão de vida qualificada do sistema. Para as centrais nucleares, em operação comercial, a extensão da vida qualificada tem se tornado uma alternativa cada vez mais necessária e de âmbito internacional. O uso das redes bayesianas possibilita representar as incertezas e as dependências condicionais do modelo. Os cálculos para a rede bayesiana modelada foram realizados através do programa NeticaTM. Os resultados obtidos foram satisfatórios e demonstraram que a modelagem, por meio de redes bayesianas, é adequada para tratar problemas que têm como objetivo a extensão da vida qualificada.

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

DECISION MAKING IN THE MAINTENANCE OF EMERGENCY DIESEL
GENERATORS OF NUCLEAR POWER PLANT BY BAYESIAN NETWORKS

Dillyane Petizero Dionizio

February / 2014

Advisor: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Department: Nuclear Engineering

This paper aims to model a system within the scope of the monitoring program of maintenance effectiveness using Bayesian networks, in order to estimate its reliability by analyzing the probability of failure involved, identify which are the most influential variables to ascertain and based on the modeled network, the possibility of extending the qualified life of the system. For nuclear power plants in commercial operation, the extension of the qualified life has become an increasingly necessary alternative, with internationally scope. The use of Bayesian networks allows to representing the uncertainties and dependencies of the conditional model. The calculations for the modeled Bayesian networks were carried through the Netica™ program. The obtained results were satisfactory and demonstrated that modeling, by means of Bayesian networks is adequate for treating problems related to the extension of qualified life.

SUMÁRIO

	Pág.
1 Introdução.....	1
2 Revisão bibliográfica.....	3
3 Fundamentos teóricos	6
3.1 Conceitos básicos da Teoria dos Grafos.....	6
3.2 Teorema de Bayes.....	7
3.3 Redes bayesianas.....	10
3.4 Netica TM	11
3.4.1 Exemplo de rede bayesiana com a utilização do Netica TM	12
4 A Regra da Manutenção.....	14
4.1 A importância da regra da manutenção.....	14
4.2 A regra da manutenção.....	15
4.3 Programa de Monitoração da Eficácia da Manutenção (PMEM).....	19
4.3.1 Norma CNEN NE-1.21.....	19
4.3.2 Norma CNEN NE-1.26.....	20
4.4 A extensão da vida útil, o PMEM e as redes bayesianas.....	21
5 Estudo de caso de um Sistema sob Regra da Manutenção.....	22
5.1 Sistemas de Alimentação Elétrica de Emergência.....	22
5.2 Avaliação das falhas e suas tendências.....	24
5.2.1 Estimativa da confiabilidade dos GDEs por ciclo.....	25
5.2.2 Estimativa da confiabilidade dos GDEs por subsistemas.....	32
5.3 Redes bayesianas aplicadas ao Estudo de Caso.....	34
5.4 Resultados.....	40
6 Conclusão e Recomendações.....	42
6.1 Conclusão.....	42
6.2 Recomendações.....	43
Referências Bibliográficas.....	45
Apêndice A –Probabilidades das RBs por variável.....	49

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 2.1 RB do processo de degradação do sistema.....	3
Fig. 3.1 Grafo não direcionado.....	6
Fig. 3.2 Grafo direcionado.....	6
Fig. 3.3 Grafo Acíclico Direcionado.....	7
Fig. 3.4 Rede bayesiana.....	11
Fig. 3.5 Exemplo de RB utilizando o Netica™.....	13
Fig. 3.6 Exemplo de RB utilizando o Netica™.....	13
Fig. 4.1 Diagrama simplificado da Regra da Manutenção.....	16
Fig. 5.1 Representação gráfica da confiabilidade do GDE-A.....	28
Fig. 5.2 Representação gráfica da confiabilidade do GDE-B.....	29
Fig. 5.3 Representação gráfica da confiabilidade do GDE-C.....	30
Fig. 5.4 Representação gráfica da confiabilidade do GDE-D.....	31
Fig. 5.5 Gerador Diesel de Emergência.....	34
Fig. 5.6 Rede Bayesiana do GDE-A.....	36
Fig. 5.7 Rede Bayesiana do GDE-B.....	37
Fig. 5.8 Rede Bayesiana do GDE-C.....	38
Fig. 5.9 Rede Bayesiana do GDE-D.....	39

ÍNDICE DE TABELAS

		Pág.
Tabela 5.1	Estimativa de confiabilidade do GDE-A.....	28
Tabela 5.2	Estimativa de confiabilidade do GDE-B.....	29
Tabela 5.3	Estimativa de confiabilidade do GDE-C.....	30
Tabela 5.4	Estimativa de confiabilidade do GDE-D.....	31
Tabela 5.5	Estimativa de confiabilidade dos GDEs por subsistemas.....	33

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

ABP	Acidente de Base de Projeto
ADT	<i>Accelerated Degradation Testing</i>
ALARA	<i>As Low As Reasonably Achievable</i>
AOI	Autorização de Operação Inicial
CNAAA2	Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto 2
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
DTS	Dispositivos Técnicos de Segurança
EdF	<i>Électricité de France</i>
EOP	<i>Emergency Operational Procedures</i>
ESC	Estruturas, Sistemas e Componentes
FP	Falha em perigo
FS	Falha Segura
GAD	Grafo Acíclico Direcionado
GDE	Gerador Diesel de Emergência
KWU	<i>Kraftwerk Union AG</i>
MPFF	<i>Maintenance Preventable Functional Failure</i>
NRC	<i>Nuclear Regulatory Commission</i>
NUMARC	<i>Nuclear Management and Resource Council</i>
PMEM	Programa de Monitoração da Eficácia da Manutenção
POE	Procedimentos Operacionais de Emergência
RB	Rede Bayesiana
RG	<i>Regulatory Guide</i>
RM	Regra da Manutenção

RPS	Reavaliação Periódica de Segurança
SAEE	Sistema de Alimentação Elétrica de Emergência
XJG	Sistema de Água de Refrigeração
XJN	Sistema de Óleo Combustível
XJP	Sistema de Ar de Partida
XJQ	Sistema de Ar de Combustão
XJR	Sistema de Gás de Exaustão
XJV	Sistema de Óleo Lubrificante
XJY	Sistema de Controle, Proteção e Velocidade
XKY	Sistema de Excitação e Regulagem de Tensão

Capítulo 1

Introdução

1.1 Apresentação do tema

A modelagem por meio de redes bayesianas tem se tornado cada vez mais comum ao se tratar problemas em que a utilização conjunta de informações, provenientes do acompanhamento, avaliação ou monitoramento de determinado sistema, são fundamentais. Permite a criação de diagramas para organização dos dados através de um mapeamento entre causas e efeitos, possibilitando a geração automática de predições ou decisões, ainda que com conhecimento incompleto.

As redes bayesianas são uma maneira sucinta para representar conjunções de probabilidades apresentando, de modo direto e estruturado, as dependências entre as variáveis de um domínio (Martins, 2013).

A proposta deste trabalho é modelar, através de uma rede bayesiana, um sistema, dentro do escopo do Programa de Monitoração da Eficácia da Manutenção (PMEM) (VAJGEL,2009), permitindo a tomada de decisões baseadas nas probabilidades da rede, com o objetivo de analisar as relações entre as variáveis envolvidas e identificar que tarefas podem ser adicionadas a fim de viabilizar a extensão da vida útil qualificada.

O objetivo do PMEM é identificar quais estruturas, sistemas e componentes são mais relevantes com relação à segurança de uma usina nuclear do tipo PWR, como as usinas nucleares em funcionamento no Brasil e, monitorá-los, com o intuito de mantê-los dentro dos critérios de segurança previamente estabelecidos.

O uso de uma rede bayesiana, neste contexto, se deu a fim de avaliar sua capacidade de apresentar a modelagem de falha de um sistema de segurança, considerando os eventos dependentes provenientes deste sistema.

Para a construção da rede bayesiana proposta neste trabalho foi selecionado o

Sistema de Alimentação Elétrica de Emergência 2 de uma usina típica KWU/Siemens (KWU, 1984), pelo fato de ser um sistema de segurança da usina, pertencer ao escopo do PMEM e apresentar dados disponíveis para a estimativa da confiabilidade, considerando as publicações relativas à experiência operacional internacional. A rede foi calculada utilizando o software NeticaTM, pela sua facilidade de utilização e disponibilidade.

1.2 Organização do trabalho

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos, sendo o Capítulo 2, uma revisão bibliográfica de trabalhos que demonstram aplicações de redes bayesianas em diversas áreas.

O Capítulo 3, por sua vez, traz os fundamentos teóricos, embasando o presente trabalho, com a disposição de conceitos envolvendo grafos, a teoria da probabilidade, o teorema de Bayes e as redes bayesianas que facilitarão o entendimento, contextualizando a proposta.

No Capítulo 4 é realizada uma abordagem da Regra da Manutenção e sua importância dentro de uma central nuclear, com o intuito de caracterizar, com mais clareza, a relevância da implantação do Programa de Monitoração da Eficácia da Manutenção, como no caso brasileiro.

O Capítulo 5 descreve os principais elementos do Sistema de Alimentação Elétrica de Emergência 2, faz o Estudo do Caso e apresenta os resultados obtidos.

No Capítulo 6, exibimos as Conclusões e as Recomendações para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Celeux et al. (2006) construíram uma rede bayesiana (RB) para representar a degradação no sistema mecânico de uma usina nuclear. O modelo foi aplicado especificamente a um subcomponente da bomba de refrigeração do reator, observado em plantas nucleares francesas – EdF. As informações utilizadas foram obtidas a partir das opiniões de especialistas. Após a análise da primeira RB (Figura 2.1), os peritos adicionaram nove dependências condicionais para obter uma maior precisão. A inferência da nova RB mostrou que três variáveis pareciam ser mais influentes sobre a degradação do sistema (Ab, Ad e PI3). A conclusão foi a definição de tarefas adicionais de manutenção nessas três variáveis a fim de melhorar a confiabilidade do sistema.

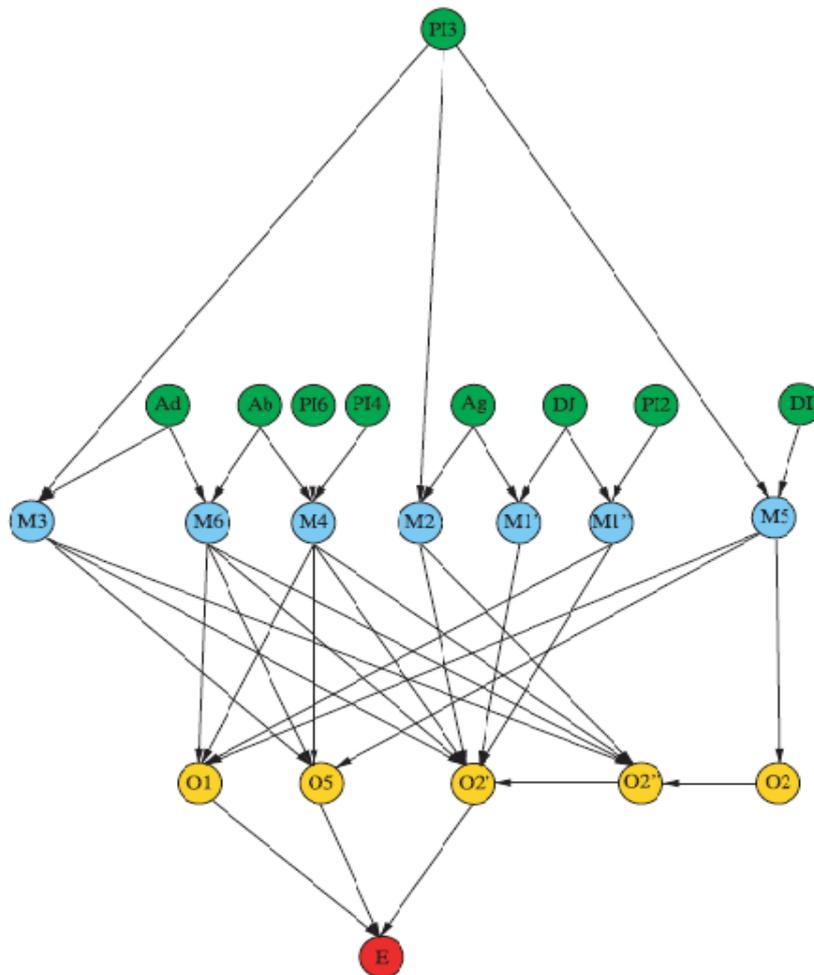


Figura 2.1 – RB do processo de degradação do sistema, Celeux et al. (2006)

Lee e Lee (2006) utilizaram redes bayesianas para avaliar probabilisticamente os riscos na eliminação de rejeitos nucleares. Com o objetivo de considerar os efeitos previstos numa evolução das condições ambientais nas instalações de eliminação de rejeitos nucleares, os autores propõem uma avaliação quantitativa que integra o processo de inferência bayesiana com a análise de risco tradicional.

Um sistema de monitoramento de segurança de uma planta detecta os sintomas no início de sua fase com a finalidade de mitigar seus efeitos. Mediante as perturbações externas ou a falha de componentes que não são controladas, a função do sistema de monitoramento de segurança é identificar os sintomas e emitir um alarme sob condições anormais da planta. Há dois tipos de falhas do sistema de monitoramento de segurança: a Falha em perigo (FP) e a Falha Segura (FS). A primeira corresponde à ausência do alarme em condições anormais, enquanto a segunda implica na ativação do alarme sob condições normais de operação. A FP pode conduzir a um acidente grave, ao passo que a FS provoca manutenção e custos desnecessários. Kohda e Cui (2007) modelaram, por redes bayesianas, o sistema de monitoração de segurança de uma instalação industrial, visando auxiliar nas tomadas de decisão necessárias à segurança.

