



ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DO PROJETO DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO
PRINCIPAL DA MINA SUBTERRÂNEA DE URÂNIO EM CAETITÉ – BA

Saulo Fernando Quintão Ribeiro

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
Março de 2016

ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DO PROJETO DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO
PRINCIPAL DA MINA SUBTERRÂNEA DE URÂNIO EM CAETITÉ – BA

Saulo Fernando Quintão Ribeiro

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

Examinada por:

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

Prof. Antonio Carlos Marques Alvim, Ph.D.

Prof. Mauricio Bezerra de Souza Junior, D.Sc

Prof. Pedro Luiz da Cruz Saldanha, D.Sc

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2016

Ribeiro, Saulo Fernando Quintão

Análise de Confiabilidade do Projeto do Sistema de Ventilação Principal da Mina Subterrânea de Urânio em Caetité – BA/ Saulo Fernando Quintão Ribeiro – Rio de Janeiro: UFRJ/ COPPE, 2016.

XIV, 116p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 72-77.

1. Análise Probabilística de Segurança. 2. Confiabilidade. 3. Árvore de Falhas. 4. Ventilação Subterrânea. I. Melo, Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais pela minha formação e apoio incondicional, ao meu irmão e minha irmã pela paciência de sempre e a minha adorável esposa pelo incentivo e dedicação.

A minha filha Sara, por toda alegria e felicidade proporcionada desde seu nascimento.

A Deus, por permitir todos esses momentos.

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

ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DO PROJETO DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO
PRINCIPAL DA MINA SUBTERRÂNEA DE URÂNIO EM CAETITÉ – BA

Saulo Fernando Quintão Ribeiro

Março/2016

Orientador: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Programa: Engenharia Nuclear

O presente trabalho faz uma análise de confiabilidade do projeto do sistema de ventilação principal da mina de subterrânea de urânio da INB, determinando a probabilidade de falha do sistema e os seus pontos fracos.

O sistema foi analisado sobre diferentes aspectos, considerando componentes reparáveis, não reparáveis e testados periodicamente. Essa análise foi estendida aos subsistemas principais (Elétrico, Instrumentação e Controle, Automação e Mecânico) sendo calculada a probabilidade de falha e a contribuição de cada um deles. Fatores técnicos e humanos foram considerados na árvore de falhas, que foram representados por eventos básicos oriundos das falhas intrínsecas dos equipamentos, falhas humanas e falhas de causa comum.

Os resultados obtidos são de extrema importância para definição das estratégias de gestão de ativos e segurança operacional da mina e que podem vir a servir como as bases de projeto em suas futuras revisões, contribuindo de forma significativa para a redução no risco global da instalação.

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

RELIABILITY ANALYSIS OF THE MAIN VENTILATION SYSTEM DESIGN FOR THE
UNDERGROUND URANIUM MINE IN CAETITÉ - BA

Saulo Fernando Quintão Ribeiro

March/2016

Advisor: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Mello

Department: Nuclear Engineering

This work analyzes the reliability of the main ventilation system design for the underground uranium mine in order to estimate its failure.

The system was analyzed on different aspects considering repairable, non-repairable and periodically tested components. This analysis was extended to the major subsystems (electrical, instrumentation and control, automation and mechanical) and the probability of failure and the contribution of each of them were calculated. Technical and human factors were considered in the developed tree and are represented by basic events arising from the intrinsic equipment failures, human errors and common-cause failures.

The results are extremely important to define the asset management strategies and the mine operational safety, as long as this analysis can serve as design basis for future revisions, significantly contributing to the reduction of the overall facility risk.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1. Análise de Segurança.....	2
1.1.1. Abordagem Determinística	2
1.1.2. Abordagem Probabilística.....	2
1.1.3. Tendências no processo de tomada de decisão sobre risco.....	4
1.2. Motivação	5
1.3. Objetivo do Trabalho	5
1.4. Justificativa e Uso dos Resultados	6
1.5. Organização do Trabalho	6
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
CAPÍTULO 3 - ANÁLISE HISTÓRICA DE ACIDENTES	9
3.1. Registro das Ocorrências em Minas de Superfície e subterrâneas.....	9
3.1.1. Indústria de Mineração Canadense	9
3.1.2. Indústria de Mineração Australiana.....	11
3.1.3. Indústria de Mineração Americana	13
3.1.4. Indústria de Mineração Peruana.....	16
CAPÍTULO 4 - SEGURANÇA E CONFIABILIDADE	18
4.1. Sistemas de Ventilação em Minas Subterrâneas e Perigos Associados	18
4.2. Análise de Risco.....	20
4.2.1. Técnicas de Análise de Risco.....	22
4.2.2. Árvore de Falhas	25
4.2.3. Cortes Mínimos	26
4.2.4. Medidas de Importância de Árvores de Falhas	28

4.2.5.	Incertezas na Probabilidade dos Eventos Básicos em Árvore de Falhas	29
4.3.	Engenharia de Confiabilidade	31
4.3.1.	Indisponibilidade de Componentes	32
4.3.2.	Falhas de Causa Comum – Modelo Fator Beta	33
4.3.3.	Confiabilidade Humana - Modelo SPAR	34
4.4.	Software Utilizado	36
CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DO SISTEMA		36
5.1.	Geral	36
5.2.	O Sistema Analisado	37
5.2.1.	Sistema Elétrico Externo	38
5.2.2.	Sistema Elétrico “Interno” da Mina Subterrânea	40
5.2.3.	Sistema de Ventilação Principal da Mina Subterrânea	42
5.3.	Base de dados	46
5.3.1.	Dados de Equipamentos e Componentes	46
5.3.2.	Dados sobre Confiabilidade Humana	47
5.3.3.	Dados sobre Falhas de Causa Comum	47
5.4.	Códigos de Identificação dos Componentes	48
5.5.	Desenvolvimento das Árvores de Falhas	48
5.5.1.	Definição do Evento Topo	49
5.5.2.	Árvore de Falhas do sistema	49
5.6.	Análise de Desempenho do Sistema de Ventilação	49
5.6.1.	Avaliação de desempenho para o caso do sistema com componentes reparáveis e com componentes testados periodicamente (standby)	50
5.6.2.	Avaliação de Desempenho para o Caso do Sistema sem Componentes Reparáveis e com Componentes Testados Periodicamente (standby)	60
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES		70
CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		72
APÊNDICE A – DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA ELÉTRICO DA MINA SUBTERRÂNEA		78
APÊNDICE B – DIAGRAMA DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DA MINA SUBTERRÂNEA		83

APÊNDICE C – LISTA DE CÓDIGOS PARA IDENTIFICAÇÃO DOS EVENTOS BÁSICOS.....	84
APÊNDICE D – ÁRVORE DE FALHAS DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO PRINCIPAL	86
APÊNDICE E – PARÂMETROS E DADOS DE FALHA DOS COMPONENTES DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO PRINCIPAL.....	98
APÊNDICE F – MEDIDAS DE IMPORTÂNCIA PARA O CASO DO SISTEMA COM COMPONENTES REPARÁVEIS E COM COMPONENTES TESTADOS PERIODICAMENTE (STANDBY).....	107
APÊNDICE G – MEDIDAS DE IMPORTÂNCIA PARA O CASO DO SISTEMA SEM COMPONENTES REPARÁVEIS E COM COMPONENTES TESTADOS PERIODICAMENTE (STANDBY).....	112

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 -: ELEMENTOS DO PROCESSO DE TOMADA DECISÃO COM INFORMAÇÃO DO RISCO DA USNRC	5
FIGURA 2 – NÚMERO DE FATALIDADES E NÚMERO DE ACIDENTES FATAIS NO SETOR DE MINERAÇÃO CANADENSE 1998-2012	10
FIGURA 3 – NÚMERO DE ACIDENTES COM AFASTAMENTO EM MINAS AUSTRALIANAS DE 2006 A 2010.....	11
FIGURA 4 – NÚMERO DE FATALIDADES NO SETOR DE MINERAÇÃO AUSTRALIANO DE 1998 A 2013. FONTE: MCA, 2013	12
FIGURA 5– NÚMERO DE FATALIDADES EM MINAS DE SUPERFÍCIE E SUBTERRÂNEA NA AUSTRÁLIA DE 1998 A 2008	12
FIGURA 6 – PORCENTAGEM DE FATALIDADES OCORRIDAS EM MINAS DE SUPERFÍCIE E SUBTERRÂNEA NA AUSTRÁLIA DE 1998 A 2008.....	13
FIGURA 7 – CAUSAS DE FATALIDADES EM MINAS AUSTRALIANAS NO PERÍODO DE 2003 A 2012.	13
FIGURA 8 – DISTRIBUIÇÃO DOS ACIDENTES COM AFASTAMENTO EM MINAS DOS EUA, NO PERÍODO DE 2003 A 2012.	14
FIGURA 9 – DISTRIBUIÇÃO DO NÚMERO DE FATALIDADES EM MINAS DOS EUA, NO PERÍODO DE 2003 A 2012.	15
FIGURA 10 – DISTRIBUIÇÃO DE ACIDENTES E FATALIDADES OCORRIDOS EM MINAS, DE 2003 A 2012.....	15
FIGURA 11– DISTRIBUIÇÃO DE ACIDENTES E FATALIDADES OCORRIDOS EM MINAS, DE 2008 A 2012.	16
FIGURA 12 - DISTRIBUIÇÃO DOS ACIDENTES FATAIS OCORRIDOS EM MINAS SEGUNDO O TIPO DE ATIVIDADE, DE 2000 A 2008.	17
FIGURA 13 – DISTRIBUIÇÃO DAS VÍTIMAS FATAIS EM MINAS SEGUNDO O TIPO DE ATIVIDADE, DE 2000 A 2008.	18
FIGURA 14 - ESQUEMA DE DECAIMENTO DO RADÔNIO E SEUS FILHOS.....	20
FIGURA 15 – EXEMPLO DE UMA MATRIZ DE RISCO.	23
FIGURA 16 – ÁRVORE DE EVENTOS PARA VAZAMENTOS INSTANTÂNEOS DE QUEROSENE.	25
FIGURA 17– DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA ELÉTRICO.	38
FIGURA 18 – NÚMERO DE INTERRUPÇÕES DA CONCESSIONÁRIA, DE 2010 A 2014.	39
FIGURA 19 – HISTOGRAMA DO NÚMERO DE INTERRUPÇÕES EM FUNÇÃO DAS RESPECTIVAS DURAÇÕES, DE 2010 A 2014.	40
FIGURA 20 - SISTEMA DE VENTILAÇÃO PRINCIPAL.....	45

FIGURA 21 – PADRÃO DE CÓDIGOS DOS EVENTOS BÁSICOS DA ÁRVORE DE FALHAS.....	48
FIGURA 22– PROBABILIDADE DE FALHA DO SISTEMA AO LONGO DO TEMPO PARA SISTEMA COM COMPONENTES REPARÁVEIS E COM COMPONENTES TESTADOS PERIODICAMENTE (STANDBY)	51
FIGURA 23 – PFD E CDF DO SISTEMA COM COMPONENTES REPARÁVEIS CONSIDERANDO AS FALHAS DOS EQUIPAMENTOS, FALHAS DE CAUSA COMUM E FALHAS HUMANAS.	56
FIGURA 24 – PDF E CDF DO SISTEMA COM COMPONENTES REPARÁVEIS DESCONSIDERANDO AS FALHAS HUMANAS E FALHAS DE CAUSA COMUM.....	56
FIGURA 25 – PDF E CDF DO SISTEMA COM COMPONENTES REPARÁVEIS DESCONSIDERANDO AS FALHAS DE CAUSA COMUM.....	57
FIGURA 26- PDF E CDF DO SISTEMA COM COMPONENTES REPARÁVEIS DESCONSIDERANDO AS FALHAS HUMANAS.	57
FIGURA 27 – EVOLUÇÃO DA PROBABILIDADE DE FALHA AO LONGO DO TEMPO PARA SISTEMA SEM COMPONENTES REPARÁVEIS E COM COMPONENTES TESTADOS PERIODICAMENTE (STANDBY)	60
FIGURA 28 – PFD E CDF DO SISTEMA SEM COMPONENTES REPARÁVEIS CONSIDERANDO AS FALHAS DOS EQUIPAMENTOS, FALHAS DE CAUSA COMUM E FALHAS HUMANAS.	66
FIGURA 29 - PDF E CDF DO SISTEMA SEM COMPONENTES REPARÁVEIS DESCONSIDERANDO AS FALHAS HUMANAS E FALHAS DE CAUSA COMUM.....	66
FIGURA 30 – PDF E CDF DO SISTEMA SEM COMPONENTES REPARÁVEIS DESCONSIDERANDO AS FALHAS DE CAUSA COMUM.....	67
FIGURA 31 – PDF E CDF DO SISTEMA SEM COMPONENTES REPARÁVEIS DESCONSIDERANDO AS FALHAS HUMANAS	67

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – NÚMERO DE FATALIDADES, DE 2000 A 2008.	17
TABELA 2 – MODELO DE FORMULÁRIO PARA ELABORAÇÃO DE UMA APR.	23
TABELA 3 – MODELO DE FORMULÁRIO PARA ANÁLISE FMEA.	24
TABELA 4– DADOS DAS INTERRUPÇÕES DA LINHA DE TRANSMISSÃO, DE 2010 A 2014.....	38
TABELA 5 – INDICADORES DE CONFIABILIDADE DO SISTEMA ELÉTRICO EXTERNO.	40
TABELA 6 - CARACTERÍSTICAS DAS INSTALAÇÕES ELÉTRICAS.	41
TABELA 7 – RESULTADOS DA ANÁLISE DETALHADA POR CADA SUBSISTEMA CONSIDERANDO O CASO DO SISTEMA COM COMPONENTES REPARÁVEIS E COM COMPONENTES TESTADOS PERIODICAMENTE (STANDBY).	51
TABELA 8 – PERCENTUAL DE REDUÇÃO NA PROBABILIDADE DE FALHA DO SISTEMA, DESCONSIDERANDO CADA TIPO DE FALHA.	52
TABELA 9 – CORTES MÍNIMOS DO SISTEMA REPARÁVEL CONSIDERANDO AS FALHAS DOS EQUIPAMENTOS, FALHAS DE CAUSA COMUM E FALHAS HUMANAS.	53
TABELA 10 – CORTES MÍNIMOS DO SISTEMA REPARÁVEL CONSIDERANDO SOMENTE AS FALHAS DOS EQUIPAMENTOS, DESCONSIDERANDO AS FALHAS DE CAUSA COMUM E AS FALHAS HUMANAS.	54
TABELA 11– RESULTADOS DA ANÁLISE DE INCERTEZAS DO SISTEMA, CONSIDERANDO OS DIFERENTES TIPOS DE FALHAS.....	55
TABELA 12 – RESUMO DOS RESULTADOS PARA CADA MEDIDA DE IMPORTÂNCIA.	59
TABELA 13 – RESULTADOS DA ANÁLISE DETALHADA POR CADA SUBSISTEMA CONSIDERANDO O CASO DE SISTEMA SEM COMPONENTES REPARÁVEIS E COM COMPONENTES TESTADOS PERIODICAMENTE (STANDBY).	61
TABELA 14 – PERCENTUAL DE REDUÇÃO NA PROBABILIDADE DE FALHA DO SISTEMA, DESCONSIDERANDO CADA TIPO DE FALHA.	61
TABELA 15 – CORTES MÍNIMOS DO SISTEMA SEM COMPONENTES REPARÁVEIS E COM COMPONENTES TESTADOS PERIODICAMENTE (STANDBY) CONSIDERANDO FALHAS DOS EQUIPAMENTOS, FALHAS DE CAUSA COMUM E FALHAS HUMANAS.	62
TABELA 16 – CORTES MÍNIMOS DO SISTEMA SEM COMPONENTES REPARÁVEIS E COM COMPONENTES TESTADOS PERIODICAMENTE (STANDBY) DESCONSIDERANDO AS FALHAS DE CAUSA COMUM E AS FALHAS HUMANAS.	64
TABELA 17 – RESULTADOS DA ANÁLISE DE INCERTEZAS DO SISTEMA, CONSIDERANDO OS DIFERENTES TIPOS DE FALHAS.....	65
TABELA 18 – RESUMO DOS RESULTADOS PARA CADA MEDIDA DE IMPORTÂNCIA.	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACH	Análise de Confiabilidade Humana
AE	<i>Árvore de Eventos</i>
AF	<i>Árvore de Falhas</i>
AOI	Autorização para Operação Inicial
AOP	Autorização para Operação Permanente
APP	<i>Análise Preliminar de Perigos</i>
APS	Análise Probabilística de Segurança
CCM	Centro de Controle de Motores
CDF	<i>Cumulative density function</i>
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CNSC	Canadian Nuclear Safety Commission
COELBA	Companhia de eletricidade do estado da Bahia
EPE	Empresa de Energia Elétrica
FCC	Falha de Causa Comum
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
FMECA	<i>Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis</i>
HAZOP	<i>Hazards and Operability Study</i>
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
INB	Indústrias Nucleares do Brasil
INB	Indústrias Nucleares do Brasil
INL	<i>Idaho National Laboratory</i>
IOE	Indivíduo Ocupacionalmente Exposto
MCA	<i>Minerals Council of Australia</i>
MSHA	<i>Mine Safety and Health Administration - MSHA</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failure</i>
MTBF	<i>Mean Time to Failure</i>
MTE	Ministério do Trabalho e Emprego
MTTF	<i>Mean Time to Failure</i>
MTTR	<i>Mean Time to Repair</i>
MTTR	<i>Mean Time to Repair</i>
NIOSH	<i>National Institute for Occupation Safety and Health</i>

NR	Norma Regulamentadora
PDF	<i>Probabilistic density Function</i>
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
QDMT	Quadro de Distribuição de Média Tensão
RFAS	Relatório Final de Análise de Segurança
RPAS	Relatório Preliminar de Análise de Segurança
SAPHIRE	<i>Systems Analysis Programs for Hands-on Integrated Reliability Evaluations</i>
SE	Subestação Elétrica
SPAR-H	<i>Standardized Plant Analysis Risk Human Reliability Analysis</i>
USNRC	<i>United States Nuclear Regulatory Commission</i>

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

O Brasil, segundo dados oficiais divulgados pela empresa de pesquisa energética (EPE) ocupa a sétima posição no ranking mundial com 278,7 mil toneladas em reservas conhecidas e que correspondem a 6% do volume total mundial (ANEEL, 2008). Segundo a EPE, apenas 25% do território nacional foi objeto de prospecção, sendo Caetité a principal reserva em exploração atualmente.

Descoberta em 1976 e após dezenas de anos em exploração, a mina de Caetité recentemente atingiu um patamar onde o processo de exploração de urânio torna-se economicamente viável somente a partir da lavra subterrânea, devido às características específicas da mina e da geologia local. Nesse contexto, as Indústrias Nucleares do Brasil (INB) tem dedicado esforços ao licenciamento nuclear desse projeto de lavra subterrânea junto a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

A CNEN é a autarquia federal responsável por regular, licenciar e fiscalizar a produção e o uso da energia nuclear no Brasil. Ela é quem concede as licenças necessárias para o licenciamento nuclear de minas e usinas de beneficiamento de minérios de urânio e/ou tório em todo o território nacional.

Com base na norma CNEN (1989) o processo de licenciamento de minas e usinas de beneficiamento de urânio e/ou tório é dividido em 5 etapas subsequentes: a) aprovação do local, b) Licença de Construção (total ou parcial), c) Autorização para Utilização de Material Nuclear, d) Autorização para Operação Inicial (AOI) e f) Autorização para Operação Permanente (AOP).

Os principais documentos analisados durante o processo de licenciamento nas etapas de licença de construção e de autorização para operação são: o Relatório Preliminar de Análise de Segurança (RPAS) e Relatório Final de Análise de Segurança (RFAS), respectivamente. Em relação à segurança, o primeiro contempla as medidas de segurança iniciais propostas para a implantação do empreendimento, já o segundo, apresenta informações detalhadas, como as bases de projeto, limites de operação e uma análise de segurança como um todo, além de outras informações aplicáveis exigidas em CNEN (1994).

As referências CNEN (1989) e CNEN (1994) tratam do processo de licenciamento nuclear no Brasil e o foco principal dessas normas está em garantir a segurança nuclear e operacional do empreendimento. No caso de uma mina subterrânea, um dos principais sistemas é o sistema de ventilação principal, pois é o elemento chave por manter as condições dentro dos limites radiológicos ocupacionais e operacionais estabelecidos por normas.

1.1. Análise de Segurança

A análise de segurança, sob a ótica do setor nuclear, é o estudo do comportamento previsto da instalação nuclear durante toda sua vida útil, em situações normais, transitórias, falhas e acidentes postulados, constituindo uma etapa do projeto e uma parte essencial da avaliação de segurança no processo de licenciamento.

Existem duas abordagens para a realização de uma análise de segurança de uma instalação nuclear, a determinística e a probabilística, as quais se complementam.

1.1.1. Abordagem Determinística

Durante muito tempo foi usada exclusivamente como a base principal para o processo de tomada de decisões relativas às questões de segurança. Consiste na determinação de pior cenário acidental e a determinação de suas consequências. O princípio dessa abordagem consiste no fato de que se o sistema foi projetado para suportar os piores acidentes, então ele está apto a suportar quaisquer outros acidentes.

A abordagem determinística tem como objetivo estabelecer e confirmar, por meio de ferramentas analíticas apropriadas, as bases de projeto para os itens importantes para a segurança e assegurar que o projeto seja capaz de atender aos limites prescritos e aceitáveis para as liberações e doses de radiação para cada condição operacional da instalação.

1.1.2. Abordagem Probabilística

A análise probabilística de segurança (APS) é um método estruturado e sistemático para a quantificação do potencial de perdas e ganhos de uma planta industrial. Seu uso permite a avaliação e a ordenação de riscos diversos visando contribuir para tomadas de decisões mais consistentes. Ela usa ferramentas conceituais e matemáticas para realizar uma investigação sistemática, exaustiva e estruturada dos diferentes cenários de risco, que podem levar a eventos indesejados a partir da ocorrência das falhas de equipamentos, falhas de causa comum e erros humanos.

A análise probabilística de segurança aplicada a projetos de usinas nucleares tem se tornado uma prática comum na indústria nuclear mundial, devido às práticas

adotadas pelos órgãos reguladores de diversos países que usam a energia nuclear para a geração de energia elétrica. O objetivo desses estudos é analisar o comportamento previsto de uma instalação nuclear.

Diversos países exigem o desenvolvimento da APS no sentido de avaliar as condições que possam levar a acidentes e suas consequências aos trabalhadores, sociedade e meio ambiente. Na maioria das vezes, é exigido como um trabalho complementar ao relatório final de análise de segurança. Dessa maneira, em uma APS a documentação pode referir-se às seções correspondentes do relatório de análise de segurança, por exemplo, descrições dos sistemas, desde que todas as referências sejam claramente apresentadas para que a informação possa ser facilmente encontrada (IAEA 2010).

Na área do ciclo do combustível nuclear, que envolve as etapas de mineração, beneficiamento, conversão, enriquecimento, reconversão, fabricação e montagem do elemento combustível, estudos quantitativos de risco ainda são pouco desenvolvidos no Brasil.

O IAEA (2002) é uma guia para a condução da APS nas demais aplicações nucleares e radioativas, apresentando um procedimento geral para a realização da análise. A finalidade da APS pode ser resumida em: determinar e identificar as combinações que possam levar a um acidente ou evento indesejado; avaliar a frequência com que ocorre cada combinação e avaliar as consequências. Com este finalidade, a metodologia APS integra informações sobre o projeto, práticas de operação e funcionamento, histórico operacional, confiabilidade, disponibilidade e manutenção de equipamentos e componentes, comportamento humano, fenômenos favoráveis a um acidente e efeitos potenciais. Todas essas informações são usadas para fazer com que possíveis incidentes, deficiências, erros e vulnerabilidades da instalação proporcionem um panorama equilibrado do efeito de cada um deles sobre a segurança, assim como a importância relativa das contribuições para o risco das sequências de acidente que poderiam ter início por causa de falhas nos equipamentos ou de erros de operação.

Segundo IAEA (2010) as medidas de importância para eventos básicos, sistemas de segurança, grupos de eventos iniciadores devem ser calculadas e usadas para interpretar os resultados da APS.

Os métodos mais comuns e usados em análise de risco na indústria em geral, são os métodos qualitativos como Análise Preliminar de Perigos (APP), *checklist*, *Hazards and Operability Study* (HAZOP), *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA),

Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis (FMECA), entre outros. Os métodos quantitativos mais conhecidos são árvores de eventos e árvores de falhas.

Nesse contexto, a engenharia de confiabilidade torna-se parte fundamental de uma APS, pois através de suas práticas é que se determinam as frequências de ocorrência de cenários de acidente.

1.1.3. Tendências no processo de tomada de decisão sobre risco

O processo de decisão baseada no risco fornece uma base convincente para a tomada de decisões e ajuda a identificar os maiores riscos e priorizar os esforços para reduzi-los ou eliminá-los. É baseado principalmente em um conjunto de métricas com base em modelos e que geralmente não considera fatores como: custo, viabilidade e os interesses das partes envolvidas. O processo de decisão baseado no risco normalmente é realizado por técnicos especialistas, sem consulta pública ou envolvimento das partes interessadas.

Opostamente, o processo de decisão com informação do risco é um processo deliberativo que usa um conjunto de medidas de desempenho juntamente com diversos outros fatores associados para balizar o processo de tomada de decisões,

O processo com informação do risco reconhece que o julgamento humano tem papel relevante nas decisões e que as informações técnicas não podem ser a única base para a tomada de decisão. Esse fato é devido a inevitáveis lacunas na informação técnica e também porque o processo de decisão é intrinsecamente uma tarefa subjetiva, baseada em valores.

Na resolução de problemas de tomada de decisões complexas que envolvem objetivos múltiplos e concorrentes, o conhecimento acumulado fornecido pelo pessoal mais experiente é essencial para a integração de elementos técnicos e não técnicos de forma a produzir decisões confiáveis. (NASA 2008, 2010).

O órgão regulador nuclear americano – US Nuclear Regulatory Commission (USNRC) adota o modelo integrado de tomada de decisões com informação do risco. Nesse modelo todos os requisitos relacionados à segurança ou questões reguladoras são levados em conta no processo decisório. Estão incluídos o reconhecimento de quaisquer requisitos obrigatórios, as conclusões das análises determinísticas e probabilísticas e todos outros fatores relevantes. Todos esses elementos devem ser considerados e ponderados para a tomada de decisão. Além disso, uma vez tomada a decisão, há a necessidade de implantá-la e monitorá-la para determinar quão eficaz tem sido e se há necessidade de revisar a decisão. (IAEA, 2005)

A Figura 1 detalha de forma bastante simples esse processo.

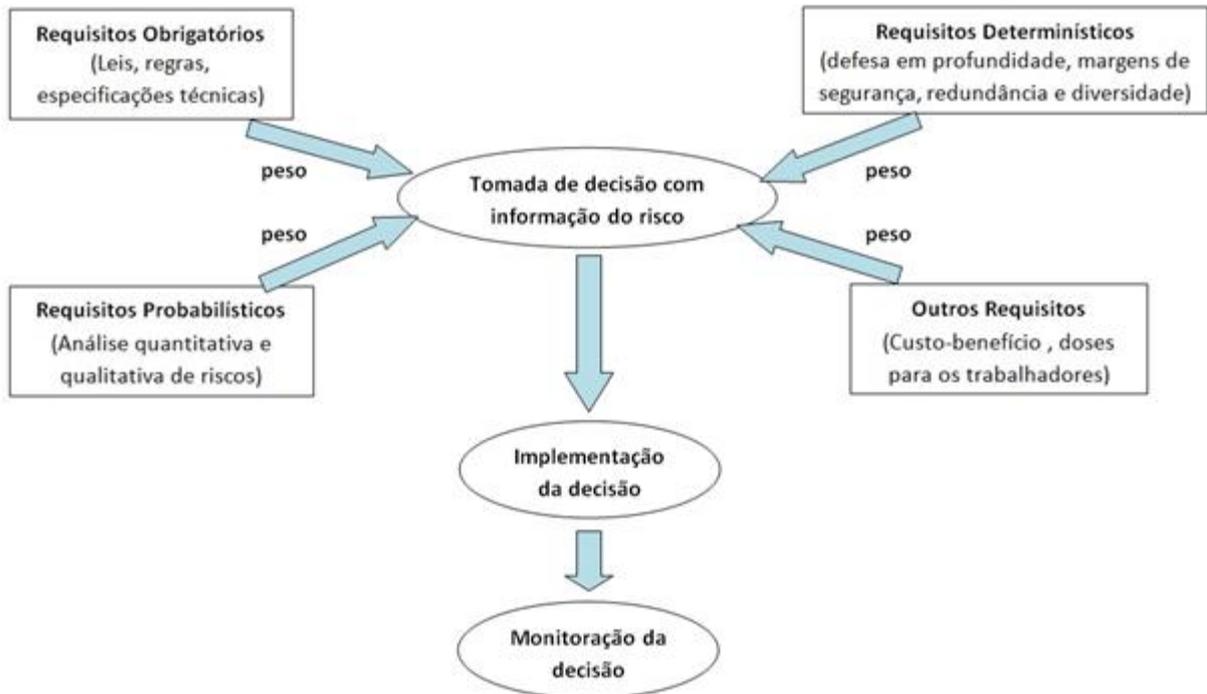


Figura 1 -: Elementos do processo de tomada decisão com informação do risco da USNRC

Fonte: IAEA, 2005

1.2. Motivação

A motivação para realização desse estudo é poder agregar informações que auxiliem no processo de licenciamento da mina subterrânea de urânio da INB, verificando o nível atual de segurança do projeto do sistema de ventilação principal da mina utilizando análise probabilística de segurança e propor em conjunto com o órgão regulatório (CNEN) medidas que possam aumentar o nível de confiabilidade do sistema considerando os resultados desse trabalho.

1.3. Objetivo do Trabalho

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a confiabilidade do sistema de ventilação principal da mina subterrânea de urânio determinando a probabilidade de falha do sistema e o seus pontos fracos sob diferentes aspectos operacionais.

1.4. Justificativa e Uso dos Resultados

Os resultados obtidos fornecerão dados importantes para a análise de segurança da instalação nuclear e poderão ser utilizados de forma a subsidiar o processo de licenciamento do empreendimento como também auxiliar no processo de tomada decisão para implantação de estratégias de manutenção, visando uma melhor relação custo-benefício entre produção e segurança operacional, desde a fase de concepção do projeto.

1.5. Organização do Trabalho

Neste capítulo foi feito uma contextualização do processo de licenciamento nuclear no Brasil e a importância da análise de segurança do empreendimento para a obtenção das licenças necessárias. São introduzidas as abordagens determinísticas, probabilísticas e as tendências no processo de tomada de decisão.

No capítulo dois são apresentados resumos das principais revisões bibliográficas de trabalhos existentes na literatura em relação análise de confiabilidade de sistemas de ventilação de minas subterrâneas, com intuito de verificar o que tem sido pesquisado sobre o assunto e contextualizar com o presente trabalho.

O capítulo três apresenta uma análise histórica de acidentes em alguns países com grande volume de atividades de mineração, considerando minas a céu aberto e subterrâneas.

No capítulo quatro são apresentados conceitos sobre segurança e confiabilidade, descrevendo o processo e as técnicas de análise de risco, a consideração das incertezas nas probabilidades dos eventos básicos e engenharia de confiabilidade. São introduzidos os modelos de indisponibilidade de sistemas e ou componentes, o modelo de

No capítulo cinco é apresentado o descritivo do projeto do sistema de ventilação, o modo de funcionamento e respectiva árvore de falhas do sistema. Nesse capítulo estão relacionados os principais bancos de dados utilizados na pesquisa e são feitas as análises de desempenho do sistema, sendo calculada a probabilidade de falha do sistema e as principais medidas importância bem como é realizada a análise de incertezas considerando os casos com componentes reparáveis e sem componentes reparáveis.

O capítulo seis apresenta as conclusões e algumas recomendações gerais e propostas para trabalhos futuros.

Finalmente, o capítulo sete apresenta as referências bibliográficas consultadas e mencionadas no decorrer desse trabalho.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Estudos de confiabilidade que analisam sistemas de ventilação principal de minas subterrâneas englobando os seus principais subsistemas (elétrico, instrumentação e controle, automação e mecânico) são escassos na literatura. Foi realizada uma extensa pesquisa bibliográfica que resultou em alguns poucos estudos relacionados.

Na literatura pesquisada, no caso específico de minas subterrâneas, poucos estudos tratam a confiabilidade do sistema de ventilação considerando os dados de falhas, tempos de reparo e suas incertezas. A maioria dos trabalhos analisa a confiabilidade de apenas um dos diversos subsistemas que compõem o sistema principal e não fornecem uma visão integrada do sistema, mas apenas de forma isolada. Ao considerar as falhas humanas e de causa comum, esse universo fica ainda mais restrito, o que dificulta a comparação dos resultados encontrados com a literatura.

Em seu trabalho sobre confiabilidade em sistema elétrico de potência de minas, STANEK E VENKATA (1988) analisaram através da aplicabilidade de árvore de falhas, a probabilidade de eventos que podem expor os trabalhadores a níveis de tensão indesejados. Nesse estudo foram consideradas minas com lavra à céu aberto e subterrâneas. Os autores também fizeram uma comparação entre diferentes taxas de falha de diferentes fontes de dados e concluem que os dados de falhas de equipamentos utilizados em minas subterrâneas apresentem ordem de magnitude de duas a três vezes maior do que os equipamentos utilizados na indústria em geral.

ZHANG et al (2013) desenvolveram um sistema de monitoração e controle baseado em inversor de frequência capaz de controlar de modo contínuo a velocidade do motor do exaustor. O sistema é capaz de monitorar os parâmetros do exaustor e do motor bem como diversos outros fatores que podem ser controlados através da velocidade do vento dentro da mina. O autor comenta que o sistema foi aplicado em uma mina de alumínio na China e que houve melhoria na confiabilidade do sistema de ventilação principal e também na segurança operacional do empreendimento.

Em NUTTER (1983) o autor reconhece que no processo de monitoração e controle de minas subterrâneas de carvão, a confiabilidade de um sistema, seja tanto a parte de hardware e software, raramente é reconhecida como um potencial risco à

segurança. No desenvolvimento do trabalho são feitas considerações sobre a necessidade de duplicação de sensores e sistemas (hardware) bem como a do próprio software responsável pelo processamento das informações vinculadas à segurança operacional da mina. Como conclusão, com a aplicação da metodologia proposta no artigo, os fabricantes poderão garantir maior confiabilidade de seus equipamentos e também um método de avaliação de novos equipamentos de monitoramento e controle.

Em MIAO et al (2010) foi realizada uma avaliação de confiabilidade do sistema de ventilação de mina utilizando a teoria de sistemas com múltiplos estados combinado com métodos de avaliação de confiabilidade. O trabalho conclui que para os valores de taxa de falha e reparo considerados para os exaustores (principal e reserva), o sistema de ventilação analisado disponibilidade é bastante alta.

FEI-MIN et al (2009) apresentaram um estudo para elaboração de um conjunto de indicadores para avaliação de sistemas de ventilação de minas. Os indicadores de segurança foram propostos com bases na análise de perigos do sistema de ventilação e foram quantificados pela árvore de falha do sistema e pelo uso do processo analítico hierárquico. Como resultado os autores afirmam que com a implantação de um sistema de indicadores de em um sistema de ventilação de mina poderá ajudar a melhorar a produtividade e facilitar o gerenciamento das atividades diárias e também da avaliação da segurança operacional do sistema de ventilação.

NOVAK E KOHLER (1998) realizaram um estudo sobre inovações em sistemas elétricos de potência em minas subterrâneas de carvão e observaram que as limitações tecnológicas dos sistemas elétricos advinham de duas áreas: automação e distribuição de energia. As principais inovações destacadas pelos autores foram: a elevação dos níveis de tensão elétrica (>1000 Volts), melhorias técnicas nos circuitos dos disjuntores e nos sistemas de proteção contra curto-circuitos fase-terra, concepção de uma rotina de testes para alta tensão, criação de barreiras de proteção para reduzir a exposição aos perigos elétricos durante a manutenção, correção do fator de potência próximo às cargas para melhoria na regulação de tensão e o uso de PLC's para controlar, monitorar e diagnosticar todo o sistema. Essas inovações e melhorias resultaram da necessidade do aumento de potência dos equipamentos e também para melhoria nos níveis de segurança operacional.

CAPÍTULO 3 - ANÁLISE HISTÓRICA DE ACIDENTES

A análise histórica de acidentes tem como objetivo fornecer subsídios para a determinação dos possíveis modos de falhas de componentes e os efeitos decorrentes destas falhas, tomando como base acidentes ocorridos em instalações similares. Adicionalmente, pode auxiliar no estabelecimento da probabilidade de ocorrência dos vários modos de falha e da ordem de magnitude das possíveis consequências de acidentes envolvendo os produtos analisados.

A dificuldade de obtenção de informações tecnicamente adequadas sobre a ocorrência de acidentes em minas subterrâneas de urânio é relativamente grande, principalmente face à multiplicidade de referências bibliográficas e as formas de recuperação da informação. Não há uma padronização na divulgação das informações, seja nos artigos, revistas, periódicos, relatórios de instituições, entre outros.

3.1.Registro das Ocorrências em Minas de Superfície e subterrâneas

3.1.1. Indústria de Mineração Canadense

As minas de urânio podem apresentar riscos aos trabalhadores, ao público e ao meio ambiente. Os principais perigos à saúde dos trabalhadores que lidam com urânio estão relacionados com a exposição ao radônio e seus derivados, os quais são originados pelo decaimento natural do urânio e sua toxicidade química. A exposição durante um longo período a altos níveis de radônio pode aumentar o risco de doenças ocupacionais.