De acordo com Langseth et al. (2009), as redes bayesianas têm sido aplicadas a vários sistemas na detecção e identificação de falhas, monitoração da confiabilidade, resolução de problemas e otimização da manutenção. A análise da confiabilidade frequentemente obterá tomadas de decisão baseadas em informações incertas. Para construir o modelo podem ser consideradas diferentes fontes de informação, como dados históricos e opiniões de especialistas. No trabalho foi feito um levantamento de pesquisas realizadas, na última década, na inferência de redes bayesianas em domínios híbridos (domínios que contêm tanto variáveis discretas quanto contínuas) e apresentado um modelo para análise da confiabilidade humana com variáveis discretas e contínuas, destacando as principais dificuldades encontradas.

Jones et al. (2010) elaboraram um estudo de caso pautado numa fábrica de produção de negro de fumo no Reino Unido a fim de analisar a falha de uma bolsa filtro, cuja função é impedir a liberação de negro de fumo em estado leve para a atmosfera e cujo tempo e custo para substituição são elevados. A partir de discussões com a equipe de gestão da fábrica foram estabelecidos os nós de influência que possibilitaram a modelagem de uma rede bayesiana relativa à falha de uma bolsa filtro.

As probabilidades foram estimadas a partir de dados históricos e por opiniões de especialistas. Os autores destacam a manutenção preventiva para a redução de ocorrência ou gravidade de falhas num sistema.

Houben (2011) considera o uso de redes bayesianas uma técnica que auxilia o processo de tomadas de decisão para a gestão de confiabilidade e cita, como exemplo, na indústria aeroespacial, o fabricante de motores de aviões Rolls-Royce, empresa onde a disponibilidade desempenha papel de suma importância, pois é o atributo que caracteriza o índice de qualidade do fabricante e está diretamente ligado à lucratividade da empresa.

Weber et al. (2012) apresentam uma visão global das aplicações de redes bayesianas em confiabilidade, análise de riscos e áreas de manutenção com uma revisão bibliográfica sobre o tema. Tendo como referência o período compreendido entre 1990 e 2008, citam os trabalhos mais relevantes e comparam a modelagem com redes bayesianas com a modelagem feita por métodos tradicionais, tais como árvores de falhas, cadeias de Markov e redes de Petri.

Wang et al. (2013) propõem um método para a avaliação da confiabilidade utilizando ensaios de degradação acelerada (ADT) a fim de estimar a confiabilidade em produtos com longos tempos de vida útil. A inferência bayesiana foi utilizada para integrar os dados (ADT) do laboratório e os dados de falha do campo com o objetivo de prever a confiabilidade de campo real de um produto de maneira mais precisa.

Nesta revisão bibliográfica foi abordada a utilização de redes bayesianas aplicadas à manutenção, sistemas de segurança, confiabilidade humana, tomadas de decisão em gestão de qualidade e modelagem da degradação permitindo a avaliação da extensão da vida útil. Este trabalho busca desenvolver os aspectos relacionados às aplicações na manutenção de um sistema de segurança buscando a tomada de decisão para viabilizar a extensão da vida útil qualificada sobre o enfoque da regra da manutenção.

Capítulo 3

Fundamentos teóricos

A rede bayesiana é um modelo gráfico de suma importância utilizado para representar dependências entre variáveis aleatórias. Estas variáveis aleatórias são representadas pelos vértices de um grafo, e a dependência entre duas variáveis aleatórias é representada por uma aresta entre os vértices correspondentes (Celeux et al, 2006). Com o intuito de propiciar um melhor entendimento acerca das redes bayesianas, são apresentados alguns conceitos a seguir.

3.1 Conceitos básicos da Teoria dos Grafos

Um grafo é composto de vértices (nós) e arestas (linhas) entre os vértices. As arestas podem ser ou não direcionadas. Um grafo com todas as arestas direcionadas (setas em uma única direção) é chamado grafo direcionado, e um grafo com todas as arestas não direcionadas é chamado grafo não direcionado (Barber, 2010). As Figuras 3.1 e 3.2 são exemplos.

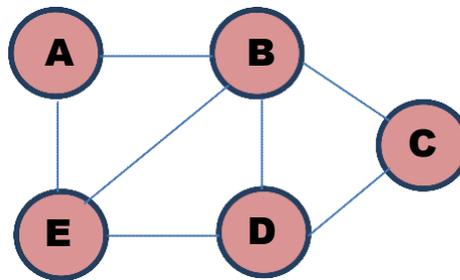


Fig. 3.1 – Grafo não direcionado

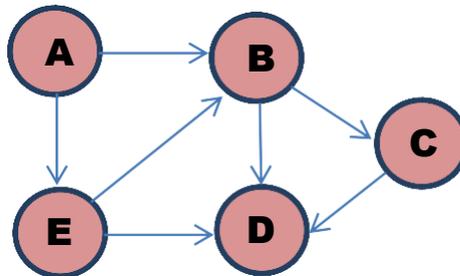


Fig. 3.2 – Grafo direcionado

Um caminho é uma sequência de nós tal que de cada um dos nós existe uma aresta para o próximo nó da sequência. Um ciclo é um caminho onde o primeiro nó é igual ao último. Se o grafo não possui ciclos, ele é chamado acíclico. Note-se que o caminho (A, B, C, D, E, B, A) na Fig. 3.1 determina um ciclo não direcionado.

Um Grafo Acíclico Direcionado (GAD) é um grafo que não possui ciclo, com arestas direcionadas (setas de ligação) entre os vértices. Em um GAD os pais de um dado nó B são aqueles nós que têm um caminho dirigido terminando em B. Por outro lado, os filhos de A são os nós que têm um caminho dirigido a partir de A (Barber, 2010). O nó que não possui pai é chamado de nó raiz.

A Fig. 3.3 exemplifica os conceitos apresentados. Os nós A e C são pais do nó B, os nós B e E são filhos do nó C. Os nós A, C e D também são chamados de nó raiz.

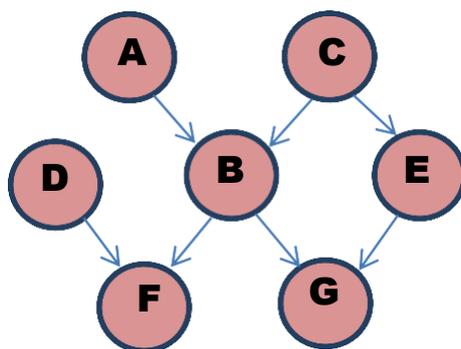


Fig. 3.3 – Grafo Acíclico Direcionado

3.2 Teorema de Bayes

Ao se considerar um cenário, geralmente não há conhecimento de todas as informações referentes a ele. Neste caso, o uso da Teoria da Probabilidade pode se tornar interessante, pois possibilita a construção de uma análise do ambiente com o objetivo de se fazer previsões sobre a ocorrência de determinadas situações.

A teoria das probabilidades é o ramo da matemática que cria, desenvolve e analisa modelos que podem ser utilizados para estudar a ocorrência de eventos aleatórios (Morgado et al., 2006). Alguns conceitos importantes são definidos a seguir.

Uma vez que um experimento é definido, a coleção de todos os resultados possíveis é chamada de espaço amostral. No caso de um espaço amostral finito, cada subconjunto do espaço é chamado de evento. Um subconjunto contendo exatamente um elemento é chamado evento elementar (Neapolitan, 2004).

Neapolitan (2004) apresenta as seguintes definições sobre probabilidade. Definição 1: Suponha um espaço amostral Ω contendo n elementos distintos. Isto é,

$$\Omega = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$$

Uma função que atribui um número real $P(E)$ a cada evento $E \subseteq \Omega$ é denominada função de probabilidade sobre o conjunto de subconjuntos de Ω se satisfaz as seguintes condições:

1. $0 \leq P(\{e_i\}) \leq 1$ para $1 \leq i \leq n$.
2. $P(\{e_1\}) + P(\{e_2\}) + \dots + P(\{e_n\}) = 1$.
3. Para cada evento $E = \{e_{i_1}, e_{i_2}, \dots, e_{i_k}\}$ não elementar,

$$P(E) = P(\{e_{i_1}\}) + P(\{e_{i_2}\}) + \dots + P(\{e_{i_k}\}) \quad (3.1)$$

O par (Ω, P) é chamado de espaço de probabilidade.

Definição 2: Sejam E e F eventos tais que $P(F) \neq 0$. Então a probabilidade condicional de E dado F , denotado por $P(E|F)$ é dada por

$$P(E|F) = \frac{P(E \cap F)}{P(F)} \quad (3.2)$$

Definição 3: Dois eventos E e F são independentes se uma das seguintes condições ocorre:

1. $P(E|F) = P(E)$ e $P(E) \neq 0, P(F) \neq 0$
2. $P(E) = 0$ ou $P(F) = 0$.

Considerando a definição 2, podemos afirmar que:

$$P(E|F) = \frac{P(E \cap F)}{P(F)} \iff P(E|F) \cdot P(F) = P(E \cap F) \quad (3.3)$$

e

$$P(F|E) = \frac{P(F \cap E)}{P(E)} \iff P(F|E) \cdot P(E) = P(F \cap E) \quad (3.4)$$

Então, como $E \cap F = F \cap E$, pela propriedade comutativa da intersecção de conjuntos,

$$P(E|F) \cdot P(F) = P(F|E) \cdot P(E) \quad (3.5)$$

Dividindo ambos os membros da equação por $P(F)$, obtemos

$$P(E|F) = \frac{P(F|E) \cdot P(E)}{P(F)} \quad (\text{Teorema de Bayes}) \quad (3.6)$$

Teorema de Bayes: Dados dois eventos E e F tais que $P(E) \neq 0$ e $P(F) \neq 0$, temos

$$P(E|F) = \frac{P(F|E) \cdot P(E)}{P(F)}$$

Onde,

$P(E|F)$ é a probabilidade condicional da ocorrência do evento E dada a ocorrência do evento F (probabilidade posterior);

$P(E)$ é a probabilidade a priori de E, isto é, a probabilidade de ocorrência do evento E antes de ocorrer o evento F;

$P(F|E)$ é a probabilidade condicional de F dada a ocorrência de E;

$P(F)$ é a probabilidade de ocorrência de F.

3.3 Redes bayesianas

Um dos recursos mais atrativos da formulação bayesiana em modelos causais é a facilidade de realizar previsões quanto a eventos futuros, tais como, o desfecho de um episódio social, o resultado de um dado teste e o prognóstico de uma determinada doença (Pearl, 1998).

A modelagem através de redes bayesianas (RB) permite a organização do conhecimento de uma dada área, ou em certo sistema de forma a mapear causas e efeitos, gerando automaticamente previsões ou decisões, ainda que, com dados escassos. A inferência bayesiana possibilita também a produção de novos resultados, de acordo com a demanda das informações, admitindo a adição de novas variáveis, atualização de dados e agregação da opinião de especialistas, quando necessário.

As redes bayesianas consistem de uma parte qualitativa, um grafo direcionado acíclico, onde os nós representam variáveis estocásticas e uma parte quantitativa, um conjunto de funções de probabilidade condicionais, Langseth et al. (2009).

Uma rede bayesiana é um grafo acíclico direcionado (GAD), em que os nós representam as variáveis do sistema e os arcos simbolizam as dependências ou as relações de causa-efeito entre as variáveis. Uma RB é definida por um conjunto de nós e um conjunto de arcos direcionados. A probabilidade está associada a cada estado do nó. Esta probabilidade é definida, a priori, por um nó raiz e calculada por inferência para os outros (Weber et al, 2012).

Celeux et al. (2006) define uma rede bayesiana como

- um conjunto de variáveis V , definindo os vértices, e um conjunto de arestas entre as variáveis E ;
- cada variável tem um número finito de estados exclusivos;
- variáveis e arestas definem um grafo acíclico direcionado, denotado por $G=(V,E)$;
- a cada variável Y com pais X_1, \dots, X_n , é associada uma probabilidade condicional $P(Y|X_1, \dots, X_n)$. Quando uma variável não possui pai, para esta, é associada a probabilidade marginal $P(Y)$.

A denominação redes bayesianas origina-se do conhecido teorema de Bayes. Em uma RB, a probabilidade conjunta pode ser escrita como segue (fatoração recursiva):

$$P(X_1, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | \text{pa}(X_i)) \quad (3.7),$$

onde $\text{pa}(X_i)$ é o conjunto dos pais do vértice X_i , Celeux et al. (2006).

A Figura 3.4 exemplifica uma rede bayesiana.

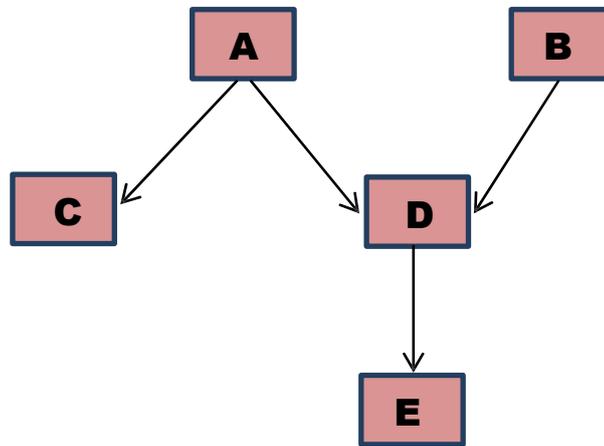


Figura 3.4 – Rede bayesiana

3.4 Netica™

Netica™ é um programa desenvolvido pela Norsys Software Corp, empresa privada, localizada no Canadá, especializada em software de rede bayesiana. Segundo informações no site da empresa (www.norsys.com/Netica), o programa já está em desenvolvimento desde 1992, tornou-se disponível para comercialização em 1995 e, atualmente, é o sistema de desenvolvimento de rede de bayesiana mais utilizado.