O Canadá, que é um dos maiores produtores de urânio do mundo, iniciou uma série de estudos e compilou os resultados em uma publicação da *Canadian Nuclear Safety Commission* (CNSC, 2012), cujo objetivo era compreender quais eram estes riscos. Entretanto, como resultado, os estudos desenvolvidos demonstraram que as pessoas que trabalham nas minas e a população que vive perto destas minas eram tão saudáveis quanto o restante da população.

Foi comprovado, através desses estudos (CNSC, 2012), que o risco de adquirir câncer devido às atividades exercidas nas minas de urânio no Canadá é baixo, pois a exposição dos trabalhadores ao radônio é baixa. Assim sendo, o risco dos trabalhadores das minas contraírem câncer é comparável ao risco do restante da população e é importante salientar que não há nenhuma evidência da doença no

Canadá que possa ser consequência da exposição ao urânio. Isso pode ser atribuído a estudos que foram conduzidos por volta dos anos 70, os quais reforçaram os requisitos regulamentares para proteger os trabalhadores dos efeitos da exposição ao radônio.

No Canadá, existem programas de monitoramento que identificam e controlam os efeitos ao meio ambiente e alguns estudos realizados já demonstraram que as minas de urânio não aumentam os níveis de radônio no meio ambiente. E mesmo quando estes níveis são mensuráveis eles não são diferentes dos níveis presentes em outros locais comuns.

A Figura 2 apresenta o histórico de fatalidades no setor de mineração canadense. No período analisado, 1980-2011, foram relatadas 91 fatalidades envolvendo as mais diversas atividades, como serviços em helicópteros, levantamentos geofísicos e perfurações. (AMEBC, 2013)

Não há indicação clara de uma tendência ao longo do tempo. Os anos de 1980, 2006, 2008 e 2011 apresentaram o maior número de incidentes fatais desde 1980.

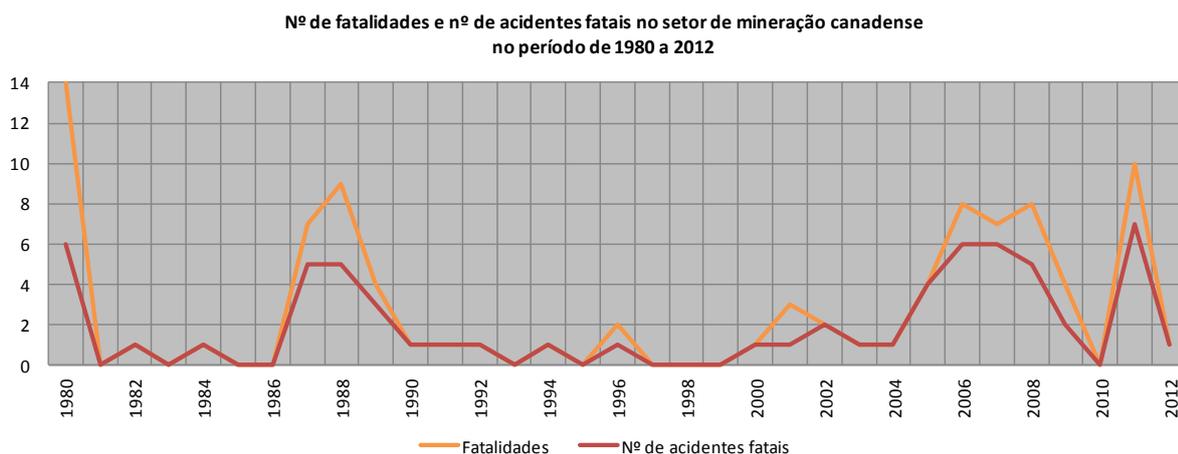


Figura 2 – Número de fatalidades e número de acidentes fatais no setor de mineração canadense 1980-2012
Fonte: AMEBC, 2013

Apesar do aumento da consciência de segurança ao longo dos últimos 30 anos, os dados apontam que a indústria mineira canadense não está conseguindo obter uma melhoria significativa no indicador de fatalidades no setor, e isso traz um desafio imenso para as empresas.

3.1.2. Indústria de Mineração Australiana

De acordo com os dados publicados pela associação *Safeworkaustralia* o país tem mantido um número praticamente estável de acidentes com afastamento no período de 2006 a 2010 conforme mostrado na Figura 3. A indústria de mineração australiana alcançou melhorias significativas com relação ao número de ocorrências de lesões no local de trabalho durante as últimas décadas, mas esse número tem praticamente permanecido constante nos últimos anos (SAFEWORKAUSTRALIA, 2013).

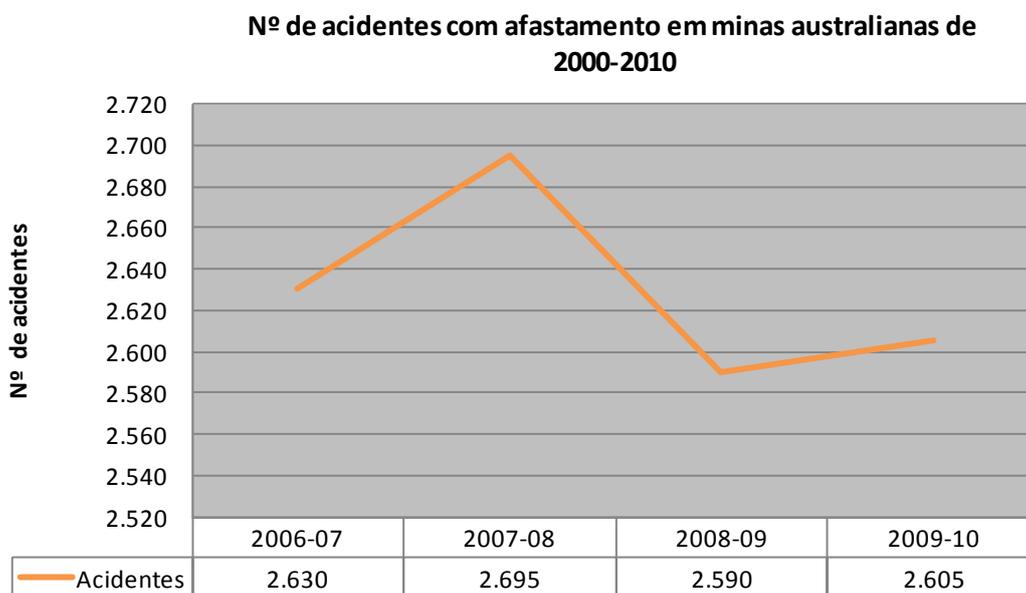


Figura 3 – Número de acidentes com afastamento em Minas Australianas de 2006 a 2010

Fonte: Safeworkaustralia, 2013

Em relação ao número de fatalidades, segundo dados apresentados pelo *Minerals Council of Australia* (MCA, 2013), vinha apresentando uma queda significativa de 2009 até 2012, voltando a registrar um número elevado de mortes em 2013, de acordo com a Figura 4.

Nº de fatalidades no setor de mineração australiano de 1998-2013

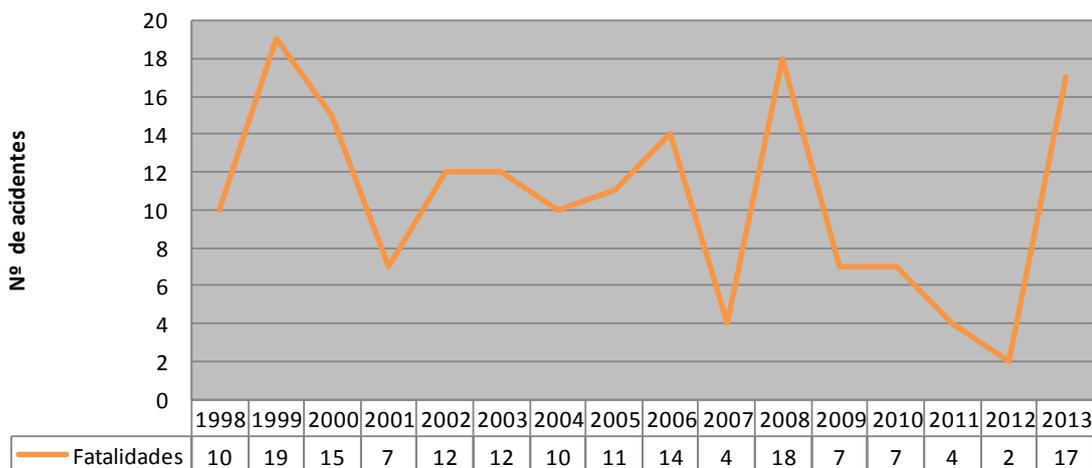


Figura 4 – Número de fatalidades no setor de mineração Australiano de 1998 a 2013.
Fonte: MCA, 2013

A Figura 5 estratifica o número de fatalidades em relação ao tipo de empreendimento, mina a céu aberto ou mina subterrânea (MCA, 2013). A diferença no total de fatalidades apresentados entre as Figuras 4 e 5, se deve ao fato de que a Figura 5 exclui os casos ocorridos nos setores de beneficiamento, indústria extrativista e exploração.

Nº de fatalidades em minas de superfície e subterrânea na Austrália de 1998-2008

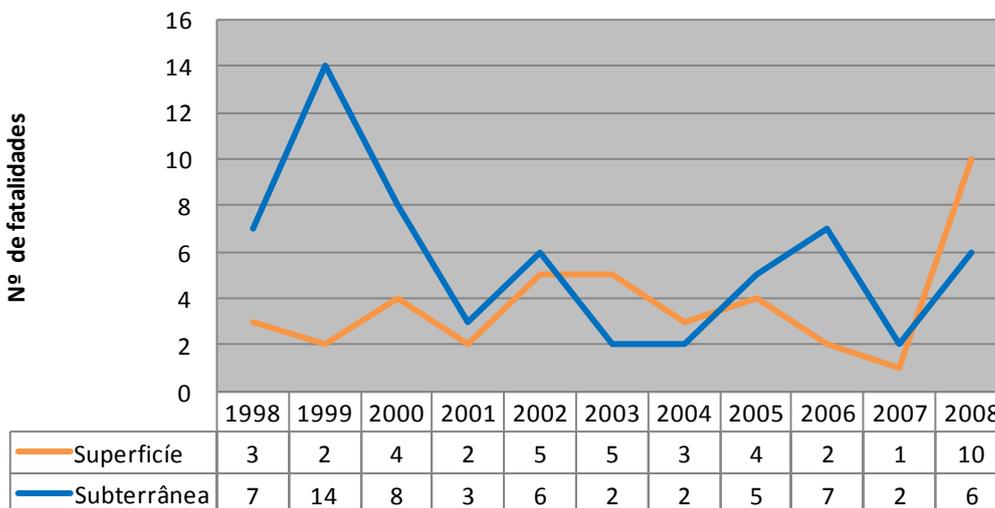


Figura 5– Número de fatalidades em minas de superfície e subterrânea na Austrália de 1998 a 2008
Fonte: MCA, 2013

Do total de fatalidades apresentados na Fig. 5 aproximadamente 60% ocorreram em minas subterrâneas, conforme mostra a Figura 6.



Figura 6 – Porcentagem de fatalidades ocorridas em minas de superfície e subterrânea na Austrália de 1998 a 2008
Fonte: MCA, 2013

A Figura 7 detalha as principais causas de acidentes em diferentes minas australianas. Incêndios, explosões, desmoronamentos, quedas em altura, são alguns dos exemplos mais comuns de acidentes. Deve-se salientar que estes dados representam casos ocorridos nas minas a céu aberto e subterrâneas (STUSEL, 2014).

**Principais causas de fatalidades em minas australianas no
período de 2003-2012**

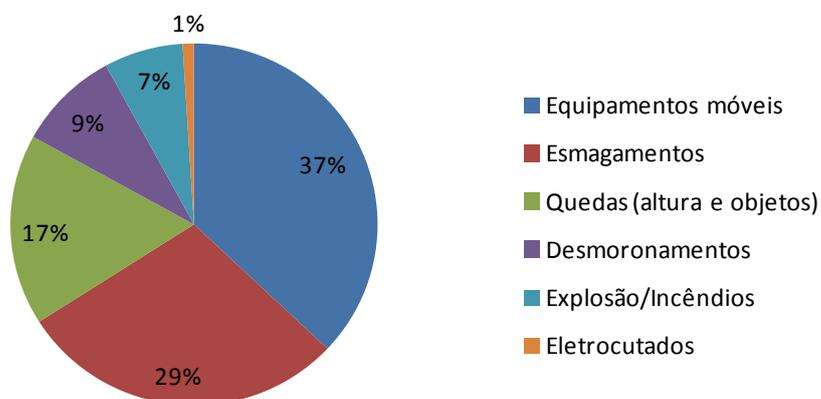


Figura 7 – Causas de fatalidades em minas australianas no período de 2003 a 2012.
Fonte: STUSEL, 2014

3.1.3. Indústria de Mineração Americana

A análise histórica de acidentes que segue foi baseada no programa de mineração do Instituto Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional dos Estados

Unidos (*National Institute for Occupation Safety and Health - NIOSH*), que conduz estudos de fiscalização e desenvolvimento de trabalhos focados na melhoria da segurança e saúde dos mineradores. Dados sobre acidentes que ocorreram a partir de causas comuns são primordiais para iniciar estudos de prevenção. A administração de segurança e saúde de minas (*Mine Safety and Health Administration - MSHA*) fornece dados de acidentes com ou sem lesões e doenças ocasionadas pelo trabalho em minas.

Analisando a Figura 8 é possível observar uma tendência decrescente ao longo dos anos para ocorrência de acidentes com afastamento. Na Figura 9 visualiza-se que o número de fatalidades não apresenta uma tendência clara, tanto para as atividades de mineração subterrâneas quanto para as de superfície (NIOSH, 2012).

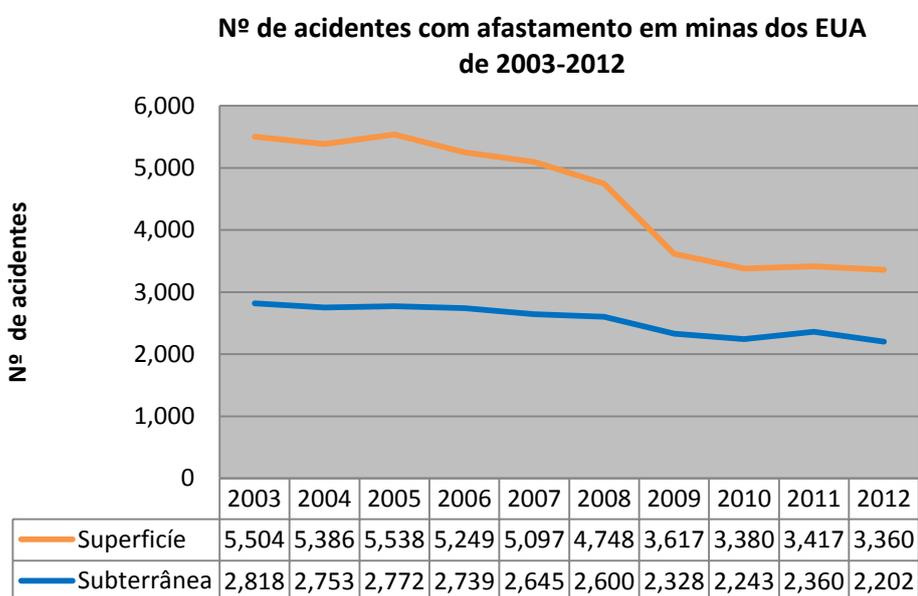


Figura 8 – Distribuição dos acidentes com afastamento em minas dos EUA, no período de 2003 a 2012.

Fonte: NIOSH, 2012

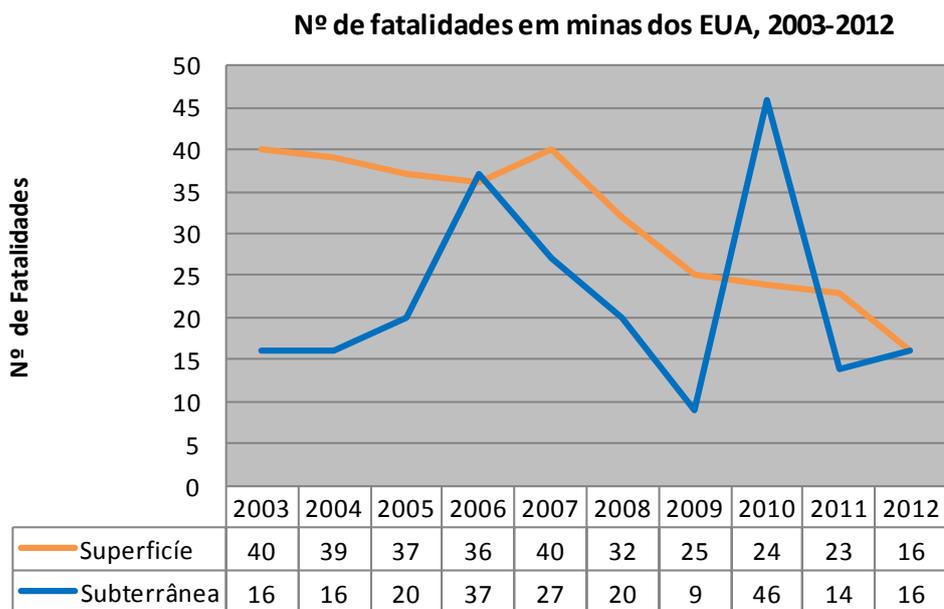


Figura 9 – Distribuição do número de fatalidades em minas dos EUA, no período de 2003 a 2012.

Fonte: NIOSH, 2012

Os acidentes com ou sem fatalidades ocorridos em minas de superfície contabilizam um percentual maior que os ocorridos nas minas subterrâneas; tais dados estão resumidos na Figura 10 (NIOSH, 2012).

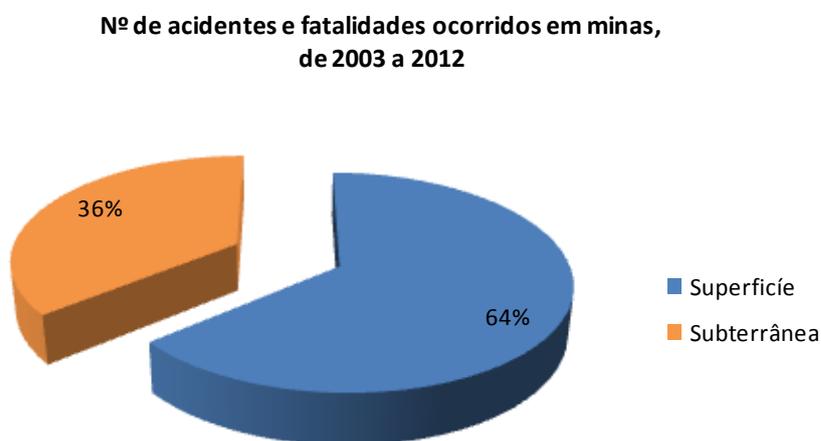


Figura 10 – Distribuição de acidentes e fatalidades ocorridos em minas, de 2003 a 2012.

Fonte: NIOSH, 2012

A Figura 11 apresenta as principais causas de acidentes em mina subterrânea no período de 2008 a 2012. (NIOSH, 2012)

**Principais Causas de fatalidades em minas subterrâneas dos EUA
no período de 2008-2012**

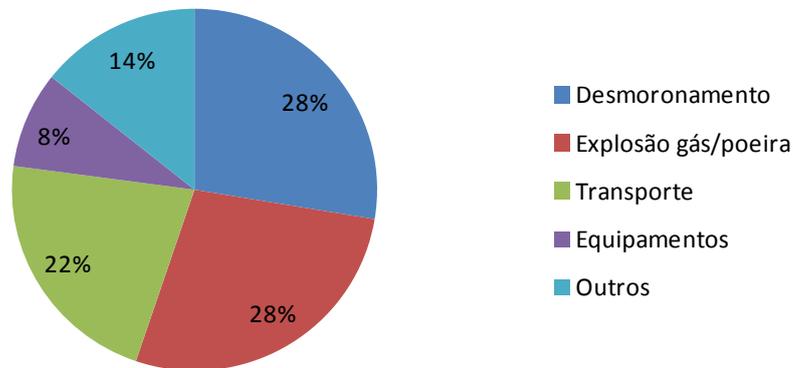


Figura 11– Distribuição de acidentes e fatalidades ocorridos em minas, de 2008 a 2012.

Fonte: NIOSH, 2012

3.1.4. Indústria de Mineração Peruana

A atividade de mineração é uma das mais importantes da economia peruana, contribuindo com cerca de 50% das exportações. Estima-se que o Peru possuía 16% das reservas minerais do mundo (CANDIA, 2009).

Foram analisados os acidentes fatais envolvendo trabalhadores do setor da mineração peruana, envolvidos na extração de minerais em operações, tanto a céu aberto como subterrâneas, ocorridos no período compreendido entre os anos de 2000 e 2008. Durante o período de análise ocorreram 472 acidentes fatais com 531 vítimas. O tipo de acidente mais representativo foi a queda de rochas em escavações subterrâneas (36,53%), seguido pelo trânsito de pessoas (9,23%), pela queda de pessoas (9,04%), pelo escorregamento do terreno (7,91%), conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Número de fatalidades, de 2000 a 2008.

Causas	Quantidade	%
1. Queda de rochas	194	36,53
2. Escorregamento de terreno	42	7,91
3. Afogamento ou inundação	6	1,13
4. Intoxicação, asfixia e radiações	38	7,16
5. Trânsito	49	9,23
6. Carregamento e transporte	30	5,65
7. Manobra de equipamentos	24	4,52
8. Enterramento por afundamento de terreno	6	1,13
9. Manipulação de materiais	9	1,69
10. Queda de pessoas	48	9,04
11. Explosivos	23	4,33
12. Ferramentas	2	0,38
13. Energia elétrica	19	3,58
14. Outros	41	7,72
Total	531	100,0%

Fonte: CANDIA, R. C. et al. 2009

A análise dos resultados mostra que o número de acidentes fatais, na mina subterrânea, de superfície e no beneficiamento foi de 426, 38 e 7, respectivamente, gerando 482, 42 e 7 vítimas, respectivamente. As Figuras 12 e 13 mostram as participações percentuais de acidentes e vítimas fatais segundo o tipo de atividade.

Acidentes Fatais

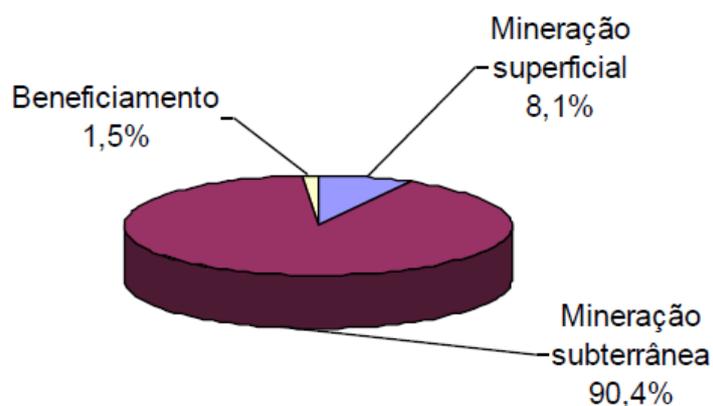


Figura 12 - Distribuição dos acidentes fatais ocorridos em minas segundo o tipo de atividade, de 2000 a 2008.

Fonte: CANDIA, R. C. et al; 2009

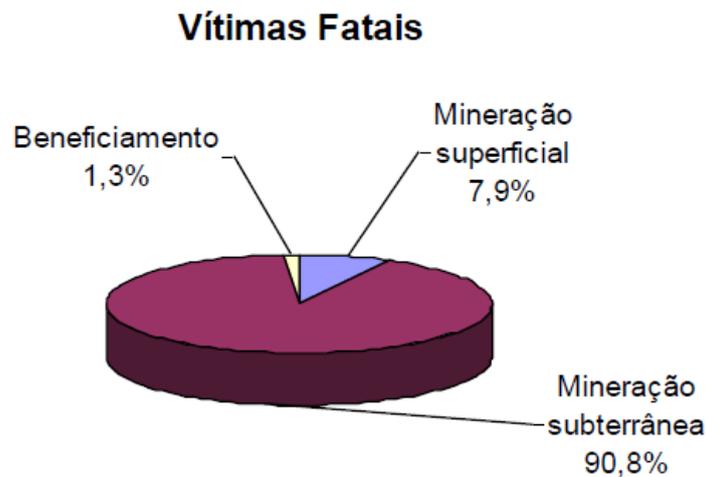


Figura 13 – Distribuição das vítimas fatais em minas segundo o tipo de atividade, de 2000 a 2008.

Fonte: CANDIA, R. C. et al; 2009

CAPÍTULO 4 - SEGURANÇA E CONFIABILIDADE

4.1. Sistemas de Ventilação em Minas Subterrâneas e Perigos Associados

Cada tipo de mina tem diferentes exigências de ventilação em termos de seu plano de lavra, layout, exigências legais e demandas de produção ao longo de sua vida útil. Uma análise detalhada considerando esses diferentes cenários permite prever com alto grau de precisão e com uma antecedência satisfatória as demandas práticas.

Os sistemas de ventilação de uma mina devem ser atualizados, redimensionados à medida que mudam as condições operacionais inicialmente consideradas. Por exemplo, uma extensão para uma maior produção, pode requerer um redimensionamento dos sistemas de ventilação,

KAROLY (2009) relata três desafios que afetam as operações em minas subterrâneas metalíferas e que são particularmente aplicáveis em sua totalidade às minas brasileiras. As minas estão se tornando mais profundas, estão cada vez mais mecanizadas e as exigências legais cada vez mais rígidas.

Do ponto de vista de ventilação, os efeitos principais da profundidade são o aumento do calor e a umidade, que levam as pessoas a concentrar sua atenção e a se tornar menos conscientes dos sinais visuais ao seu redor. Essas reduções levam eventualmente a um ponto em que o comprometimento de sua atenção é tal que pode afetar a segurança e a saúde dos trabalhadores.

Nas minas subterrâneas os trabalhos em profundidade ficam mais quentes, devido principalmente ao aumento de temperatura da rocha virgem com a profundidade, os impactos da autocompressão, bem como o calor liberado pelo maquinário usado. As fontes de calor em uma mina podem ser divididas em dois grupos distintos: o primeiro inclui as fontes que dependem do local geográfico da mina e, por conseguinte do extrato rochoso e o segundo, as fontes derivadas das atividades humanas.

O ar que circula nas galerias das minas subterrâneas sofre modificações relativas na sua composição química e física. Quando flui descendentemente em uma escavação de minas, o ar gera um aumento de pressão devido a seu próprio peso, e isso causa aumento de temperatura. Além disso, o ar de ventilação incorpora gases, vapores, poeira e umidade resultantes das diversas atividades executadas. E por ser um fluido compressível, sofre modificações significativas em sua densidade. Essas variações na composição química, densidade e temperatura demandam metodologias e ferramentas adequadas de controle e são essenciais para calcular as demandas futuras, à medida que a mina se torna mais profunda.

Em minas subterrâneas, outro fator relevante é a presença do gás radônio, que está fortemente ligado às características geológicas, como o tipo de rocha. Quanto maior for o teor de rádio no solo, maior o potencial de aparecimento de níveis elevados de radônio dentro de construções acima desse solo.

Segundo MURAD (2013), o gás é responsável por 55% da radiação que o ser humano recebe ao longo da vida. O radônio emite partículas alfa que permanecem no ar e são posteriormente inaladas, depositando-se no epitélio das vias aéreas, e ao longo prazo podem levar ao câncer de pulmão.

Na mina subterrânea da INB em Caetité, os locais onde se espera uma maior exalação de radônio são aqueles onde existe minério de urânio na superfície exposta da rocha. Tal efeito ocorre em grande intensidade nas regiões dos subníveis que atravessam os corpos mineralizados e que, por isso, apresentam minério exposto nas paredes, piso e teto.

A exalação de radônio permite que os produtos de seu decaimento radioativo, denominados filhos do radônio, sejam gerados no ar. Os filhos do radônio em suspensão no ar podem então ser inalados por indivíduos presentes nesse ambiente e, ao se depositarem no pulmão, proporcionam dose interna devido à irradiação proporcionada pelas emissões alfa. A irradiação proporcionada pelo próprio radônio é desprezível frente àquela devida a seus filhos, de modo que o radônio não proporciona

exposição direta, mas é apenas um condutor dos seus filhos de meia-vida curta. Isto é, só há filhos de radônio onde há radônio.

Uma das maneiras de evitar a exposição a radônio e filhos consiste na ventilação do ambiente, de forma a remover o radônio antes que se acumule e proporcione concentrações elevadas de seus filhos. Sendo assim, é importante definir um sistema de ventilação para a mina subterrânea e modelar o comportamento desses radionuclídeos com a vazão de ar, de modo a estimar o valor adequado dessa grandeza que garanta níveis adequados para a concentração de filhos do radônio.

Para entender a dinâmica dos filhos do radônio, deve-se compreender o esquema de decaimento do radônio e desses radionuclídeos, ilustrado abaixo na Figura 14.

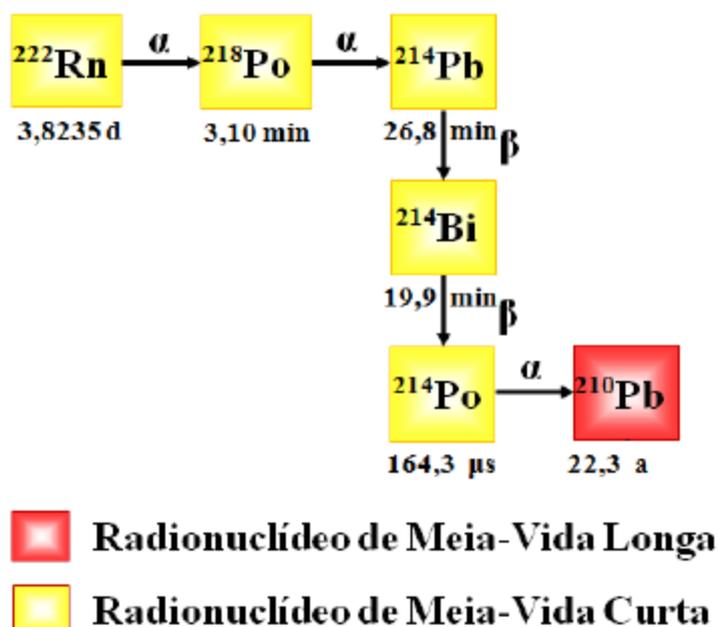


Figura 14 - Esquema de decaimento do radônio e seus filhos.
Fonte: RPAS, 2014

4.2. Análise de Risco

Uma análise de risco é uma maneira organizada de identificar e analisar determinadas situações associadas com o projeto ou atividade (CCPS-AIChE, 1992, p.11). É o processo ou procedimento para identificar, caracterizar, quantificar e avaliar os riscos e seus significados, segundo Lafraia (2001, p.111). Uma análise de risco tem como objetivo apontar deficiências, pontos fracos no projeto ou operação de uma planta.

As análises geralmente focam nas questões de segurança de processo, como efeitos de liberações não programadas de determinados materiais sobre pessoal da planta ou público em geral. Estes estudos complementam atividades industriais de segurança e saúde mais tradicionais, tais como proteção contra deslizamentos ou quedas, uso de equipamentos de proteção individual, monitoramento de exposição de empregados a substâncias químicas, radiológicas e outras muitas técnicas que podem auxiliar no alcance de necessidades da planta, sejam estas operacionais, econômicas ou ambientais.

As análises de risco podem também identificar falhas nos sistemas de gerenciamento de um programa de segurança de processo, como por exemplo, falhas no gerenciamento de mudanças ou deficiência nas práticas de manutenção (CCPS-AIChE, 1992, p.11). As técnicas individuais de análise de risco podem ser usadas para: (1) investigar as prováveis causas de um incidente já ocorrido, (2) como parte de um programa de gerenciamento de mudanças da planta, e (3) para identificar equipamentos críticos sob aspectos de segurança para manutenção especial, testes, ou inspeção como parte de um programa de integridade mecânica (CCPS-AIChE, 1992, p. 7)

Para DHILLON (1982, p.164) os elementos básicos chaves da análise de risco que devem estar presentes em qualquer abordagem são: (1) identificação de perigos potenciais, (2) avaliação dos eventos, sua importância, probabilidade de ocorrência e efeitos e (3) comunicação dos resultados finais para a organização, com a definição das medidas corretivas, prazos, responsabilidades e recursos.

Todas as técnicas de análise de risco são mais completas e efetivas quando conduzidas através de um grupo de pessoas com experiência em segurança, instrumentação, mecânica, elétrica, operação, etc (CCPS-AIChE, 1992, p.12). As avaliações podem ser conduzidas para auxiliar o gerenciamento de riscos de todas as etapas do ciclo de vida do empreendimento, desde sua concepção, projeto, montagem, comissionamento, operação até o seu descomissionamento.

Diante de um cenário cada vez mais rígido por parte dos órgãos reguladores e também pela própria sociedade, que exige que os empreendimentos industriais sejam capazes de minimizar os riscos associados à sua atividade, a avaliação de riscos torna-se uma prática quase obrigatória no processo de licenciamento.

Um bom programa de gerenciamento de riscos proporciona redução no número de acidentes, atenuação das consequências, rapidez nas respostas em emergências, padronização de práticas operacionais, fortalecimento da cultura de segurança e a

transparência no relacionamento com a comunidade e agentes reguladores (CCPS-AIChE, 1992, p.8).

Um acidente deve ser visto como uma sequência de eventos e cada um destes eventos propagadores representa uma oportunidade para interromper a sequência do acidente ou agravamento da severidade dos seus efeitos. O entendimento destas sequências de eventos para potenciais acidentes em uma atividade permite a tomada de decisões para reduzir a frequência e as consequências de suas ocorrências. (CCPS-AIChE, 1992, p.20).

4.2.1. Técnicas de Análise de Risco

As técnicas de análise qualitativa de risco são ferramentas através das quais pode-se obter uma graduação de riscos de uma atividade, processo ou até mesmo uma unidade industrial. Basicamente esse processo de graduação é definido pela composição entre duas variáveis: a frequência de ocorrência e a consequência para cada perigo encontrado. A elaboração dessas categorias é uma tarefa subjetiva e intrínseca a cada avaliação de risco, fato que implica em grandes variações tanto no número de categorias até o que abrange cada uma delas.

As técnicas qualitativas mais conhecidas, resumidamente, são:

- **Análise Preliminar de Perigos ou Risco – APP ou APR**

É uma técnica geralmente usada nas fases de pesquisa e desenvolvimento (P&D), ou projeto conceitual, ou antes da expansão ou modificação de um sistema ou processo, quando as informações ainda são pouco detalhadas no projeto.

É uma técnica qualitativa de análise bem estruturada que fornece uma categorização dos riscos envolvidos em uma atividade. A categorização do risco usualmente é feita através de uma matriz de risco, resultado da severidade do evento (linhas) e da probabilidade ou frequência de ocorrência (colunas). A Figura 15 ilustra bem uma matriz de risco. Nesse caso, as cores são usadas para agrupar os riscos em determinadas categorias. Geralmente, risco alto em vermelho, risco moderado em amarelo e risco baixo em verde.

As categorias de frequência de ocorrência e severidade das consequências variam entre autores e devem ser observados em cada avaliação de risco.

Risco		Frequência				
		A	B	C	D	E
Severidade	IV	M	RA	RA	RA	RA
	III	M	M	M	RA	RA
	II	RB	RB	M	M	M
	I	RB	RB	RB	RB	M

Figura 15 – Exemplo de uma matriz de risco.
Fonte: INB, 2015.

A Tabela 2 apresenta um modelo de formulário para elaboração de uma APR.

Tabela 2 – Modelo de formulário para elaboração de uma APR.

Análise Preliminar de Riscos (APR)								
Empreendimento:								
Processo:								
Perigo	Causa	Detecção/ Salv guarda	Efeito	Freq.	Sev.	Cat. Risco	Recomendações	Cenário

Fonte: Raposo, 2005.

- **Análise de perigos e operabilidade – HAZOP**

A Análise de Perigos e Operabilidade (*Hazard and Operability Analysis*) foi desenvolvida para identificar e avaliar perigos em plantas de processo e também para identificar problemas operacionais que, apesar de não perigosos, comprometem a confiabilidade desejada (CCPS-AIChE, 1992, p.64). Adequada para uso tanto na fase de projeto como na fase operacional de um processo, a técnica usa a combinação sistemática de palavras-guia que são aplicadas a determinados pontos específicos do processo. A combinação é acrescida de parâmetros do processo, resultando na identificação de desvios na operação da planta.

- **Análise de modos e efeitos de falhas – FMEA**

A análise de modos e efeitos de falhas (*Failure Modes and Effects Analysis*) relaciona os modos de falhas de equipamentos e seus componentes com os efeitos provocados sobre o sistema.

É uma técnica sistemática e voltada para o aumento da confiabilidade através da identificação de modos de falha de equipamentos individualmente e os efeitos sobre o sistema. Também é muito usada na melhoria da segurança do processo, e em atividades de manutenção centrada em confiabilidade.

Embora na FMEA possam ser identificados quais os modos de falha que resultam ou contribuem para a ocorrência de acidentes, “a técnica não é eficiente para identificar uma lista extensa de combinações de falhas de equipamentos que resultem em acidentes”. (CCPS-AIChE, p.66).

A Tabela 3 exemplifica um modelo de formulário para elaboração da FMEA.

Tabela 3 – Modelo de formulário para análise FMEA.

FMEA							
Sub-sistema:		Referência:		Data:		Elab.:	
Componentes	Modo de Falha	Efeitos sobre outros componentes	Efeitos sobre sistema	Freq	Sev	Métodos de Detecção	Recomendações

Fonte: Raposo, 2005.