O software Netica™ foi selecionado para uso neste trabalho por apresentar as seguintes atribuições:

- possui interface de usuário intuitiva e suave para desenhar as redes;
- as relações entre as variáveis podem ser inseridas como probabilidades individuais;
- dado um caso de que temos conhecimento limitado, o Netica™ encontrará as probabilidades apropriadas para todas as variáveis desconhecidas, que podem ser exibidas de vários modos, incluindo gráficos de barras e medidores;
- pode usar diagramas de influência para a tomada de melhores decisões que maximizem os valores esperados das variáveis especificadas;
- pode construir planos condicionais, já que as decisões no futuro podem depender de observações ainda a serem feitas.

Através do Netica™, podem ser analisados modelos probabilísticos, removendo ou adicionando influências causais, otimizando uma decisão no tempo, entre outros. Estas operações podem ser feitas com apenas um clique do mouse, o que torna o Netica™ adequado para pesquisa e ensino de redes de opinião.

3.4.1 Exemplo de rede bayesiana com a utilização do Netica™

Um exemplo do uso do Netica™ para inferência probabilística é apresentado abaixo.

A rede ilustrada nas Figuras 3.5 e 3.6 é o exemplo de um problema de diagnóstico médico, criada por Lauritzen e Spiegelhalter (1988), utilizado para fins de demonstração, com o objetivo de introduzir conceitos de RB. As ligações da rede correspondem à relação de causalidade entre as variáveis envolvidas no problema. Os dois nós principais são "predisposições" que influenciam a probabilidade das doenças na linha abaixo deles. Na parte inferior estão os sintomas das doenças.

Esta rede foi usada como exemplo no tutorial online da ferramenta Netica™ (Norsys Software Corp, 2013).

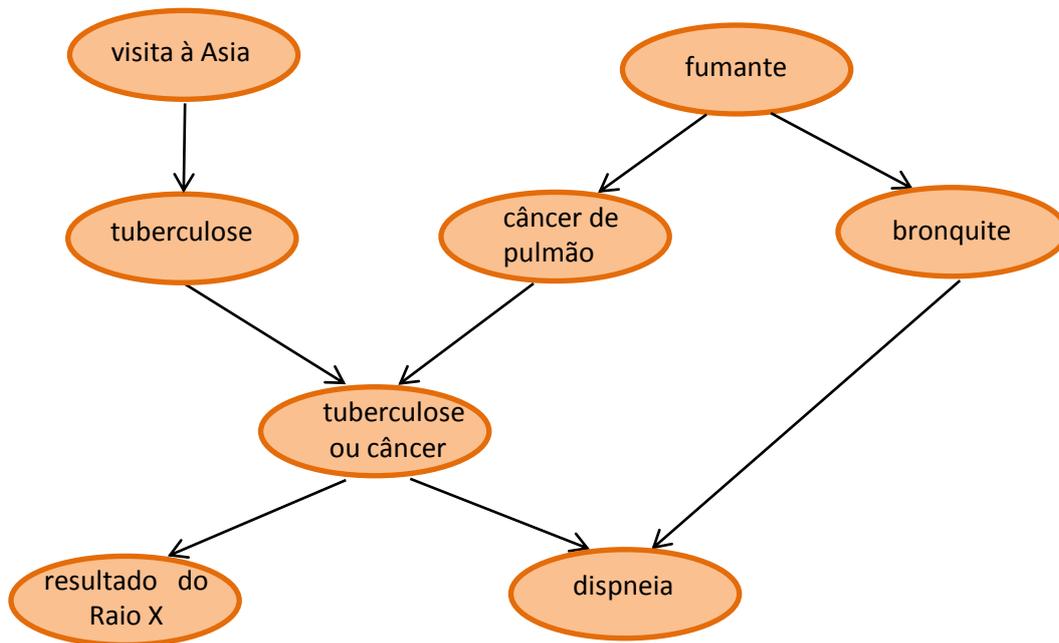


Figura 3.5 – Exemplo de RB utilizando o Netica™ (Norsys Software Corp, 2013)

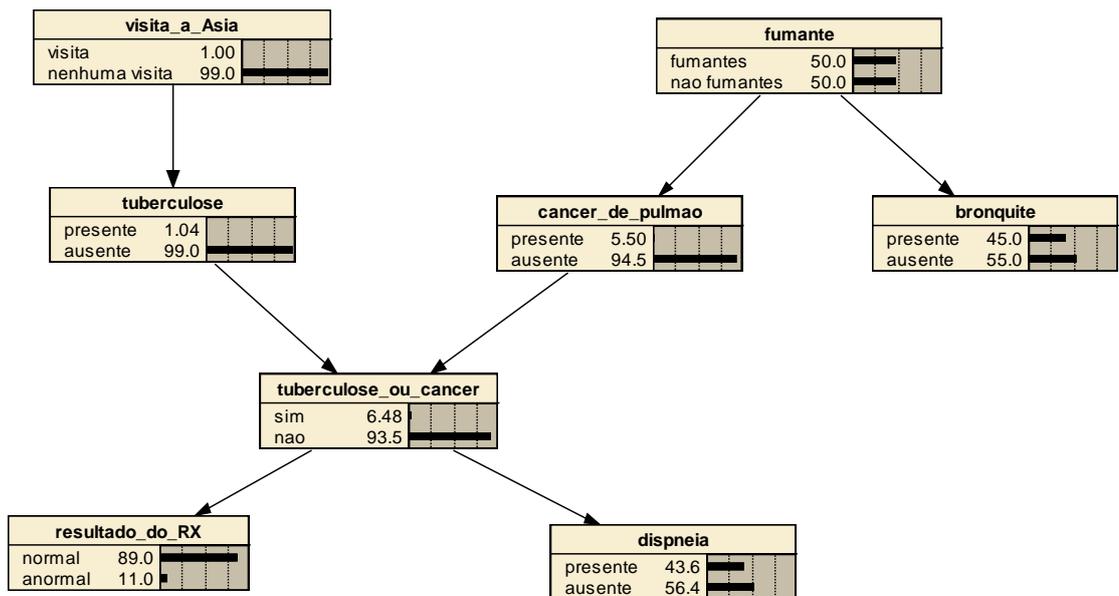


Figura 3.6 – Exemplo de RB utilizando o Netica™ (Norsys Software Corp, 2013)

Capítulo 4

A Regra da Manutenção

Em julho de 1991 foi publicada, pela Nuclear Regulatory Commission (NRC), a Regra da Manutenção (“Maintenance Rule”), RM, no parágrafo 50.65 do documento 10 CRF Parte 50 (NEI, 2007). Prevista para entrar em vigor em julho de 1996, exigia, assim, sua plena implantação até essa data. Em 1993 foi publicado o NUMARC 93-01 com o objetivo de apresentar uma breve análise dos principais elementos da RM, descrevendo o processo global de sua efetivação e orientando o licenciado nas adequações à regra (NRC, 2012). Com base no NUMARC 93-01 (NEI, 2007) e no Guia Regulador RG 1.160 (NRC, 2012) foi abordada, neste capítulo, a Regra da Manutenção e sua importância.

4.1 A importância da Regra da Manutenção

Desde 1982, a indústria nuclear enfatizou a importância da manutenção para a melhoria do desempenho da planta em geral. A eficácia da manutenção deve ser monitorada continuamente de forma a assegurar o resultado desejado, ou seja, procurar garantir que as estruturas, sistemas e componentes (ESC) sejam capazes de executar suas funções, sempre que necessário. A Regra da Manutenção tem por objetivo melhorar a segurança e a confiabilidade através de uma manutenção mais eficaz, compromisso que resultou na melhoria das instalações de manutenção, aumento da ênfase em boas práticas de trabalho e procedimentos de manutenção, melhor instrução técnica e acompanhamento de desempenho dos equipamentos.

A orientação provê um processo para decidir quais das estruturas, sistemas e componentes que compõem uma usina nuclear estão dentro do escopo da RM, descreve um processo para determinar a significância do risco específico, o critério de desempenho a ser cumprido e monitorar as ESC de acordo com esses critérios. Esta é uma atividade contínua. São estabelecidas metas específicas para as ESC que não atendam os seus critérios, visando à melhoria necessária ao desempenho.

4.2 A Regra da Manutenção

As Estruturas, Sistemas ou Componentes são classificados de acordo com os seguintes subitens:

(a) (1) – As ESC que não atingem os critérios de desempenho previstos. Para estas, devem ser estabelecidas ações corretivas apropriadas, de forma que as divergências sejam corrigidas;

(a) (2) – As ESC que atingem os critérios de desempenho estabelecidos, o que evidencia que a manutenção preventiva está sendo realizada de forma adequada;

(a) (3) – Os critérios de desempenho e as metas estabelecidas associadas às atividades de manutenção devem ser reavaliados a cada ciclo de recarga, não excedendo o período de 24 meses;

(a) (4) – Estabelece que o licenciado avalie e gereencie o aumento no risco resultante das atividades de manutenção propostas, antes de executar a manutenção em determinada ESC.

As ESC são, ainda, divididas nas seguintes categorias:

(b) (1) – ESC relacionadas à segurança da usina;

(b) (2) – ESC que não estão diretamente relacionadas com a segurança da usina, mas que possuem as seguintes características:

(i) Aqueles que são utilizados na mitigação de acidentes/transientes ou são utilizados em Procedimentos Operacionais de Emergência (POE);

(ii) Aqueles cuja falha possa impedir que outra ESC execute ações de segurança;

(iii) Aqueles cuja falha possa causar um desligamento forçado do reator ou demandar atuação do sistema de segurança.

A Fig. 4.1 possibilita uma visão de todo o processo da Regra da Manutenção.

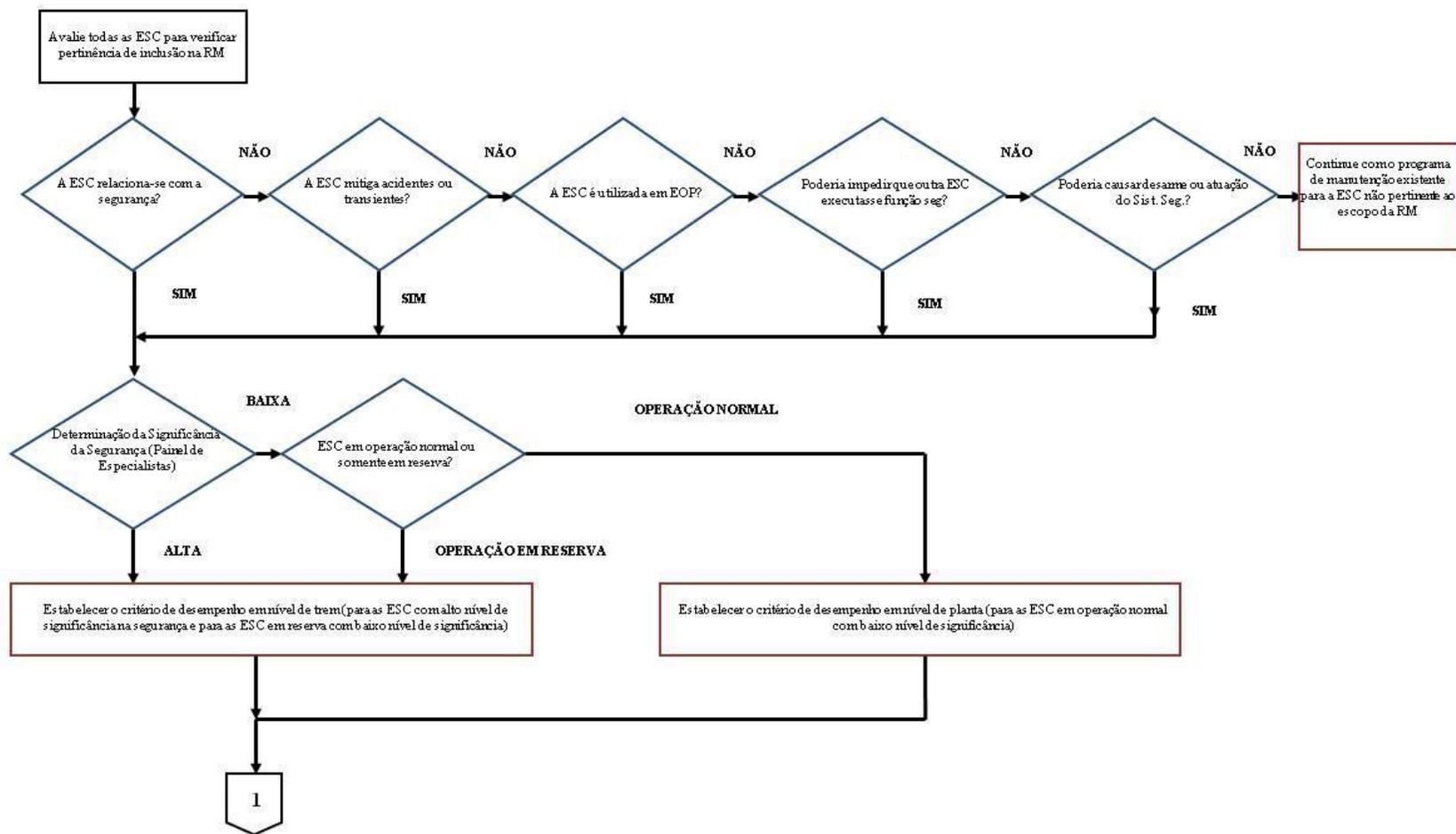


Figura 4.1 – Diagrama simplificado da Regra da Manutenção (NRC, 2014).