Com uma complementação da FMEA, a análise de modo, efeito e criticalidade das falhas (*Failure Mode Effects and Criticality Analysis – FMECA*) fornece estimativas para frequências de ocorrência dos modos de falhas e para o grau de diversidade dos seus efeitos.

Quando o processo de tomada de decisão sobre risco exigir análises mais detalhadas, os métodos quantitativos deverão ser usados. Nesse caso, temos a chamada análise quantitativa de riscos, conforme o CCPS-AIChE(1992, p.13).

- **Análise por árvore de eventos – AE**

É um método lógico indutivo para a identificação de possíveis consequências de um acidente a partir de um evento iniciador, que pode ser a falha de um equipamento ou um erro humano.

Dependendo da resposta dos sistemas de segurança operacional, treinamentos dos operadores e procedimentos de Emergência, o evento iniciador poderá ou não evoluir para um acidente.

A árvore de eventos (*event tree*) torna-se adequada para sistemas complexos, uma vez que requer um banco de informações amplo e de pessoas com habilidades específicas em análise de segurança. Na técnica de AE, são identificadas possíveis seqüências de acidentes para um dado evento iniciador.

As possibilidades de falha ou sucesso são graficamente representadas em formas de ramos que, em seqüência, formarão a árvore de eventos.

A Figura 16 exemplifica graficamente uma típica AE.



Figura 16 – Árvore de eventos para vazamentos instantâneos de querosene.
Fonte: INB, 2015.

- **Análise por Árvore de Falha – AF**

A análise por árvore de falhas (*Fault Tree Analysis*) é a técnica que permite determinar através de um método dedutivo as causas de um evento topo.

Por ser a técnica aplicada nessa dissertação, esse tópico mereceu um item específico, onde é detalhado a aplicabilidade e o processo de construção e análise por árvore de falhas.

4.2.2. Árvore de Falhas

Segundo LEE et al. (1985), o principal conceito na análise de árvore de falhas é a transformação de um sistema físico em um diagrama lógico estruturado, onde são especificadas as causas que levam à ocorrência de um evento indesejado, chamado de evento topo. É amplamente usada nos campos aeroespacial, eletrônico e nuclear.

A árvore de falhas é a técnica que permite determinar, através de um processo dedutivo, as causas de um evento indesejado, conhecido como evento topo. Seus resultados podem ser direcionados para a confiabilidade de equipamentos e para a segurança do processo. Usa uma estrutura lógica em forma de ramificações com símbolos de álgebra booleana, sendo muito útil na descrição de uma combinação de falhas de um sistema ou erros humanos que contribuam para a ocorrência do evento

topo. Os eventos básicos representam os diversos tipos de falhas de equipamentos, falhas de causa comum e de falhas humanas, cujas combinações suficientes para resultar no evento topo, são denominadas de “cortes mínimos”. Ela pode fornecer resultados qualitativos e quantitativos dependendo da fase de evolução do projeto e do propósito da análise. Se o propósito for apenas o de identificar as falhas que possam ocorrer no sistema, uma avaliação qualitativa será suficiente. De outra maneira, se o propósito for determinar as características de confiabilidade do sistema uma avaliação quantitativa será imprescindível.

A árvore é uma representação gráfica de possíveis combinações de falhas que levam à ocorrência do evento topo e é usada para demonstrar a lógica do modelo (Modarres, 1993).

Apesar de amplamente usada e reconhecida como uma técnica para a análise de segurança em diversos setores da indústria em geral, deve-se observar o que foi apresentando por BOBBIO et al. (2001) e NEIL et al (2007), que a técnica de análise de falhas possui algumas restrições, já que não permite a representação de relações de dependência presentes em alguns sistemas e pelos eventos serem necessariamente binários e estatisticamente independentes.

4.2.3. Cortes Mínimos

Os cortes mínimos são as menores combinações possíveis de eventos básicos cuja ocorrência simultânea leva à ocorrência do evento topo.

A probabilidade de cada corte mínimo neste estudo (assumindo a independência entre os eventos básicos) é obtida pela equação 3.1.

$$C_i = q_1 \times q_2 \times \dots \times q_K \quad (3.1)$$

Onde: C_i é a probabilidade do i -ésimo corte mínimo

q_K = Probabilidade de ocorrência do k -ésimo evento básico do corte mínimo.

A partir dos valores de probabilidade de cada corte mínimo (C_i) é obtida a probabilidade P de ocorrência do evento topo usando um dos três métodos descritos nas aproximações abaixo. (USNRC, 2011a)

Aproximação do Evento Raro:

Essa aproximação considera que a soma de todos os cortes representa a exata probabilidade da árvore de falhas. É calculada segundo a equação 3.2 (USNRC, 2011a)

$$P = \sum_{i=1}^n C_i \quad (3. 2)$$

Onde: P é a indisponibilidade do sistema

C_i é a probabilidade do i-ésimo corte mínimo

N = O número de cortes mínimos

Aproximação da Cota Superior

A equação 3.3 calcula a probabilidade de união dos eventos de cortes mínimos da árvore de falhas correspondente. (USNRC, 2011a)

$$P = \prod_{i=1}^n (1 - C_i) \quad (3. 3)$$

Onde: P é a indisponibilidade do sistema

C_i é a probabilidade do i-ésimo corte mínimo

n = O número de cortes mínimos

Quando valores dos caminhos críticos (C_i) são muito pequenos (da ordem de $1E-15$), $1-C_i$ é aproximadamente 1,0. Se isso acontece para a maioria dos C_i 's, o produto da equação 3.3 será muito grande e a probabilidade muito pequena. Embora, na teoria, a probabilidade seja um limite superior, na prática, não é calculada com precisão quando os cortes mínimos são muito pequenos. Nesses casos, a aproximação pelo evento raro é considerada a melhor opção.

Quantificação por inclusão-exclusão ou min-max

Calcula a indisponibilidade do sistema, através da equação 3.4, usando o algoritmo exato para quantificação de probabilidades. Representa a probabilidade de união de todos os cortes mínimos do sistema. Executa as seguintes etapas: Adição dos cortes mínimos, subtração das combinações 2 a 2 dos cortes mínimos, adição das combinações 3 a 3 dos cortes mínimos e assim sucessivamente. (USNRC, 2011a)

$$P = \sum_{i=1}^n P(C_i) - \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} P(C_i \cap C_j) + \dots + (-1)^{n-1} * P(C_1 \cap C_2 \cap \dots \cap C_n) \quad (3. 4)$$

Onde: P é a indisponibilidade do sistema

C_i é a probabilidade do i-ésimo corte mínimo

n = O número de cortes mínimos

4.2.4. Medidas de Importância de Árvores de Falhas

A análise das medidas de importância fornece informações valiosas sobre os eventos básicos que aparecem nos cortes de uma árvore de falhas, pois componentes com alto grau de importância necessitam de acompanhamento detalhado na operação da mina para evitar desgaste/falha ao longo do tempo ou necessitam de mudanças no projeto do componente.

As medidas de importância mais usuais são: Fussell-Vesely, taxa de redução de risco, intervalo de redução de risco, taxa de aumento de risco, intervalo de aumento de risco, Birnbaum. (USNRC, 2011a)

4.2.4.1. Importância de Fussell-Vesely (FV)

É uma indicação percentual da contribuição de cada evento básico em relação a probabilidade do evento topo. É calculada pela equação 3.5 (USNRC, 2011a).

$$FV_i = F(i)/F(x) \quad (3.5)$$

Onde: F(i) = soma da probabilidade de todos os corte mínimos contendo o i-ésimo evento básico.

F(x) = corte mínimo avaliado com a probabilidade do evento básico em seu valor médio.

4.2.4.2. Taxa de Redução de Risco (RRR) e Intervalo de Redução de Risco (RRI)

É uma indicação de quanto o corte mínimo reduz, se a probabilidade do evento básico for reduzida a zero, ou seja, como se o componente nunca falhasse. A taxa de redução é calculada pela equação 3.6 e o intervalo de redução de risco pela equação 3.7 (USNRC, 2011a).

$$RRR = F(x)/F(0) \quad (3.6)$$

$$RRI = F(x) - F(0) \quad (3.7)$$

Onde: $F(x)$ = Corte mínimo original

$F(0)$ = Corte mínimo com a probabilidade do evento básico considerado igual a 0,0.

4.2.4.3. Taxa de Aumento do Risco (RIR) ou Intervalo de Aumento de Risco (RII)

É uma indicação de quanto o corte mínimo aumenta, se a probabilidade do evento básico for considerada 1, ou seja, como se o componente sempre falhasse. A taxa de aumento é calculada pela equação 3.8 e o intervalo de redução de risco pela equação 3.9 (USNRC, 2011a).

$$\mathbf{RIR = F(1)/F(x)} \quad \mathbf{(3. 8)}$$

$$\mathbf{RRI = F(1) - F(x)} \quad \mathbf{(3. 9)}$$

Onde: $F(x)$ = Corte mínimo original

$F(1)$ = Corte mínimo com a probabilidade do evento básico considerado igual a 1,0.

4.2.4.4. Importância de Birnbaum (B)

É uma indicação da sensibilidade da probabilidade do evento topo em relação a um determinado evento básico. É calculado pela equação 3.10 (USNRC, 2011a).

$$\mathbf{B = F(1) - F(0)} \quad \mathbf{(3. 10)}$$

Onde: $F(1)$ = Corte mínimo com a probabilidade do evento básico considerado igual a 1,0.

$F(0)$ = Corte mínimo com a probabilidade do evento básico considerado igual a 0,0.

4.2.5. Incertezas na Probabilidade dos Eventos Básicos em Árvore de Falhas

Os valores dos dados de falhas e reparos disponíveis em banco de dados nem sempre trazem a realidade exata do dado de falha de um componente particular, ou evento básico, pois muito deles estão associados à experiência prévia dos operadores e outros julgamentos que podem tornar difícil o processo de quantificação com árvore de falhas. A determinação de um dado de falha e reparo particular pode tornar-se um

exercício complexo para a escolha de um valor de probabilidade ou de uma melhor estimativa. Parece que, a menos que se possam adotar valores realísticos de probabilidade (taxas de falha, etc.) com algum grau de confiança para os eventos básicos, o resultado do evento topo poderá representar algo de particular significância.

O uso de distribuição de probabilidades para os eventos básicos representam informações mais realistas e compatíveis com os níveis de informação disponíveis, produzindo indicações mais realísticas para os resultados do evento topo. Isto deverá permitir a obtenção de melhores resultados de tomada de decisão em áreas de gerenciamento de risco e de confiabilidade.

4.2.5.1. Método de Monte Carlo

Segundo KAMAT e RILEY (1975), a simulação de Monte Carlo pode ser utilizada, com relativa facilidade, para encontrar a confiabilidade de um sistema complexo. Este método de cálculo de probabilidade é baseado em simulações aleatórias, sendo de fácil compreensão, apresenta boa precisão, é de fácil implementação computacional e amplamente utilizado nas mais diversas situações e áreas de conhecimento como, por exemplo, engenharia, física, finanças, administração, economia. A Simulação de Monte Carlo envolve a geração de um grande número de valores randômicos para cada variável aleatória. A partir destes valores, a função de comportamento é avaliada e então seus resultados são observados (JACOBONI e REGGIANI, 1983). As saídas de um processo de modelagem e simulação de Monte Carlo incluem itens como: (i) uma distribuição para cada variável de saída; (ii) uma listagem de sensibilidade das variáveis chaves ordenadas segundo sua correlação com a variável de saída; (iii) vários gráficos e resumos estatísticos que caracterizem os resultados simulados. Ressalta-se ainda que a simulação de Monte Carlo não fornece como resultado uma recomendação explícita para se tomar uma decisão e sim um detalhamento para as possibilidades de resultado através de uma distribuição de frequência. Dependendo da natureza do problema, diferentes distribuições de probabilidade podem ser utilizadas para as variáveis independentes. Pode-se utilizar distribuições como: Normal, Log-Normal, Exponencial, Triangular, Weibull e Uniforme (JACOBONI e REGGIANI, 1983).

4.3. Engenharia de Confiabilidade

A confiabilidade é definida por LEES (1991, p.80) como sendo “a probabilidade que um item desempenhe uma função requerida sob certas condições por um determinado período de tempo”. Esse conceito é amplamente difundido na engenharia de confiabilidade.

A função da engenharia da confiabilidade é criar e desenvolver requisitos necessários de confiabilidade para o sistema, estabelecer um programa de confiabilidade adequado, e executar análises de confiabilidade apropriadas e tarefas que assegurem que o sistema atenderá aos requisitos estipulados.

Dependendo do enfoque adotado na engenharia de confiabilidade, é possível obter informações importantes a respeito de otimização, desempenho de sistemas e equipamentos, tomadas de decisão, segurança industrial e riscos, levando à implantação de melhorias em todas as fases de um projeto, com um custo-benefício bastante interessante. Especificamente, quando o enfoque adotado envolve a indisponibilidade de sistemas de segurança industriais, essa passa a ter enorme integração com atividades de análise, avaliação e gerenciamento de riscos.

Sob esse enfoque, o conceito de confiabilidade está diretamente relacionado com a segurança industrial, uma vez que o mau desempenho ou a falha da função requerida resulta em consequências que podem causar danos ou morte de pessoas, violações de requisitos ambientais, ocupacionais e outros. Um dos objetivos principais da confiabilidade é reduzir a frequência ou severidade de falhas em sistemas.

Segundo os comentários de BILLINTON e ALLAN (1992) “técnicas de análise de confiabilidade podem atender ao objetivo de avaliação probabilística de riscos e ajudar em quantificá-los, não somente pela severidade, mas também pela frequência”. MOUBRAY (1992, p.64) relata que a avaliação destas consequências não deve se referir apenas aos empregados, mas também deve incorporar os clientes e a comunidade em geral.

Já DHILLON (1982, p. 160) mostra que as disciplinas que contribuem para a efetividade de um sistema (confiabilidade, segurança, fatores humanos, qualidade, manutenibilidade e engenharia de valor) devem manter uma relação de integração entre si.

A análise de confiabilidade está associada à investigação do potencial de falha do sistema e à avaliação das consequências dessas falhas.

4.3.1. Indisponibilidade de Componentes

Para confiabilidade, os sistemas ou componentes podem ser classificados como: a) reparáveis, b) não-reparáveis e c) os testados periodicamente ou de reserva (FILHO, 2007).

a) Componentes Reparáveis são aqueles em que toda a falha é detectada exatamente no instante de sua ocorrência e imediatamente após é iniciado um processo de restauração (reparo) do componente afetado. Também chamados de componentes sujeitos à mudança de estados reversíveis, monitorados, on-line, etc. Na prática, esta situação é usada para modelar componentes que operam continuamente ou aqueles que possuem um alto grau de monitoração. São genericamente conhecidos como componentes reparáveis (FILHO, 2007).

Considerando que as distribuições de falhas e reparos do componente são exponenciais, isto é, taxa média de falha λ e tempo médio de reparo τ constante com a variação do tempo, a indisponibilidade é calculada pela equação 3.11 (USNRC, 2011, p.56).

$$P = ([\lambda * \tau])/[1 + \{\lambda * \tau\}] * (1 - \text{Exp}[-(\lambda + 1/\tau) * Tm]) \quad (3. 11)$$

Onde: λ = taxa média de falha

Tm = tempo de missão

τ = tempo médio de reparo

b) Componentes Não-Reparáveis são aqueles que, ao sofrerem uma falha continuarão no estado falho até o restante do tempo de interesse da análise (tempo de missão - Tm). Também chamados de componentes sujeitos à mudanças de estado irreversíveis, de missão, descartáveis etc (FILHO, 2007).

Considerando a distribuição de falhas do componente exponencial, isto é, taxa de falha λ constante, a probabilidade de falha de um componente não-reparável é dada pela equação 3.12 (USNRC, 2011, p.56).

$$P = 1 - \text{Exp}(-\lambda * Tm) \quad (3. 12)$$

Onde: λ = taxa média de falha

Tm = tempo de missão

c) Componentes Testados Periodicamente ou de reserva são os sistemas de proteção e segurança que normalmente são acionados em uma condição de emergência ou uma eventual anormalidade do sistema. São conhecidos como componentes sujeitos a mudanças de estado parcialmente reversíveis, de proteção, reserva, etc. (FILHO, 2007).

Em confiabilidade, durante o período em que o sistema está inativo os seus componentes estão em uma condição semelhante a de componentes não-reparáveis, isto é, se sofrerem uma falha, esta não será reparada, pois, não se pode reparar um componente que não se sabe que está falho.

Desta forma, se nada for feito, a nossa avaliação da indisponibilidade dos componentes segue a mesma evolução temporal dos componentes não-reparáveis mostrado anteriormente. Em pouco tempo, o sistema estaria completamente indisponível devido a falhas não reveladas dos seus componentes. (FILHO, 2007).

Mesmo os mais sofisticados sistemas de proteção apresentariam uma indisponibilidade não aceitável após uns poucos anos. Para evitar este crescimento contínuo da indisponibilidade, tais sistemas são submetidos a testes periódicos, para que se possa conhecer o estado real do sistema e reparar os componentes cujas falhas tenham ocorrido (FILHO, 2007). A prática de realização de testes periódicos de sistemas de proteção é, portanto, fundamental para a garantia da disponibilidade deste tipo de sistema, contribuindo para manter a frequência de acidentes na instalação dentro de padrões aceitáveis.

Considerando que o teste é realizado instantaneamente, ou seja, a duração do tempo é desprezada e que o reparo da falha também é instantâneo, ou seja, o componente é reparado imediatamente pode-se efetuar o cálculo da indisponibilidade através da equação 3.13 (USNRC, 2011, p.57).

$$P = 1 + (Exp[-\lambda * \tau] - 1)/(\lambda * \tau) \quad (3. 13)$$

Onde: λ = taxa média de falha

τ = Intervalo entre testes

4.3.2. Falhas de Causa Comum – Modelo Fator Beta

Falhas de causa comum podem ser definidas como aquelas que, quando ocorrem, afetam mais de um componente. Portanto, quando um componente falha devido à uma falha de causa comum, outro ou vários componentes podem também falhar. O Modelo do Fator Beta é um dos modelos de parâmetro simples mais

utilizados na análise de causa comum. Modelos de parâmetro simples são aqueles que usam um parâmetro além da probabilidade de falha total do componente para o cálculo das falhas de causa comum (MODARRES, 2006).

No Modelo do Fator Beta, uma fração (β) da taxa de falha do componente pode ser associada aos eventos de causa comum compartilhados pelo outro componente do mesmo grupo. De acordo com este modelo, sempre que uma falha de causa comum ocorre, todos os componentes do grupo (dentro do grupo de causa comum) falham.

$$\beta = \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \lambda_c} \quad (3.14)$$

Onde: λ_i = probabilidade de todas as falhas independentes

λ_c = probabilidade de todas as falhas de causa comum

4.3.3. Confiabilidade Humana - Modelo SPAR

De acordo com HOLLNAGEL(1998) a expressão confiabilidade humana é definida como a probabilidade de que uma pessoa execute corretamente alguma atividade exigida pelo sistema durante um determinado período de tempo (se o tempo for um fator limitante) sem realizar outra atividade que possa degradar o sistema. Historicamente, o que levou ao desenvolvimento de um conjunto de métodos/metodologias/técnicas ligados à análise de confiabilidade humana (ACH) foram a necessidade de descrever as possíveis e/ou prováveis ações humanas incorretas e seu impacto na APS.

A ACH é uma ferramenta utilizada para melhorar o desempenho humano e estimar a confiabilidade humana, ao fornecer informações tanto qualitativas, quanto quantitativas. Além disso, incorporam fatores ligados à ergonomia, fatores sócio-técnicos e cognitivos.

A metodologia SPAR-H começou a ser desenvolvida em 1994 pelo *Idaho National Laboratory* para a U.S. Nuclear Regulatory Commission, com o objetivo de ser uma abordagem fácil de ser utilizada e que permitisse o desenvolvimento de modelos probabilísticos de avaliação da confiabilidade humana em centrais nucleares.

É uma metodologia de segunda geração que integra o conhecimento e as informações advindas da ergonomia cognitiva, modelos cognitivos e tomadas de decisão. Segundo GERTMAN et al. (2004) essa metodologia decompõe a probabilidade de falha humana em duas categorias:

Falhas de diagnóstico (fase cognitiva) com probabilidade de erro genérica igual a 0,01.

Falhas de execução (fase de ação) com probabilidade de erro genérica igual a 0,001.

A revisão da literatura revela oito fatores de desempenho humano operacionais, que estão associados com a operação de usinas nucleares e que podem ser generalizados para qualquer outra atividade equivalente. Estes fatores operacionais podem estar diretamente associados ao modelo do desempenho humano, considerando as influências ergonômicas e cognitivas.

Esses fatores são:

- 1) Tempo disponível
- 2) Estresse e estressores
- 3) Complexidade
- 4) Experiência e treinamento
- 5) Procedimentos
- 6) Ergonomia e interface Homem-Máquina
- 7) Aptidão para o serviço
- 8) Processos de trabalho

Cada um dos fatores de desempenho pode ser modificado individualmente e apresentar quantidades diferentes de subníveis. Dentro dos diferentes fatores de desempenho cada subnível pode apresentar pesos diferentes a fim de determinar o valor do fator de desempenho que será multiplicado pela probabilidade de erro genérico de cada fase (0,01 para fase cognitiva e 0,001 para fase de ação). Esse raciocínio é válido tanto para fase cognitiva quanto para a fase de ação.

A probabilidade de erro humano total será dada pela soma da probabilidade obtida na fase cognitiva e na fase de ação.

Em suma, a metodologia consiste em:

- 1) Decompor as probabilidades em contribuições de falhas na ação ou falhas no diagnóstico, que podem ocasionar eventos de falha humana (EFH)
- 2) Avaliação do contexto associado com os eventos de falha humana (EFH) usando os fatores de desempenho humano (FDH)
- 3) Uso de Probabilidades de Erro Humano (PEH) definidas no método e de fatores de desempenho humano (FDH) selecionados pelo analista. Os FDHs aplicados às PEHs alteram os valores das mesmas.

4.4. Software Utilizado

O software usado para a análise do sistema foi o *Systems Analysis Programs for Hands-on Integrated Reliability Evaluations* (SAPHIRE) em sua versão 8.01 (USNRC, 2011a). Esse software foi desenvolvido pelo *Idaho National Laboratory* (INL) em parceria com o órgão regulador das atividades nucleares americanas a *U.S. Nuclear Regulatory Commission* (USNRC) e é muito usado em análises probabilísticas de segurança (APS). Ele permite aos usuários fornecer dados para os eventos básicos, criar e quantificar árvores de falhas e eventos, realizar análises de incertezas e gerar relatórios. Nesse sentido, analistas podem realizar APS para quaisquer sistemas complexos, instalações ou processos. (USNRC, 2011, p. 1)

Para todos os eventos básicos, o programa amostra aleatoriamente os valores de taxa de falha (λ) a partir de suas distribuições de incerteza, usando estes valores para calcular a probabilidade do evento topo. Pelo método de Monte Carlo (KAMAT e RILEY (1975) esse cálculo é repetido centenas ou milhares de vezes e dessa forma é obtida a distribuição de incerteza do sistema. O valor médio da distribuição é a melhor estimativa da probabilidade do evento topo, e a dispersão fornece a incerteza nesta probabilidade.

O software traz uma série de rotinas e modelos de cálculo de probabilidades para eventos de causa comum, como por exemplo, o modelo do fator-beta, modelos de múltiplos parâmetros (fator-alpha, múltiplas letras gregas, etc) e também modelos de cálculo de probabilidade de erro humano (metodologia SPAR-H). Apresenta também diferentes métodos de cálculo para probabilidade de eventos dependendo do modelo adotado para o componente (USNRC, 2011a).

CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DO SISTEMA

5.1. Geral

Este trabalho visa analisar a indisponibilidade do sistema de ventilação principal da mina subterrânea de urânio da INB, fornecendo a probabilidade de falha do evento topo, estimativas de desempenho do sistema e identificação dos pontos fracos.

O evento topo analisado corresponde à falha simultânea das duas centrais de exaustão de ar da mina subterrânea. Para isso, consideraram-se os efeitos de falhas de equipamentos, falhas humanas e de causa comum oriundas dos subsistemas elétrico, instrumentação e controle, automação e mecânico.

Em uma análise mais profunda, verificou-se o comportamento do sistema considerando o sistema com componentes reparáveis e em seguida com componentes sem reparo. A escolha dessas duas configurações tem como objetivo principal mostrar a importância da gestão de ativos para a segurança e a confiabilidade de um sistema.

Foram realizadas também análises de incertezas e de medidas de importância para ambos os casos.

A árvore de falhas foi a técnica escolhida como a ferramenta adequada, pois, além de ser muito usada em estudos de confiabilidade, principalmente nos setores aeroespacial e nuclear, é capaz de fornecer os resultados desejados.

Neste trabalho foram adotadas algumas premissas importantes para as análises de confiabilidade realizadas, tais como:

- O dimensionamento dos equipamentos está consoante com as especificações técnicas e as suas respectivas normas;
- As falhas oriundas de qualquer uma das 5 subestações móveis no subsolo serão rapidamente solucionadas pelos seus respectivos sistemas de proteção e não ocasionarão efeito cascata desligando o QDMT-8411 e a subestação a montante (SE-810), conforme o diagrama de blocos da Figura 17;
- Para atender à necessidade de produção da mina, o regime de trabalho deverá ser de 4 (quatro) turnos/dia, 6h/turno, 7 dias por semana e 365 dias por ano.

5.2. O Sistema Analisado

O sistema elétrico completo é composto de diferentes interfaces, e foi dividido em dois sistemas: o sistema elétrico externo, que compreende a linha de transmissão e a subestação da concessionária de energia que é responsável por fornecer toda a energia usada no complexo industrial de Caetité, e o sistema elétrico interno que compreende todo o sistema de distribuição interna de energia responsável por atender a mina subterrânea.

Essa divisão facilita o entendimento do sistema e pode ser melhor compreendida através do diagrama de blocos representado na Figura 17.

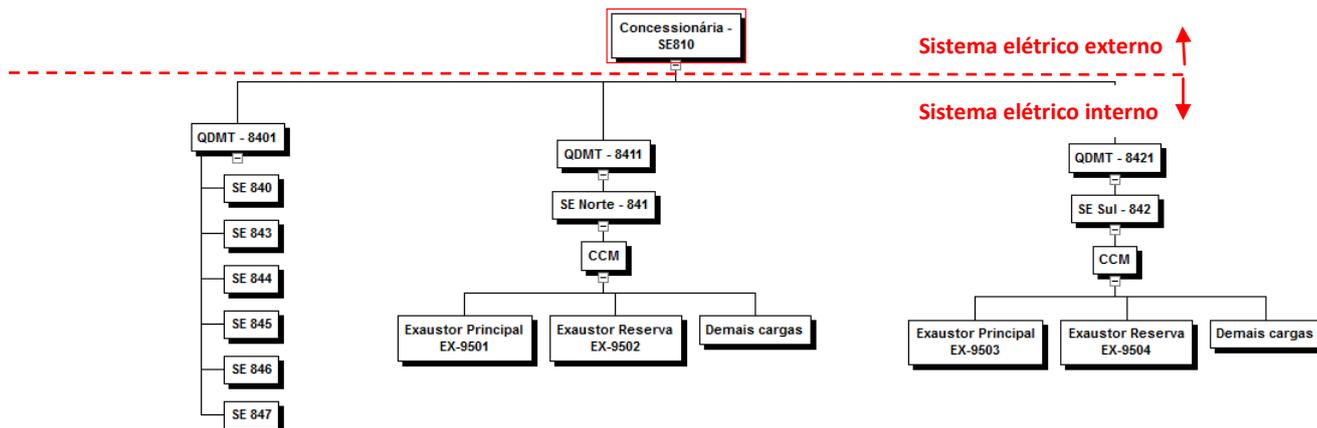


Figura 17– Diagrama de blocos do sistema elétrico.

5.2.1. Sistema Elétrico Externo

O sistema elétrico externo é a fonte primária de energia para todas as cargas da mina e é composto pela linha de transmissão e a subestação da concessionária que rebaixa a tensão da linha de transmissão de 34,5KV para 13,8KV.

Por se tratar de um sistema de extrema importância para a segurança operacional da mina e também para a saúde dos trabalhadores, foram calculados alguns índices de confiabilidade.

A concessionária de energia local (COELBA) forneceu informações sobre as interrupções no fornecimento durante os últimos cinco anos, compreendendo o período entre 2010 e 2014. Os indicadores de confiabilidade foram calculados com base nessas informações e nas seguintes premissas:

- Taxa de falhas constante (distribuição de falhas exponencial);
- Falha foi qualquer evento que ocasionou interrupção independente da sua duração.

A Tabela 4 contém os dados das interrupções fornecidos pela concessionária e descreve o mês da ocorrência, a duração, a data e a hora de início e fim do evento.

Tabela 4– Dados das interrupções da linha de transmissão, de 2010 a 2014.

Data	Duração	Início	Hora1	Fim	Hora2
mar/10	4:07:15	13/03/2010	4:52	13/03/2010	9:00
mar/10	9:25:00	28/03/2010	7:00	28/03/2010	16:25
mai/10	0:00:11	07/05/2010	13:40	07/05/2010	13:40
mai/10	6:24:16	11/05/2010	8:55	11/05/2010	15:20
mai/10	1:22:38	18/05/2010	11:01	18/05/2010	12:24
mai/10	4:17:51	23/05/2010	6:09	23/05/2010	10:27

ago/11	2:37:48	14/08/2011	5:50	14/08/2011	8:28
ago/12	5:02:00	14/08/2012	9:03	14/08/2012	14:05
out/12	2:13:00	25/10/2012	23:14	26/10/2012	1:27
nov/12	1:08:30	06/11/2012	11:31	06/11/2012	12:40
mar/13	1:53:00	19/03/2013	0:25	19/03/2013	2:18
abr/13	0:00:00	10/04/2013	16:54	10/04/2013	16:54
jul/13	5:37:58	02/07/2013	7:07	02/07/2013	12:45
ago/13	0:58:10	28/08/2013	15:08	28/08/2013	16:06
set/13	10:47:28	01/09/2013	15:46	02/09/2013	2:33
set/13	6:24:19	24/09/2013	19:04	25/09/2013	1:29
out/13	0:07:04	21/10/2013	15:11	21/10/2013	15:19
out/13	0:02:02	21/10/2013	15:33	21/10/2013	15:35
nov/14	02:32:01	14/11/2014	20:51	14/11/2014	23:23
nov/14	01:38:14	16/11/2014	13:46	16/11/2014	15:24
nov/14	04:41:51	17/11/2014	09:23	17/11/2014	14:05
TOTAL	71:20:36				

Fonte: COELBA

Algumas destas interrupções foram ocasionadas por fatores externos à concessionária, como queimadas, falhas no sistema de geração e ou transmissão, além de operações para alívio de carga em dias considerados críticos pela ANEEL.

O número de interrupções ao longo do período observado não apresenta uma evolução contínua, apresentando valores elevados em alguns anos e menores no ano seguinte, tendência essa que pode ser visualizado na Figura 18.

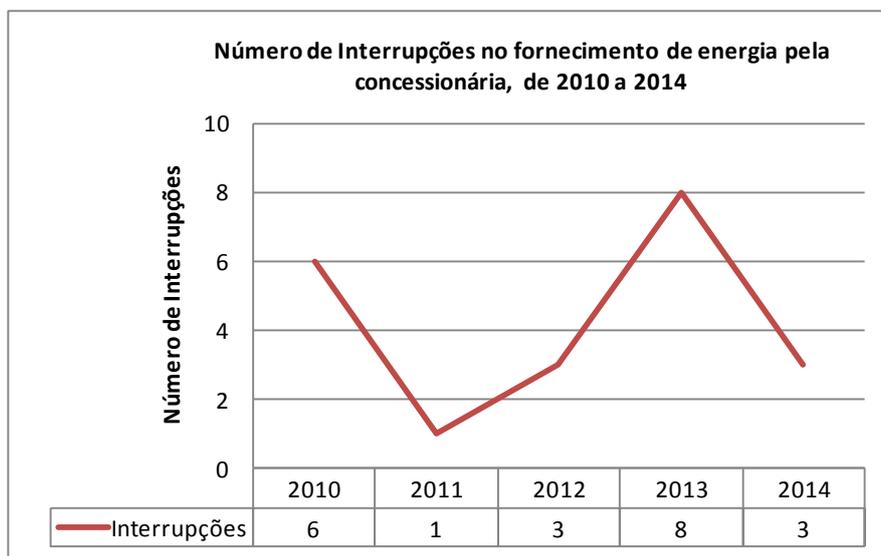


Figura 18 – Número de interrupções da concessionária, de 2010 a 2014.
Fonte: COELBA

Interpretando os dados que foram fornecidos, foi elaborado o histograma da Figura 19 que apresenta o número de vezes que a linha de transmissão analisada teve

interrupções em função das respectivas durações, ao longo dos últimos cinco anos. Pode-se observar que na linha acumulada (vermelha) aproximadamente 40% das interrupções no fornecimento tiveram menos de 2 horas de duração e que interrupções de até 4 horas representam pouco menos de 60%.

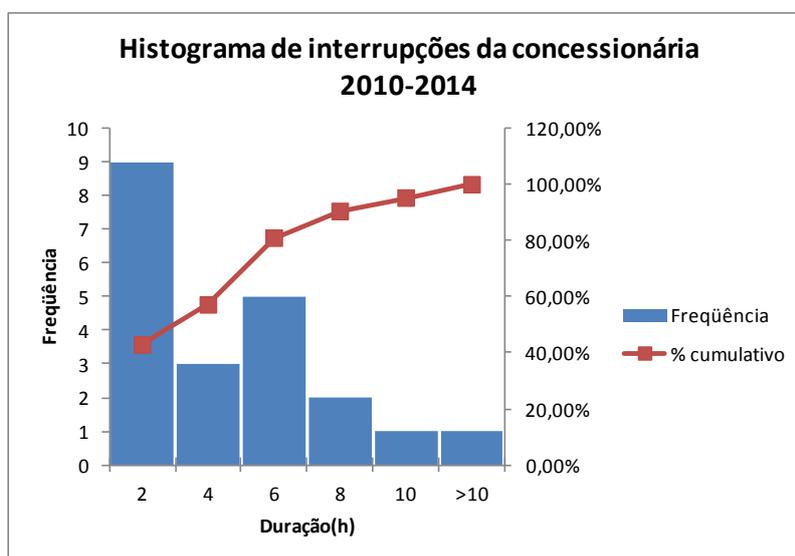


Figura 19 – Histograma do número de interrupções em função das respectivas durações, de 2010 a 2014.

Fonte: COELBA

Com base nos dados fornecidos pela COELBA, os indicadores de confiabilidade da linha de transmissão foram calculados e os resultados estão na Tabela 5.

Tabela 5 – Indicadores de confiabilidade do sistema elétrico externo.

Indicador	Valor	Unidade
MTTF	2085,71	h
Taxa de falha	0,00048	Falha/h
MTBF	2082,32	h
MTTR	3,40	h
Desvio Padrão do MTTR	3,06	h
Disponibilidade	99,84	%

5.2.2. Sistema Elétrico “Interno” da Mina Subterrânea

Conforme detalhado em INB (2011a) está prevista a instalação de oito subestações para atender o desenvolvimento e lavra da mesma. Serão dois tipos de subestações: os eletrocentros fixos, que serão subestações montadas em contêineres e instaladas sobre bases no piso, e as subestações móveis.

Das oito subestações previstas no projeto elétrico, três serão instaladas na superfície, sendo a subestação SE-840 e as duas outras que alimentarão as centrais de exaustão, chamadas de subestação chaminé norte (SE-841) e subestação chaminé sul (SE-842). As cinco demais serão instaladas em subsolo, sendo três fixas nos subníveis 780 (SE-843), 674 (SE-844) e 612 (SE-845) e duas móveis (SE-846 e SE-847). A Figura 17 identifica todas essas subestações.

A rede elétrica de 13,8 KV existente alimentará o quadro de distribuição de média tensão, que distribuirá a energia para a SE-840 e também para as subestações no subsolo. As subestações SE-841 e SE-842 terão fonte de alimentação independente das demais, que será proveniente de uma derivação na rede elétrica interna de distribuição oriunda da SE-810. Cada subestação no interior da mina será equipada com um transformador de força com potência de 500kVA para rebaixar a tensão de 13,8kV para 440V. Esses transformadores irão alimentar os quadros de distribuição de baixa tensão, que alimentarão os motores e as demais cargas. Também está previsto um sistema de iluminação de emergência do tipo autônomo, com autonomia mínima de 3 horas, em que o sistema atua automaticamente quando ocorre a falta de energia. O projeto prevê ainda a instalação de três conjuntos de grupos geradores com potência de 300 kVA e tensão de 440 V, sendo um para cada central de exaustão e o outro para alimentação da subestação 840.

A Tabela 6 fornece as principais características do sistema elétrico interno da mina, mostrando as tensões e as potências dos principais sistemas e equipamentos elétricos.

Tabela 6 - Características das instalações elétricas.

TENSÃO	Volts (V)
Tensão de Fornecimento	13800
Tensão do Motores	440
Tensão de Iluminação	220
Tensão de Controle no CCM (Vcc)	24
POTÊNCIA	KVA
Geradores de Emergência	300
Transformadores das subestações móveis	600
Transformadores das demais subestações	500
Motores dos Exaustores	300

O Apêndice A apresenta o diagrama unifilar do sistema elétrico responsável por fornecer toda a energia elétrica necessária para suprir as necessidades da mina subterrânea.