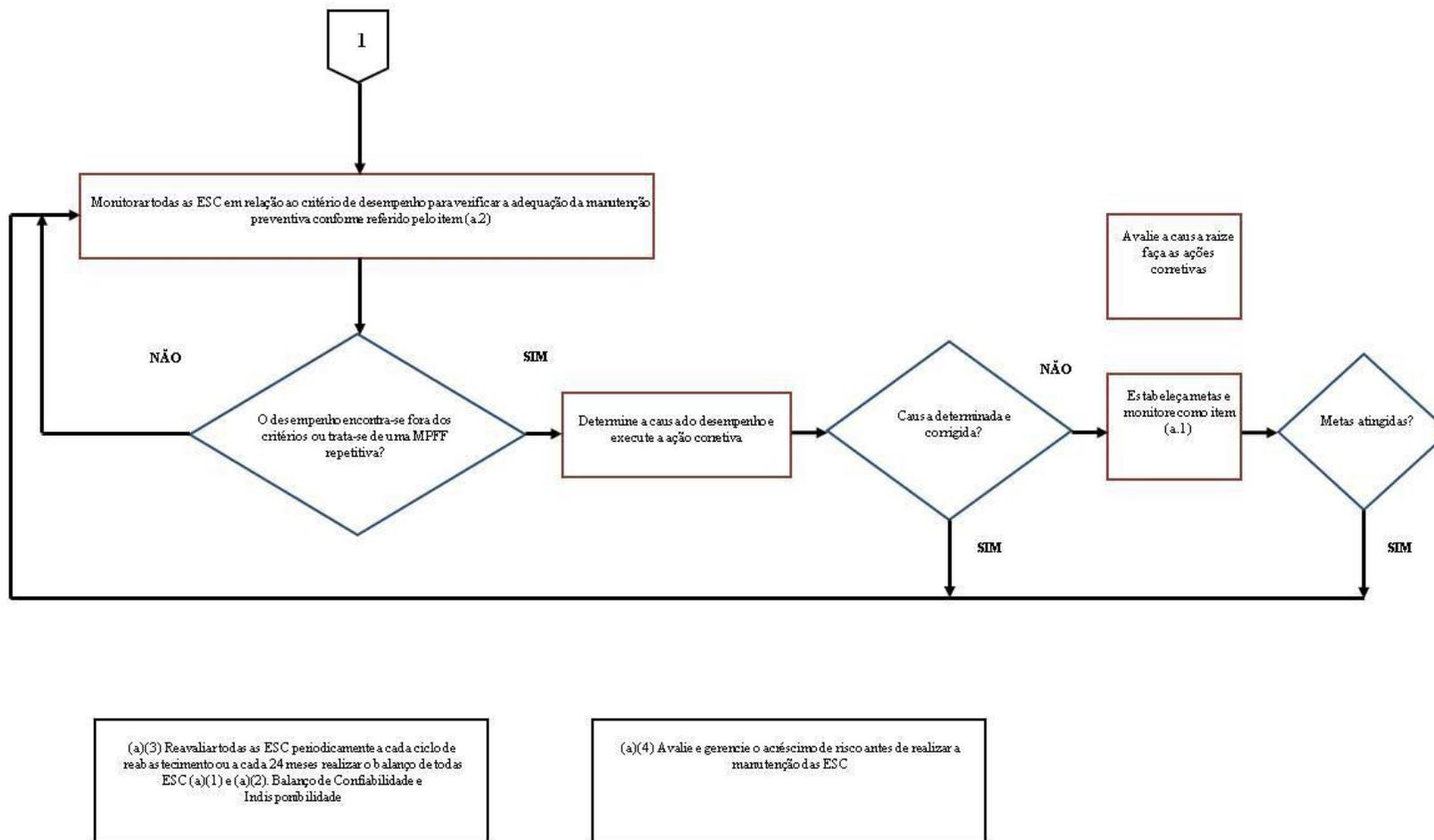


Figura 4.1 – Diagrama simplificado da Regra da Manutenção – continuação (NRC, 2014).

A Regra de Manutenção requer que os licenciados monitorem o desempenho ou condição de ESC, conforme as metas estabelecidas, de forma suficiente para fornecer segurança razoável de que tais ESC sejam capazes de cumprir as funções pretendidas. Deverão ser estabelecidos critérios compatíveis com a segurança. Quando o desempenho ou a condição de uma ESC não cumprir os critérios estabelecidos, deve ser executada a ação corretiva apropriada. (NEI, 2007).

A avaliação deve ser realizada, tendo em conta, sempre que possível, a experiência operacional em toda a indústria. Devem ser feitos ajustes, sempre que necessário, para garantir que o objetivo de prevenir falhas de ESC através da manutenção esteja devidamente equilibrado com o objetivo de minimizar a indisponibilidade de ESC, devido ao monitoramento ou manutenção preventiva.

Para ser classificado como (a) (2), um ESC deve possuir um desempenho aceitável, de acordo com os critérios estabelecidos. As ESC que não estiverem dentro dos padrões aceitáveis devem ser colocadas em (a) (1) com metas a serem atingidas a fim de que suas discrepâncias sejam corrigidas e que, retornando a um desempenho aceitável, possam ser classificadas como (a) (2). Uma verificação do risco associado às ações de manutenção é realizada antes da execução das mesmas.

A RM institui que, para o monitoramento do grupo com baixo grau de implicação na segurança e modo de operação contínuo, sejam empregados indicadores em nível de desempenho da planta e que para as ESC que possuem alto grau de implicação na segurança ou operem no modo reserva, a monitoração seja considerada em nível de linha redundante. As ESC em reserva, ainda que possuam baixo grau de implicação com a segurança, devem ser monitoradas em nível de linha redundante, pois a falha da maior parte dos sistemas em reserva só pode ser detectada durante o respectivo teste. Dessa maneira, como os transientes da planta ocorrem a uma frequência menor, a falha na demanda não forneceria as informações necessárias, caso o monitoramento fosse realizado em nível de planta (Ferro, 2011).

As principais medidas desta regra estão descritas como segue (NEI, 2007):

- Selecionar ESC no âmbito da Regra da Manutenção;
- Estabelecer e aplicar critérios significativos de risco;
- Estabelecer e aplicar critérios de desempenho;

- Estabelecer metas e monitorar as ESC para garantir à planta que as funções sejam mantidas de forma confiável e para demonstrar a eficácia das atividades de manutenção;
- Avaliar e gerenciar o risco resultante da realização das atividades de manutenção;
- Realizar a avaliação periódica de desempenho;
- Documentar o que for necessário para validar a implantação da Regra de Manutenção.

4.3 Programa de Monitoração da Eficácia da Manutenção (PMEM)

No Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), através da portaria CNEN PR 117, CNEN (2005), estabeleceu como uma das condições para renovar a Autorização de Operação Inicial (AOI) da Unidade II da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAAA2) a elaboração e implantação de um Programa de Monitoração da Eficácia da Manutenção (PMEM).

A CNEN, através da Resolução CNEN nº 106 de 15 de junho de 2011, concedeu à Eletronuclear a Autorização de Operação Permanente (AOP) da CNAAAA2, válida pelo prazo de 30 anos, sujeita a Reavaliação Periódica de Segurança (RPS), a cada período de 10 anos, de acordo com a Norma CNEN-NE-1.26 (CNEN, 2011).

Os requisitos reguladores básicos para a implantação do PMEM estão estabelecidos, de forma geral, de acordo com as Normas da CNEN, os guias reguladores da NRC e o NEI (Vajgel, 2009).

4.3.1 Norma CNEN NE-1.21 (CNEN, 1991)

Esta Norma tem por objetivo determinar os requisitos administrativos e organizacionais para o estabelecimento e implantação de um programa de manutenção de usinas nucleoeletrônicas. Os requisitos desta Norma tratam das medidas necessárias às atividades de manutenção e que devem constar do programa de manutenção.

Conforme o Item 12 da NE-1.21 (CNEN, 1991):

- Devem ser estabelecidos índices de desempenho de modo que seja possível monitorar e avaliar a eficiência do programa de manutenção.

- O programa de análise deve examinar o programa de manutenção verificando:
 - a) adequação do programa de manutenção preventiva e sua implantação;
 - b) resposta aos requisitos de manutenção corretiva;
 - c) controle satisfatório de doses de radiação;
 - d) uso efetivo de recursos;
 - e) nível de treinamento e experiência;
 - f) cumprimento dos requisitos de garantia da qualidade;
 - g) adequação de procedimentos e instruções.

4.3.2 Norma CNEN NE-1.26 (CNEN, 1997)

O objetivo desta Norma é estabelecer os requisitos mínimos necessários para garantir que a condução da operação de usinas nucleoeletricas seja mantida sem risco indevido à saúde e à segurança da população como um todo e ao meio ambiente.

Conforme o Item 9 da NE-1.26 (CNEN, 1997):

- A manutenção, os testes, os exames, os ensaios e as inspeções de todos os itens importantes à segurança devem ser de padrão e frequência tais que assegurem que seus níveis de confiabilidade e eficácia permaneçam em conformidade com os requisitos de projeto e fabricação, de forma que a segurança da usina não seja reduzida.
- Na determinação da frequência citada acima devem ser considerados fatores como:
 - a) importância relativa do item ;
 - b) probabilidade de falha;
 - c) desgaste induzido por intervenções excessivas;
 - d) aumento na probabilidade de falha induzido por intervenções excessivas;
 - e) efeito na segurança associado à indisponibilidade durante a intervenção;

f) necessidade de se manter a exposição à radiação tão baixa quanto razoavelmente exequível (princípio ALARA).

- A retirada de serviço para manutenção, testes, exame, ensaio ou inspeção de itens importantes à segurança deve ser cuidadosamente avaliada para assegurar que sejam ainda obedecidas as condições limites para operação.
- A organização operadora deve estabelecer índices de desempenho a fim de monitorar e avaliar a eficiência do programa de manutenção.
- Os itens importantes à segurança, cujos históricos apresentem precedentes significativos de falha, degradação ou indisponibilidade, devem ter um tratamento diferenciado, tendo monitorada a eficiência de sua manutenção, até que as ações corretivas tenham se mostrado eficazes.

4.4 A extensão da vida útil, o PMEM e as redes bayesianas

A extensão da vida qualificada nas centrais nucleares em operação comercial tem sido uma opção muito atrativa e de esfera internacional. As renovações de licenças precisam ser pautadas de forma que cada usina continue dentro do nível de segurança adequado ao longo do seu ciclo de vida, sendo, portanto, pertinente verificar a eficácia da manutenção realizada nas plantas nucleares. Neste caso, o PMEM pode ser usado para este fim.

Este estudo propõe modelar uma rede bayesiana referente a uma ESC, dentro do escopo do PMEM, para ser utilizada como ferramenta de auxílio às tomadas de decisão, com a possibilidade de realizar estimativas, considerando o comportamento dos dados de falha presentes, visando identificar ações que possam melhorar a confiabilidade do sistema escolhido e possibilitar a avaliação da extensão da sua vida útil.

Capítulo 5

Estudo de caso de um Sistema sob Regra da Manutenção

Neste capítulo será abordado o sistema escolhido para a modelagem da rede bayesiana, bem como, suas principais características, o desenvolvimento do processo de criação da rede, a análise da confiabilidade e os resultados obtidos.

5.1 Sistemas de Alimentação Elétrica de Emergência

Os Geradores Diesel de Emergência (GDEs) fazem parte do Sistema Elétrico de Emergência de uma usina nuclear. Ocorrendo uma perturbação no fornecimento de energia para o sistema auxiliar, ou seja, perda da rede elétrica externa, acarretará no acionamento do sistema elétrico de emergência, onde os geradores diesel estão sempre de prontidão. Os Geradores Diesel de Emergência têm a função de suprir os barramentos de segurança e os equipamentos a eles conectados para que ocorra o desligamento seguro da usina.

O estudo de caso foi montado com base em uma usina nuclear típica de projeto Siemens / KWU, KWU (1984). O Grupo Gerador Diesel de Emergência do Sistema de Alimentação Elétrica de Emergência 2 (SAEE 2) foi o sistema escolhido para a aplicação da metodologia, por pertencer ao escopo do PMEM e apresentar dados disponíveis para a estimativa da confiabilidade, levando em conta as publicações relativas à experiência operacional internacional.

No caso de um distúrbio na rede elétrica externa principal (500 kV), que ocasione a desconexão da usina da rede elétrica principal (rejeição de carga), o sistema de controle da turbina garante a operação continuada com a potência auxiliar sendo fornecida pelo grupo turbogerador da usina.

Se o grupo turbogerador desarmar e as outras fontes estiverem inoperáveis, os sistemas de segurança serão supridos através de grupos geradores diesel de emergência (potência independente) dos dois Sistemas de Alimentação Elétrica de Emergência: o Sistema de Alimentação Elétrica de Emergência 1 (SAEE 1), com quatro Grupos Geradores Diesel de 4,16 kV redundantes (4x50%) e o Sistema de Alimentação Elétrica de Emergência 2 (SAEE 2), com quatro Grupos Geradores Diesel de 480 V redundantes (4x50%), KWU (1984).

Todas as cargas de segurança, necessárias para o desligamento seguro do reator, isolamento da contenção, refrigeração do núcleo, remoção de calor residual ou para a prevenção de liberação significativa de materiais radioativos para o meio ambiente são fornecidas a partir dos Sistemas de Alimentação Elétrica de Emergência 1 ou 2.

Os Sistemas de Alimentação Elétrica de Emergência 1 e 2 têm uma configuração de quatro trens, cada trem sendo projetado para 50% da potência total requerida. A redundância corresponde àquela dos sistemas de processo importantes para a segurança. Os trens redundantes são completamente independentes quanto à funcionalidade e fisicamente separados uns dos outros.

Para mitigar acidentes, as cargas de alimentação elétrica de emergência são determinadas por um programa de partida e carregamento, com sequências de conexão precisamente definidas, de tal forma que as cargas requeridas para qualquer acidente postulado entrem em operação quando solicitadas.