5.2.3. Sistema de Ventilação Principal da Mina Subterrânea

5.2.3.1. Determinação do Volume Total de Ventilação da Mina

A Norma Regulamentadora 22 – Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração (MTE, 2014) no seu item 22.24.8 – Ventilação em Atividades de Subsolo determina a metodologia de cálculo para a vazão de ar fresco nas frentes de trabalho. O cálculo da vazão é baseado em três condições que variam em função do número máximo de pessoas ou máquinas com motores a combustão a óleo diesel, ou em função do consumo de explosivos ou em função da tonelagem mensal desmontada, devendo prevalecer a vazão que for maior.

No caso da mina de urânio, foi incluída uma condição extra, não existente na norma, que é em função da emissão de radônio. Segundo INB (2011), os estudos realizados determinaram como necessário uma vazão mínima de 59,7 m³/s de ar para garantir as concentrações de filhos de radônio abaixo do nível de registro (857 NJ/m³).

Conforme preconizado na MTE (2014), a vazão de ar fresco na mina foi dimensionada em função do número máximo de pessoas ou máquinas com motores a combustão a óleo diesel, pois foi o cálculo que apresentou maior valor de vazão, em torno de 224,9 m³/s. Essa vazão é suficiente para a diluição dos gases de radônio e de filhos de radônio.

Outros requisitos da MTE (2014) devem ser observados para que as condições estabelecidas pelo Ministério do Trabalho e Emprego não sejam violadas. Um desses requisitos é que a velocidade do ar no subsolo não deve ser inferior a 0,2 m/s e nem superior à média de 8 m/s onde haja circulação de pessoas. Os casos especiais que demandem o aumento do limite superior devem ser analisados pelo MTE.

5.2.3.2. O Funcionamento do Sistema de Ventilação Principal da Mina

Segundo as informações presentes em INB (2014), o sistema de ventilação deverá suprir de ar a mina, fazer a renovação contínua deste, diluir de forma eficaz todos os gases inflamáveis ou nocivos e exauri-los, manter os níveis de poeira, temperatura e umidade relativa do ar, adequados ao trabalho humano e ser mantido e operado de forma regular e contínua, conforme descrito na MTE (2014) em seu item 22.24.1.

O princípio de funcionamento do sistema de ventilação principal adotará o princípio de conduzir o ar fresco para o interior da mina e posteriormente para todas as frentes de serviço, travessas e subníveis, através da rampa na superfície. (INB, 2014)

O projeto de ventilação principal da mina foi calculado para uma vazão de 226 m³/s de ar fluindo para a mina subterrânea. O fluxo constante de ar irá para o interior da mina via rampa e chaminé de adução e o ar viciado será exaurido pelas chaminés de exaustão que serão construídas nas extremidades dos corpos de minério 1 e 3. Nas varações das chaminés de exaustão junto à superfície serão instaladas as centrais de exaustão de ar. Em cada central de exaustão, serão instalados dois exaustores idênticos com as mesmas características operacionais. O segundo equipamento atuará com exaustor reserva e de emergência, acionando sempre que houver qualquer paralisação do exaustor principal, assegurando assim a normalidade do fluxo de ventilação principal da mina. Este equipamento será instalado em paralelo com a unidade de exaustor principal, restrito a uma unidade em cada chaminé de exaustão varada na superfície. Os exaustores em operação forçarão a corrente de ar a entrar para a mina através da rampa principal e da chaminé de adução (saída de emergência), ventilar as frentes de trabalho e retornar à superfície através das chaminés de exaustão. O sistema auxiliar, insuflará o ar que será captado na rampa principal e usado nas frentes em desenvolvimento por meio de ventiladores auxiliares e dutos de ventilação (INB, 2014).

A qualidade do ar captado na superfície para fazer a ventilação da mina subterrânea depende diretamente das concentrações de radônio e de filhos do radônio originados nas fissuras das rochas da mina a céu aberto e nas paredes da mina subterrânea. Estudos (modelagem), amostragens de radônio e de filhos de radônio realizadas no emboque¹ da rampa de acesso à mina subterrânea e medidas de exalação de radônio, demonstraram que é necessária uma vazão mínima de 59,7 m³/s de ar para garantir as concentrações de filhos de radônio abaixo do nível de registro (857 NJ/m³) (INB, 2011).

No desenvolvimento da mina subterrânea serão usados dois sistemas de ventilação, o principal, aplicado nas atividades de lavra, e o auxiliar, aplicado nos desenvolvimentos da mina. O sistema de ventilação principal da mina subterrânea consistirá, essencialmente, de:

a) 02 (duas) chaminés de exaustão nas extremidades dos corpos mineralizados;

¹ Parte primeira e principal de uma mina subterrânea, túnel ou caverna.

b) 02 (dois) ventiladores de exaustão (ou exaustores) em cada chaminé de exaustão, sendo um de reserva, posicionados na variação de cada chaminé;

c) 01 chaminé de adução entre os corpos 1 e 3 que interligará todos os subníveis através das respectivas travessas de adução;

d) Rampa de acesso que interligará todos os subníveis através das travessas de acesso aos respectivos subníveis;

e) Portões instalados em locais estratégicos dos subníveis e ou travessas de acessos aos subníveis, de modo a distribuir a vazão de ar e reduzir ao máximo as perdas de ar na mina subterrânea. Por exemplo, após o desenvolvido um subnível, este será fechado com portões que impedirão a passagem de pessoas e do fluxo de ar, de modo que não competirão na ventilação dos demais subníveis.

O sistema de ventilação principal promoverá o seguinte circuito de ventilação:

- Adução passiva de ar pelo emboque (ponto de entrada) da mina subterrânea, com uma maior vazão de ar, e pela chaminé de adução, com uma menor vazão de ar;

- Entrada do fluxo de ar em um subnível através da travessa de acesso ao respectivo subnível e pela chaminé de adução através da travessa de adução do respectivo subnível. Parte do volume de ar que adentrará este subnível será exaurida pelo poço de exaustão do corpo 1 e a parte restante pelo poço de exaustão do corpo 3.

A Figura 20 ilustra, de modo esquemático, o sistema de ventilação principal da mina com a abertura de 10 (dez) subníveis, de onde serão lavrados os corpos de minério, denominados Corpo 1 e Corpo 3.

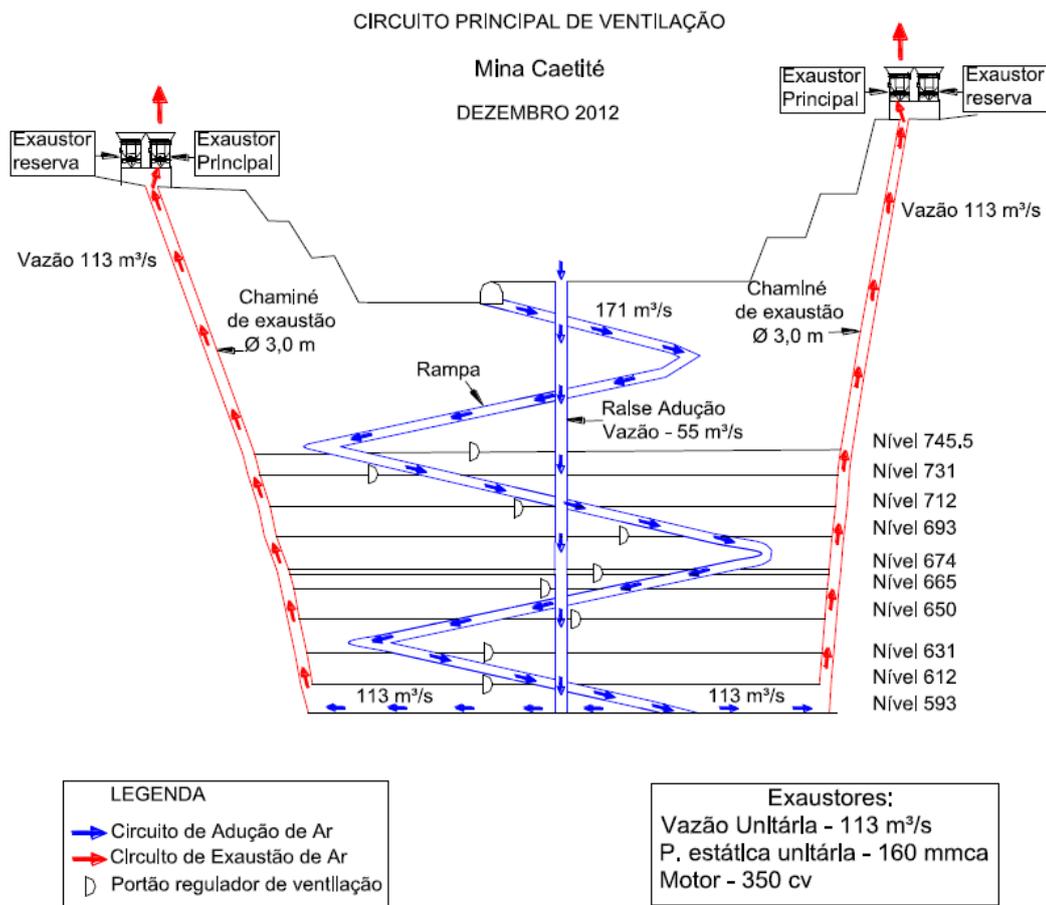


Figura 20 - Sistema de Ventilação Principal.
Fonte: INB, 2014

Conforme indica a Figura 20, apenas um dos subníveis (no caso, o de cota 593 m) encontra-se ventilado, estando os demais fechados com portões a fim de aumentar a eficiência de ventilação do sistema de ventilação principal. O sistema de ventilação principal de um determinado subnível só estará plenamente em operação quando o desenvolvimento do subnível atingir suas extremidades finais e uni-lo ao imediatamente superior através das respectivas chaminés de exaustão. Dessa forma, para o desenvolvimento de cada subnível será necessária a adoção de um sistema de ventilação auxiliar.

A mina subterrânea possuirá um sistema alternativo de alimentação de energia proveniente de fonte independente da alimentação principal para acionar os exaustores de emergência em situações emergenciais. Caso falte alimentação de energia e de fonte independente da alimentação principal, o responsável pela mina deverá providenciar a retirada imediata dos empregados. Serão também instalados painéis para comutação automática dos geradores de emergência no caso de falta de tensão da concessionária de energia (INB, 2014).

5.3. Base de dados

5.3.1. Dados de Equipamentos e Componentes

Uma diversidade de banco de dados foi pesquisada para obtenção dos valores de taxas de falha, distribuições de falhas, tempos de reparo dos equipamentos e componentes elétricos, instrumentação e controle, automação e mecânicos. Os bancos de dados pesquisados foram:

- ✓ IAEA-TECDOC-478 (IAEA, 1988) - *Component Reliability Data For Use In Probabilistic Safety Assessment*, 1988.
- ✓ IEEE493 (IEEE, 2007) - *Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems*, 2007.

Para os equipamentos mecânicos cujos dados não foram obtidos nas fontes anteriores, foi pesquisado em fonte específica para componentes não-eletrônicos, conhecido como:

- ✓ *Nonelectronic Parts Reliability Data – NPRD 95:1995* (RAC, 1995).

No caso de gerador diesel e seus sistemas auxiliares os dados foram extraídos do:

- ✓ NUREG/CR 5500, Vol. 05 – *Reliability Study: Emergency Diesel Generator Power System*, 1987-1993 (USNRC, 1999).

Para os componentes do sistema de automação foram utilizados dados de componentes do *Schweitzer Engineering Laboratories* divulgados em SCHEER (1998).

No caso dos cabos de fibra óptica foram usados dados obtidos em publicações especializadas, como:

- ✓ *ATM: The New Wave in Broadband Telecommunications*. (ATM, 1992).
O Apêndice B detalha o projeto de automação da mina.

Os dados de confiabilidade da linha de transmissão e da subestação da concessionária de energia foram calculados com base nos dados fornecidos pela própria empresa.

No caso dos componentes para os quais não havia indicação de tempo de reparo ou intervalo de realização de teste, foi usada a informação baseada na experiência de especialistas em manutenção da própria INB.

5.3.2. Dados sobre Confiabilidade Humana

O modelo utilizado para o cálculo da probabilidade de erro humano é baseado na metodologia *Standardized Plant Analysis Risk Human Reliability Analysis* (SPAR-H). Essa metodologia leva em consideração fatores sócio-técnicos como aspectos ergonômicos, interface homem/máquina, aspectos cognitivos como a complexidade da tarefa e a qualidade dos procedimentos. O SPAR-H analisa quantitativamente esses fatores e calcula a probabilidade de falha humana. (GERTMAN et al, 2004). O software SAPHIRE já traz em sua rotina um modelo para o cálculo de falha humana, considerando o SPAR-H, onde os parâmetros de entrada são obtidos pelo preenchimento das respectivas planilhas relativas às etapas de diagnose da tarefa (fase cognitiva) e das etapas de execução da tarefa (fase de ação) (USNRC, 2011, p.59).

Em cada evento de falha humana considerado no sistema foi aplicado esse modelo e dessa forma foram obtidas as respectivas probabilidades de falha.

5.3.3. Dados sobre Falhas de Causa Comum

O software usado fornece uma ampla biblioteca de plug-ins para cálculo da probabilidade de falhas de causa comum (USNRC, 2011, p.103-111). Nessa dissertação, o modelo utilizado para o cálculo de probabilidade de falhas de causa comum foi baseado no modelo conhecido como do fator beta. Este modelo baseia-se na noção de que as falhas de componentes podem ser divididas em dois grupos: falhas independentes e falhas dependentes de todos os componentes. Os parâmetros de entrada do modelo no software são: o número de eventos básicos envolvidos (limitado no máximo a 6), o número mínimo de componentes em falha que levam a uma falha completa do grupo e o fator beta

Por se tratar de um projeto ainda em fase de revisão, o uso do modelo fator beta é justificado e fornecerá uma aproximação conservadora do evento de causa comum.

A norma IEC 62061 (2005) apresenta uma abordagem qualitativa e simplificada para estimativa do fator beta baseada nas medidas específicas adotadas no projeto contra a ocorrência de falhas de causa comum em sistemas de comandos elétricos, eletrônicos, eletrônicos programáveis relativos à segurança.

Cada medida de combate as FCC's recebe uma pontuação individual que deve ser somada conforme forem aplicadas ao projeto. O resultado desse somatório é

utilizado para determinar o fator de insucesso de causa comum. No caso específico desse trabalho as medidas de combate somaram 42 pontos correspondendo a um fator beta igual a 0,05.

No caso dos geradores diesel, o valor recomendado para o fator beta, também é de 0,05 de acordo com o estudo apresentando em USNRC (1998).

5.4. Códigos de Identificação dos Componentes

Os códigos de identificação dos eventos básicos seguem um padrão de forma a facilitar a descrição e a interpretação dos eventos da árvore de falhas. Os códigos seguem a padronização mostrada na Figura 21.

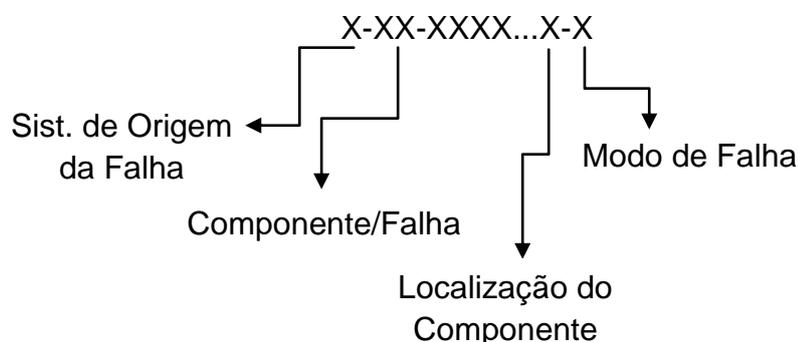


Figura 21 – Padrão de códigos dos eventos básicos da árvore de falhas.

A origem da falha e o modo de falha são caracterizados por apenas 01 caractere, enquanto o componente ou o tipo de falha é caracterizado por 02 caracteres e a localização do componente é caracterizada por uma combinação de 04 a 10 caracteres. A lista completa de códigos é apresentada no Apêndice C.

5.5. Desenvolvimento das Árvores de Falhas

O sucesso do sistema de ventilação principal da mina subterrânea é obtido com o funcionamento de 01 exaustor (principal ou reserva), simultaneamente em cada uma das centrais de exaustão.

Foi construída uma árvore de falhas que engloba os principais subsistemas que controlam e operam todo o sistema de ventilação principal. Esses subsistemas são o: elétrico, instrumentação e controle, automação e mecânico.

Nas simulações consideradas, em todas as situações, a árvore de falhas é a mesma, apresentando diferenças apenas na probabilidade de falha dos eventos básicos devido aos diferentes modelos de cálculo adotados para cada componente.

No primeiro caso analisado, foram considerados componentes reparáveis e no segundo caso, componentes não-reparáveis.

5.5.1. Definição do Evento Topo

A perda total do sistema de ventilação principal da mina subterrânea é um dos eventos de maior impacto para a segurança operacional da mina. A situação em que as duas centrais de exaustão, norte e sul, deixam de funcionar simultaneamente foi definida como evento topo neste trabalho. O nome do evento topo considerado é “Falha nas duas centrais de exaustão de ar”.

5.5.2. Árvore de Falhas do sistema

A configuração da árvore de falhas analisada foi dividida em subsistemas (automação, elétrico, mecânico, e instrumentação e controle) de modo a facilitar a compreensão do sistema por completo e permitir o cálculo da contribuição de cada subsistema na probabilidade de falha total do sistema. Cada subsistema contempla os seus principais componentes. Alguns componentes, por apresentarem estudos específicos e dados abundantes, foram desmembrados em seus modos de falha mais comuns, permitindo uma análise mais detalhada. O Apêndice D apresenta a árvore de falhas construída para análise do sistema.

5.6. Análise de Desempenho do Sistema de Ventilação

Para avaliar a confiabilidade do sistema de ventilação principal da mina foram realizadas análises do modelo considerando dois casos distintos:

- 1) Sistema com componentes reparáveis e com componentes testados periodicamente (standby).
- 2) Sistema com componentes não reparáveis e com componentes testados periodicamente (standby).

O objetivo de analisar esses dois casos é verificar como a indisponibilidade é diretamente afetada pelas práticas de manutenção adotadas. A indisponibilidade do sistema foi estudada considerando diferentes tempos de missão para o sistema, a fim de permitir uma ampla compreensão do comportamento do sistema ao longo do tempo.

Em ambos os casos, para os componentes que exercem a função de reserva, estes foram considerados como componentes testados periodicamente (standby).

Na análise de cada caso, foram realizados estudos considerando combinações entre falhas dos equipamentos, falhas de causa comum e falhas humanas.

O sistema totaliza 120 eventos e para cada um está associado uma taxa de falha, uma distribuição de densidade de falha, um modelo de falha e os seus respectivos parâmetros, como por exemplo: MTTR, Intervalo entre testes e outros.

O Apêndice E mostra os parâmetros utilizados para cada componente em cada uma das situações simuladas.

Para avaliar a contribuição das falhas de causa comum foram usados valores iguais para o fator beta em todas as falhas de causa comum, conforme explicado no item 5.3.3.

Todas as análises e os resultados numéricos e gráficos foram obtidos através de simulação no software SAPHIRE ver. 8.01 (USNRC, 2011a) .

Considera-se falha do sistema a situação na qual a mina subterrânea fica desprovida do sistema do sistema de exaustão principal, devido a falhas nos exaustores principais e reservas das duas centrais de exaustão de ar por qualquer intervalo de tempo.

5.6.1. Avaliação de desempenho para o caso do sistema com componentes reparáveis e com componentes testados periodicamente (standby).

Foi feita a análise temporal do sistema, considerando um intervalo entre 1 hora e 10^6 horas de operação. A Figura 22 mostra a probabilidade de falha do sistema ao longo desse período. Pode-se observar que a probabilidade de falha estabiliza-se a partir de 250h de operação.

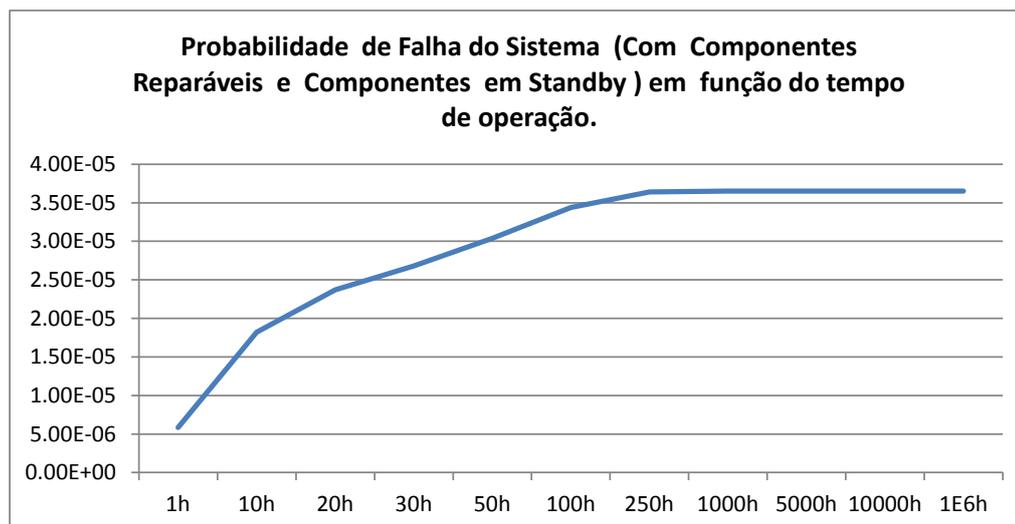


Figura 22– Probabilidade de falha do sistema ao longo do tempo para sistema com componentes reparáveis e com componentes testados periodicamente (standby)

Em uma análise mais detalhada do sistema, foi verificado o número de caminhos críticos e a probabilidade de falha por cada subsistema considerando combinações entre falhas dos equipamentos, falhas humanas e falhas de causa comum para um tempo de missão de 1000 horas. Esse tempo de missão foi selecionado para que os casos pudessem ser comparados antes que qualquer um deles alcançasse a probabilidade 1,0. A Tabela 7 mostra os resultados obtidos.

Tabela 7 – Resultados da análise detalhada por cada subsistema considerando o caso do sistema com componentes reparáveis e com componentes testados periodicamente (standby).

	Global (Todos os sistemas)		Sistema Elétrico		Sistema de I&C		Sistema de Automação		Sistema Mecânico	
	Nº Cortes Mín	10 ³ horas	Nº Cortes Mín	10 ³ horas	Nº Cortes Mín	10 ³ horas	Nº Cortes Mín	10 ³ horas	Nº Cortes Mín	10 ³ horas
Considerando Fhumana e FCC	1503	3,65E-05	783	1,22E-05	26	6,39E-06	18	1,78E-05	676	6,76E-08
Desconsiderando Fhumana e FCC	922	1,17E-05	633	9,81E-06	16	2,30E-07	17	1,70E-06	256	4,11E-15
Desconsiderando FCC	1351	1,70E-05	684	1,16E-05	25	3,58E-06	17	1,70E-06	625	5,61E-08
Desconsiderando Fhumana	1050	3,12E-05	726	1,04E-05	17	3,04E-06	18	1,78E-05	289	5,45E-10

A probabilidade de falha do sistema é de 3.65E-05 considerando as falhas dos equipamentos, as de causa comum e as humanas.

A análise dos dados acima revela que, ao considerar as falhas dos equipamentos, as falhas humanas e as falhas de causa comum, o sistema de automação é o que tem maior contribuição para a falha do sistema, com 48,8% do total, seguido pelo sistema elétrico que contribui com 33,4% da probabilidade de falha do sistema.

Em todas as situações analisadas, o sistema mecânico é o que apresenta a menor probabilidade de falha, o que se deve à robustez dos componentes considerados em conjunto com a combinação lógica necessária para que os quatro exaustores falhem ao mesmo tempo. Diferentemente do sistema mecânico que necessita de uma combinação de falha simultânea dos quatro exaustores, as consequências de uma falha nos sistemas de automação e instrumentação e controle compromete o funcionamento de uma central de exaustão completa (exaustores principal e reserva).

Em outra análise, pode-se identificar o peso que cada tipo de falha representa em relação à probabilidade de falha do sistema. Ao desconsiderar as falhas humanas e as falhas de causa comum, a probabilidade de falha do sistema é reduzida em 67,9%. Se desconsiderarmos as falhas de causa comum, a probabilidade do sistema falhar reduz em 53,4%. E desconsiderando as falhas humanas, a probabilidade de falha do sistema é reduzida em 14,5%. Com isso, vemos que a parcela de contribuição exclusiva das falhas de causa comum é bastante relevante na análise do sistema, conforme detalhado na Tabela 8.

Tabela 8 – Percentual de redução na probabilidade de falha do sistema, desconsiderando cada tipo de falha.

P(sist) = 3.65E-05	% Redução
Desconsiderando Fhumana e FCC	67,9%
Desconsiderando FCC	53,4%
Desconsiderando Fhumana	14,5%

Em relação aos cortes mínimos, para o caso do sistema reparável e com componentes testados periodicamente (standby), foram feitas análises para algumas das situações anteriores, ou seja, considerando as falhas dos equipamentos, as falhas humanas e as falhas de causa comum e depois desconsiderando as falhas humanas e as falhas de causa comum.

A Tabela 9 apresenta os cortes mínimos do sistema considerando as falhas dos equipamentos, falhas de causa comum e falhas humanas. Foram selecionados os cortes mínimos cuja probabilidade de falha represente no máximo 0,1% da probabilidade total do sistema, pois representam uma amostra considerável e diversificada dos principais eventos que possam levar à ocorrência do evento topo. Nesse caso, os 03 cortes mínimos de maior importância representam 57,26% do total e são oriundos exclusivamente de falhas de causa comum e de falhas humanas.

O corte mínimo de maior importância é composto por apenas uma única falha de causa comum (A-CC-CEX841e842) oriunda do sistema de automação e representa 44,1% da probabilidade de falha do sistema. Essa falha é uma combinação de outras 04 falhas: 02 falhas são dos programadores lógicos (A-PL-SE8411 e A-PL-SE8421) e 02 dos Switches Ethernet (A-SW-SE8411 e A-SW-SE8421) presente nas subestações norte e sul.

O segundo corte mínimo de maior importância com 7,7% de participação também é composto por uma única falha de causa comum (I-CC-EX841e842) originária do sistema de Instrumentação e Controle. Essa falha é uma combinação de outras 04 falhas: 02 falhas das Chaves de Transferência (I-CT-EX9501 e I-CT-EX9503) e 02 falhas no sistema de alimentação DC (I-CE-EX9501 e I-CE-EX9503).

O terceiro corte mínimo de maior importância com 5,46% de participação é uma composição de duas falhas humanas (I-HF-EX9501 e I-HF-EX9503) que podem ocorrer na comutação manual entre os exaustores principal e reserva de cada central de exaustão.

Os cortes mínimos seguintes, apresentados na Tabela 9, são uma combinação de falhas no fornecimento de energia elétrica tanto pela concessionária de energia quanto pelos geradores de emergência.

Tabela 9 – Cortes Mínimos do sistema reparável considerando as falhas dos equipamentos, falhas de causa comum e falhas humanas.

#	Prob/Freq	Total %	Cut Set
Total	3.65E-05	100	Displaying 1503 of 1503 Cut Sets.
1	1.61E-05	44,1	A-CC-CEX841E842
2	2.81E-06	7,70	I-CC-EX841E842
3	1.99E-06	5,46	I-HF-EX9501-A,I-HF-EX9503-A
4	1.78E-06	4,87	E-FD-GERAL-A,E-GE-GE8411-O,E-GE-GE8421-O
5	1.67E-06	4,57	E-FD-GERAL-A,E-GE-8421-M,E-GE-GE8411-O
6	1.67E-06	4,57	E-FD-GERAL-A,E-GE-8411-M,E-GE-GE8421-O
7	1.57E-06	4,29	E-FD-GERAL-A,E-GE-8411-M,E-GE-8421-M
8	1.14E-06	3,13	A-SW-SE8401-A
9	6.83E-07	1,87	E-FD-GERAL-A,E-GE-8421-P,E-GE-GE8411-O
10	6.83E-07	1,87	E-FD-GERAL-A,E-GE-8411-P,E-GE-GE8421-O
11	6.41E-07	1,76	E-FD-GERAL-A,E-GE-8411-M,E-GE-8421-P
12	6.41E-07	1,76	E-FD-GERAL-A,E-GE-8411-P,E-GE-8421-M
13	3.76E-07	1,03	E-FD-GERAL-A,E-GE-GE8421-O,E-HF-GE8411-A
14	3.76E-07	1,03	E-FD-GERAL-A,E-GE-GE8411-O,E-HF-GE8421-A
15	3.53E-07	0,97	E-FD-GERAL-A,E-GE-8421-M,E-HF-GE8411-A
16	3.53E-07	0,97	E-FD-GERAL-A,E-GE-8411-M,E-HF-GE8421-A
17	3.37E-07	0,92	I-HD-EX9501-A,I-HF-EX9503-A
18	3.36E-07	0,92	I-HD-EX9503-A,I-HF-EX9501-A
19	2.63E-07	0,72	E-FD-GERAL-A,E-GE-8411-P,E-GE-8421-P

20	2.31E-07	0,63	I-HF-EX9503-A,I-SS-EX9501-A
21	2.30E-07	0,63	I-HF-EX9501-A,I-SS-EX9503-A
22	1.47E-07	0,40	A-PC-SE8411-A,A-PC-SE8421-A
23	1.45E-07	0,40	E-FD-GERAL-A,E-GE-8421-P,E-HF-GE8411-A
24	1.45E-07	0,40	E-FD-GERAL-A,E-GE-8411-P,E-HF-GE8421-A
25	1.24E-07	0,34	A-PC-SE8421-A,A-PL-SE8411-A
26	1.24E-07	0,34	A-PC-SE8411-A,A-PL-SE8421-A
27	1.13E-07	0,31	E-CC-EX01E02-A,E-CC-EX03E04-A
28	1.04E-07	0,28	A-PL-SE8411-A,A-PL-SE8421-A
29	9.24E-08	0,25	E-CC-GE8411-A,E-FD-GERAL-A,E-GE-GE8421-O
30	9.24E-08	0,25	E-CC-GE8421-A,E-FD-GERAL-A,E-GE-GE8411-O
31	8.67E-08	0,24	E-CC-GE8411-A,E-FD-GERAL-A,E-GE-8421-M
32	8.67E-08	0,24	E-CC-GE8421-A,E-FD-GERAL-A,E-GE-8411-M
33	7.96E-08	0,22	E-FD-GERAL-A,E-HF-GE8411-A,E-HF-GE8421-A
34	7.95E-08	0,22	I-CT-EX9501-A,I-HF-EX9503-A
35	7.92E-08	0,22	I-CT-EX9503-A,I-HF-EX9501-A
36	5.66E-08	0,16	I-HD-EX9501-A,I-HD-EX9503-A
37	4.92E-08	0,13	M-HF-EX9501-A,M-HF-EX9502-A,M-HF-EX9503-A,M-HF-EX9504-A
38	3.89E-08	0,11	I-HD-EX9503-A,I-SS-EX9501-A
39	3.89E-08	0,11	I-HD-EX9501-A,I-SS-EX9503-A
40	3.55E-08	0,10	E-CC-GE8411-A,E-FD-GERAL-A,E-GE-8421-P
41	3.55E-08	0,10	E-CC-GE8421-A,E-FD-GERAL-A,E-GE-8411-P

A Tabela 10 apresenta os cortes mínimos do sistema considerando somente as falhas dos equipamentos, ou seja, desconsiderando as falhas de causa comum e as falhas humanas. Foram selecionados apenas os cortes mínimos cuja probabilidade de falha represente mais de 0,1% da probabilidade total do sistema. Nessa situação, os cortes mínimos de maior importância compreendem eventos relativos às falhas da concessionária de energia e as falha dos geradores de emergência em diferentes modos de falha. É interessante observar que na 5º posição com 9,73% de probabilidade de falhar, está um corte mínimo que compreende uma única falha de automação (A-SW-SE8401-A). Esse equipamento é o responsável pela integração das comunicações entre as duas subestações (SEN841 e SES842) e a sala de controle.

Tabela 10 – Cortes Mínimos do sistema reparável considerando somente as falhas dos equipamentos, desconsiderando as falhas de causa comum e as falhas humanas.

#	Prob/Freq	Total %	Cut Set
Total	1.17E-5	100	.
1	1.78E-6	15,1	E-FD-GERAL-A,E-GE-GE8411-O,E-GE-GE8421-O
2	1.67E-6	14,2	E-FD-GERAL-A,E-GE-8421-M,E-GE-GE8411-O
3	1.67E-6	14,2	E-FD-GERAL-A,E-GE-8411-M,E-GE-GE8421-O
4	1.57E-6	13,3	E-FD-GERAL-A,E-GE-8411-M,E-GE-8421-M
5	1.14E-6	9,73	A-SW-SE8401-A
6	6.83E-7	5,82	E-FD-GERAL-A,E-GE-8421-P,E-GE-GE8411-O

7	6.83E-7	5,82	E-FD-GERAL-A,E-GE-8411-P,E-GE-GE8421-O
8	6.41E-7	5,47	E-FD-GERAL-A,E-GE-8411-M,E-GE-8421-P
9	6.41E-7	5,47	E-FD-GERAL-A,E-GE-8411-P,E-GE-8421-M
10	2.63E-7	2,24	E-FD-GERAL-A,E-GE-8411-P,E-GE-8421-P
11	1.47E-7	1,26	A-PC-SE8411-A,A-PC-SE8421-A
12	1.24E-7	1,05	A-PC-SE8421-A,A-PL-SE8411-A
13	1.24E-7	1,05	A-PC-SE8411-A,A-PL-SE8421-A
14	1.04E-7	0,88	A-PL-SE8411-A,A-PL-SE8421-A
15	5.66E-8	0,48	I-HD-EX9501-A,I-HD-EX9503-A
16	3.89E-8	0,33	I-HD-EX9503-A,I-SS-EX9501-A
17	3.89E-8	0,33	I-HD-EX9501-A,I-SS-EX9503-A
18	2.67E-8	0,23	I-SS-EX9501-A,I-SS-EX9503-A
19	2.44E-8	0,21	E-DJ-QDMT8411-A,E-DJ-QDMT8421-A
20	1.34E-8	0,11	I-CT-EX9503-A,I-HD-EX9501-A
21	1.34E-8	0,11	I-CT-EX9501-A,I-HD-EX9503-A
22	1.28E-8	0,11	E-FD-GERAL-A,E-GE-GE8421-O,I-HD-GE8411-A
23	1.28E-8	0,11	E-FD-GERAL-A,E-GE-GE8411-O,I-HD-GE8421-A
24	1.20E-8	0,10	E-FD-GERAL-A,E-GE-8421-M,I-HD-GE8411-A
25	1.20E-8	0,10	E-FD-GERAL-A,E-GE-8411-M,I-HD-GE8421-A

5.6.1.1. Análise das incertezas do Sistema de Ventilação Principal com Componentes Reparáveis e com Componentes Testados Periodicamente (standby).

Conforme descrito no item 4.2.5 e detalhado no Apêndice E, cada evento de falha está associado a uma distribuição de probabilidade que representa o comportamento da taxa de falha segundo os diferentes bancos de dados pesquisados.

Para as análises de incertezas do evento topo do sistema, foi utilizado o método de Monte Carlo, conforme descrito no item 4.2.5.1. Considerou-se a combinação de falhas dos equipamentos, falhas de causa comum e falhas humanas, conforme mostrado na Tabela 11.

Tabela 11– Resultados da análise de incertezas do sistema, considerando os diferentes tipos de falhas.

Incertezas (Monte Carlo)							
Número de amostras = 5000							
	Média	5%	Mediana	95%	Desvio Padrão	Amostra Min	Amostra Max
Considerando Fhumana e FCC	4,49E-05	1,66E-05	3,98E-05	9,05E-05	2,47E-05	5,39E-05	2,25E-04
Desconsiderando Fhumana e FCC	1,10E-05	1,69E-06	6,90E-06	3,30E-05	1,23E-05	4,33E-07	1,67E-04
Desconsiderando FCC	1,64E-05	3,35E-06	1,19E-05	4,40E-05	1,56E-05	6,60E-07	2,51E-04
Desconsiderando Fhumana	4,07E-05	1,39E-05	3,57E-05	8,43E-05	2,30E-05	4,47E-06	2,36E-04

As Figuras 23, 24, 25 e 26 ilustram os gráficos das funções densidade de probabilidade (pdf) e da distribuição acumulada (cdf) das análises anteriormente realizadas, considerando cada tipo de falha.

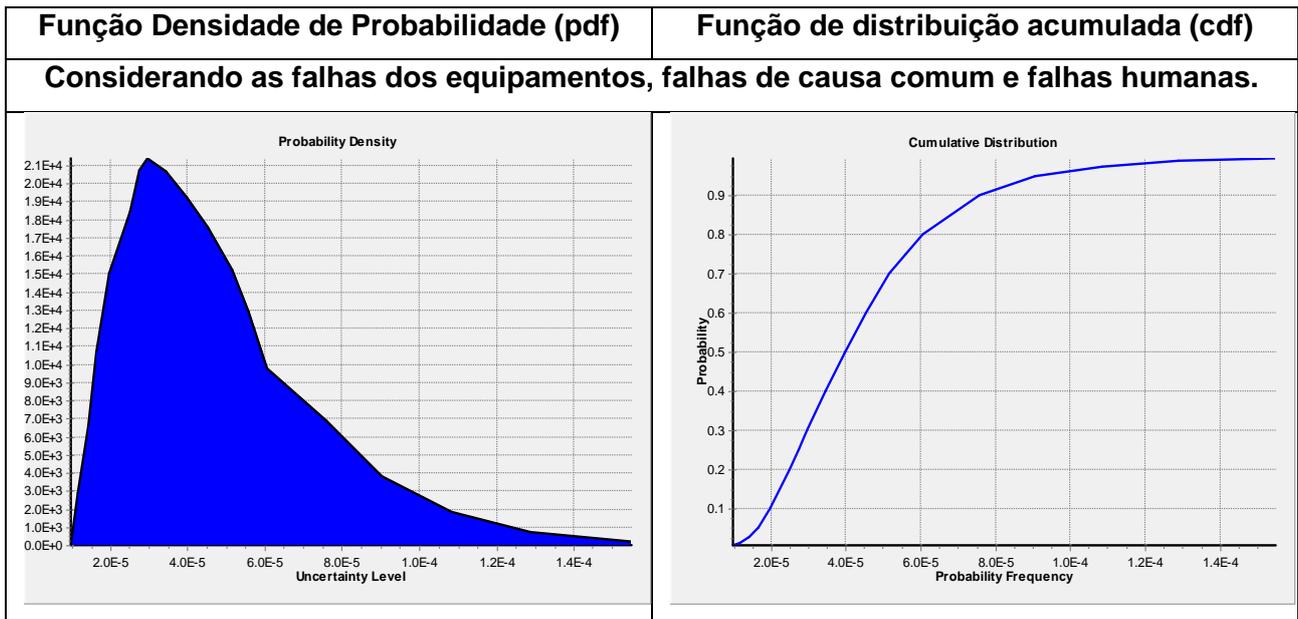


Figura 23 – pdf e cdf do sistema com componentes reparáveis considerando as falhas dos equipamentos, falhas de causa comum e falhas humanas.

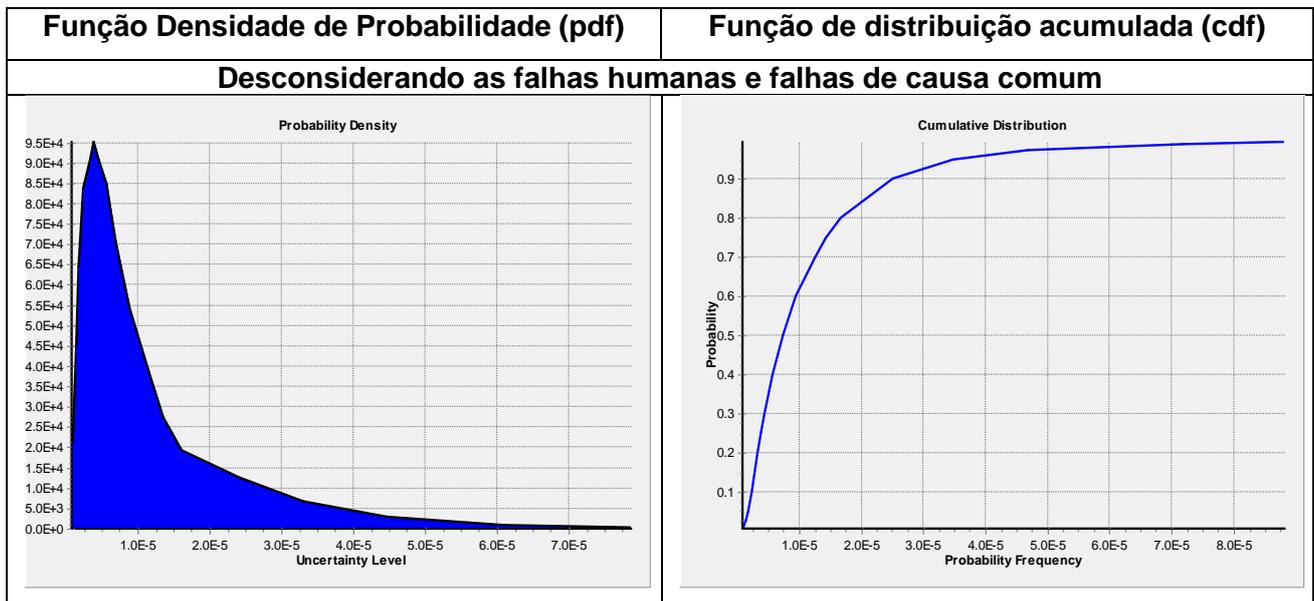


Figura 24 – pdf e cdf do sistema com componentes reparáveis desconsiderando as falhas humanas e falhas de causa comum.

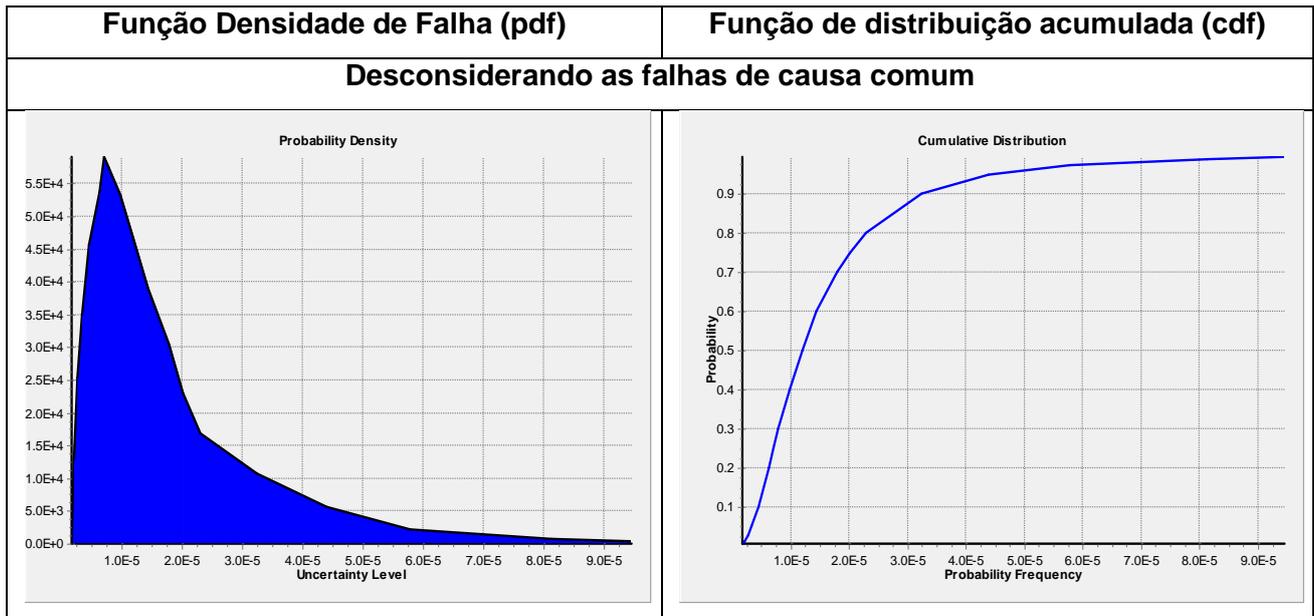


Figura 25 – pdf e cdf do sistema com componentes reparáveis desconsiderando as falhas de causa comum.

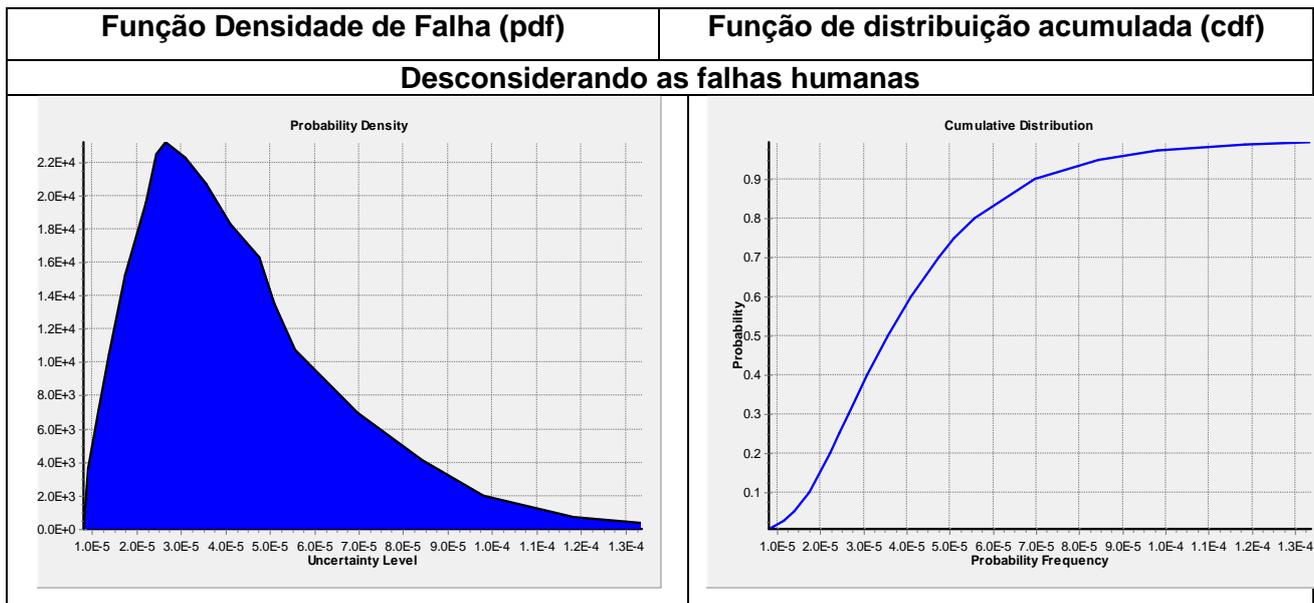


Figura 26- pdf e cdf do sistema com componentes reparáveis desconsiderando as falhas humanas.

5.6.1.2. Análise das Medidas de Importância do Sistema de Ventilação Principal com Componentes Reparáveis e com Componentes Testados Periodicamente (standby).

A análise das medidas de importância fornece informações valiosas sobre os eventos básicos que aparecem nos cortes de uma árvore de falhas, pois componentes com alto grau de importância necessitam de acompanhamento detalhado na operação da mina para evitar desgaste/falha ao longo do tempo ou mudanças no projeto do componente.

Devido a grande quantidade de eventos e no sentido de simplificar a análise dos resultados foram selecionados os cinco eventos de maior contribuição para cada medida de importância analisada, conforme mostrado na Tabela 12.

O evento de causa comum no sistema de automação (A-CC-CEX841E842) representa um grande risco potencial representando a maior contribuição em todas as medidas de importância calculadas. É interessante observar que alguns eventos, apesar de não aparecerem em nenhum corte mínimo mostrado na Tabela 9, podem elevar consideravelmente a probabilidade de falha do sistema. Alguns desses eventos envolvem falhas do sistema de proteção da subestação 810 (E-SP-SE345KV-A) e do sistema de para-raios da linha de distribuição interna (E-PR-LT8411-A). Esses itens merecem ser tratados de forma a serem evitados. Por outro lado, os riscos que podem representar a maior redução do risco são os eventos relacionados a falhas da distribuidora de energia (E-FD-GERAL-A) e dos geradores (E-GE-GE8411-O) e (E-GE-GE8421-O).

Tabela 12 – Resumo dos resultados para cada medida de importância.

Fussell-Vesely (FV)			
Name	Count	Prob.	FV
A-CC-CEX841E842	1	1,61E-05	4,41E-01
E-FD-GERAL-A	100	1,63E-03	3,30E-01
E-GE-GE8411-O	30	3,30E-02	1,27E-01
E-GE-GE8421-O	30	3,30E-02	1,27E-01
E-GE-8411-M	30	3,10E-02	1,19E-01
TAXA DE AUMENTO DE RISCO - RIR			
Name	Count	Prob.	RIR
A-CC-CEX841E842	1	1,61E-05	2,74E+04
I-CC-EX841E842	1	2,81E-06	2,74E+04
A-SW-SE8401-A	1	1,14E-06	2,74E+04
E-SP-SE345KV-A	100	3,42E-07	2,03E+02
E-PR-LT8411-A	100	3,02E-07	2,03E+02
INTERVALO DE AUMENTO DE RISCO -			
Name	Count	Prob.	RII
A-CC-CEX841E842	1	1,61E-05	1,00E+00
I-CC-EX841E842	1	2,81E-06	1,00E+00
A-SW-SE8401-A	1	1,14E-06	1,00E+00
E-SP-SE345KV-A	100	3,42E-07	7,36E-03
E-PR-LT8411-A	100	3,02E-07	7,36E-03
INTERVALO DE REDUÇÃO DE RISCO - RRI			
Name	Count	Prob.	RRI
A-CC-CEX841E842	1	1,61E-05	1,61E-05
E-FD-GERAL-A	100	1,63E-03	1,20E-05
E-GE-GE8411-O	30	3,30E-02	4,63E-06
E-GE-GE8421-O	30	3,30E-02	4,63E-06
E-GE-8411-M	30	3,10E-02	4,34E-06
TAXA DE REDUÇÃO DE RISCO - RRR			
Name	Count	Prob.	RRR
A-CC-CEX841E842	1	1,61E-05	1,79E+00
E-FD-GERAL-A	100	1,63E-03	1,49E+00
E-GE-GE8411-O	30	3,30E-02	1,15E+00
E-GE-GE8421-O	30	3,30E-02	1,15E+00
E-GE-8411-M	30	3,10E-02	1,14E+00
BIRNBAUM			
Name	Count	Prob.	Birnbaum
A-CC-CEX841E842	1	1,61E-05	1,00E+00
I-CC-EX841E842	1	2,81E-06	1,00E+00
A-SW-SE8401-A	1	1,14E-06	1,00E+00
E-SP-SE345KV-A	100	3,42E-07	7,36E-03
E-PR-LT8411-A	100	3,02E-07	7,36E-03

O Apêndice F apresenta a lista completa de eventos básicos com os respectivos cálculos das diversas medidas de importância do sistema. A coluna “Count” fornece o número de vezes que o evento aparece em diferentes cortes

mínimos. A coluna “Prob” fornece o valor da probabilidade daquele evento básico, de acordo como os parâmetros inseridos, e as Colunas “FV”, “RIR”, “RRR”, “Birnbaum”, “RII”, “RRI” e “Uncertainty”, são respectivamente as medidas de importâncias de Fussel-Vessely, Taxa de aumento de risco, Taxa de redução de risco, Birnbaum, Intervalo de aumento de risco, Intervalo de redução de risco e Incertezas.

Esses resultados equivalem a uma quantidade enorme de simulações do sistema, ora considerando os eventos básicos com probabilidade de ocorrência igual a 0, no caso do RRR e RRI, ora igual a 1, no caso do RIR e RII.

5.6.2. Avaliação de Desempenho para o Caso do Sistema sem Componentes Reparáveis e com Componentes Testados Periodicamente (standby).

De forma equivalente, à análise realizada no item 5.6.1, foi feita a análise temporal do sistema, considerando um intervalo entre 1 hora e 10^6 horas de operação. A Figura 27 descreve o comportamento do sistema ao longo desse período. Observa-se que a partir de 250 horas de funcionamento a probabilidade de falha começa a aumentar consideravelmente, até que o momento em que atinge o patamar máximo para probabilidade de falha, em torno de 1270 horas de funcionamento.

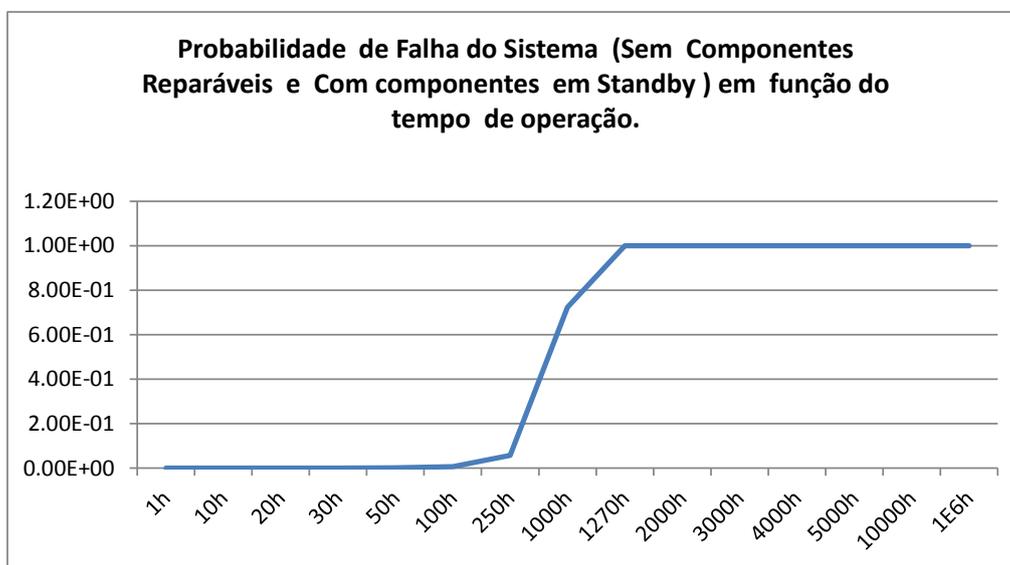


Figura 27 – Evolução da Probabilidade de falha ao longo do tempo para sistema sem componentes reparáveis e com componentes testados periodicamente (standby)

Aprofundando a análise do sistema, foi verificado o número de cortes mínimos e a probabilidade de falha por cada subsistema considerando combinações entre

falhas dos equipamentos, falhas humanas e falhas de causa comum para um tempo de missão de 1000 horas. A Tabela 13 lista os resultados obtidos.

Tabela 13 – Resultados da análise detalhada por cada subsistema considerando o caso de sistema sem componentes reparáveis e com componentes testados periodicamente (standby).

	Global (Todos os sistemas)		Sistema Elétrico		Sistema de I&C		Sistema de Automação		Sistema Mecânico	
	Nº Cortes Mín	10 ³ horas	Nº Cortes Mín	10 ³ horas	Nº Cortes Mín	10 ³ horas	Nº Cortes Mín	10 ³ horas	Nº Cortes Mín	10 ³ horas
Considerando Fhumana e FCC	1503	7,22E-01	783	6,77E-01	26	4,40E-02	18	1,26E-03	676	4,71E-07
Desconsiderando Fhumana e FCC	922	6,67E-01	633	6,23E-01	16	4,30E-02	17	9,24E-04	256	1,05E-10
Desconsiderando FCC	1351	6,74E-01	684	6,30E-01	25	4,35E-02	17	9,24E-04	625	1,68E-07
Desconsiderando Fhumana	1050	7,15E-01	726	6,70E-01	17	4,34E-02	18	1,26E-03	289	8,21E-08

A probabilidade de falha total do sistema é de 7.22E-01 considerando as falhas dos equipamentos, as falhas de causa comum e as falhas humanas.

A análise dos dados acima revela que ao considerar todos os tipos de falhas, o sistema elétrico é o que apresenta disparadamente a maior contribuição para a probabilidade de falha do sistema, com aproximadamente 94% do total.

Em outra análise, pode-se identificar o peso que cada tipo de falha representa em relação à probabilidade de falha do sistema. Ao desconsiderar as falhas humanas e as falhas de causa comum, a probabilidade de falha do sistema é reduzida em apenas 7,6%. Se desconsiderarmos as falhas de causa comum, a probabilidade do sistema falhar reduz-se em 6,6%. E desconsiderando as falhas humanas, a probabilidade de falha do sistema é reduzida em 1,0%. Nesse caso, a parcela de contribuição exclusiva das falhas de causa comum tem peso maior em relação às falhas humanas na probabilidade de falha do sistema de ventilação. A Tabela 14 apresenta de forma resumida a contribuição de cada tipo de falha. Podemos notar que a parcela de contribuição exclusiva das falhas de causa comum é bastante relevante na análise do sistema.

Tabela 14 – Percentual de redução na probabilidade de falha do sistema, desconsiderando cada tipo de falha.

P(sist) = 7.22E-01	% Redução
Desconsiderando Fhumana e FCC	7,6%
Desconsiderando FCC	6,6%
Desconsiderando Fhumana	1,0%

Em relação aos cortes mínimos, para o caso do sistema sem componentes reparáveis e com componentes testados periodicamente (standby) foram feitas

análises para algumas das situações anteriores, ou seja, considerando as falhas dos equipamentos, as falhas humanas e as falhas de causa comum e depois desconsiderando as falhas humanas e as falhas de causa comum.

A Tabela 15 apresenta os cortes mínimos do sistema considerando as falhas dos equipamentos, falhas de causa comum e falhas humanas. Foram selecionados os cortes mínimos cuja probabilidade de falha represente no mínimo 0,1% da probabilidade total do sistema. Nesse caso, somente o corte mínimo principal representa 47,5% do total da probabilidade de falha.

O corte mínimo de maior importância é composto por uma combinação de falhas que causam interrupção no fornecimento de energia elétrica aos exaustores, tanto pela concessionária quanto pelos geradores de emergência.

O segundo e o terceiro cortes mínimos de maior importância, representam cada um, uma parcela de 9,81% de probabilidade de falha do sistema. Esses dois cortes são uma combinação de falha da concessionária, falha dos geradores de emergência em operação e de falhas de lógica e controle dos sensores dos geradores.

Com 5,31% de probabilidade, o quarto corte mínimo de maior importância é composto por falhas dos sensores do sistema de instrumentação e controle responsáveis pela comutação dos exaustores principal e reserva de cada central de exaustão.

Tabela 15 – Cortes Mínimos do sistema sem componentes reparáveis e com componentes testados periodicamente (standby) considerando falhas dos equipamentos, falhas de causa comum e falhas humanas.

#	Prob/Freq	Total %	Cut Set
Total	7.22E-01	100	
1	3.43E-01	47,5	E-FD-GERAL-A,E-GE-GE8411-O,E-GE-GE8421-O
2	7.09E-02	9,81	E-FD-GERAL-A,E-GE-GE8411-O,I-SS-GE8421-A
3	7.08E-02	9,81	E-FD-GERAL-A,E-GE-GE8421-O,I-SS-GE8411-A
4	3.84E-02	5,31	I-SS-EX9501-A,I-SS-EX9503-A
5	1.78E-02	2,47	E-CC-GE8411-A,E-FD-GERAL-A,E-GE-GE8421-O
6	1.78E-02	2,47	E-CC-GE8421-A,E-FD-GERAL-A,E-GE-GE8411-O
7	1.46E-02	2,03	E-FD-GERAL-A,I-SS-GE8411-A,I-SS-GE8421-A
8	1.12E-02	1,55	E-FD-GERAL-A,E-GE-8421-M,E-GE-GE8411-O
9	1.12E-02	1,55	E-FD-GERAL-A,E-GE-8411-M,E-GE-GE8421-O
10	1.02E-02	1,42	A-PL-GE8411-A,E-FD-GERAL-A,E-GE-GE8421-O
11	1.02E-02	1,42	A-PL-GE8421-A,E-FD-GERAL-A,E-GE-GE8411-O
12	5.93E-03	0,82	E-RP-QDMT8421-A,E-RP-TP8411-A
13	5.93E-03	0,82	E-RP-QDMT8411-A,E-RP-QDMT8421-A
14	5.93E-03	0,82	E-RP-TP8411-A,E-RP-TP8421-A
15	5.93E-03	0,82	E-RP-QDMT8411-A,E-RP-TP8421-A

16	4.59E-03	0,64	E-FD-GERAL-A,E-GE-8421-P,E-GE-GE8411-O
17	4.59E-03	0,64	E-FD-GERAL-A,E-GE-8411-P,E-GE-GE8421-O
18	3.91E-03	0,54	E-DJ-QDMT8421-A,E-RP-TP8411-A
19	3.91E-03	0,54	E-DJ-QDMT8411-A,E-RP-QDMT8421-A
20	3.91E-03	0,54	E-DJ-QDMT8411-A,E-RP-TP8421-A
21	3.91E-03	0,54	E-DJ-QDMT8421-A,E-RP-QDMT8411-A
22	3.69E-03	0,51	E-CC-GE8411-A,E-FD-GERAL-A,I-SS-GE8421-A
23	3.68E-03	0,51	E-CC-GE8421-A,E-FD-GERAL-A,I-SS-GE8411-A
24	3.52E-03	0,49	E-CT-GE8411-A,E-FD-GERAL-A,E-GE-GE8421-O
25	3.52E-03	0,49	E-CT-GE8421-A,E-FD-GERAL-A,E-GE-GE8411-O
26	2.58E-03	0,36	E-DJ-QDMT8411-A,E-DJ-QDMT8421-A
27	2.53E-03	0,35	E-FD-GERAL-A,E-GE-GE8421-O,E-HF-GE8411-A
28	2.53E-03	0,35	E-FD-GERAL-A,E-GE-GE8411-O,E-HF-GE8421-A
29	2.32E-03	0,32	E-FD-GERAL-A,E-GE-8411-M,I-SS-GE8421-A
30	2.31E-03	0,32	E-FD-GERAL-A,E-GE-8421-M,I-SS-GE8411-A
31	2.11E-03	0,29	A-PL-GE8411-A,E-FD-GERAL-A,I-SS-GE8421-A
32	2.11E-03	0,29	A-PL-GE8421-A,E-FD-GERAL-A,I-SS-GE8411-A
33	1.91E-03	0,26	I-CT-EX9503-A,I-SS-EX9501-A
34	1.91E-03	0,26	I-CT-EX9501-A,I-SS-EX9503-A
35	1.35E-03	0,19	E-FD-GERAL-A,E-GE-GE8421-O,I-CE-GE8411-A
36	1.35E-03	0,19	E-FD-GERAL-A,E-GE-GE8411-O,I-CE-GE8421-A
37	9.49E-04	0,13	E-FD-GERAL-A,E-GE-8411-P,I-SS-GE8421-A
38	9.48E-04	0,13	E-FD-GERAL-A,E-GE-8421-P,I-SS-GE8411-A
39	9.28E-04	0,13	E-CC-GE8411-A,E-CC-GE8421-A,E-FD-GERAL-A
40	7.28E-04	0,10	E-CT-GE8411-A,E-FD-GERAL-A,I-SS-GE8421-A
41	7.27E-04	0,10	E-CT-GE8421-A,E-FD-GERAL-A,I-SS-GE8411-A

Desconsiderando as falhas de causa comum e as falhas humanas, a sequência dos 04 primeiros cortes mínimos continuou a mesma, em relação à situação analisada anteriormente, havendo apenas pequenas alterações na porcentagem de cada corte mínimo. A Tabela 16 apresenta os cortes mínimos do sistema considerando somente as falhas dos equipamentos. Foram selecionados apenas os cortes mínimos cuja probabilidade de falha represente no mínimo 0,1% da probabilidade total do sistema. Nessa situação, o corte mínimo de maior peso representa 51,4% da probabilidade de falha do sistema. O segundo e o terceiro cortes mínimos passaram a representam 10,6% de probabilidade de falha cada um.

Tabela 16 – Cortes Mínimos do sistema sem componentes reparáveis e com componentes testados periodicamente (standby) desconsiderando as falhas de causa comum e as falhas humanas.

#	Prob/Freq	Total %	Cut Set
Total	6.67E-01	100	Displaying 922 of 922 Cut Sets.
1	3.43E-01	51,4	E-FD-GERAL-A,E-GE-GE8411-O,E-GE-GE8421-O
2	7.09E-02	10,6	E-FD-GERAL-A,E-GE-GE8411-O,I-SS-GE8421-A
3	7.08E-02	10,6	E-FD-GERAL-A,E-GE-GE8421-O,I-SS-GE8411-A
4	3.84E-02	5,75	I-SS-EX9501-A,I-SS-EX9503-A
5	1.46E-02	2,19	E-FD-GERAL-A,I-SS-GE8411-A,I-SS-GE8421-A
6	1.12E-02	1,68	E-FD-GERAL-A,E-GE-8421-M,E-GE-GE8411-O
7	1.12E-02	1,68	E-FD-GERAL-A,E-GE-8411-M,E-GE-GE8421-O
8	1.02E-02	1,53	A-PL-GE8411-A,E-FD-GERAL-A,E-GE-GE8421-O
9	1.02E-02	1,53	A-PL-GE8421-A,E-FD-GERAL-A,E-GE-GE8411-O
10	5.93E-03	0,89	E-RP-QDMT8421-A,E-RP-TP8411-A
11	5.93E-03	0,89	E-RP-QDMT8411-A,E-RP-QDMT8421-A
12	5.93E-03	0,89	E-RP-TP8411-A,E-RP-TP8421-A
13	5.93E-03	0,89	E-RP-QDMT8411-A,E-RP-TP8421-A
14	4.59E-03	0,69	E-FD-GERAL-A,E-GE-8421-P,E-GE-GE8411-O
15	4.59E-03	0,69	E-FD-GERAL-A,E-GE-8411-P,E-GE-GE8421-O
16	3.91E-03	0,59	E-DJ-QDMT8421-A,E-RP-TP8411-A
17	3.91E-03	0,59	E-DJ-QDMT8411-A,E-RP-QDMT8421-A
18	3.91E-03	0,59	E-DJ-QDMT8411-A,E-RP-TP8421-A
19	3.91E-03	0,59	E-DJ-QDMT8421-A,E-RP-QDMT8411-A
20	3.52E-03	0,53	E-CT-GE8411-A,E-FD-GERAL-A,E-GE-GE8421-O
21	3.52E-03	0,53	E-CT-GE8421-A,E-FD-GERAL-A,E-GE-GE8411-O
22	2.58E-03	0,39	E-DJ-QDMT8411-A,E-DJ-QDMT8421-A
23	2.32E-03	0,35	E-FD-GERAL-A,E-GE-8411-M,I-SS-GE8421-A
24	2.31E-03	0,35	E-FD-GERAL-A,E-GE-8421-M,I-SS-GE8411-A
25	2.11E-03	0,32	A-PL-GE8411-A,E-FD-GERAL-A,I-SS-GE8421-A
26	2.11E-03	0,32	A-PL-GE8421-A,E-FD-GERAL-A,I-SS-GE8411-A
27	1.91E-03	0,29	I-CT-EX9503-A,I-SS-EX9501-A
28	1.91E-03	0,29	I-CT-EX9501-A,I-SS-EX9503-A
29	1.35E-03	0,20	E-FD-GERAL-A,E-GE-GE8421-O,I-CE-GE8411-A
30	1.35E-03	0,20	E-FD-GERAL-A,E-GE-GE8411-O,I-CE-GE8421-A
31	9.49E-04	0,14	E-FD-GERAL-A,E-GE-8411-P,I-SS-GE8421-A
32	9.48E-04	0,14	E-FD-GERAL-A,E-GE-8421-P,I-SS-GE8411-A
33	7.28E-04	0,11	E-CT-GE8411-A,E-FD-GERAL-A,I-SS-GE8421-A
34	7.27E-04	0,11	E-CT-GE8421-A,E-FD-GERAL-A,I-SS-GE8411-A

5.6.2.1. Análise das Incertezas do Sistema de Ventilação Principal sem Componentes Reparáveis e com Componentes Testados Periodicamente (standby).

Seguindo a mesma lógica aplicada no item 5.6.1.1, foram realizadas análises de incertezas para o evento topo desse sistema utilizando o método de Monte Carlo. Foi considerado a combinação de falhas dos equipamentos, falhas de causa comum e falhas humanas, conforme mostrado na Tabela 17.

Tabela 17 – Resultados da análise de incertezas do sistema, considerando os diferentes tipos de falhas.

Incetezas (Monte Carlo)

Número de amostras = 5000

	Média	5%	Mediana	95%	Desvio Padrão	Amostra Min	Amostra Max
Considerando Fhumana e FCC	3,50E-01	8,67E-02	3,08E-01	7,56E-01	2,09E-01	1,88E-02	9,77E-01
Desconsiderando Fhumana e FCC	3,32E-01	8,01E-02	2,86E-01	7,34E-01	2,02E-01	1,76E-02	9,63E-01
Desconsiderando FCC	3,37E-01	8,26E-02	2,94E-01	7,25E-01	2,03E-01	1,57E-02	9,82E-01
Desconsiderando Fhumana	3,41E-01	8,32E-02	2,94E-01	7,42E-01	2,07E-01	1,93E-02	9,70E-01

As Figuras 28, 29, 30 e 31 ilustram os gráficos das funções densidade de probabilidade (pdf) e da distribuição acumulada (cdf) das análises anteriormente realizadas, considerando cada tipo de falha.

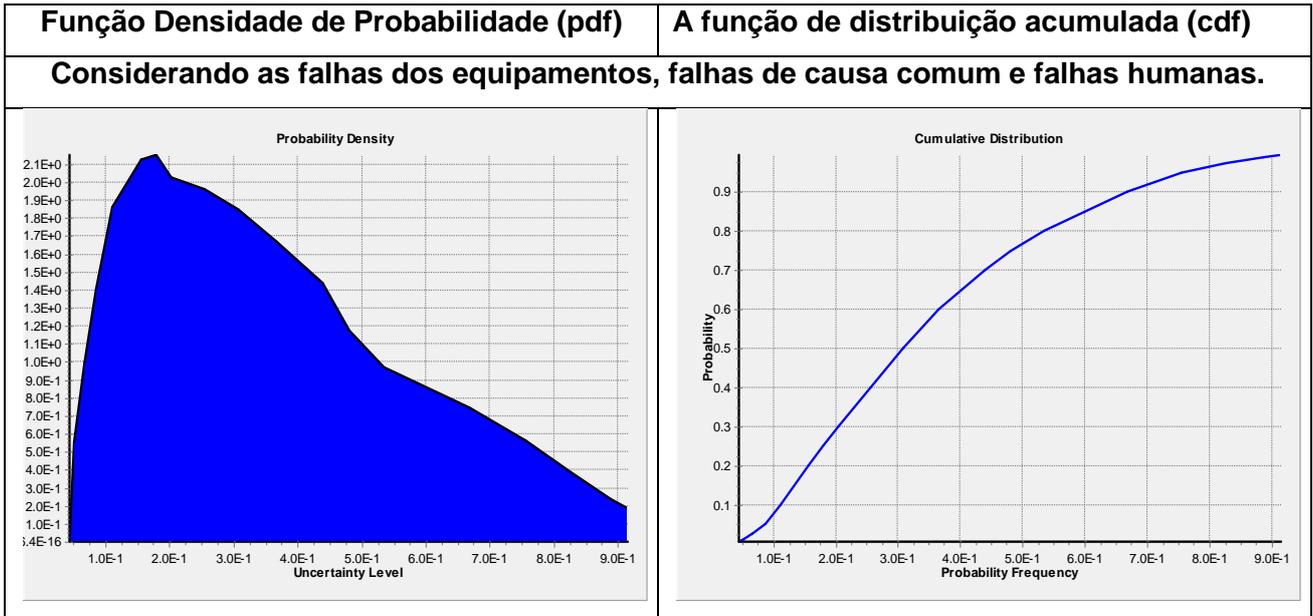


Figura 28 – pdf e cdf do sistema sem componentes reparáveis considerando as falhas dos equipamentos, falhas de causa comum e falhas humanas.

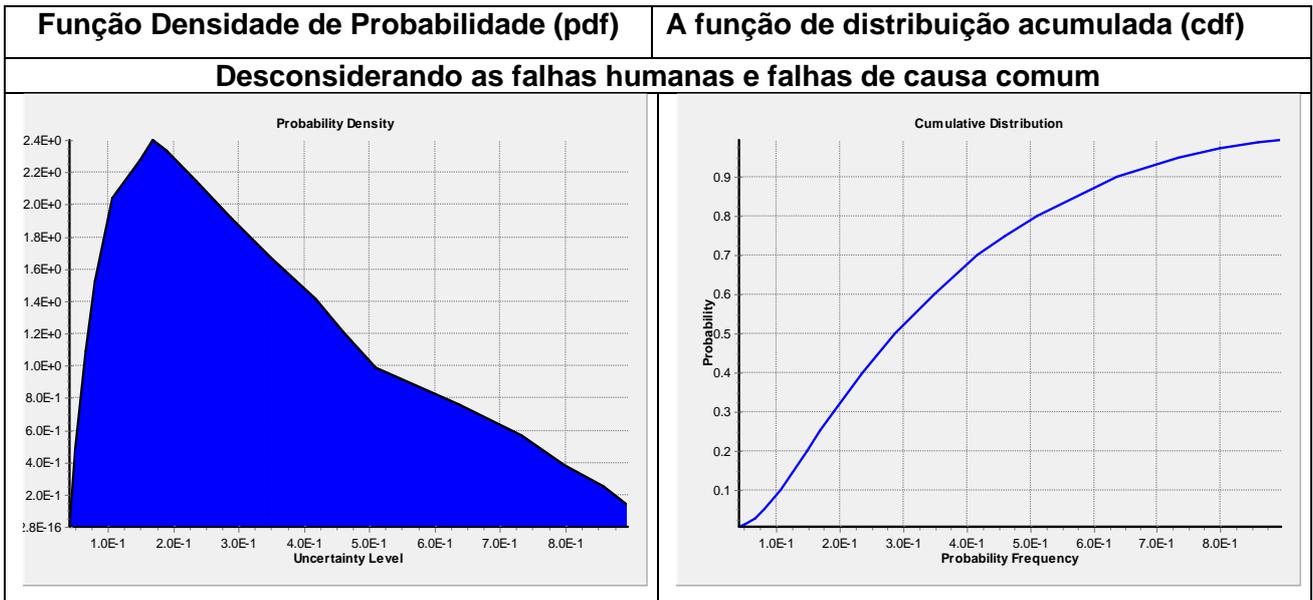


Figura 29 - pdf e cdf do sistema sem componentes reparáveis desconsiderando as falhas humanas e falhas de causa comum.