A operação de alimentação elétrica de emergência é terminada manualmente, trem por trem, após a recuperação do Sistema de Alimentação Elétrica Auxiliar pela rede externa. Os sistemas de monitoração e de alarme permitem que o SAEE 1 e 2 sejam devidamente operados e supervisionados pelo pessoal de operação, KWU (1984).

As configurações dos circuitos dos sistemas de processo e dos sistemas de geração e distribuição de alimentação elétrica de emergência associados correspondem às redundâncias dos sistemas de processo.

As condições iniciais do Acidente de Base de Projeto (ABP) e das análises de transientes assumem que os sistemas dos Dispositivos Técnicos de Segurança (DTS) estão operáveis. Os Acidentes de Base de Projeto são acidentes considerados como de ocorrência admissível para fins de análise, visando ao estabelecimento das condições de segurança capazes de impedir e/ou minimizar eventuais consequências, CNEN (2002). Os Dispositivos Técnicos de Segurança são componentes, equipamentos e sistemas de segurança de uma instalação nuclear, cujo objetivo é impedir a ocorrência de acidentes postulados, ou atenuar suas consequências, CNEN (2002).

Os sistemas de distribuição elétrica de potência CA e CC de distribuição ininterrupta são projetados para fornecer capacidade, capacidade (capacidade de um item atender a uma demanda de serviço de determinadas características quantitativas,

sob dadas condições externas, BRANCO FILHO, 2000), redundância e confiabilidade suficientes para garantir a disponibilidade da potência necessária para os DTS, de tal forma que os limites de projeto do combustível, do Sistema de Refrigeração do Reator e da Contenção não sejam excedidos, KWU (1984).

A operabilidade do SAEE 1 está de acordo com as considerações iniciais das análises de acidentes. Isto inclui a manutenção dos sistemas de distribuição de potência elétrica operáveis, durante condições de acidente concomitantemente com:

- Perda de toda a alimentação elétrica externa;
- Falha única; e
- Um trem fora, para reparos.

Requer-se a operabilidade do SAEE 2 para eventos externos. O ABP é a ocorrência de um sismo (terremoto) com desligamento seguro combinado com uma onda de pressão por ruptura, causada por uma falha de um tanque de alta energia no edifício da turbina durante a operação da usina.

Os GDEs do SAEE 2 acionam diretamente as bombas de água de alimentação de emergência através do acoplamento e fornecem alimentação elétrica para outras cargas. Eles são ligados a partir do Critério de Nível do Gerador de Vapor.

Cada um dos quatro geradores diesel do SAEE 1 possui óleo combustível suficiente para operação por 72 horas à potência máxima requerida. Cada um dos quatro geradores diesel do SAEE 2 possui óleo combustível suficiente para operação por 24 horas à potência máxima requerida. Para cada gerador diesel, tanto do SAEE1 como do SAEE2, existe uma bomba de transferência de combustível (para reposição), que permite a transferência de óleo combustível de dois tanques de estocagem (protegidos sismicamente), ETN (2013).

5.2 Avaliação das falhas e suas tendências

Cada GDE do SAEE2 possui cinco sistemas auxiliares (KWU, 1984):

(1) o Sistema de Água de Refrigeração (XJG), que é projetado para remover o calor gerado no motor, nos turboalimentadores, no sistema de ar para combustão e no sistema de óleo de lubrificação;

(2) o Sistema de Óleo Lubrificante (XJV), que é projetado para suprir óleo, lubrificar as partes móveis do motor e dissipar o calor (enquanto a unidade diesel está de prontidão, este sistema é mantido pré-aquecido e em permanente recirculação);

(3) o Sistema de Óleo Combustível (XJN) fornece combustível para o funcionamento do motor e também efetua o controle de velocidade e parada do motor;

(4) o Sistema de Ar de Partida (XJP) armazena o ar pressurizado em tanques e quando é solicitada a partida, injeta ar no motor, sendo a capacidade do tanque de sete partidas sequenciais;

(5) os Sistemas de Ar de Combustão e Gás de Exaustão (XJQ/XJR), o XJQ admite, filtra e armazena o ar para combustão e o XJR controla a temperatura do ar e extrai o gás resultante da combustão do motor.

O cenário preparado para o estudo de caso foi montado considerando os dados da experiência operacional publicada, segundo a NRC (1999) e o Joint Research Centre, centro de referência de ciência e tecnologia para a União Européia, (JRC) (2013), para as falhas em partida, carga e dos subsistemas. As falhas registradas no JRC (2013) para os testes dos GDEs puderam ser levantadas por ciclo de operação. Para os subsistemas, o levantamento só pode ser feito pelo acúmulo das falhas considerando o total do período. Desta forma, os resultados só podem ser comparados pelo acúmulo das falhas no período total. Contudo, não invalida a avaliação por ciclo de cada GDE.

O período de observação considerado foi de oito ciclos de queima de combustível da usina (cada ciclo com aproximadamente 450 dias, com intervalos de 30 dias de paradas para recarregamento do núcleo do reator e manutenção da planta).

Os GDEs são equipamentos que operam em prontidão. A confiabilidade e a verificação da disponibilidade são realizadas ou através de testes operacionais (ou periódicos ou *surveillance*) ou por demandas reais (casos de eventos postulados). Para este estudo de caso, para a classificação nas categorias, foram consideradas as falhas registradas nos testes operacionais como testes sem sucesso, ETN (2013).

5.2.1 Estimativa da confiabilidade dos GDEs por ciclo

A confiabilidade dos geradores diesel de emergência pode ser um dos principais fatores a afetar a probabilidade de dano ao núcleo na ocorrência de um estado de *blackout*. Portanto, nos geradores diesel de emergência, é necessário alcançar uma confiabilidade elevada e mantê-la, nas usinas nucleares, a fim de contribuir significativamente para a garantia do suprimento de energia elétrica aos sistemas de segurança durante o *blackout*. A confiabilidade deve estar classificada dentro de uma margem não inferior a 5%, ou seja, a confiabilidade mínima aceitável é de 95%. Outro critério de desempenho é a indisponibilidade máxima aceitável de 5% (RG 1.9, 2007).

Nos relatórios pesquisados não foram encontrados dados suficientes para estimativa da indisponibilidade e, portanto, neste trabalho utilizaremos somente o critério referente à confiabilidade mínima aceitável.

As confiabilidades dos GDEs são verificadas através dos resultados das demandas dos testes de operação com uma periodicidade de 30 dias. São consideradas as confiabilidades na partida e sob carga, de acordo com a expressão a seguir, Vajgel (2009):

$$R_{\text{teste}} = 100 - \left\{ \frac{\text{n}^\circ \text{ testes sem sucesso na partida}}{\text{n}^\circ \text{ total de testes}} + \frac{\text{n}^\circ \text{ testes sem sucesso com carga}}{\text{n}^\circ \text{ total de testes}} \right\} \times 100 (\%) \quad (5.1)$$

$$R_{\text{teste}} = \text{confiabilidade}$$

Os dados das falhas e degradações dos GDEs foram obtidos da pesquisa realizada no Incident Report System, IAEA (2014), observadas de eventos operacionais em reatores de água leve, JRC (2013).

Deve ser considerada qualquer falha nas partes, subsistemas e sistemas, que

exija a intervenção da equipe de manutenção. De acordo com o NRC (1987), pela severidade, as falhas podem ser definidas como: críticas (são falhas que causam o encerramento de uma ou mais funções de equipamentos), sendo denominadas de severidade F; degradadas (são falhas que acontecem de forma gradual e parcial, mas o equipamento/ componente continua operando), sendo denominadas de severidade D; e incipientes (são falhas que descrevem imperfeições no estado ou condição de um item), sendo denominadas de severidade N. As falhas consideradas no estudo de caso foram aquelas que impediram a continuidade dos testes operacionais.

O caso estudo considerou quatro geradores diesel de emergência GDE-A e GDE-B, GDE-C e GDE-D. As Tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 apresentam, por ciclo, respectivamente, os resultados dos testes sem sucesso dos GDEs A, B, C e D, a perda da confiabilidade e a classificação da RM. A perda da confiabilidade foi calculada de acordo com a Eq. (5.1).

As Figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 apresentam, por ciclo, respectivamente, a perda da confiabilidade GDEs A, B, C e D e a classificação da RM.

Considera-se que:

- Demanda: nº total de testes realizados, com e sem sucesso.
- Falhas: nº de testes sem sucesso.
- Ciclo: período de tempo compreendido entre o sincronismo da unidade após um recarregamento de combustível e o religamento da unidade, após a próxima recarga.

Tabela 5.1 – Estimativa de confiabilidade do GDE-A

GDE-A	ciclo	testes de partida		testes em carga		probabilidade de falha			confiabilidade	Classe RM
		demanda	falhas	demanda	falhas	partida	carga	total	R%	
	1	35	0	35	0	0,00000	0,000000	0,00000	100	a(2)
	2	22	0	22	0	0,00000	0,000000	0,00000	100	a(2)
	3	23	0	23	0	0,00000	0,000000	0,00000	100	a(2)
	4	23	0	23	0	0,00000	0,000000	0,00000	100	a(2)
	5	20	0	20	0	0,00000	0,000000	0,00000	100	a(2)
	6	22	2	22	0	0,09091	0,000000	0,09091	90,90909	a(1)
	7	18	0	18	0	0,00000	0,000000	0,00000	100	a(2)
	8	23	0	23	1	0,00000	0,043478	0,04348	95,65217	a(2)
		186	2	186	1	0,01075	0,005376	0,01613	98,3871	a(2)



Figura 5.1 – Representação gráfica da confiabilidade do GDE-A

Tabela 5.2 – Estimativa de confiabilidade do GDE-B

GDE-B	ciclo	testes de partida		testes em carga		probabilidade de falha			confiabilidade	Classe RM
		demanda	falhas	demanda	falhas	partida	carga	total	R%	
	1	35	0	35	0	0,00000	0,000000	0,00000	100	a(2)
	2	22	0	22	0	0,00000	0,000000	0,00000	100	a(2)
	3	23	0	23	0	0,00000	0,000000	0,00000	100	a(2)
	4	23	1	23	0	0,04348	0,000000	0,04348	95,65217	a(2)
	5	20	0	20	0	0,00000	0,000000	0,00000	100	a(2)
	6	22	0	22	0	0,00000	0,000000	0,00000	100	a(2)
	7	18	0	18	0	0,00000	0,000000	0,00000	100	a(2)
	8	23	0	23	0	0,00000	0,000000	0,00000	100	a(2)
		186	1	186	0	0,00538	0,000000	0,00538	99,46237	a(2)



Figura 5.2 – Representação gráfica da confiabilidade do GDE-B

Tabela 5.3 – Estimativa de confiabilidade do GDE-C

GDE-C	ciclo	testes de partida		testes em carga		probabilidade de falha			confiabilidade	Classe RM
		demanda	falhas	demanda	falhas	partida	carga	total	R%	
	1	33	0	33	0	0,00000	0,000000	0,00000	100	a(2)
	2	20	1	20	0	0,05000	0,000000	0,05000	95	a(1)
	3	22	0	22	0	0,00000	0,000000	0,00000	100	a(2)
	4	25	0	25	1	0,00000	0,040000	0,04000	96	a(2)
	5	16	0	16	0	0,00000	0,000000	0,00000	100	a(2)
	6	21	2	21	0	0,09524	0,000000	0,09524	90,47619	a(1)
	7	19	2	19	0	0,10526	0,000000	0,10526	89,47368	a(1)
	8	30	3	30	2	0,10000	0,066667	0,16667	83,33333	a(1)
		186	8	186	3	0,04301	0,016129	0,05914	94,08602	a(1)

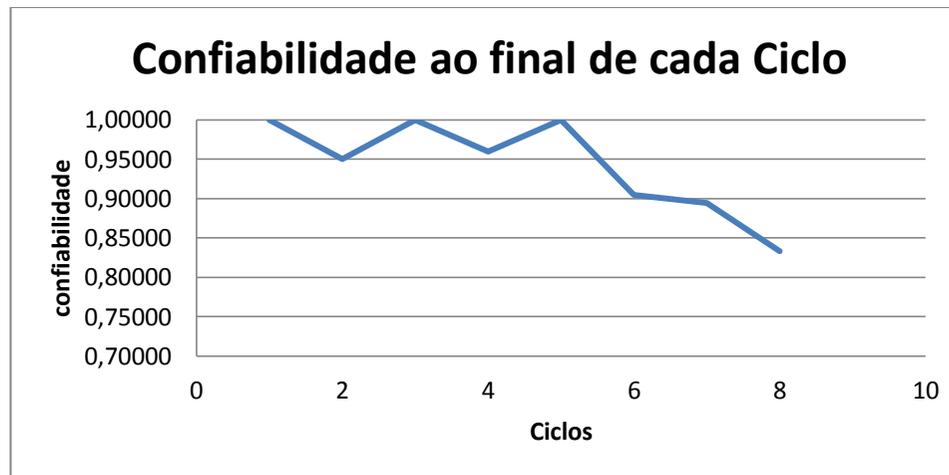


Figura 5.3 – Representação gráfica da confiabilidade do GDE-C

Tabela 5.4 – Estimativa de confiabilidade do GDE-D

GDE-D	ciclo	testes de partida		testes em carga		probabilidade de falha			confiabilidade	Classe RM
		demanda	falhas	demanda	falhas	partida	carga	total	R%	
	1	32	0	32	0	0,00000	0,000000	0,00000	100	a(2)
	2	19	0	19	0	0,00000	0,000000	0,00000	100	a(2)
	3	18	0	18	0	0,00000	0,000000	0,00000	100	a(2)
	4	24	0	24	0	0,00000	0,000000	0,00000	100	a(2)
	5	22	0	22	0	0,00000	0,000000	0,00000	100	a(2)
	6	24	4	24	0	0,16667	0,000000	0,16667	83,33333	a(1)
	7	19	0	19	0	0,00000	0,000000	0,00000	100	a(2)
	8	28	4	28	0	0,14286	0,000000	0,14286	85,71429	a(1)
		186	8	186	0	0,04301	0,000000	0,04301	95,69892	a(2)



Figura 5.4 – Representação gráfica da confiabilidade do GDE-D

Com base nas tabelas, acima expostas, pode-se verificar que:

- O GDE-A apresentou confiabilidade de 98,39% no acúmulo dos oito ciclos e, portanto, foi classificado, segundo a RM, como a(2).
- O GDE-B apresentou confiabilidade de 99,46% no total dos oito ciclos e foi classificado como a(2).
- No caso do GDE-C, a confiabilidade acumulada nos oito ciclos foi de 94,09%, sendo classificado como a(1), segundo a RM. Observe-se que no ciclo 8 a confiabilidade calculada foi de apenas 83,3%, muito abaixo do padrão aceitável.
- O GDE-D apresentou confiabilidade acumulada de 95,7%, considerando os oito ciclos e, portanto, foi classificado como a(2). Note-se que, ao final do ciclo 8, sua confiabilidade foi de 85.7%.