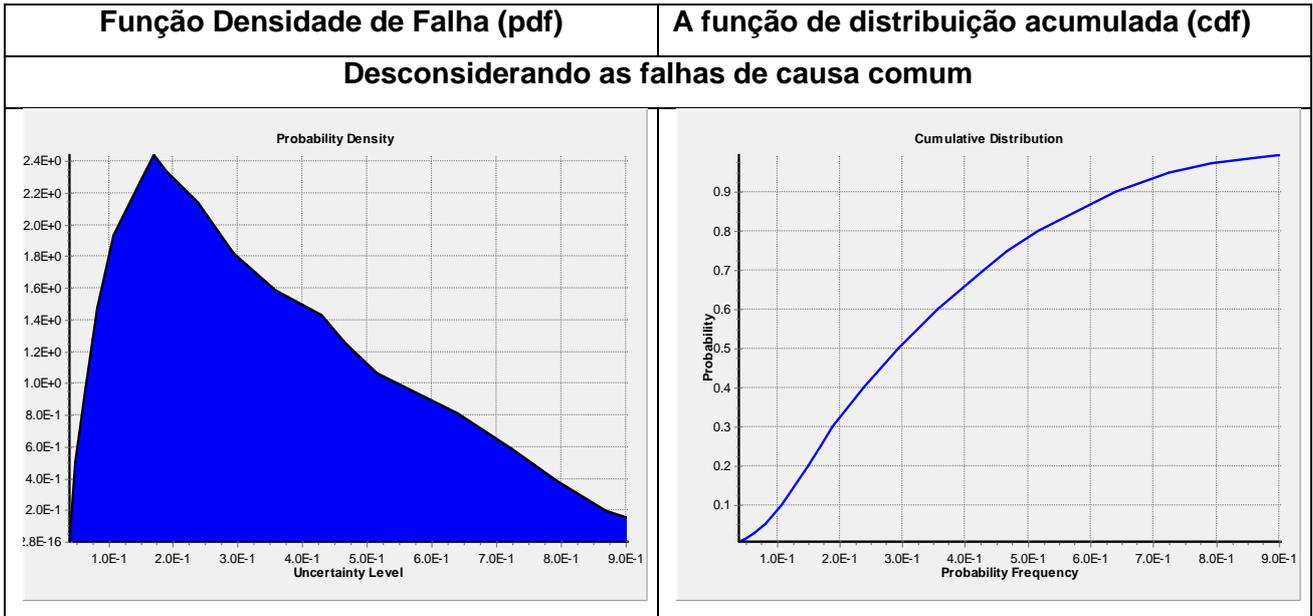


Figura 30 – pdf e cdf do sistema sem componentes reparáveis desconsiderando as falhas de causa comum.

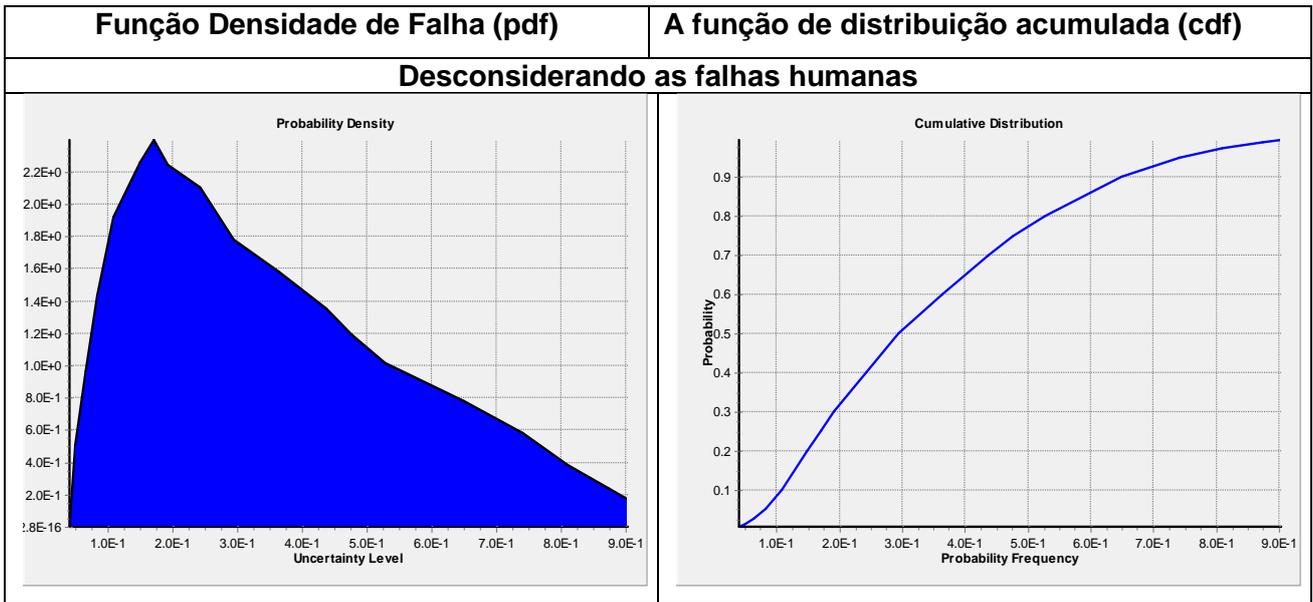


Figura 31 – pdf e cdf do sistema sem componentes reparáveis desconsiderando as falhas humanas

5.6.2.2. Análise das Medidas de Importância do Sistema de Ventilação Principal sem componentes Reparáveis e com Componentes Testados Periodicamente (standby).

Conforme descrito no item 5.6.1.2, nesse caso também foram selecionados os cinco eventos de maior contribuição para cada medida de importância analisada, conforme mostrado na Tabela 18.

Nesse caso, o evento de falha da distribuidora (E-FD-GERAL-A) é o evento que mais contribui para a probabilidade de falha do sistema segundo a importância de Fussell-Vessely. Caso esse evento não ocorra, ele é o que mais contribui também para a redução do risco do sistema. O evento (A-SW-SE8401-A) devido a falha no Switch Ethernet que centraliza as informações oriundas da SE841 e SE841 aparece em diversas medidas de importância e representa um componente de grande risco para o sistema.

Tabela 18 – Resumo dos resultados para cada medida de importância.

Fussell-Vesely (FV)			
Name	Count	Prob.	FV
E-FD-GERAL-A	100	3,81E-01	9,22E-01
E-GE-GE8411-O	30	9,49E-01	7,60E-01
E-GE-GE8421-O	30	9,49E-01	7,60E-01
I-SS-GE8411-A	30	1,96E-01	1,70E-01
I-SS-GE8421-A	30	1,96E-01	1,70E-01
TAXA DE AUMENTO DE RISCO - RIR			
Name	Count	Prob.	RIR
A-SW-SE8401-A	1	5,71E-04	1,81E+00
I-CC-EX841E842	1	4,87E-04	1,81E+00
A-CC-CEX841E842	1	3,34E-04	1,81E+00
E-PR-LT8411-A	100	1,51E-04	1,77E+00
E-SP-SE345KV-A	100	6,85E-05	1,77E+00
INTERVALO DE AUMENTO DE RISCO - RII			
Name	Count	Prob.	RII
A-SW-SE8401-A	1	5,71E-04	4,46E-01
I-CC-EX841E842	1	4,87E-04	4,46E-01
A-CC-CEX841E842	1	3,34E-04	4,46E-01
E-PR-LT8411-A	100	1,51E-04	4,26E-01
E-SP-SE345KV-A	100	6,85E-05	4,26E-01

INTERVALO DE REDUÇÃO DE RISCO - RRI			
Name	Count	Prob.	RRR
E-FD-GERAL-A	100	3,81E-01	6,28E+00
E-GE-GE8411-O	30	9,49E-01	2,41E+00
E-GE-GE8421-O	30	9,49E-01	2,41E+00
I-SS-GE8411-A	30	1,96E-01	1,09E+00
I-SS-GE8421-A	30	1,96E-01	1,09E+00
TAXA DE REDUÇÃO DE RISCO - RRR			
Name	Count	Prob.	RRI
E-FD-GERAL-A	100	3,81E-01	4,65E-01
E-GE-GE8411-O	30	9,49E-01	3,24E-01
E-GE-GE8421-O	30	9,49E-01	3,24E-01
I-SS-GE8411-A	30	1,96E-01	4,64E-02
I-SS-GE8421-A	30	1,96E-01	4,64E-02
BIRNBAUM			
Name	Count	Prob.	Birnbaum
E-FD-GERAL-A	100	3,81E-01	8,71E-01
A-SW-SE8401-A	1	5,71E-04	4,47E-01
I-CC-EX841E842	1	4,87E-04	4,47E-01
A-CC-CEX841E842	1	3,34E-04	4,47E-01
E-PR-LT8411-A	100	1,51E-04	4,26E-01

O Apêndice G apresenta a lista de completa de eventos básicos com os respectivos cálculos das diversas medidas de importância do sistema. O significado de cada coluna é o mesmo que foi apresentado no 4.5.1.2 desse trabalho.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os dois casos analisados nesse trabalho, sob as diferentes combinações de falhas que foram apresentadas, fornecem uma ampla visão do sistema sob a ótica de confiabilidade e segurança.

Para o primeiro caso, com componentes reparáveis e com componentes testados periodicamente, os resultados revelam que a partir de 1000 horas de operação a probabilidade de falha torna-se praticamente constante atingindo o patamar de $3.65E-05$. Considerando como frequência de falha e fazendo às devidas conversões, conclui-se que são esperadas em torno de 0,00032 falhas por ano ou uma falha desse tipo a cada 3125 anos aproximadamente. Também é possível concluir que as falhas de causa comum representam a maior contribuição para a probabilidade de falha do sistema, com aproximadamente 53,4%. Em uma proporção menor, mas não desprezível, as falhas humanas representam cerca de 14,5% da probabilidade de falha do sistema.

Excetuando-se as falhas de causa comum e analisando os cortes mínimos e as medidas de importância, podemos observar que os eventos de falha associados à distribuidora de energia (E-FD-GERAL-A) e aos geradores diesel (E-GE-8411-O) (E-GE-8421-O) apresentam grande contribuição para a indisponibilidade do sistema. Esses eventos foram identificados com riscos potenciais para a falha do sistema tanto pela contribuição individual calculada pelas respectivas medidas de importância quanto pela combinação de seus cortes mínimos.

É interessante observar que a probabilidade de falha do switch ethernet da SE8401 (A-SW-SE8401-A) foi identificado como um risco potencial ao sistema, tanto pela identificação dos cortes mínimos quanto pelas medidas de importância calculadas. Esse componente é o elemento de integração das comunicações entre as subestações SE841, SE842 e o sistema supervisor. É fortemente recomendável a inclusão de uma redundância desse equipamento.

Conforme já esperado, no segundo caso, sem componentes reparáveis e com componentes testados periodicamente, o tempo para falha total do sistema é bem menor se comparado com o primeiro caso. A simulação aponta que em apenas 1,8 meses a probabilidade de falha do sistema é de 1,0. A não reparação dos itens desgastados/danificados influencia muito na confiabilidade do sistema, aumentando consideravelmente a probabilidade de falha. Outro dado interessante é que as falhas de causa comum, apesar de continuarem sendo os maiores contribuintes na probabilidade de falha do sistema, agora apresentam peso muito menor se comparado

ao caso anterior. A parcela devido às falhas humanas é pequena e representa 1,0% da probabilidade total de falha do sistema.

De forma geral, os resultados apresentados podem auxiliar na melhoria efetiva na confiabilidade do sistema. Os cortes mínimos indicam os pontos fracos do sistema e quantificam a sua importância em relação à probabilidade de ocorrência do evento topo.

Diante dos resultados, foram feitas algumas recomendações:

Todas essas análises contribuem para uma melhor gestão dos riscos, da manutenção, dos ativos do empreendimento e da empresa resultando em redução de custos de manutenção, redução de paralisações na produção, ganho na segurança operacional e ocupacional dos IOE. Depois de classificados os itens, sistemas ou estruturas mais importantes para a segurança, todo o esforço deve ser empregado para um melhor gerenciamento destes ativos. Uma forte interação entre os diversos setores envolvidos (compras, operação, manutenção, segurança e outros) nesse processo deve ser estabelecida para que não se perca nenhuma informação relevante para a segurança operacional da mina.

Em paralelo, um sistema de garantia da qualidade eficiente deve ser implantado a fim de estabelecer e procedimentar todo o processo de garantia da qualidade. Procedimentos devem ser elaborados para questões de segurança, operação, manutenção, treinamentos, armazenamento, transporte, itens não conformes, testes e auditorias para as diversas fases do projeto desde a sua concepção, comissionamento, operação, manutenção e descomissionamento.

No processo de licenciamento de instalações do ciclo do combustível no Brasil, o órgão regulatório deveria exigir análises probabilísticas de segurança e propor níveis mínimos de risco global para novos projetos, assim como é feito para o caso de usinas nucleares nos Estados Unidos da América, onde indicadores como *Core Damage Frequency* (CDF) e *Large Early Release Frequency* (LERF) são requisitos obrigatórios a serem atendidos em qualquer modificação de projeto que altere as bases do projeto licenciado ou por qualquer nova usina nuclear conforme descrito no Regulatory Guide 1.174 (USNRC, 2011b).

Como sugestões para trabalhos futuros são propostos estudos comparativos com os dados reais de operação da planta quando o empreendimento estiver em funcionamento, ou simulações considerando diferentes estratégias de manutenção e verificando a relação custo-benefício ou considerar as incertezas em todos os dados de entrada do sistema, incluindo tempos de reparo e intervalos entre testes.

CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMEBC - ASSOCIATION FOR MINERAL EXPLORATION BRITISH COLUMBIA - **Canadian Mineral Exploration Health & Safety Annual Report 2011/2012**. Canada, 2013.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas da Energia Elétrica do Brasil**, 3ª ed. Brasília, 2008.

ATM: The New Wave in BroadBand Telecommunications. Vol.41. Information Gatekeepers, Inc., Boston, Massachusetts, USA. Apr. 1992.

BILLINTON, R. ; ALLAN, R. N. **Reliability Evaluation of Engineering Systems – Concepts and Techniques**. 2nd ed. New York: Plenum, 1992.

BOBBIO, A. ; PORTINALE, L. ; MINICHINO, M. ; CIANCAMERLA, E. – **Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks**, Reliability Engineering and System Safety 71, 2001.

BONFIETTI, G. **Análise da confiabilidade do sistema de suprimento de energia elétrica de emergência de um reator nuclear de pequeno porte**. 2003, 123f. Dissertação (Mestrado na Área de Tecnologia Nuclear - Reatores) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN, São Paulo, 2003.

CANDIA, R. C.; HENNIES, W. T.; IRAMINA, W.; ELGUERA, J. F. S. Análise de acidentes fatais na mineração – o caso da mineração no Peru. **REM: Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, vol.62 n°4, out./dez. 2009.

CCPS-AIChE - CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY OF THE AMERICAN INSTITUTE AMERICAN OF CHEMICAL ENGINEERS. **Guidelines for hazard evaluation procedures: with worked examples**. 2nd ed. New York, 1992.

CNEN - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR – **CNEN-NE-1.04 - Licenciamento de Instalações Nucleares**. Rio de Janeiro, Brasil. 2002.

CNEN - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR – **CNEN-NE-1.13 - Licenciamento de Minas e Usinas de Beneficiamento de Minérios de Urânio e/ou tório**. Rio de Janeiro. Brasil. 1989.

CNSC - Canadian Nuclear Safety Commission. **Radon and Health**. Ottawa. Jan. 2012. Disponível em: http://nuclearsafety.gc.ca/pubs_catalogue/uploads/January-2012-Radon-and-Health-eng.pdf

DHILLON, B. S. **Reliability engineering in systems design and operation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1982.

FEI-MIN S.; BO-HUI C.; JIAN Y. **Study on construction and quantification of evaluation index system of mine ventilation system**. The 6th International Conference on Mining Science & Technology, Vol. 1, p.114-122, Sep. 2009.

FILHO, S. S. **Análise de Árvore de Falhas Considerando Incertezas na Definição dos Eventos Básicos**. 2006, 277f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

GERTMAN, D. I., BLACKMAN, H. S., MARBLE, J. L., BYERS, J. C., SMITH, C. L.. **The SPAR-H Human Reliability Analysis Method**. Washington, DC, U.S. Nuclear Regulatory Commission. 2004. (NUREG/CR-6883)

HOLLNAGEL, E. **Cognitive Reliability and Error Analysis Method**. Oxford, Elsevier Science, 1998.

IAEA – INTERNACIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – **IAEA-TECDOC-1267 – Procedures for conducting probabilistic safety assessment for non-reactor nuclear facilities**. Vienna – Austria. Jan. 2002.

IAEA – INTERNACIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – **IAEA-TECDOC-1436 – Risk-informed regulation of nuclear facilities: overview of the current status**. Vienna - Austria. Fev. 2005. Disponível em: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/>

IAEA – INTERNACIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – **IAEA-TECDOC-478 – Component Reliability Data For Use In Probabilistic Safety Assessment**. Vienna – Austria. Oct. 1988.

IAEA – INTERNACIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – **Specific Safety Guide - No. SSG-3 - Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants**. Vienna – Austria. 2010.

IEC – INTERNACIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **62061: Safety of machinery functional safety of safety related electrical, electronic and programmable electronic control systems**. Geneva. 2005.

IEEE – INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – **Guide to the Collection and Presentation of Electrical, Electronic, Sensing Component and Mechanical Equipment Reliability Data for Nuclear Power Generating Stations**. 1984. (IEEE Std 500).

IEEE – INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – **Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems**. New York. Feb. 2007 (IEEE Std 493).

INB – INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL - **Projeto elétrico da mina subterrânea – INB/CIMTEC – nº1128-000000-GML01 e GML02 – Rev.02**. Dez. 2011a.

INB – INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL - **Relatório de Local – CNEN1.04 e 1.13 – Licenciamento de instalações nucleares (Projeto Santa Quitéria) – Análise Preliminar de Riscos**. Rio de Janeiro. Mai. 2015.

INB – INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL - **Relatório de Ventilação na Mina Subterrânea da URA para Radônio e Filhos**. Rev. 01. 2011b.

INB – INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL – **Relatório Preliminar de Análise de Segurança (RPAS)**. Rev.00. 2014.

JACOBONI, C.; REGGIANI, L. **The Monte Carlo method for the solution of charge transport in semiconductors with applications to covalent materials**. Rev. Mod. Phys, v. 55, n. 3, p. 645-705, 1983.

KAMAT, S.J.; RILEY, M.W. **Determination of Reliability Using Event-Based Monte Carlo Simulation**. IEEE Transactions on Reliability, v. 24, n. 1, 1975.

KAROLY, C. K. **New ventilation design criteria for underground metal mines based upon the “life-cycle” airflow demand schedule**. The University Of British Columbia (Vancouver). August 2009.

LAFRAIA, J. R. B. **Manual de Confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

LEE, W.S.; GROSH,D.L.; TILLMAN, F.A. e LIE, C.H. ***Fault tree analysis, methods, and applications - a review. AIEE Transactions on Reliability***, R34, n.3, p. 194-203, august 1985

LEES, F. P. ***Loss prevention in process industries***. 1st. ed rev. atual. London UK: Butterworth-Heinemann, 1991. 2 V.

MCA - MINERALS COUNCIL OF AUSTRALIA - ***Safety Performance Report of the Australian Minerals Industry 2008-2009***. Australia. 2009.

MIAO Z.; WANG Z.; LAN W. ***Reliability evaluation of mine ventilation systems based on multi-state system theory***. Control and Automation (ICCA), 2010 8th IEEE International Conference on, p. 1092-1097, Jun. 2010.

MODARRES, M. – ***What Every Engineer Should Know about Reliability and Risks Analysis***, Marcel Dekker, EUA, 1993.

MODARRES, M., ***Risk Analysis in Engineering, Techniques, Tools, and Trends***.Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, 2006.

MOUBRAY, J. ***Reliability-centered maintenance***. London: Butterworth Heinemann, 1992.

MTE - MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. ***Norma Regulamentadora 22 (NR22): Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração***. DOU. Brasília. 2014.

MURAD, A. M. Radônio uma ameaça aos pulmões. Correio Braziliense, Distrito Federal, 27 nov. 2013. Saúde. p.1-4.

NASA – NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - ***Agency risk management procedural requirements (NPR 8000.4A)***. 2008. Disponível em: http://nodis3.gsfc.nasa.gov/displayDir.cfm?Internal_ID=N_PR_8000_004A_.47

NASA – NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - ***Risk-Informed decision making handbook (NASA/SP-2010-576)***. 2010. Disponível em: <http://standards.nasa.gov/documents/viewdoc/3315763/3315763>

NEIL, M. ; TAILOR, M. ;MARQUEZ, D. – ***Inference in Bayesian Networks using dynamic discretization***. Journal of Statistics and Computing, 17-3. 2007.

NIOSH - THE NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH
- **Mining Statistics**. 2012. Disponível em:
<http://www.cdc.gov/niosh/mining/statistics/allmining.html>

NOVAK T.; KOLHER J. L. **Technological innovations in deep coal mine power systems**. IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 34, Nº 1, p. 196-204. Jan-Feb. 1998.

NUTTER R. S. **Hazard Evaluation Methodology for Computer-Controlled Mine Monitoring/Control Systems**. IEEE Transactions on Industry Applications, IA-19, Nº 3, p. 445-449. May-Jun. 1983

RAC – RELIABILITY ANALYSIS CENTER. **Nonelectronic Parts Reliability Data – NPRD 95:1995**. New York.1995.

RAPOSO, J. L. O. **Manutenção Centrada em Confiabilidade aplicada à sistemas elétricos: uma proposta para análise de risco no diagrama de decisão**. 2005, 134f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2005.

RAPOSO, J. L. O. **Manutenção Centrada em Confiabilidade aplicada à sistemas elétricos: uma proposta para análise de risco no diagrama de decisão**. 2005, 134f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2005.

SAFEWORKAUSTRALIA – **Statistical Reports** – Data de publicação: 25/03/2013. – Disponível em: www.safeworkaustralia.gov.au

SCHEER, G. W. **Answering Substation Automation Questions Through Fault Tree Analysis** - Schweitzer Engineering Laboratories (SEL). Washington, 1998.

STANEK E.K., VENKATA S.S. **Mine Power System Reliability**. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 24, No. 5, Sep-Oct. 1988.

STUSEL, M. **Evaluating Safety and Health in Australian's Mining Sector**. **CornerStone – The official journal of the world coal industry**, Australia. 28 de Jul. 2014. Disponível em: <http://cornerstonemag.net/evaluating-safety-and-health-in-australias-mining-sector/>

USNRC - UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. ***An Approach for Using Probabilistic Risk Assessment in Risk-Informed Decisions on Plant-Specific Changes to Licensing Rules***, Rev. 02. May. 2011b.

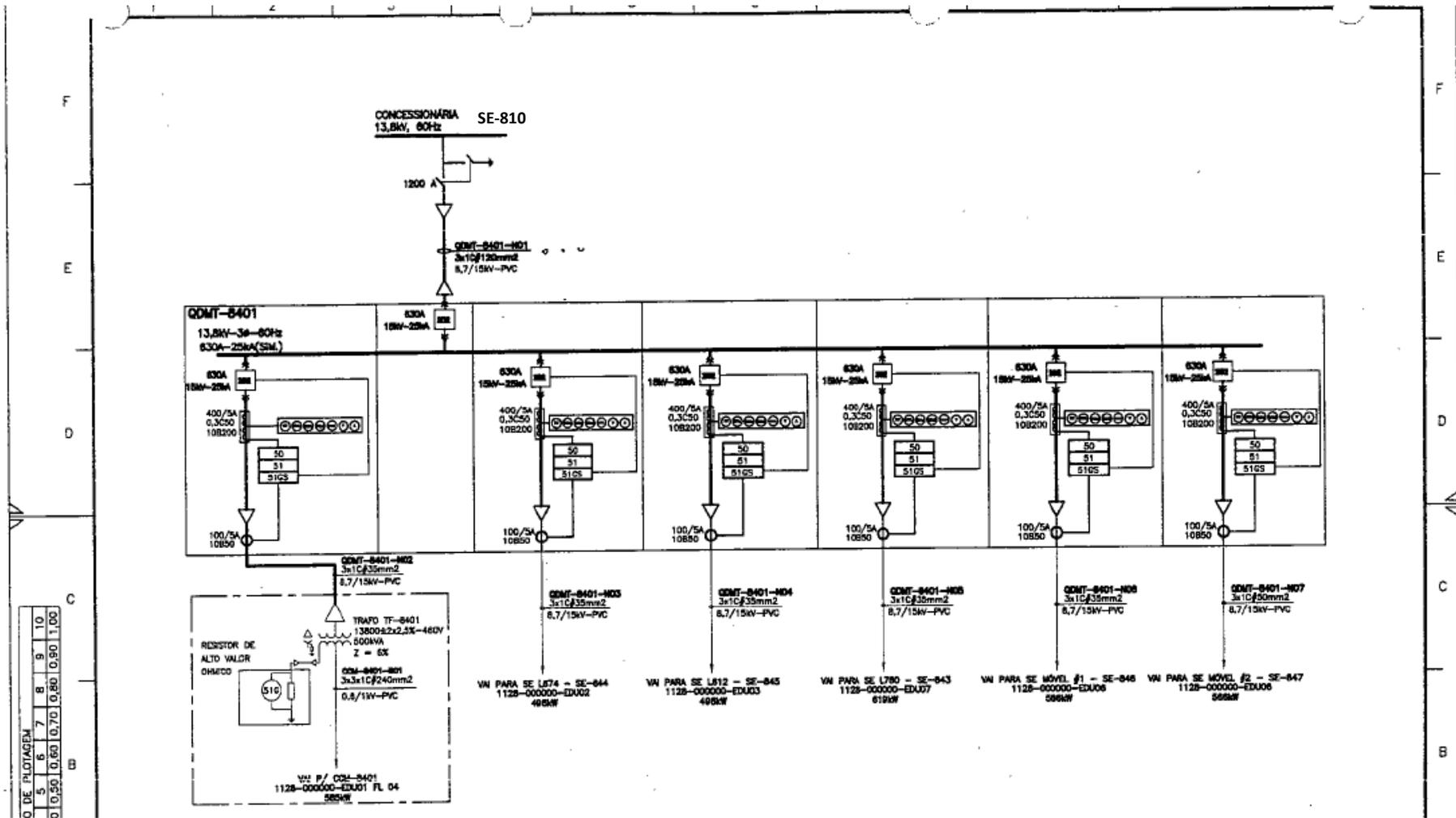
USNRC - UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. ***Procedures for Treating Common Cause Failures in Safety and Reliability Studies***. Washington. Jan, 1998. (NUREG/CR 4780).

USNRC - UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. ***Reliability Study: Emergency Diesel Generator Power System 1987-1993***. Vol.05 Washington. Sep. 1999 (NUREG/CR 5500).

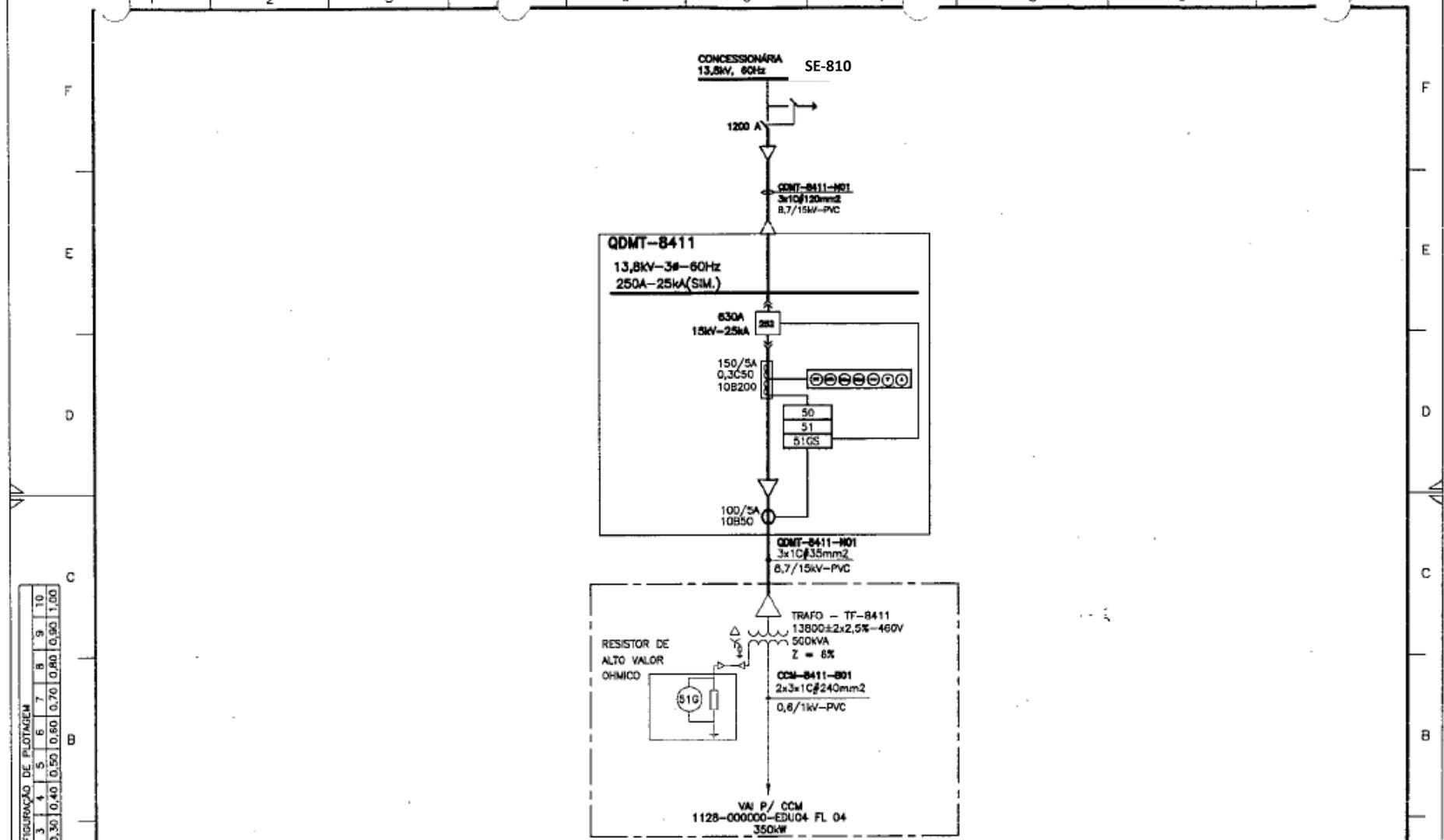
USNRC – UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. ***Systems Analysis Programs for Hands-on Integrated Reliability Evaluations (SAPHIRE) Version 8***, Vol. 02. Jun. 2011a. (NUREG/CR-7039).

ZHANG Y. C.; ZHANG R. W.; KONG X. Z.; GONG J. Y.; CHEN Q. G. ***Development of monitoring and control system for a mine main fan based on frequency converter***. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 52, 2013.

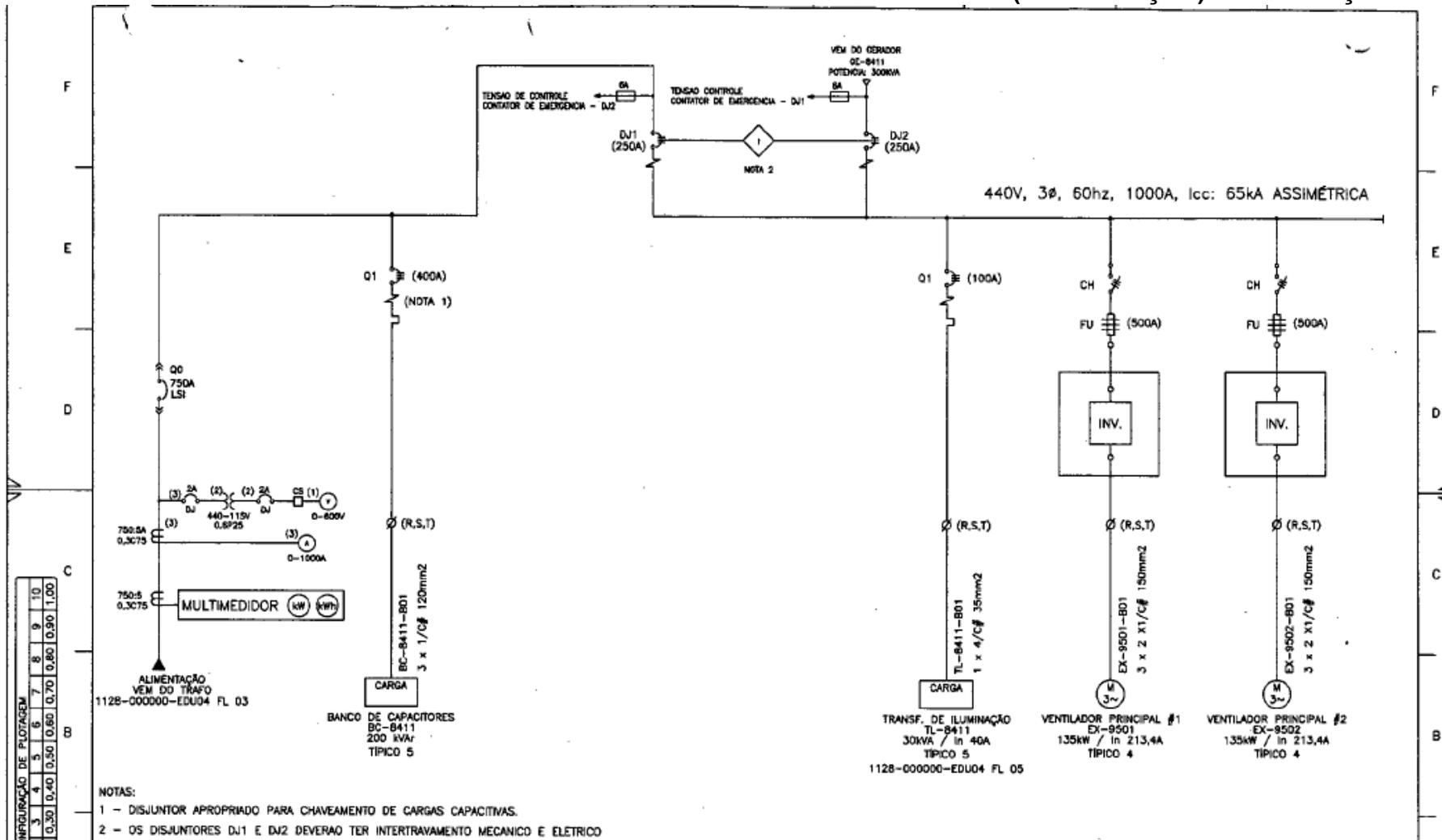
APÊNDICE A – DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA ELÉTRICO DA MINA SUBTERRÂNEA.



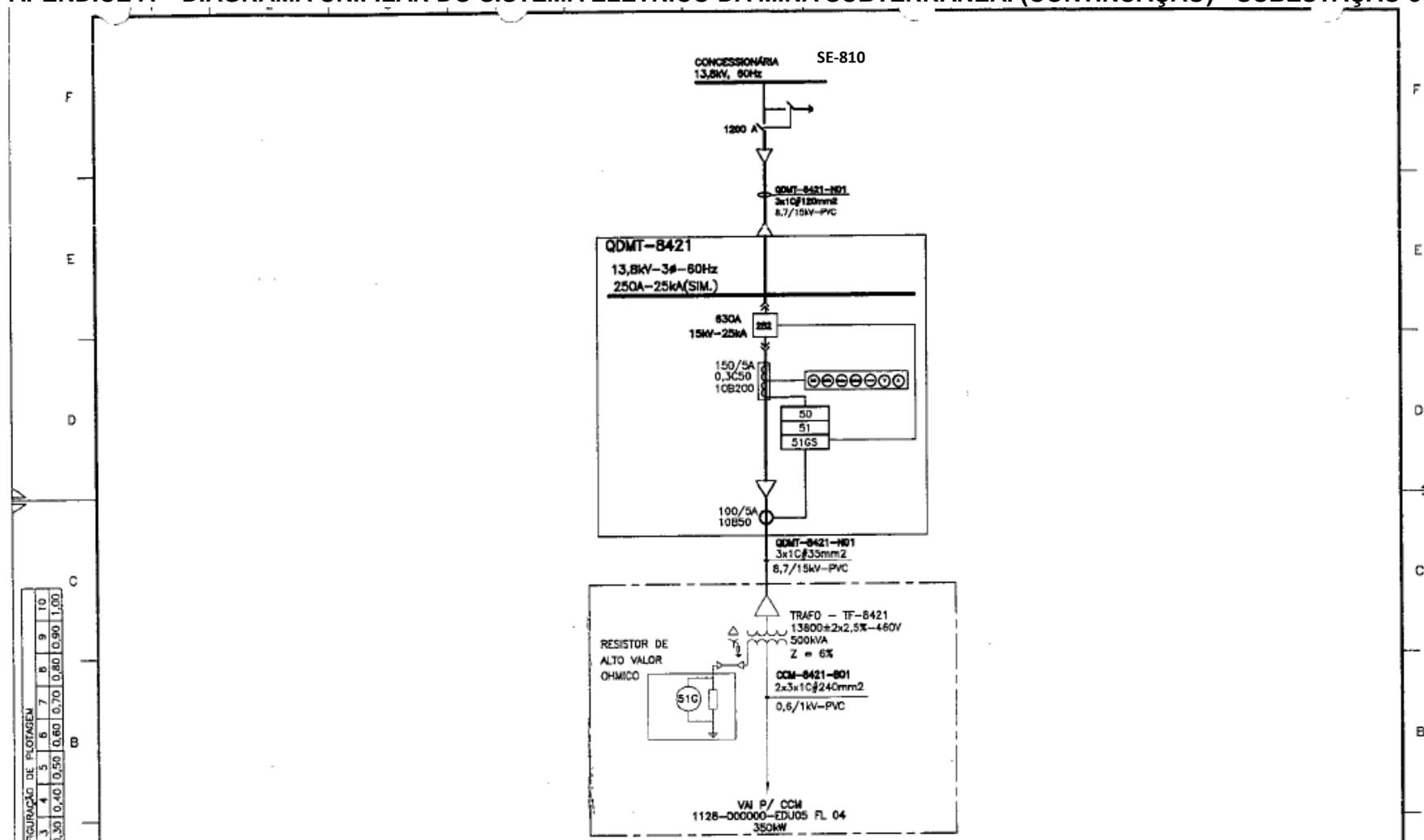
APÊNDICE A – DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA ELÉTRICO DA MINA SUBTERRÂNEA. (CONTINUAÇÃO) - SUBESTAÇÃO 841



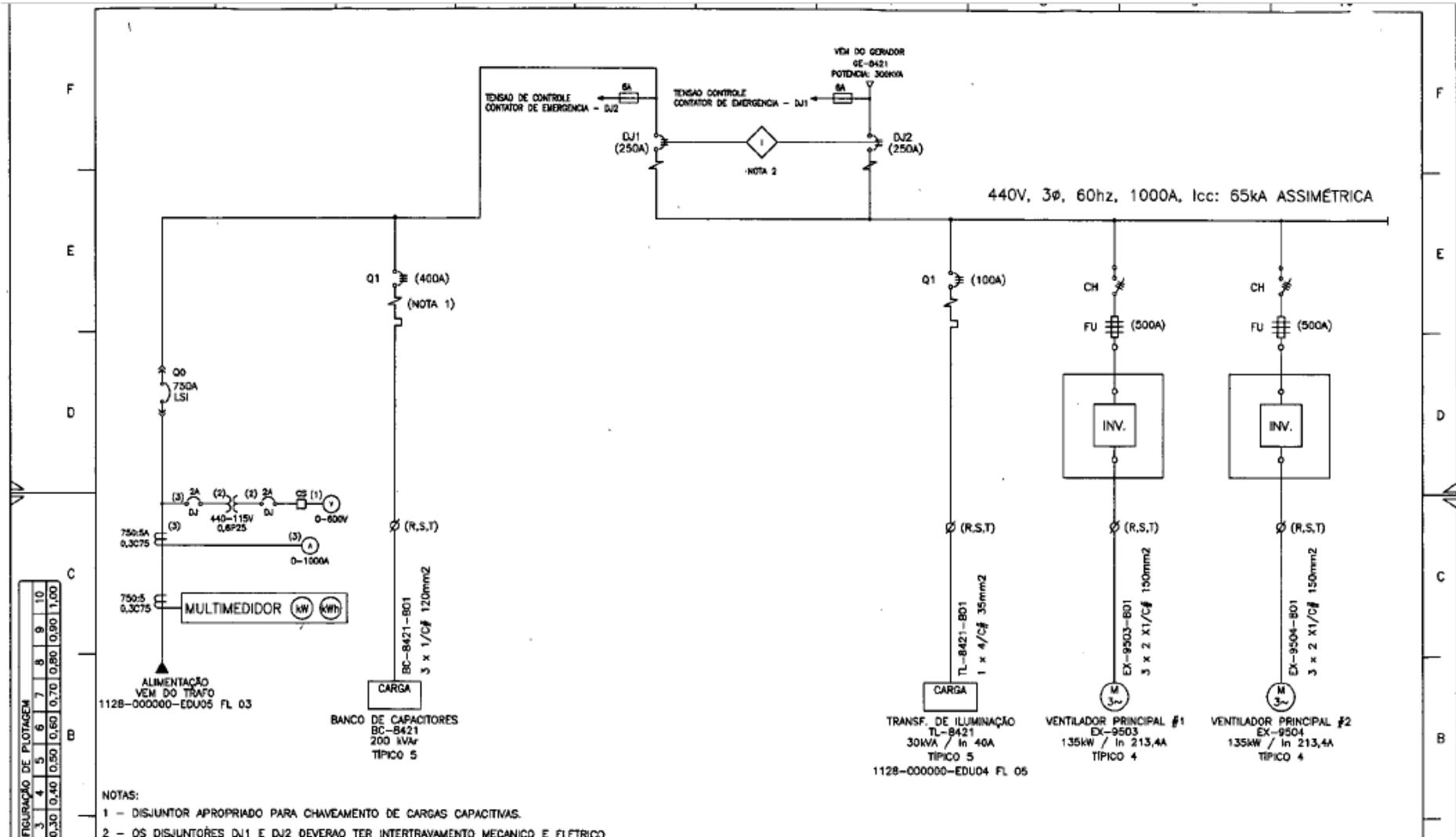
APÊNDICE A – DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA ELÉTRICO DA MINA SUBTERRÂNEA. (CONTINUAÇÃO) - SUBESTAÇÃO 841



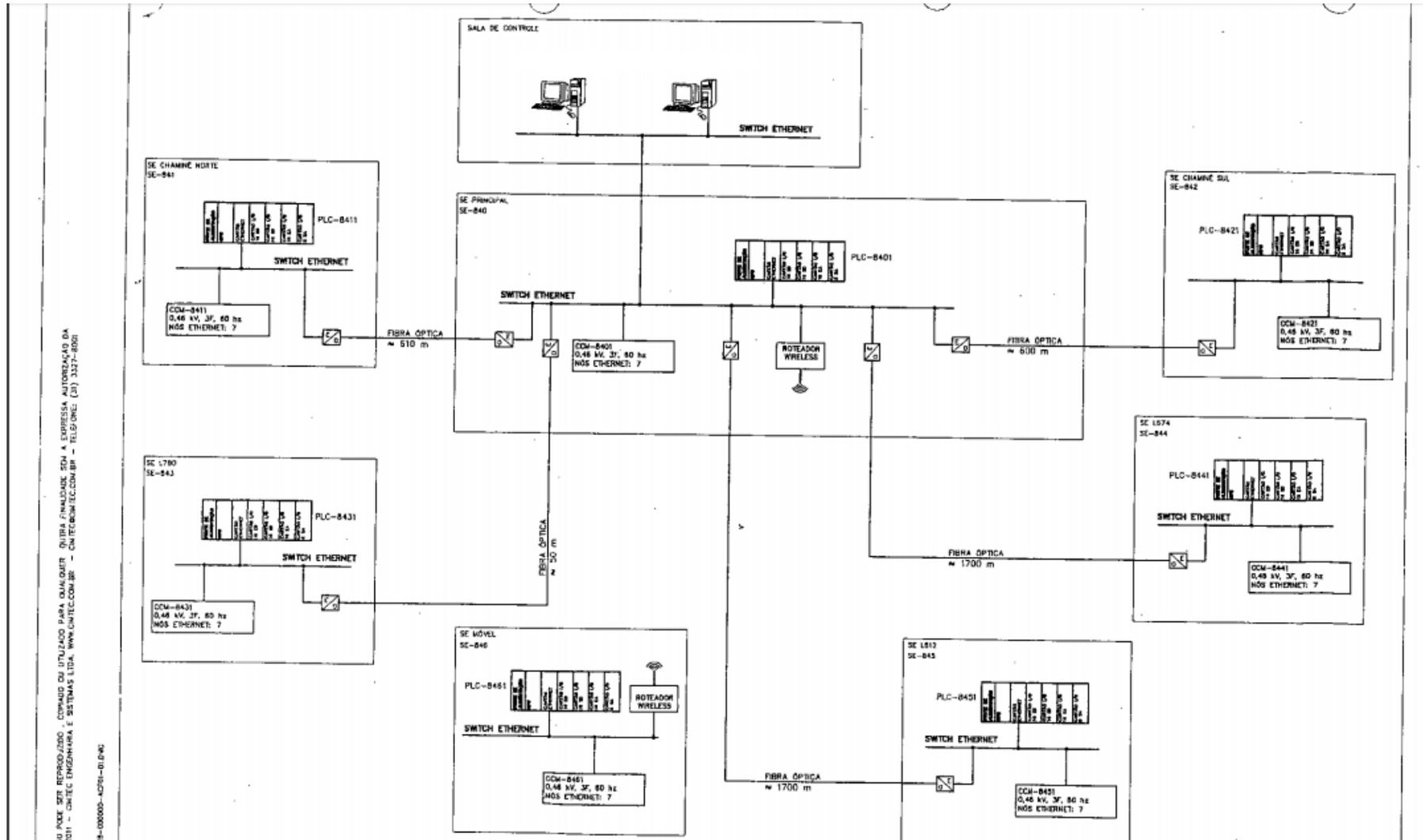
APÊNDICE A – DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA ELÉTRICO DA MINA SUBTERRÂNEA. (CONTINUAÇÃO) - SUBESTAÇÃO 842



APÊNDICE A – DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA ELÉTRICO DA MINA SUBTERRÂNEA. (CONTINUAÇÃO) - SUBESTAÇÃO 842



APÊNDICE B – DIAGRAMA DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DA MINA SUBTERRÂNEA.



APÊNDICE C – LISTA DE CÓDIGOS PARA IDENTIFICAÇÃO DOS EVENTOS BÁSICOS.

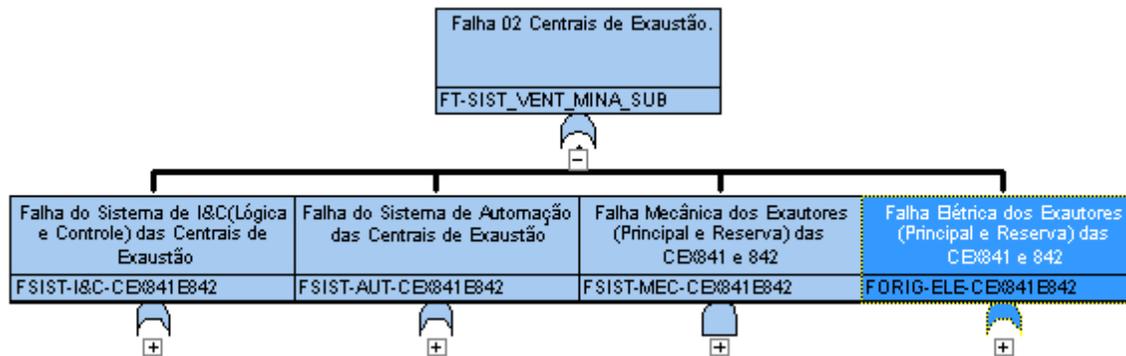
Códigos de identificação do Sistema de Origem da Falha	
A	Automação
E	Elétrica
I	Instrumentação e Controle
M	Mecânica

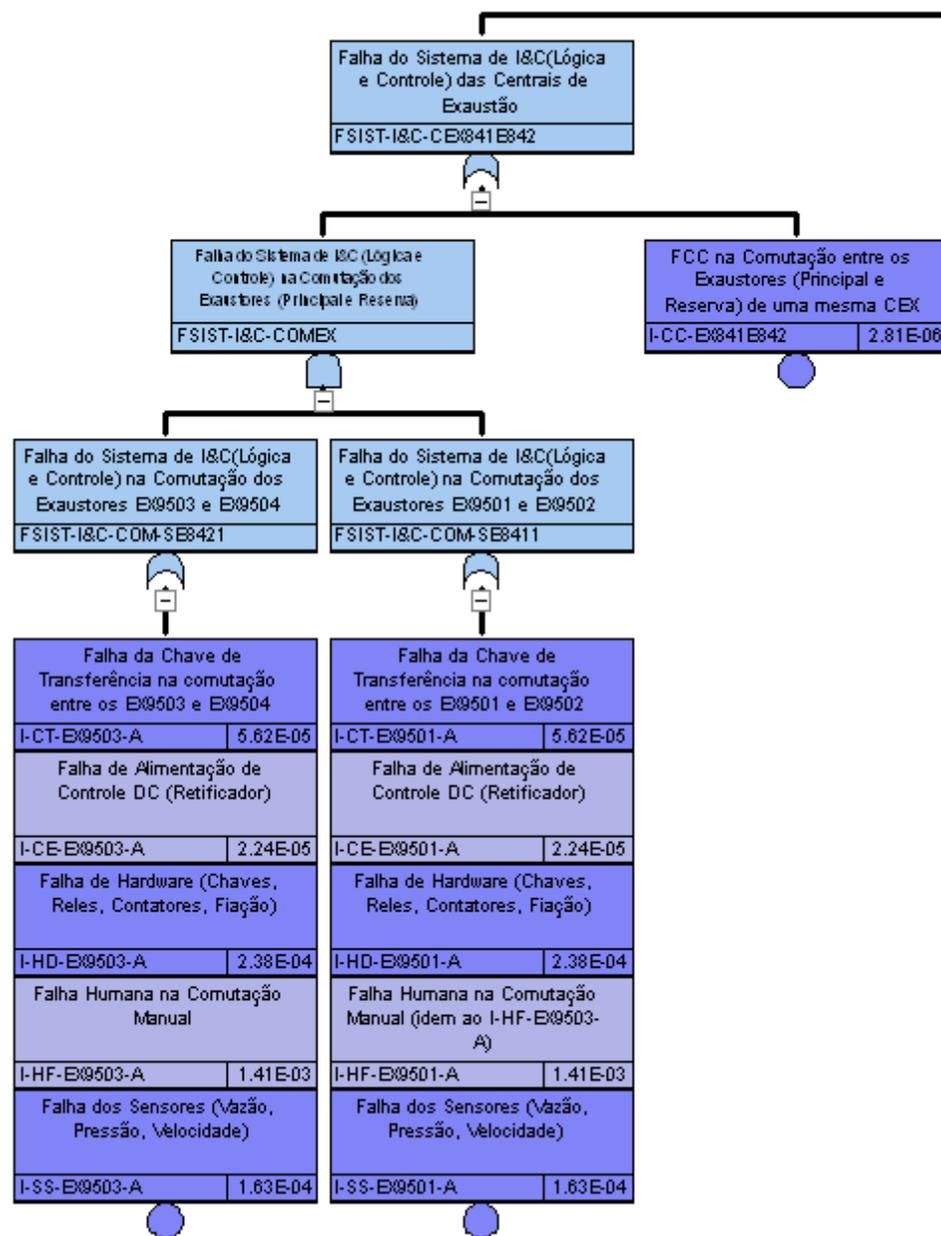
Lista de códigos de identificação do componente			
AC	Acoplamento	HD	Hardware
AL	Alimentador (energia)	HF	Falha Humana
BS	Barramento	IS	Isolamento
CA	Cabo	IT	Intrínseca/Interna
CC	Causa de falha Comum	LC	Lógica de Controle
CE	Contator de Emergência	LT	Linha de Transmissão
CS	Chave Seccionadora	MO	Motor
CT	Chave de Transferência	PC	Computador Pessoal
DJ	Disjuntor	PL	Programador Lógico
DR	Driver/Inversor de frequência	PR	Para-Raios
EI	Eixo Mecânico	QD	Quadro de Distribuição
EN	Enrolamento	RL	Rolamento
ES	Estator	RP	Réle de Proteção
FD	Falha da Concessionária	SP	Sistema de Proteção
FO	Fibra Óptica	SS	Sensores
FU	Fusível	SW	Switch Ethernet
GE	Gerador	TP	Transformador de Potência

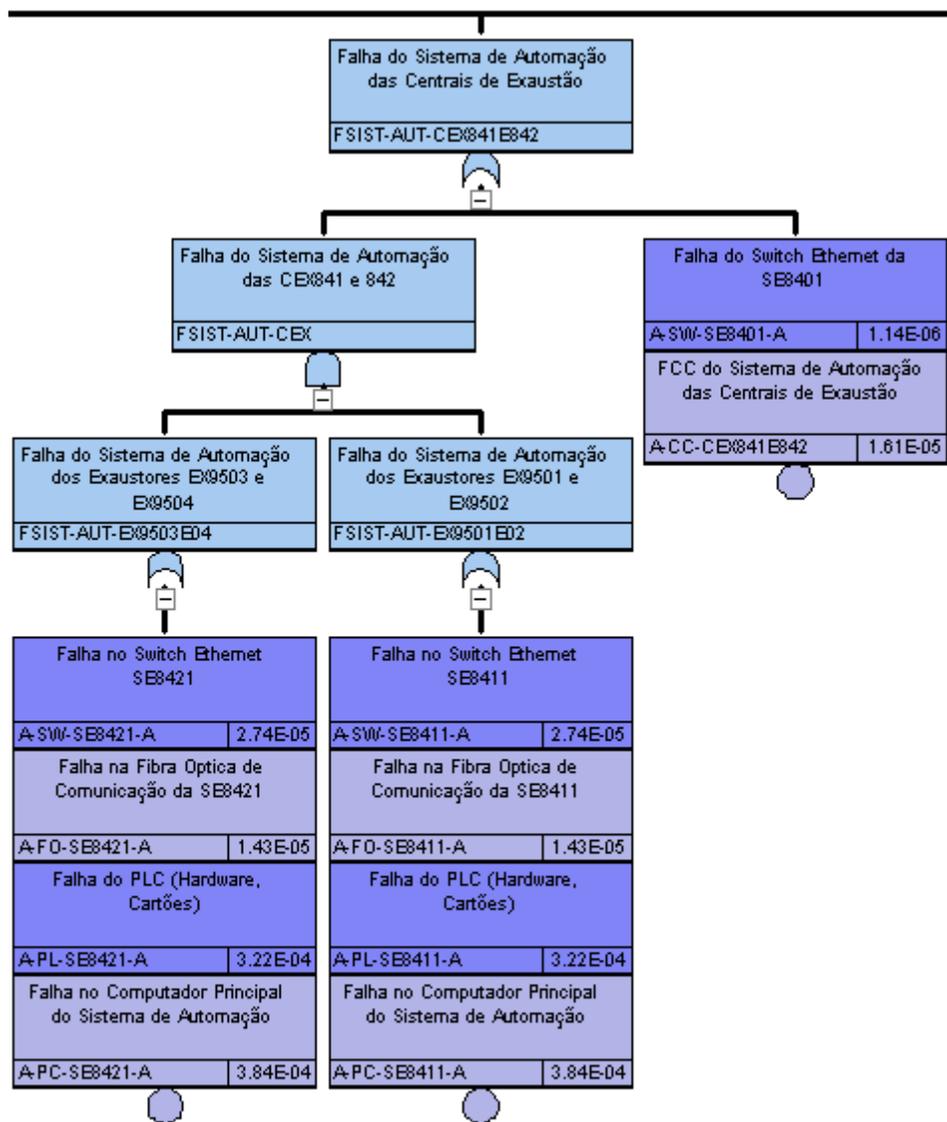
Códigos de identificação da Localização do componente	
CCM8411	Centro de Comando de Motores 8411
CCM8421	Centro de Comando de Motores 8421
CEX841E842	Central de Exaustão 841 e 842
EX01E02	Exaustor Principal EX9501 e Exaustor Reserva 9502
EX03E04	Exaustor Principal EX9503 e Exaustor Reserva 9504
EX9501	Exaustor Principal EX9501
EX9502	Exaustor Reserva EX9502
EX9503	Exaustor Principal EX9503
EX9504	Exaustor Reserva EX9504
GE8411	Gerador de Emergência 8411
GE84211	Gerador de Emergência 8421
GV01E02	Quadro/Gaveta de alimentação dos Exaustores EX9501 e EX9502
GV03E04	Quadro/Gaveta de alimentação dos Exaustores EX9503 e EX9504
LT8411	Ramal da linha de distribuição 8411
LT8421	Ramal da linha de distribuição 8421
QDMT8411	Quadro de Média Tensão 8411
QDMT8421	Quadro de Média Tensão 8421
SE345KV	Subestação de entrada da Concessionária - 34,5KV
SE8411	Subestação 8411
SE8421	Subestação 8421

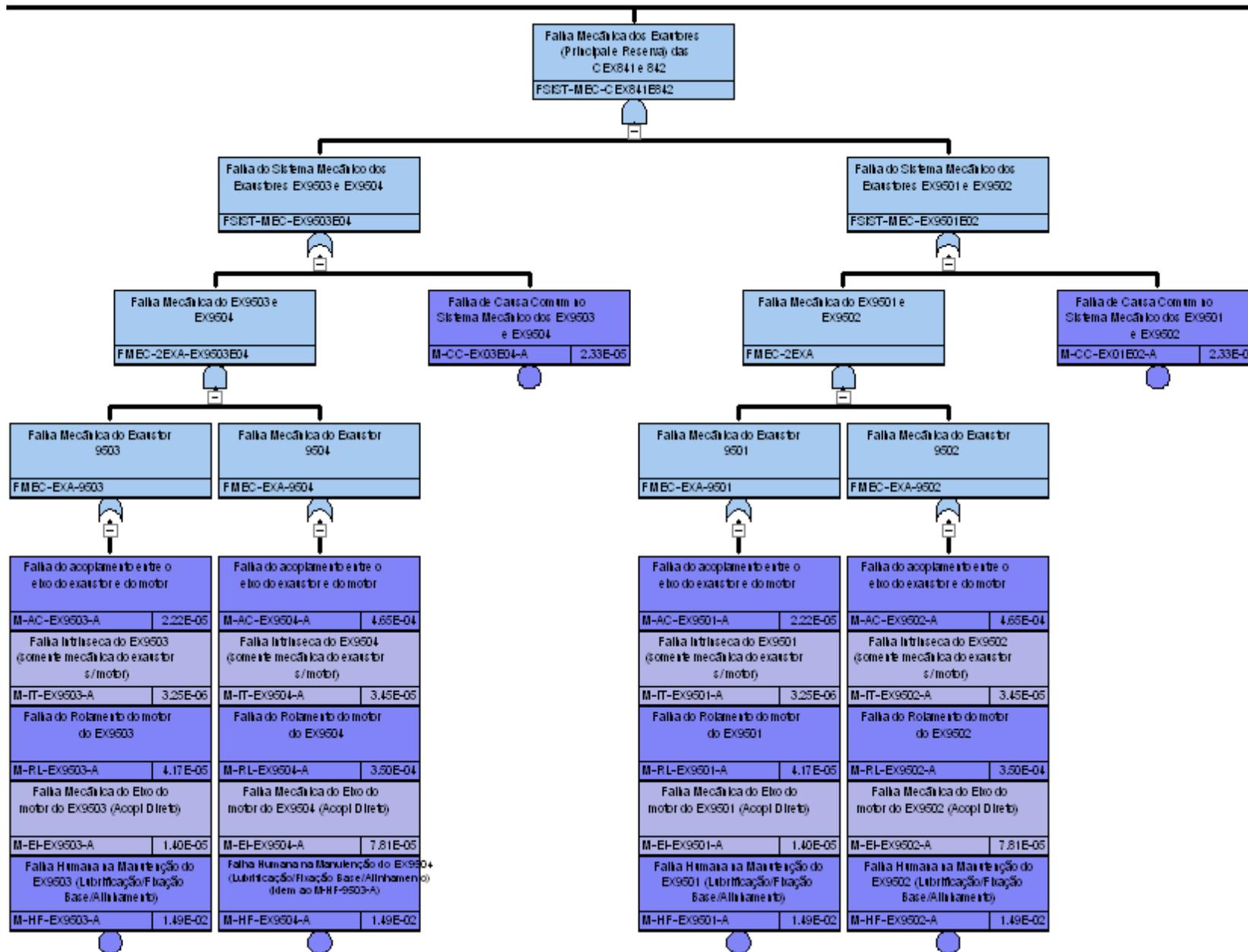
Códigos de identificação dos Modos de Falha	
A	Todos os modos de falhas possíveis
B	Quebra/Rompimento
M	Manutenção
O	Operação
P	Partida

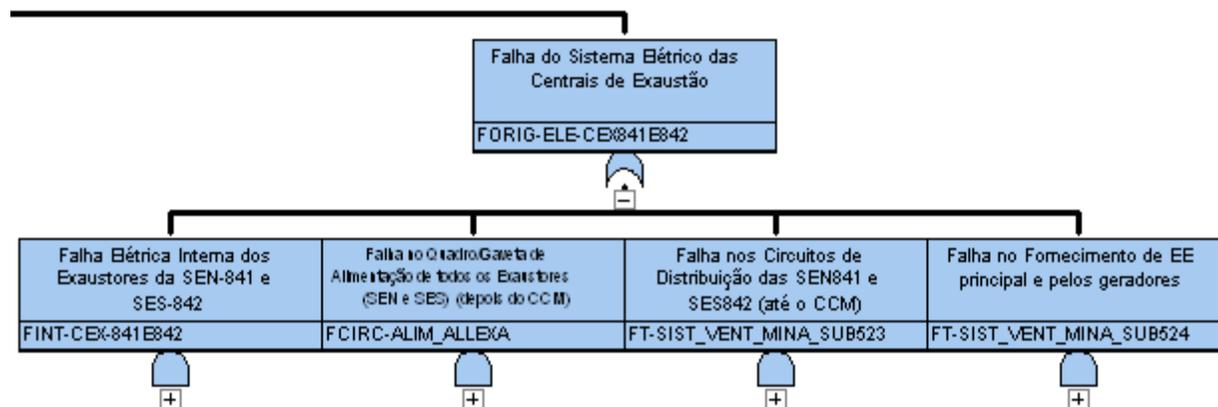
APÊNDICE D – ÁRVORE DE FALHAS DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO PRINCIPAL