5.2.2 Estimativa da confiabilidade dos GDEs por subsistemas

A Tabela 5.5 apresenta as falhas dos testes operacionais (testes sem sucesso) por subsistema (sistema auxiliar) dos GDEs A, B, C e D, considerando os oito ciclos de queima de combustível da usina e o mesmo número de testes operacionais executados.

Tabela 5.5 – Estimativa de confiabilidade dos GDEs por subsistemas

Gerador	Sub	falha	demanda	prob. de falha	Classe RM
GDE-A	XJN	6	186	0,032	a(2)
	XJV	1	186	0,005	a(2)
	XJP	1	186	0,005	a(2)
	XJG	0	186	0,000	a(2)
	XJQ	0	186	0,000	a(2)
	XJY	0	186	0,000	a(2)
	XKY	0	186	0,000	a(2)
GDE-B	XJN	9	186	0,048	a(2)
	XJV	1	186	0,005	a(2)
	XJP	3	186	0,016	a(2)
	XJG	1	186	0,005	a(2)
	XJQ	1	186	0,005	a(2)
	XJY	1	186	0,005	a(2)
	XKY	0	186	0,000	a(2)
GDE-C	XJN	10	186	0,054	a(1)
	XJV	0	186	0,000	a(2)
	XJP	2	186	0,011	a(2)
	XJG	3	186	0,016	a(2)
	XJQ	2	186	0,011	a(2)
	XJY	0	186	0,000	a(2)
	XKY	0	186	0,000	a(2)
GDE-D	XJN	11	186	0,059	a(1)
	XJV	1	186	0,005	a(2)
	XJP	5	186	0,027	a(2)
	XJG	3	186	0,016	a(2)
	XJQ	1	186	0,005	a(2)
	XJY	0	186	0,000	a(2)
	XKY	0	186	0,000	a(2)

Na Tabela 5.5 pode ser observada a confiabilidade dos GDEs por subsistemas. O subsistema XJN apresentou confiabilidade inferior a 95% nos GDEs C e D e, nestes, foi classificado como a(1), segundo as normas da RM. Uma falha do Sistema de Óleo Combustível gera diretamente a falha do Gerador Diesel de Emergência em questão. Todos os outros subsistemas analisados atenderam ao critério estabelecido e foram classificados como a(2).

5.3 Redes Bayesianas aplicadas ao Estudo de Caso

Uma representação genérica de um gerador diesel de emergência e seus subsistemas é ilustrada na Fig. 5.5.

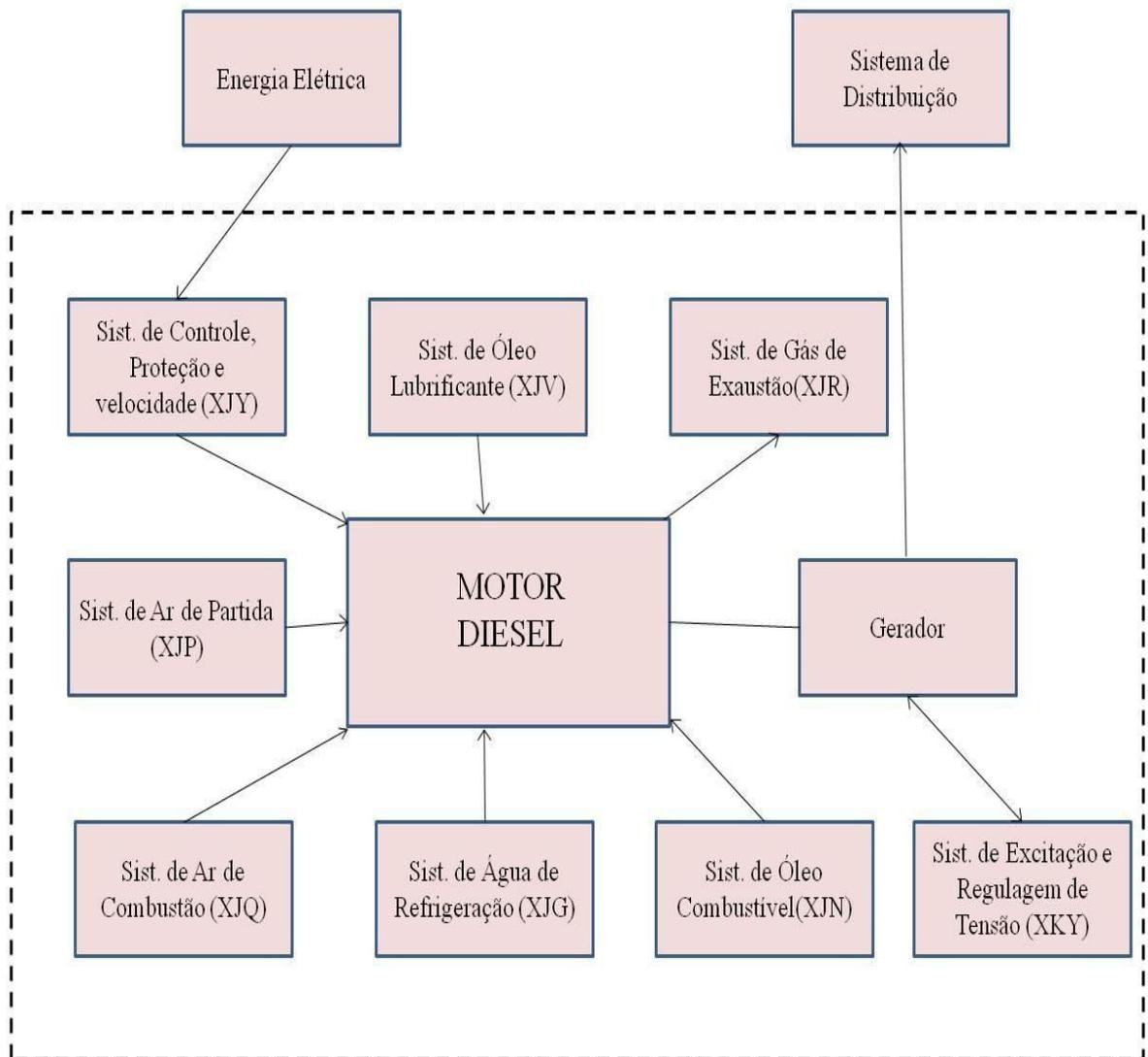


Figura 5.5 – Gerador Diesel de Emergência (RG 1.9, 1993)

Diante das informações expostas, concernentes às estimativas da confiabilidade dos GDEs e da Fig. 5.5, é proposta a modelagem de uma rede bayesiana para cada GDE, a fim de mensurar a probabilidade conjunta, ou seja, a confiabilidade do sistema como um todo.

As probabilidades de falha e a confiabilidade foram calculadas através dos dados obtidos nas publicações pesquisadas, JRC (2013) e NRC (1987). O cálculo de confiabilidade, na Seção 5.2.1, foi realizado considerando os dados por ciclo e, na Seção 5.2.2, considerando os dados por subsistema.

As estimativas de confiabilidade, por subsistema, da Seção 5.2.2 foram utilizadas como dados de entrada da rede. As estimativas de confiabilidade, por ciclo, da Seção 5.2.1 foram utilizadas para comparação com a confiabilidade resultante de cada GDE proveniente da rede bayesiana.

A rede foi implantada através do programa NeticaTM. As Figuras 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9 ilustram, respectivamente, as RBs modeladas dos GDEs A, B, C e D e as confiabilidades obtidas.

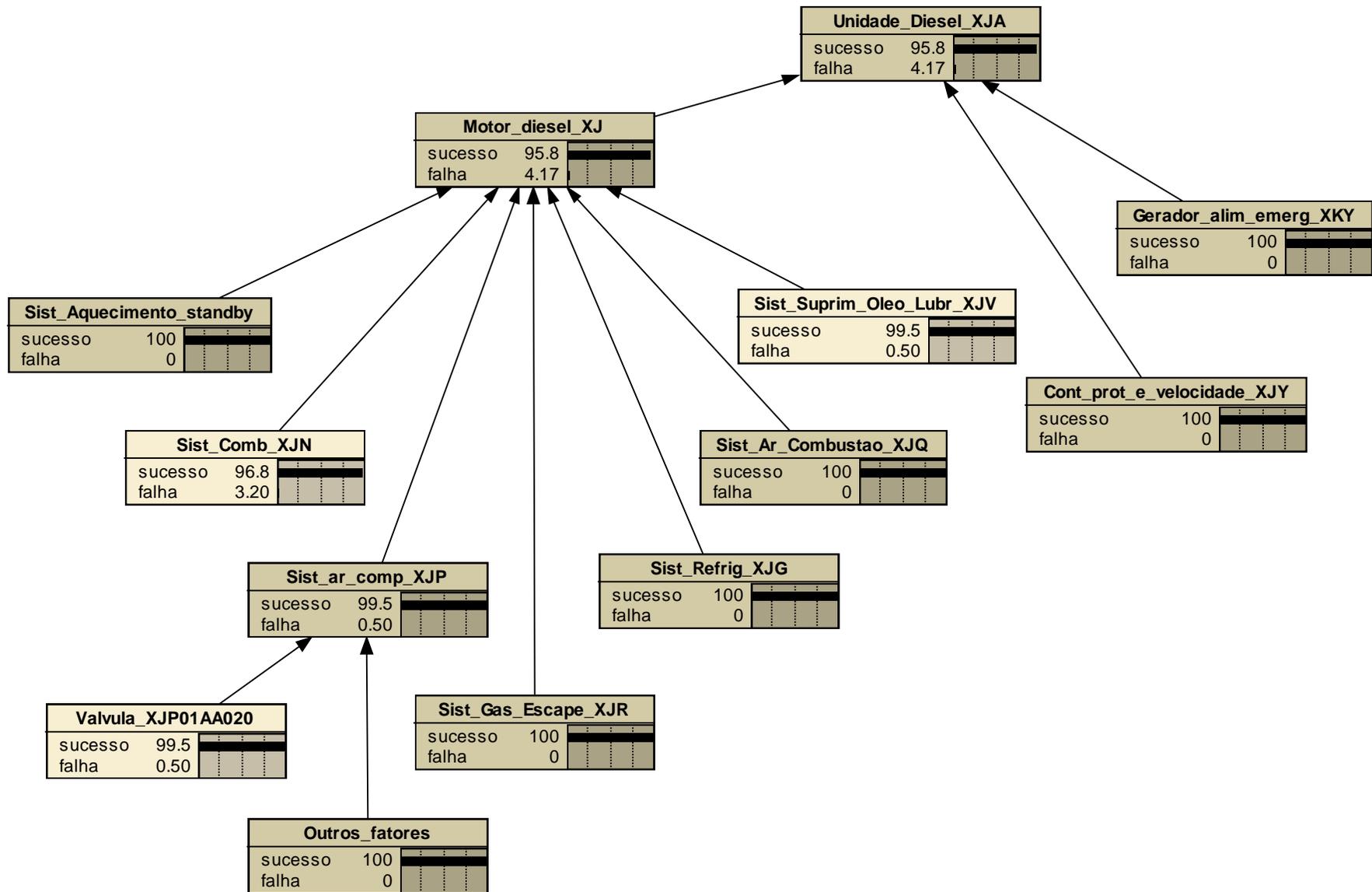


Figura 5.6 – Rede Bayesiana do GDE-A

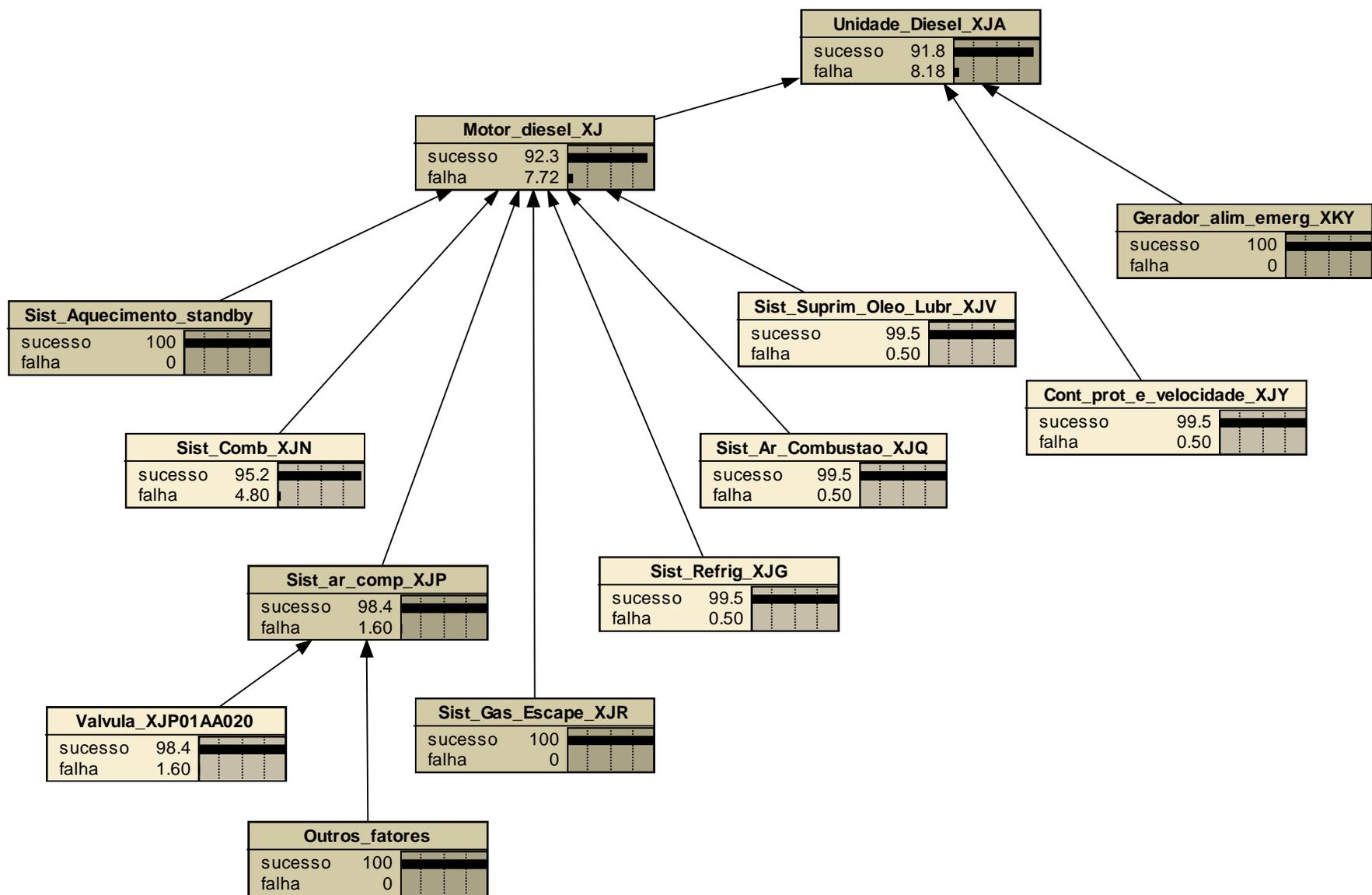


Figura 5.7 – Rede Bayesiana do GDE-B

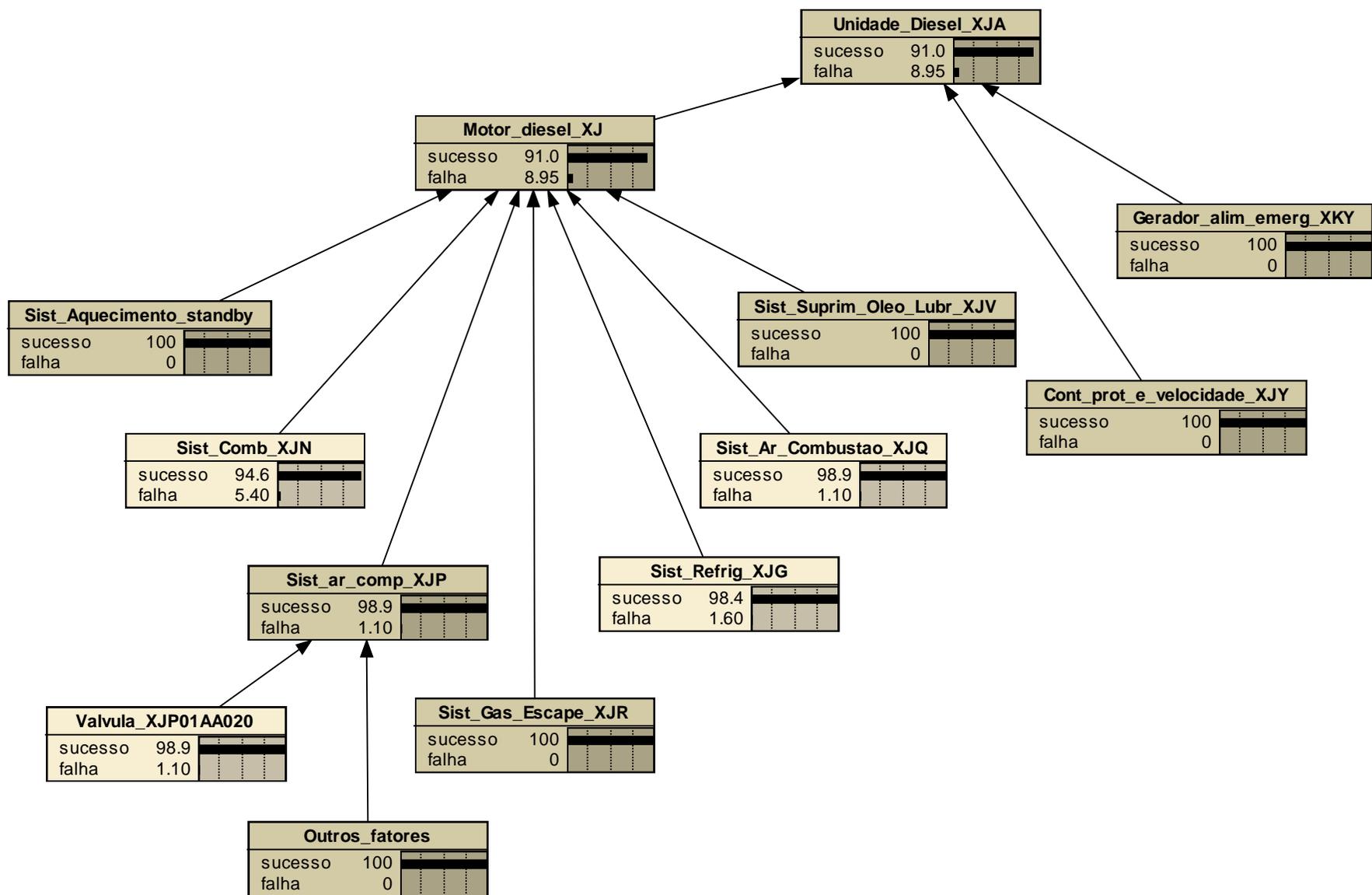


Figura 5.8 – Rede Bayesiana do GDE-C

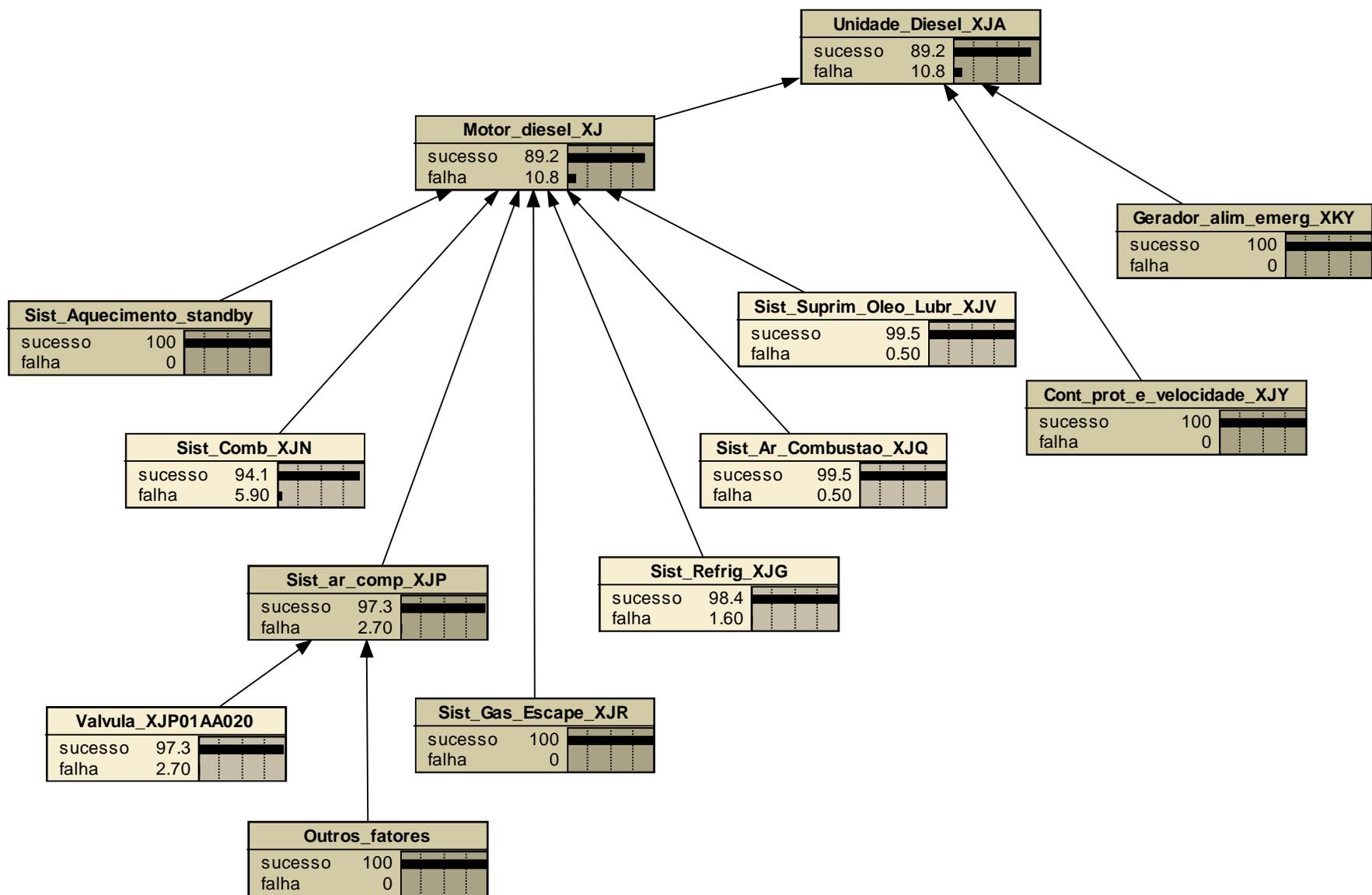


Figura 5.9 – Rede Bayesiana do GDE-D

5.4 Resultados

A vantagem da utilização das redes bayesianas, neste caso, consistiu no fato de que se pôde visualizar todas as variáveis envolvidas no processo de geração de energia no SAEE 2, as relações de dependência entre elas e a estimativa da confiabilidade conjunta do sistema, ou seja, considerando a confiabilidade de cada subsistema dos quais depende a perfeita funcionalidade do GDE.

Os resultados provenientes da análise da confiabilidade, por GDE, realizada do SAEE 2 estão listados como se segue:

- No GDE-A, a confiabilidade resultante da rede bayesiana, Fig. 5.6, foi de 95,8%, podendo ser classificado como a(2), segundo a RM, caso fosse esta a estimativa considerada. No acúmulo dos oito ciclos de recarga apresentou confiabilidade de 98,39%, Tabela 5.1, e, portanto, foi classificado como a(2).
- No GDE-B, a confiabilidade resultante da rede bayesiana foi de 91,8%, Fig. 5.7, caso esta estimativa fosse considerada para classificação, segundo a RM, o GDE-B teria classificação a(1). Porém, apresentou confiabilidade de 99,46%, Tabela 5.2, no total dos oito ciclos e foi classificado como a(2).
- No GDE-C, a confiabilidade resultante da rede bayesiana, Fig. 5.8, foi de 91%, caso esta estimativa fosse considerada para classificação, segundo a RM, o GDE-C teria classificação a(1). A confiabilidade acumulada nos oito ciclos foi de 94,09%, Tabela 5.3, sendo classificado como a(1), segundo a RM. Neste caso, a diferença entre as confiabilidades calculadas para o mesmo sistema foi de 3,09%. Ambos os resultados chegaram à conclusão de que o GDE-C deve ser classificado como a(1) e medidas devem ser tomadas para recuperação da confiabilidade, a fim de que esta esteja dentro dos padrões aceitáveis, isto é, mínimo de 95% e seja novamente enquadrada em a(2).
- No GDE-D, a confiabilidade resultante da rede bayesiana, Fig. 5.9, foi de 89,2%, caso esta estimativa fosse considerada para classificação, segundo a RM, o GDE-D seria classificado em a(1). O GDE-D apresentou confiabilidade acumulada de 95,7%, considerando os oito ciclos e, portanto, foi classificado como a(2). Porém, ao final do ciclo 8, sua confiabilidade era de 85,7%, valor

mais próximo da confiabilidade calculada através da RB do GDE-D, caso esta fosse a única estimativa considerada, o GDE-D seria classificado como a(1), confirmando a classificação obtida em decorrência dos resultados da RB concernente ao sistema.

- Na Tabela 5.5, confiabilidade dos GDEs por subsistemas, o subsistema XJN foi classificado como a(1) nos GDEs C e D, pois apresentou confiabilidade inferior a 95%. Neste subsistema devem ser realizadas ações corretivas a fim de atingir a confiabilidade mínima exigida, contribuindo, assim, para o aumento da confiabilidade conjunta do GDE em questão.

As probabilidades de todos os nós, provenientes de cada RB, foram obtidas através do NeticaTM e são apresentadas no Apêndice A.

Capítulo 6

Conclusão e Recomendações

6.1 Conclusão

Para a renovação da licença de uma usina nuclear é imprescindível a manutenção de um nível adequado de segurança ao longo do seu ciclo de vida e, portanto, há necessidade de monitoramento da eficácia da manutenção realizada. O Programa de Monitoração da Eficácia da Manutenção foi baseado na metodologia proposta pela Regra da Manutenção.

O objetivo deste trabalho foi modelar, através de uma rede bayesiana, um sistema dentro do escopo do PMEM. Modelou-se, então, o Grupo Gerador Diesel de Emergência do Sistema de Alimentação Elétrica de Emergência 2 de uma usina nuclear típica de projeto Siemens / KWU, KWU (1984).

Com base na modelagem realizada, foi possível identificar o Sistema de Óleo Combustível (XJN) como a variável da RB com menor confiabilidade, visto que, na análise, apresentou resultado insatisfatório em dois dos quatro geradores diesel pesquisados, Tabela 5.5, na estimativa da confiabilidade por subsistema, influenciando negativamente a confiabilidade conjunta, calculada através das redes bayesianas modeladas. Neste subsistema é necessária a adição de tarefas de manutenção a fim de restabelecer a confiabilidade mínima necessária.

Diante dos resultados obtidos, pode-se afirmar que uma rede bayesiana é capaz de modelar adequadamente um sistema de segurança e, portanto, é importante aproveitar os recursos oferecidos por esta ferramenta para tratar as variáveis dependentes dentro do sistema, através do Teorema de Bayes, obtendo assim uma confiabilidade baseada na probabilidade conjunta, levando em conta o todo, ou seja, todas as variáveis envolvidas e suas relações de dependência. Característica esta, importante em centrais nucleares, particularmente em sistemas de segurança, onde os eventos dependentes podem ser determinantes, numa situação de emergência.

O software Netica TM mostrou-se eficaz na execução deste trabalho, permitindo modelar adequadamente a confiabilidade dos GDEs.

Analisando as Figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 é possível observar a variação da confiabilidade dos GDEs no decorrer dos oito ciclos de recarga, com degradações e elevações nos níveis de confiabilidade, decorrentes do envelhecimento e de ações de manutenção, respectivamente.

Com o intuito de manter a confiabilidade de cada GDE dentro dos padrões aceitáveis e pleitear, assim, uma renovação de licença, caso seja necessário, podem ser buscadas decisões baseadas nas probabilidades da rede bayesiana, com o objetivo de analisar as relações entre as variáveis envolvidas e identificar que tarefas podem ser adicionadas a fim de viabilizar a extensão da vida útil qualificada.

Nas Tabelas 5.3 e 5.4 referentes à estimativa da confiabilidade, por ciclo, dos GDE-C e GDE-D, respectivamente, ao se comparar a confiabilidade acumulada nos 8 ciclos (considerada para classificar os geradores diesel no âmbito da RM) com a confiabilidade apresentada ao final do ciclo 8 (último ciclo), observa-se uma diferença considerável.

No caso do GDE-C, a confiabilidade acumulada dos 8 ciclos foi de 94,09%, enquanto que a confiabilidade no ciclo 8 foi de 83,3%, esta diferença de 10,79% foi ilustrada claramente na Fig. 5.3. Ainda que a confiabilidade considerada para classificação do sistema tenha sido a mais alta, de 94,09%, o sistema foi classificado como a(1), visto que não atendia ao critério estabelecido.

O GDE-D apresentou confiabilidade acumulada dos 8 ciclos de 95,7% e foi classificado como a(2), porém sua confiabilidade no ciclo 8 foi de 85,7%, esta diferença de 10% pode ser vista claramente na Fig. 5.4. Caso a confiabilidade considerada para classificação, no âmbito da RM, fosse a obtida do ciclo 8, o sistema teria sido classificado como a(1), pois apresentaria confiabilidade inferior a 95%.

6.2 Recomendações

Observando as diferenças na confiabilidade dos GDE-C e GDE-D, pode-se notar que, ao classificar os GDEs, no âmbito da RM, com base na confiabilidade apresentada no último ciclo, é possível obter uma estimativa mais realista da situação atualizada do sistema, levando em conta o progresso do processo de envelhecimento de forma mais veemente.

Outra maneira de estimar uma confiabilidade mais realista é calculá-la considerando o conjunto do sistema, através das redes bayesianas, como foi exposto. Desta forma, é possível identificar quais subsistemas necessitam de ações mais efetivas, buscando, assim, a permanência do índice de confiabilidade dentro do limite estabelecido. A RB permite a produção de novos resultados, de acordo com a demanda das informações, admitindo a adição de novas variáveis, atualização de dados e, conseqüentemente, a atualização no cálculo da confiabilidade.

Para trabalhos futuros, recomenda-se um exame mais profundo dos subsistemas dos GDEs, identificando novas variáveis e, em decorrência, adicionando novos nós à rede para análises mais detalhadas e observação das particularidades dos GDEs.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBER, D. (2010), *Bayesian Reasoning and Machine Learning*. University College London, Draft, 2010.

BRANCO FILHO, G. (2000), *Dicionário de Termos de Manutenção, Confiabilidade e Qualidade*, Ed. Ciência Moderna, Rio de Janeiro, 2000.

CELEUX G., CORSET F., LANNOY A., B. RICARD B. (2006), “Designing a Bayesian network for preventive maintenance from expert opinions in a rapid and reliable way”, *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 91, pp. 849–856, 2006.

CNEN (1991), *Manutenção de Usinas Nucleoelétricas*, NE 1.21, CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, Brasil, 1991.

CNEN (1997), *Segurança na Operação de Usinas Nucleoelétricas*, NE 1.26, CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, Brasil, 1997.

CNEN (2002), *Licenciamento de Instalações Nucleares*, NE 1.04, CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.

CNEN (2005), *Portaria de Licenciamento da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, Angra II*, PR 117, CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

CNEN (2011), *Resolução nº 106 de 15 de junho de 2011*, CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.

ETN (2013), Eletrobrás Termonuclear S. A., *Final Safety Report*, Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, Angra II, FSAR, Rev. 13, Brasil, 2013.

FERRO, N. (2011), *Incorporação de Atributos de Confiabilidade à Regra de Manutenção para a Extensão de Vida Útil Qualificada em Sistemas de Segurança de Centrais Nucleares*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2011.

HOUBEN, M. (2011), “Using Bayesian Networks for Reliability Management”, *European Safety and Reliability Association - Newsletter*, Março de 2011.

IAEA (2014), *Portal Nucleus*, Disponível em < <http://irs.iaea.org/> >, Acesso em 15 de janeiro de 2014.

JENKINSON, I., JONES, B., YANG, Z., WANG, J. (2010), “The use of Bayesian network modeling for maintenance planning in a manufacturing industry”, *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 95, pp. 267- 277, 2010.

JRC (2013), *Events Related to Emergency Diesel Generators*, JRC – European Commission Joint Research Centre Institute for Energy and Transport, Netherlands, 2013.

KOHDA, T., CUI, W. (2007), “Risk-based reconfiguration of safety monitoring system using dynamics Bayesian network”, *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 92, pp. 1716–1723, 2007.

KWU (1984), *PWR 1300 MW Technology Course*, Personnel Training Service, Kraftwerk Union AG, Erlangen, 1984.

LANGSETH, H., NIELSEN, T., RUMÍ, R., SALMERÓN, A. (2009), “Inference in hybrid Bayesian networks”, *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 94, pp. 1499–1509, 2009.

LAURITZEN, S., SPIEGELHALTER, D. (1998), "Local computations with probabilities on graphical structures and their application to expert systems", *Journal Royal Statistics Society B*, vol. 50, n. 2, pp. 157-194, 1998.

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

MARTINS, M. (2013), *Considerações sobre Análise de Confiabilidade e Risco*, Tese de Livre Docência, Departamento de Engenharia Naval, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2013.

MORGADO, A., CARVALHO, J., CARVALHO, P., FERNANDEZ, P. (2006), *Análise Combinatória e Probabilidade*, 9 ed., Rio de Janeiro, SBM - Sociedade Brasileira de Matemática, 2006.

NEAPOLITAN, R. (2004), *Learning Bayesian Networks*, New Jersey, Pearson Prentice Hall, 2004.

NEI (2007), *Industry Guideline for Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants*, NUMARC 93-01, Revision 4, NEI – Nuclear Energy Institute, USA, 2007.

NORSYS SOFTWARE CORP. (2014), *Netica Tutorial*, Disponível em < http://www.norsys.com/tutorials/netica/nt_toc_A.htm >, Acesso em 14 de janeiro de 2014.

NRC (1987), *An Aging Failure Survey of Light Water Reactor Safety Systems and Components*, NUREG/CR- 4747, NRC – United States Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 1987.

NRC (1993), *Selection, Design, Qualification, and Testing of Emergency Diesel Generator Units used as Class 1E Onsite Electric Power Systems at Nuclear Power Plants*, Regulatory Guide 1.9, Revision 3, NRC – Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, USA, 1993.

NRC (1999), *Lessons Learned From Maintenance Rule Baseline Inspections*, NUREG 1648, NRC – United States Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, USA, 1999.

NRC (2000), *Assessing and Managing Risk Before Maintenance Activities at Nuclear Power Plants*, Regulatory Guide 1.182, NRC – United States Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, USA, 2000.

NRC (2007), *Application and Testing of Safety-related Diesel Generators in Nuclear Power Plants*, Regulatory Guide 1.9, Revision 4, NRC – Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, USA, 2007.

NRC (2012), *Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants*, Regulatory Guide 1.160, Revision 3, NRC – Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, USA, 2012.

NRC (2014), *Simplified Maintenance Rule Flow Chart*, Disponível em < <http://www.nrc.gov/reactors/operating/ops-experience/maintenance->

effectiveness/mainten-effect-files/simp-maint-rule.gif >, Acesso em 25 de janeiro de 2014.

PEARL, J. (1988), *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems*. California, Morgan Kaufmann, 1988.

VAJGEL, S. (2009), *Abordagem Regulatória do Programa de Monitoração da Eficácia da Manutenção para Usinas Nucleoelétricas*. Dissertação de Mestrado, IEN/CNEN, Rio de Janeiro, RJ, 2009.

WANG, L., PAN, R., LI, X., JIANG, T. (2013), “A Bayesian reliability evaluation method with integrated accelerated degradation testing and field information”, *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 112, pp. 38–47, 2013.

WEBER, P., MEDINA-OLIVA, G., SIMON, C., IUNG, B. (2012), “Overview on Bayesian networks applications for dependability, risk analysis and maintenance areas”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 25, pp. 671–682, 2012.

Apêndice A - Probabilidades das RBs por variável

- GDE-A

VARIÁVEL	PROBAB.	
	SUCESSO	PROBAB. FALHA
Cont_prot_e_velocidade_XJY	1	0
Gerador_alim_emerg_XKY	1	0
Motor_diesel_XJ	0.95834	0.041656
Outros_fatores	1	0
Sist_Aquecimento_standby	1	0
Sist_Ar_Combustao_XJQ	1	0
Sist_Comb_XJN	0.968	0.032
Sist_Gas_Escape_XJR	1	0
Sist_Refrig_XJG	1	0
Sist_Suprim_Oleo_Lubr_XJV	0.995	0.005
Sist_ar_comp_XJP	0.995	0.005
Unidade_Diesel_XJA	0.95834	0.041656
Valvula_XJP01AA020	0.995	0.005

- GDE-B

VARIÁVEL	PROBAB. SUCESSO	PROBAB. FALHA
Cont_prot_e_velocidade_XJY	0.995	0.005
Gerador_alim_emerg_XKY	1	0
Motor_diesel_XJ	0.92279	0.077213
Outros_fatores	1	0
Sist_Aquecimento_standby	1	0
Sist_Ar_Combustao_XJQ	0.995	0.005
Sist_Comb_XJN	0.952	0.048
Sist_Gas_Escape_XJR	1	0
Sist_Refrig_XJG	0.995	0.005
Sist_Suprim_Oleo_Lubr_XJV	0.995	0.005
Sist_ar_comp_XJP	0.984	0.016
Unidade_Diesel_XJA	0.91817	0.081827
Valvula_XJP01AA020	0.984	0.016

- GDE-C

VARIÁVEL	PROBAB. SUCESSO	PROBAB. FALHA
Cont_prot_e_velocidade_XJY	1	0
Gerador_alim_emerg_XKY	1	0
Motor_diesel_XJ	0.9105	0.089502
Outros_fatores	1	0
Sist_Aquecimento_standby	1	0
Sist_Ar_Combustao_XJQ	0.989	0.011
Sist_Comb_XJN	0.946	0.054
Sist_Gas_Escape_XJR	1	0
Sist_Refrig_XJG	0.984	0.016
Sist_Suprim_Oleo_Lubr_XJV	1	0
Sist_ar_comp_XJP	0.989	0.011
Unidade_Diesel_XJA	0.9105	0.089502
Valvula_XJP01AA020	0.989	0.011

- GDE-D

VARIÁVEL	PROBAB. SUCESSO	PROBAB. FALHA
Cont_prot_e_velocidade_XJY	1	0
Gerador_alim_emerg_XKY	1	0
Motor_diesel_XJ	0.89196	0.10804
Outros_fatores	1	0
Sist_Aquecimento_standby	1	0
Sist_Ar_Combustao_XJQ	0.995	0.005
Sist_Comb_XJN	0.941	0.059
Sist_Gas_Escape_XJR	1	0
Sist_Refrig_XJG	0.984	0.016
Sist_Suprim_Oleo_Lubr_XJV	0.995	0.005
Sist_ar_comp_XJP	0.973	0.027
Unidade_Diesel_XJA	0.89196	0.10804
Valvula_XJP01AA020	0.973	0.027