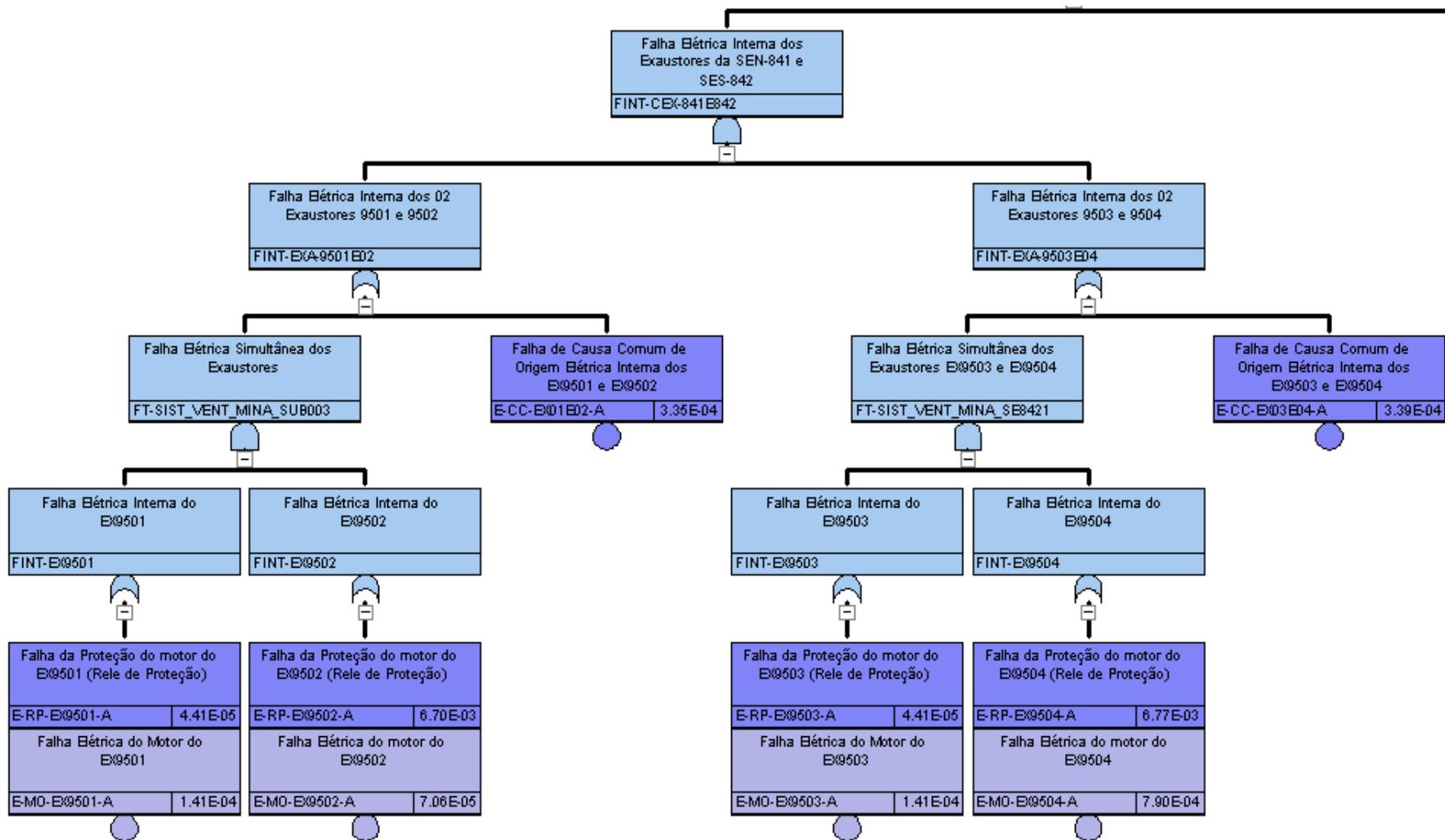


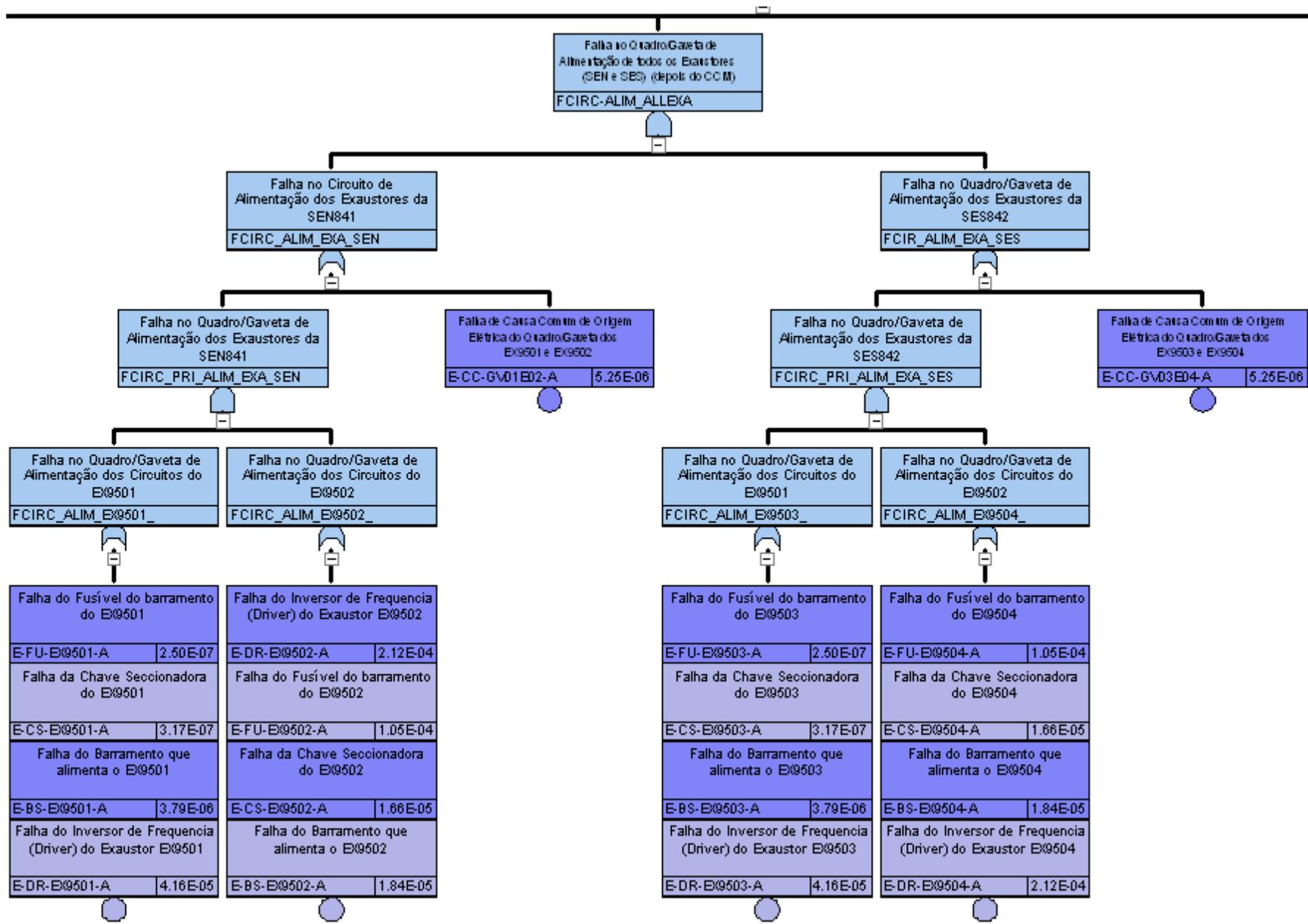


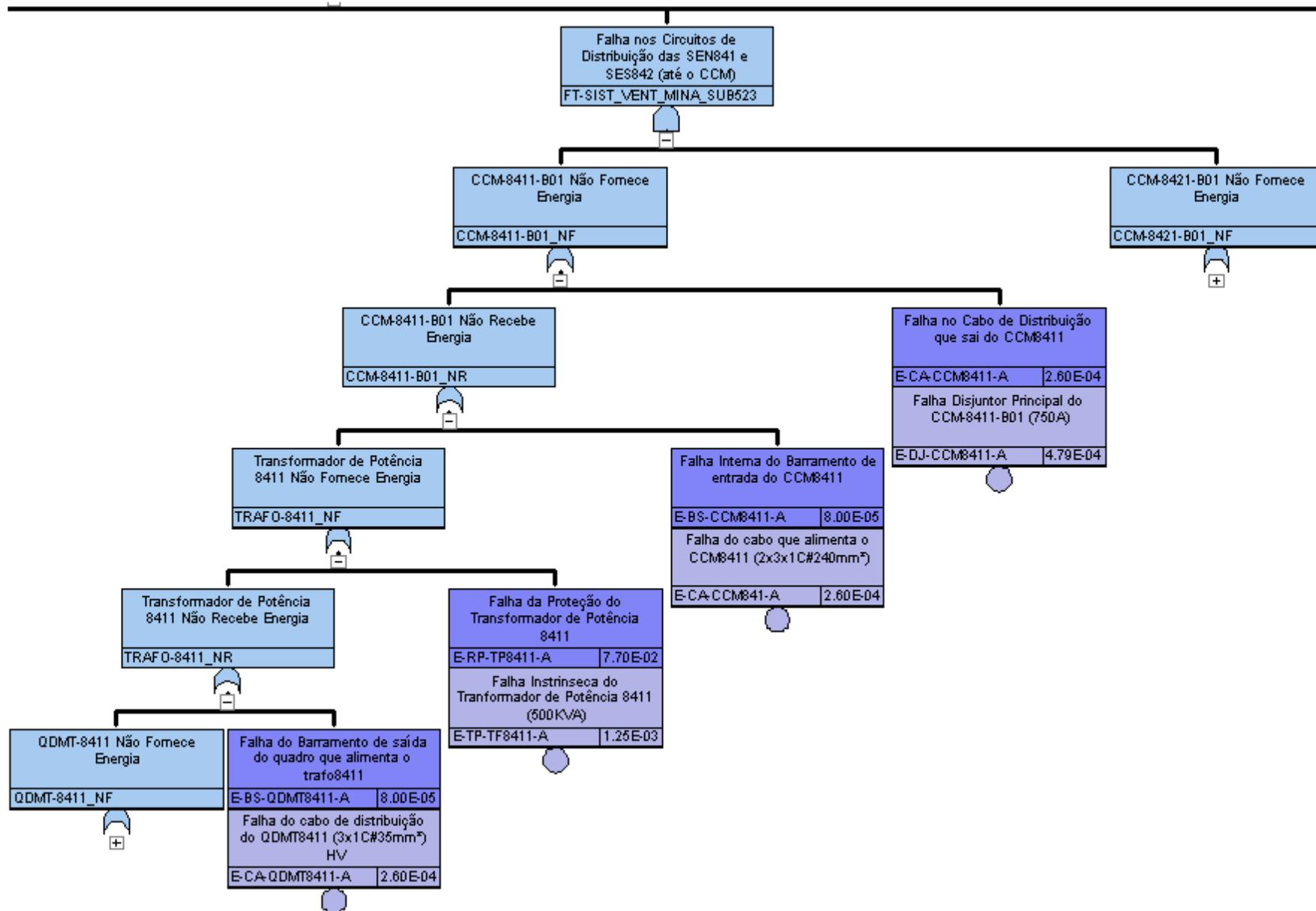


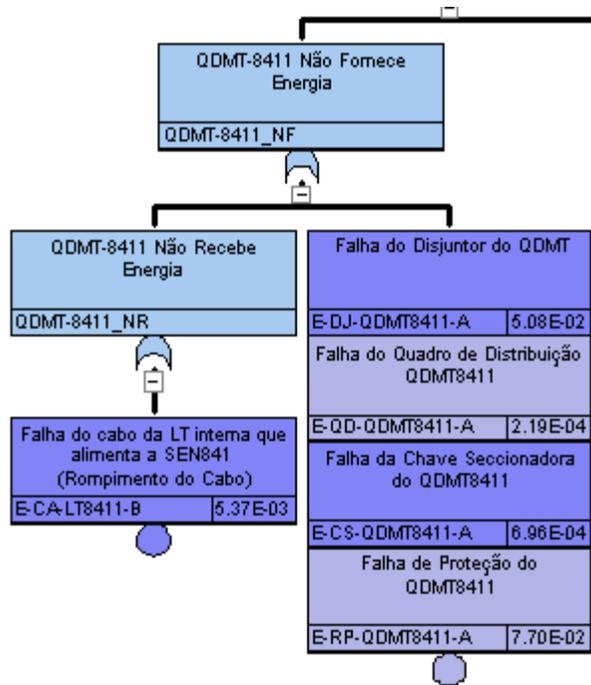


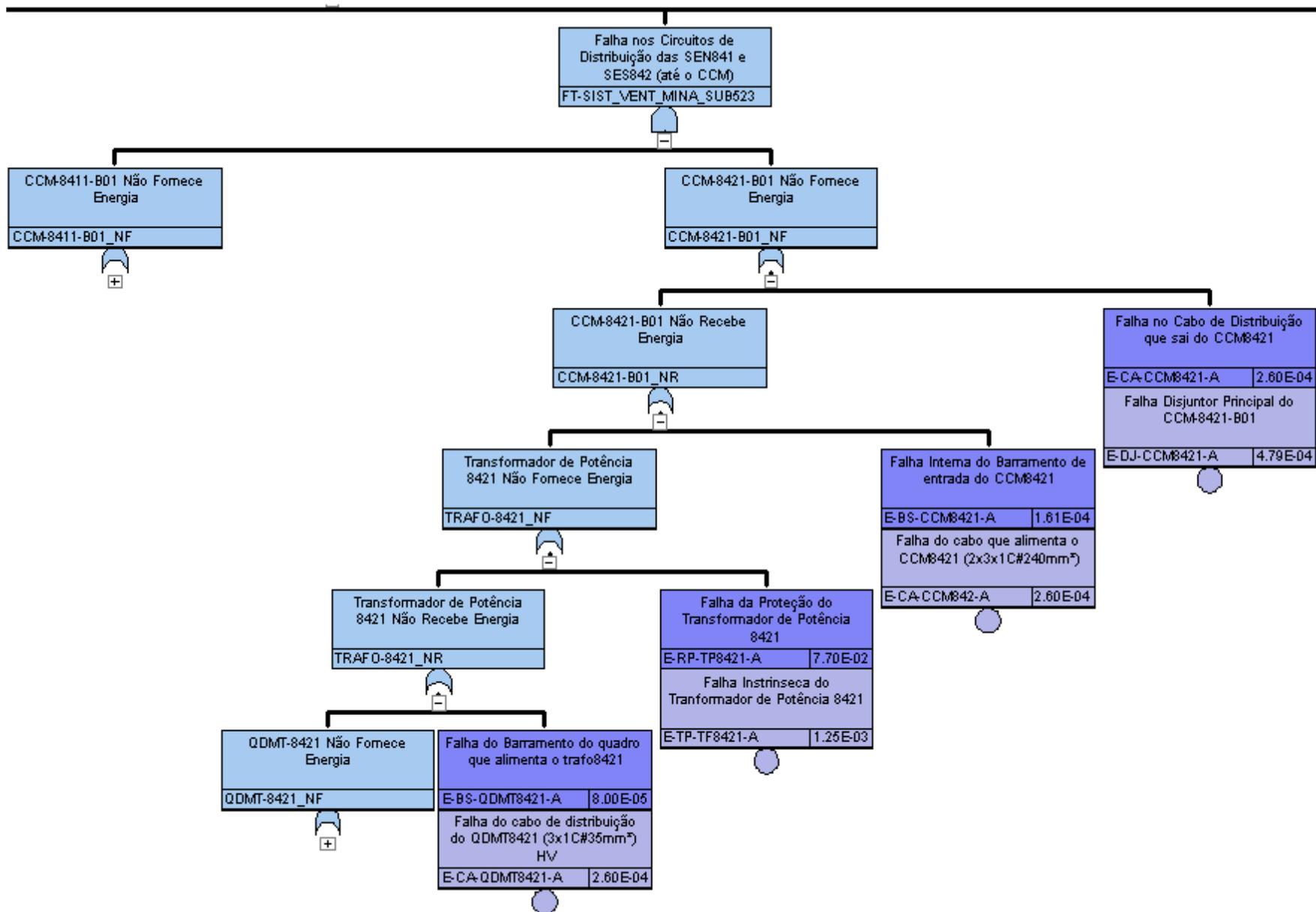


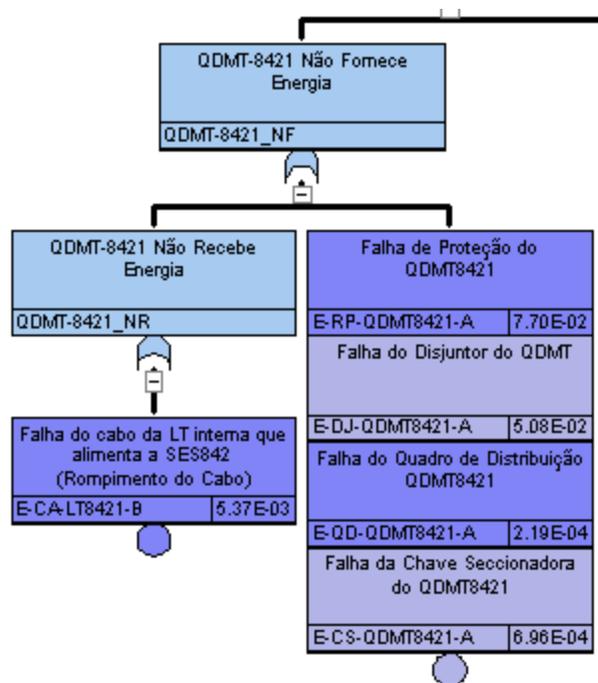


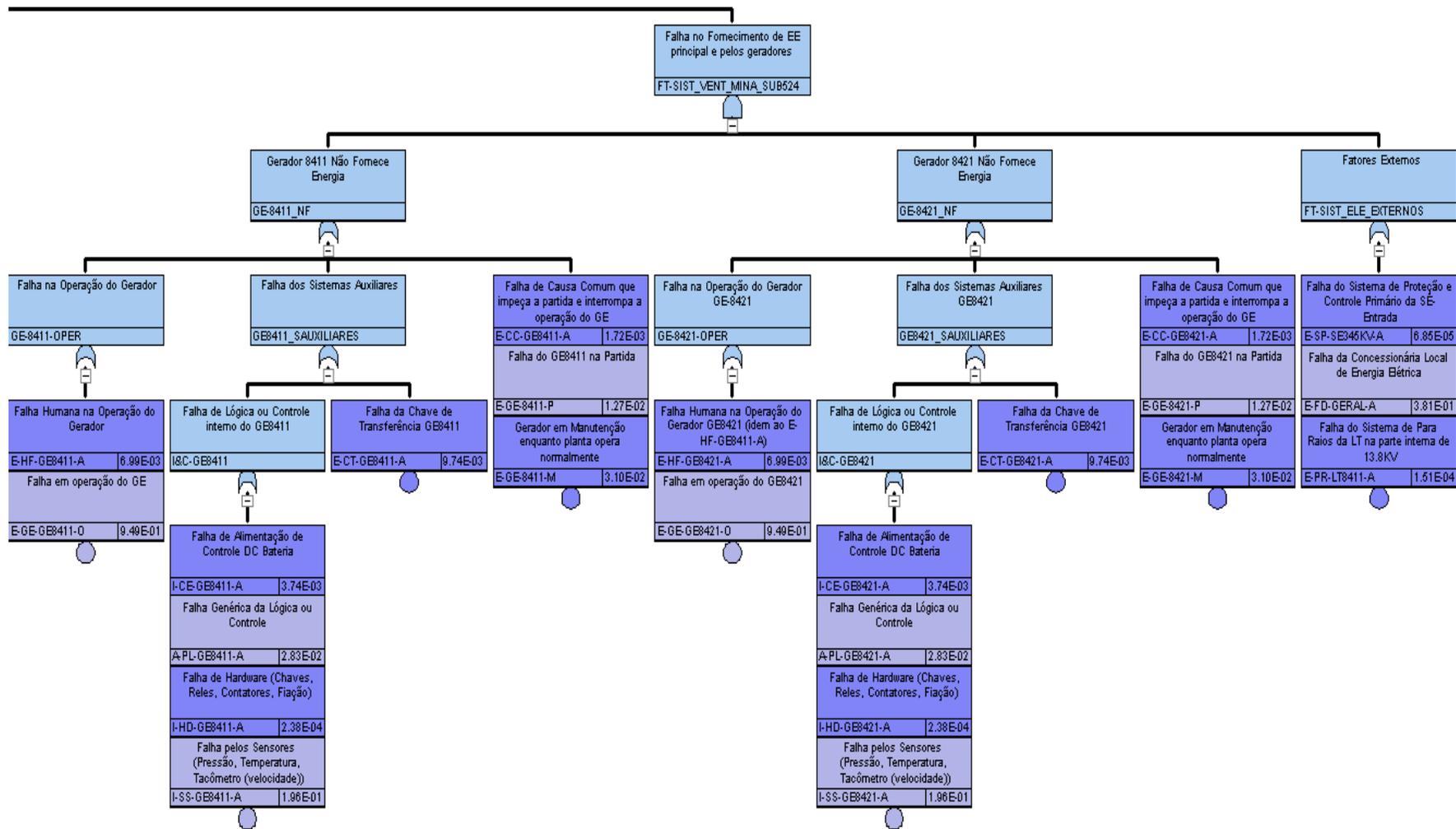












APÊNDICE E – PARÂMETROS E DADOS DE FALHA DOS COMPONENTES DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO PRINCIPAL.

Código do Evento Básico	Descrição do Evento Básico	Fonte	Frequência de falha (h⁻¹)	Tipo de Distribuição	Tipo de Modelo para Cálculo de Falha	(1) MTTR (h) / Intervalo de Testes
A-CC-CEX841E842	FCC do Sistema de Automação das Centrais de Exaustão	(USNRC, 2011a)	1.41E-05	Probabilidade Simples	Evento Composto - FCC (Plugin Fator Beta)	-
A-FO-SE8411-A	Falha na Fibra Optica de Comunicação da SE8411	(ATM, 1992)	0.78E-06/h/km	Exponencial	Com Reparo	4
A-FO-SE8421-A	Falha na Fibra Optica de Comunicação da SE8421	(ATM, 1992)	0.78E-06/h/km	Exponencial	Com Reparo	4
A-PC-SE8411-A	Falha no Computador Principal do Sistema de Automação	(SCHEER, 1998)	8.00E-06	Exponencial	Com Reparo	48
A-PC-SE8421-A	Falha no Computador Principal do Sistema de Automação	(SCHEER, 1998)	8.00E-06	Exponencial	Com Reparo	48
A-PL-GE8411-A	Falha Genérica da Lógica ou Controle	(IEEE, 2007)	2.87E-05	Exponencial	Com Reparo	2.24
A-PL-GE8421-A	Falha Genérica da Lógica ou Controle	(IEEE, 2007)	2.87E-05	Exponencial	Com Reparo	2.24
A-PL-SE8411-A	Falha do PLC (Hardware, Cartões)	(SCHEER, 1998)	6.71E-06	Exponencial	Com Reparo	48
A-PL-SE8421-A	Falha do PLC (Hardware, Cartões)	(SCHEER, 1998)	6.71E-06	Exponencial	Com Reparo	48
A-SW-SE8401-A	Falha do Switch Ethernet da SE8401	(SCHEER, 1998)	5.71E-07	Exponencial	Com Reparo	48
A-SW-SE8411-A	Falha no Switch Ethernet SE8411	(SCHEER, 1998)	5.71E-07	Exponencial	Com Reparo	48
A-SW-SE8421-A	Falha no Switch Ethernet SE8411	(SCHEER, 1998)	5.71E-07	Exponencial	Com Reparo	48
E-BS-CCM8411-A	Falha Interna do Barramento de entrada do CCM8411	(IAEA, 1988)	8.00E-08	Exponencial	Com Reparo	17.3 *IEEE493
E-BS-CCM8421-A	Falha Interna do Barramento de entrada do CCM8411	(IAEA, 1988)	8.00E-08	Exponencial	Com Reparo	17.3 *IEEE493
E-BS-EX9501-A	Falha do Barramento que alimenta o EX9501	(IEEE, 2007)	2,19E-07	Exponencial	Com Reparo	17.3

Código do Evento Básico	Descrição do Evento Básico	Fonte	Frequência de falha (h⁻¹)	Tipo de Distribuição	Tipo de Modelo para Cálculo de Falha	(1) MTTR (h) / Intervalo de Testes
E-BS-EX9502-A	Falha do Barramento que alimenta o EX9502	(IEEE, 2007)	2,19E-07	Exponencial	Standby - Testado Periodicamente	168 <i>Experiência</i>
E-BS-EX9503-A	Falha do Barramento que alimenta o EX9503	(IEEE, 2007)	2,19E-07	Exponencial	Com Reparo	17.3
E-BS-EX9504-A	Falha do Barramento que alimenta o EX9504	(IEEE, 2007)	2,19E-07	Exponencial	Standby - Testado Periodicamente	168 <i>Experiência</i>
E-BS-QDMT8411-A	Falha do Barramento de saída do quadro que alimenta o trafo8411	(IAEA, 1988)	8.00E-08	Exponencial	Com Reparo	17.3
E-BS-QDMT8421-A	Falha do Barramento de saída do quadro que alimenta o trafo8421	(IAEA, 1988)	1.61E-07	Exponencial	Com Reparo	17.3
E-CA-CCM8411-A	Falha no Cabo de Distribuição que sai do CCM8411	(IAEA, 1988)	2.60E-07	Exponencial	Com Reparo	5.3 <i>*IEEE493</i>
E-CA-CCM841-A	Falha do cabo que alimenta o CCM8411 (2x3x1C#240mm ²)	(IAEA, 1988)	2.60E-07	Exponencial	Com Reparo	5.3 <i>*IEEE493</i>
E-CA-CCM8421-A	Falha no Cabo de Distribuição que sai do CCM8421	(IAEA, 1988)	2.60E-07	Exponencial	Com Reparo	5.3 <i>*IEEE493</i>
E-CA-CCM842-A	Falha do cabo que alimenta o CCM8421 (2x3x1C#240mm ²)	(IAEA, 1988)	2.60E-07	Exponencial	Com Reparo	5.3 <i>*IEEE493</i>
E-CA-LT8411-B	Falha do cabo da LT interna que alimenta a SEN841 (Rompimento do Cabo)	(IEEE, 2007)	5,38E-06	Exponencial	Com Reparo	1.82
E-CA-LT8421-B	Falha do cabo da LT interna que alimenta a SES842 (Rompimento do Cabo)	(IEEE, 2007)	5,38E-06	Exponencial	Com Reparo	1.82
E-CA-QDMT8411-A	Falha do cabo de distribuição do do QDMT8411 (3x1C#35mm ²)	(IAEA, 1988)	2.60E-07	Exponencial	Com Reparo	5.3 <i>*IEEE493</i>
E-CA-QDMT8421-A	Falha do cabo de distribuição do do QDMT8411 (3x1C#35mm ²)	(IAEA, 1988)	2.60E-07	Exponencial	Com Reparo	5.3 <i>*IEEE493</i>

Código do Evento Básico	Descrição do Evento Básico	Fonte	Frequência de falha (h⁻¹)	Tipo de Distribuição	Tipo de Modelo para Cálculo de Falha	(1) MTTR (h) / Intervalo de Testes
E-CC-EX01E02-A	Falha de Causa Comum de Origem Elétrica Interna dos EX9501 e EX9502	(USNRC, 2011a)	3.35E-04	Probabilidade Simples	Evento Composto - FCC (Plugin Fator Beta)	-
E-CC-EX03E04-A	Falha de Causa Comum de Origem Elétrica Interna dos EX9503 e EX9504	(USNRC, 2011a)	3.39E-04	Probabilidade Simples	Evento Composto - FCC (Plugin Fator Beta)	-
E-CC-GE8411-A	Falha de Causa Comum que impeça a partida e interrompa a operação do GE ou vice-versa	(USNRC, 2011a)	1.72E-03	Probabilidade Simples	Evento Composto - FCC (Plugin Fator Beta)	-
E-CC-GE8421-A	Falha de Causa Comum que impeça a partida e interrompa a operação do GE ou vice-versa	(USNRC, 2011a)	1.72E-03	Probabilidade Simples	Evento Composto - FCC (Plugin Fator Beta)	-
E-CC-GV01E02-A	Falha de Causa Comum de Origem Elétrica do Quadro/Gaveta dos EX9501 e EX9502	(USNRC, 2011a)	5.20E-06	Probabilidade Simples	Evento Composto - FCC (Plugin Fator Beta)	-
E-CC-GV03E04-A	Falha de Causa Comum de Origem Elétrica do Quadro/Gaveta dos EX9503 e EX9504	(USNRC, 2011a)	5.20E-06	Probabilidade Simples	Evento Composto - FCC (Plugin Fator Beta)	-
E-CS-EX9501-A	Falha da Chave Seccionadora do EX9501	(IEEE, 2007)	1.98E-07	Exponencial	Com Reparo	1.6
E-CS-EX9502-A	Falha da Chave Seccionadora do EX9502	(IEEE, 2007)	1.98E-07	Exponencial	Standby - Testado Periodicamente	168 <i>Experiência</i>
E-CS-EX9503-A	Falha da Chave Seccionadora do EX9503	(IEEE, 2007)	1.98E-07	Exponencial	Com Reparo	1.6
E-CS-EX9504-A	Falha da Chave Seccionadora do EX9504	(IEEE, 2007)	1.98E-07	Exponencial	Standby - Testado Periodicamente	168 <i>Experiência</i>
E-CS-QDMT8411-A	Falha da Chave Seccionadora do QDMT8411	(IEEE, 2007)	6.97E-04	Exponencial	Com Reparo	1.6

Código do Evento Básico	Descrição do Evento Básico	Fonte	Frequência de falha (h ⁻¹)	Tipo de Distribuição	Tipo de Modelo para Cálculo de Falha	(1) MTTR (h) / Intervalo de Testes
E-CS-QDMT8421-A	Falha da Chave Seccionadora do QDMT8421	(IEEE, 2007)	6.97E-04	Exponencial	Com Reparo	1.6
E-CT-GE8411-A	Falha da Chave de Transferência GE8411	(IEEE, 2007)	9,79E-06	Exponencial	Com Reparo	5
E-CT-GE8421-A	Falha da Chave de Transferência GE8421	(IEEE, 2007)	9,79E-06	Exponencial	Com Reparo	5
E-DJ-CCM8411-A	Falha Disjuntor Principal do CCM-8411-B01 (750A)	(IEEE, 2007)	4.79E-07	Exponencial	Com Reparo	4
E-DJ-CCM8421-A	Falha Disjuntor Principal do CCM-8421-B01 (750A)	(IEEE, 2007)	4.79E-07	Exponencial	Com Reparo	4
E-DJ-QDMT8411-A	Falha do Disjuntor do QDMT	(IAEA, 1988)	5,21E-05	Lognormal	Com Reparo	3 *IEEE493
E-DJ-QDMT8421-A	Falha do Disjuntor do QDMT	(IAEA, 1988)	5,21E-05	Lognormal	Com Reparo	3 *IEEE493
E-DR-EX9501-A	Falha do Inversor de Frequencia (Driver) do Exaustor EX9501	(IEEE, 2007)	2.53E-03	Exponencial	Com Reparo	16.5
E-DR-EX9502-A	Falha do Inversor de Frequencia (Driver) do Exaustor EX9502	(IEEE, 2007)	2.53E-03	Exponencial	Standby - Testado Periodicamente	168 <i>Experiência</i>
E-DR-EX9503-A	Falha do Inversor de Frequencia (Driver) do Exaustor EX9503	(IEEE, 2007)	2.53E-03	Exponencial	Com Reparo	16.5
E-DR-EX9504-A	Falha do Inversor de Frequencia (Driver) do Exaustor EX9504	(IEEE, 2007)	2.53E-03	Exponencial	Standby - Testado Periodicamente	168 <i>Experiência</i>
E-FD-GERAL-A	Falha da Concessionária de Energia Elétrica	Concessionária de Energia – COELBA	4.80E-04	Exponencial	Com Reparo	3.4
E-FU-EX9501-A	Falha do Fusível do barramento do EX9501	(IAEA, 1988)	1.25E-06	Lognormal	Com Reparo	0.2 *Experiência
E-FU-EX9502-A	Falha do Fusível do barramento do EX9502	(IAEA, 1988)	1.25E-06	Lognormal	Standby - Testado Periodicamente	168 <i>Experiência</i>
E-FU-EX9503-A	Falha do Fusível do barramento do EX9503	(IAEA, 1988)	1.25E-06	Lognormal	Com Reparo	0.2 *Experiência

Código do Evento Básico	Descrição do Evento Básico	Fonte	Frequência de falha (h⁻¹)	Tipo de Distribuição	Tipo de Modelo para Cálculo de Falha	(1) MTTR (h) / Intervalo de Testes
E-FU-EX9504-A	Filha do Fusível do barramento do EX9504	(IAEA, 1988)	1.25E-06	Lognormal	Standby - Testado Periodicamente	168 <i>Experiência</i>
E-GE-8411-M	Gerador em Manutenção	(USNRC, 1999)	3.10E-02	Beta	Probabilidade de Falha	-
E-GE-8411-P	Falha do GE8411 na Partida	(USNRC, 1999)	1.27E-02	Beta	Probabilidade de Falha	-
E-GE-8421-M	Gerador em Manutenção	(USNRC, 1999)	3.10E-02	Beta	Probabilidade de Falha	-
E-GE-8421-P	Falha do GE8411 na Partida	(USNRC, 1999)	1.27E-02	Beta	Probabilidade de Falha	-
E-GE-GE8411-O	Falha em operação do GE	(IAEA, 1988)	2.97E-03	Exponencial	Com Reparo	11.5
E-GE-GE8421-O	Falha em operação do GE	(IAEA, 1988)	2.97E-03	Exponencial	Com Reparo	11.5
E-HF-GE8411-A	Falha Humana na Operação do Gerador	(USNRC, 2011a)	6.99E-03	Failure Probability	SPAR-H Modelo de Confiabilidade Humana	-
E-HF-GE8421-A	Falha Humana na Operação do Gerador	(USNRC, 2011a)	6.99E-03	Failure Probability	SPAR-H Modelo de Confiabilidade Humana	-
E-MO-EX9501-A	Falha do motor do EX9501	(IEEE, 2007)	9.41E-06	Exponencial	Com Reparo	15
E-MO-EX9502-A	Falha do motor do EX9502	(IEEE, 2007)	9.41E-06	Exponencial	Standby - Testado Periodicamente	15
E-MO-EX9503-A	Falha do motor do EX9503	(IEEE, 2007)	9.41E-06	Exponencial	Com Reparo	15
E-MO-EX9504-A	Falha do motor do EX9504	(IEEE, 2007)	9.41E-06	Exponencial	Standby - Testado Periodicamente	15
E-PR-LT8411-A	Falha do Sistema de Para Raios da LT na parte interna	(IEEE, 2007)	1,51E-07	Exponencial	Com Reparo	2
E-QD-QDMT8411-A	Falha do Quadro de Distribuição QDMT8411	(IEEE, 2007)	2,19E-07	Exponencial	Com Reparo	17.3
E-QD-QDMT8421-A	Falha do Quadro de Distribuição QDMT8421	(IEEE, 2007)	2,19E-07	Exponencial	Com Reparo	17.3

Código do Evento Básico	Descrição do Evento Básico	Fonte	Frequência de falha (h ⁻¹)	Tipo de Distribuição	Tipo de Modelo para Cálculo de Falha	(1) MTTR (h) / Intervalo de Testes
E-RP-EX9501-A	Falha da Proteção do EX9501 (Rele de Proteção)	(IAEA, 1988)	8.00E-05	Triangular	Com Reparo	0.55
E-RP-EX9502-A	Falha da Proteção do EX9502 (Rele de Proteção)	(IAEA, 1988)	8.00E-05	Exponencial	Standby - Testado Periodicamente	168 <i>Experiência</i>
E-RP-EX9503-A	Falha da Proteção do EX9503 (Rele de Proteção)	(IAEA, 1988)	8.00E-05	Triangular	Com Reparo	0.55
E-RP-EX9504-A	Falha da Proteção do EX9504 (Rele de Proteção)	(IAEA, 1988)	8.00E-05	Exponencial	Standby - Testado Periodicamente	168
E-RP-QDMT8411-A	Falha de Proteção do QDMT	(IAEA, 1988)	8.00E-05	Triangular	Com Reparo	0.55
E-RP-QDMT8421-A	Falha de Proteção do QDMT	(IAEA, 1988)	8.00E-05	Triangular	Com Reparo	0.55
E-RP-TP8411-A	Falha da Proteção do Transformador de Potência 8411	(IAEA, 1988)	8.00E-05	Triangular	Com Reparo	0.55
E-RP-TP8421-A	Falha da Proteção do Transformador de Potência 8421	(IAEA, 1988)	8.00E-05	Triangular	Com Reparo	0.55
E-SP-SE345KV-A	Falha do Sistema de Proteção e Controle Primário da SE-Entrada	(IEEE, 2007)	6,85E-08	Exponencial	Com Reparo	5
E-TP-TF8411-A	Falha Intrínseca do Transformador de Potência 8411 (500KVA)	(IAEA, 1988)	1,25E-06	Lognormal	Com Reparo	5 <i>*IEEE493</i>
E-TP-TF8421-A	Falha Intrínseca do Transformador de Potência 8421 (500KVA)	(IAEA, 1988)	1,25E-06	Lognormal	Com Reparo	5 <i>*IEEE493</i>
I-CC-EX841E842-A	FCC na Comutação entre os Exaustores (Principal e Reserva) de uma mesma CEX	(USNRC, 2011a)	2.81E-06	Failure Probability	Evento Composto - FCC (Plugin Fator Beta)	-
I-CE-EX9501-A	Falha de Alimentação de Controle DC (Retificador)	(IAEA, 1988)	1.40E-06	Exponencial	Com Reparo	5
I-CE-EX9503-A	Falha de Alimentação de Controle DC (Retificador)	(IAEA, 1988)	1.40E-06	Exponencial	Com Reparo	5

Código do Evento Básico	Descrição do Evento Básico	Fonte	Frequência de falha (h ⁻¹)	Tipo de Distribuição	Tipo de Modelo para Cálculo de Falha	(1) MTTR (h) / Intervalo de Testes
I-CE-GE8411-A	Falha de Alimentação de Controle DC Bateria	(IAEA, 1988)	3.75E-06	Lognormal	Com Reparo	$\frac{2}{*IEEE493}$
I-CE-GE8421-A	Falha de Alimentação de Controle DC Bateria	(IAEA, 1988)	3.75E-06	Lognormal	Com Reparo	$\frac{2}{*IEEE493}$
I-CT-EX9501-A	Falha da Chave de Transferência na comutação entre os EX9501 e EX9502	(IEEE, 2007)	9.79E-06	Exponencial	Com Reparo	5.74
I-CT-EX9503-A	Falha da Chave de Transferência na comutação entre os EX9503 e EX9504	(IEEE, 2007)	9.79E-06	Exponencial	Com Reparo	5.74
I-HD-EX9501-A	Falha de Hardware (Chaves, Relés, Contatores, Fiação)	(BONFIETTI, 2003)	2.38E-04	Prob. simples	Probabilidade de Falha	-
I-HD-EX9503-A	Falha de Hardware (Chaves, Relés, Contatores, Fiação)	(BONFIETTI, 2003)	2.38E-04	Prob. simples	Probabilidade de Falha	-
I-HD-GE8411-A	Falha de Hardware (Chaves, Relés, Contatores, Fiação)	(BONFIETTI, 2003)	2.38E-04	Prob. simples	Probabilidade de Falha	-
I-HD-GE8421-A	Falha de Hardware (Chaves, Relés, Contatores, Fiação)	(BONFIETTI, 2003)	2.38E-04	Prob. simples	Probabilidade de Falha	-
I-HF-EX9501-A	Falha Humana na Comutação Manual	(USNRC, 2011a)	1.41E-03	Prob. simples	SPAR-H Modelo de Confiabilidade Humana	-
I-HF-EX9503-A	Falha Humana na Comutação Manual	(USNRC, 2011a)	1.41E-03	Prob. simples	SPAR-H Modelo de Confiabilidade Humana	-
I-SS-EX9501-A	Falha dos Sensores (Vazão, Pressão, Velocidade)	(BONFIETTI, 2003)	2.18E-04	Exponencial	Com Reparo	$\frac{0.75}{*IEEE493}$
I-SS-EX9503-A	Falha dos Sensores (Vazão, Pressão, Velocidade)	(BONFIETTI, 2003)	2.18E-04	Exponencial	Com Reparo	$\frac{0.75}{*IEEE493}$
I-SS-GE8411-A	Falha do Sensores (Pressão, Temperatura, Tacômetro)	(BONFIETTI, 2003)	2.18E-04	Exponencial	Com Reparo	$\frac{0.75}{*IEEE493}$
I-SS-GE8421-A	Falha do Sensores (Pressão, Temperatura, Tacômetro)	(BONFIETTI, 2003)	2.18E-04	Exponencial	Com Reparo	$\frac{0.75}{*IEEE493}$
M-AC-EX9501-A	Falha do acoplamento entre o eixo do exaustor e do motor	(RAC, 1995)	5.54E-06	Exponencial	Com Reparo	4

Código do Evento Básico	Descrição do Evento Básico	Fonte	Frequência de falha (h⁻¹)	Tipo de Distribuição	Tipo de Modelo para Cálculo de Falha	(1) MTTR (h) / Intervalo de Testes
M-AC-EX9502-A	Falha do acoplamento entre o eixo do exaustor e do motor	(RAC, 1995)	5.54E-06	Exponencial	Standby - Testado Periodicamente	168 <i>Experiência</i>
M-AC-EX9503-A	Falha do acoplamento entre o eixo do exaustor e do motor	(RAC, 1995)	5.54E-06	Exponencial	Com Reparo	4
M-AC-EX9504-A	Falha do acoplamento entre o eixo do exaustor e do motor	(RAC, 1995)	5.54E-06	Exponencial	Standby - Testado Periodicamente	168 <i>Experiência</i>
M-CC-EX01E02-A	Falha de Causa Comum no Sistema Mecânico dos EX9501 e EX9502	(USNRC, 2011a)	2.33E-05	Failure Probability	Evento Composto - FCC (Plugin Fator Beta)	-
M-CC-EX03E04-A	Falha de Causa Comum no Sistema Mecânico dos EX9503 e EX9504	(USNRC, 2011a)	2.33E-05	Failure Probability	Evento Composto - FCC (Plugin Fator Beta)	-
M-EI-EX9501-A	Falha Mecânica do Eixo do motor do EX9501 (Acopl Direto)	(RAC, 1995)	9.30E-07	Exponencial	Com Reparo	15 <i>*Experiência</i>
M-EI-EX9502-A	Falha Mecânica do Eixo do motor do EX9502 (Acopl Direto)	(RAC, 1995)	9.30E-07	Exponencial	Standby - Testado Periodicamente	168 <i>Experiência</i>
M-EI-EX9503-A	Falha Mecânica do Eixo do motor do EX9503 (Acopl Direto)	(RAC, 1995)	9.30E-07	Exponencial	Com Reparo	15 <i>*Experiência</i>
M-EI-EX9504-A	Falha Mecânica do Eixo do motor do EX9504 (Acopl Direto)	(RAC, 1995)	9.30E-07	Exponencial	Standby - Testado Periodicamente	168 <i>Experiência</i>
M-HF-EX9501-A	Falha Humana na Manutenção do EX9501 (Lubrificação/Fixação Base/Alinhamento)	(USNRC, 2011a)	1.49E-02	Failure Probability	SPAR-H Modelo de Confiabilidade Humana	-
M-HF-EX9502-A	Falha Humana na Manutenção do EX9502 (Lubrificação/Fixação Base/Alinhamento)	(USNRC, 2011a)	1.49E-02	Failure Probability	SPAR-H Modelo de Confiabilidade Humana	-

Código do Evento Básico	Descrição do Evento Básico	Fonte	Frequência de falha (h⁻¹)	Tipo de Distribuição	Tipo de Modelo para Cálculo de Falha	(1) MTTR (h) / Intervalo de Testes
M-HF-EX9503-A	Falha Humana na Manutenção do EX9503(Lubrificação/Fixação Base/Alinhamento)	(USNRC, 2011a)	1.49E-02	Failure Probability	SPAR-H Modelo de Confiabilidade Humana	-
M-HF-EX9504-A	Falha Humana na Manutenção do EX9504 (Lubrificação/Fixação Base/Alinhamento)	(USNRC, 2011a)	1.49E-02	Failure Probability	SPAR-H Modelo de Confiabilidade Humana	-
M-IT-EX9501-A	Falha Intrínseca do EX9501 (somente mecânica do exaustor s/ motor)	(IEEE, 2007)	4.11E-07	Exponencial	Com Reparo	7.91
M-IT-EX9502-A	Falha Intrínseca do EX9502Falha Intrínseca do EX9501 (somente mecânica do exaustor s/ motor)	(IEEE, 2007)	4.11E-07	Exponencial	Standby - Testado Periodicamente	168 <i>Experiência</i>
M-IT-EX9503-A	Falha Intrínseca do EX9503 (somente mecânica do exaustor s/ motor)	(IEEE, 2007)	4.11E-07	Exponencial	Com Reparo	7.91
M-IT-EX9504-A	Falha Intrínseca do EX9504Falha Intrínseca do EX9501 (somente mecânica do exaustor s/ motor)	(IEEE, 2007)	4.11E-07	Exponencial	Standby - Testado Periodicamente	168 <i>Experiência</i>
M-RL-EX9501-A	Falha do Rolamento do EX9501	(RAC, 1995)	4.17E-06	Exponencial	Com Reparo	10 <i>*Experiência</i>
M-RL-EX9502-A	Falha do Rolamento do EX9502	(RAC, 1995)	4.17E-06	Exponencial	Standby - Testado Periodicamente	168 <i>Experiência</i>
M-RL-EX9503-A	Falha do Rolamento do EX9503	(RAC, 1995)	4.17E-06	Exponencial	Com Reparo	10 <i>*Experiência</i>
M-RL-EX9504-A	Falha do Rolamento do EX9504	(RAC, 1995)	4.17E-06	Exponencial	Standby - Testado Periodicamente	168 <i>Experiência</i>

(1) MTTR (h) representa o tempo médio de reparo para os casos de componentes com reparo.

Intervalo de testes representa o tempo entre a realização de testes para os componentes testados periodicamente (standby).

*Indica que, pela ausência de informações na fonte de dados, foi utilizado a informação oriunda de outra fonte de dados semelhante àquele componente.

APÊNDICE F – MEDIDAS DE IMPORTÂNCIA PARA O CASO DO SISTEMA COM COMPONENTES REPARÁVEIS E COM COMPONENTES TESTADOS PERIODICAMENTE (STANDBY)

SISTEMA_VENTILACAO_MINA2 - Medidas de Importância -								
Cód. Evento Básico	Count	Prob	FV	RIR	RRR	Birnbaum	RII	RRI
A-CC-CEX841E842	1	1.61E-05	4.41E-01	2.74E+04	1.79E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.61E-05
A-FO-SE8411-A	4	1.43E-05	2.93E-04	2.15E+01	1.00E+00	7.47E-04	7.47E-04	1.07E-08
A-FO-SE8421-A	4	1.43E-05	2.93E-04	2.15E+01	1.00E+00	7.47E-04	7.47E-04	1.07E-08
A-PC-SE8411-A	4	3.84E-04	7.86E-03	2.15E+01	1.01E+00	7.47E-04	7.47E-04	2.87E-07
A-PC-SE8421-A	4	3.84E-04	7.86E-03	2.15E+01	1.01E+00	7.47E-04	7.47E-04	2.87E-07
A-PL-GE8411-A	30	6.43E-05	2.47E-04	4.84E+00	1.00E+00	1.40E-04	1.40E-04	9.01E-09
A-PL-GE8421-A	30	6.43E-05	2.47E-04	4.84E+00	1.00E+00	1.40E-04	1.40E-04	9.01E-09
A-PL-SE8411-A	4	3.22E-04	6.60E-03	2.15E+01	1.01E+00	7.47E-04	7.47E-04	2.41E-07
A-PL-SE8421-A	4	3.22E-04	6.60E-03	2.15E+01	1.01E+00	7.47E-04	7.47E-04	2.41E-07
A-SW-SE8401-A	1	1.14E-06	3.13E-02	2.74E+04	1.03E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.14E-06
A-SW-SE8411-A	4	2.74E-05	5.61E-04	2.15E+01	1.00E+00	7.47E-04	7.47E-04	2.05E-08
A-SW-SE8421-A	4	2.74E-05	5.61E-04	2.15E+01	1.00E+00	7.47E-04	7.47E-04	2.05E-08
E-BS-CCM8411-A	13	1.38E-06	1.05E-05	8.62E+00	1.00E+00	2.78E-04	2.78E-04	3.85E-10
E-BS-CCM8421-A	13	2.79E-06	2.09E-05	8.51E+00	1.00E+00	2.74E-04	2.74E-04	7.64E-10
E-BS-EX9501-A	68	3.79E-06	1.92E-10	1.00E+00	1.00E+00	1.85E-09	1.85E-09	6.99E-15
E-BS-EX9502-A	68	1.84E-05	1.19E-10	1.00E+00	1.00E+00	2.42E-10	2.42E-10	4.33E-15
E-BS-EX9503-A	68	3.79E-06	1.92E-10	1.00E+00	1.00E+00	1.85E-09	1.85E-09	6.99E-15
E-BS-EX9504-A	68	1.84E-05	1.19E-10	1.00E+00	1.00E+00	2.42E-10	2.42E-10	4.33E-15
E-BS-QDMT8411-A	13	1.38E-06	1.05E-05	8.62E+00	1.00E+00	2.78E-04	2.78E-04	3.85E-10
E-BS-QDMT8421-A	13	1.38E-06	1.04E-05	8.51E+00	1.00E+00	2.74E-04	2.74E-04	3.79E-10
E-CA-CCM841-A	13	1.38E-06	1.05E-05	8.62E+00	1.00E+00	2.78E-04	2.78E-04	3.83E-10
E-CA-CCM8411-A	13	1.38E-06	1.05E-05	8.62E+00	1.00E+00	2.78E-04	2.78E-04	3.83E-10
E-CA-CCM842-A	13	1.38E-06	1.04E-05	8.51E+00	1.00E+00	2.74E-04	2.74E-04	3.78E-10
E-CA-CCM8421-A	13	1.38E-06	1.04E-05	8.51E+00	1.00E+00	2.74E-04	2.74E-04	3.78E-10
E-CA-LT8411-B	13	9.79E-06	7.46E-05	8.62E+00	1.00E+00	2.78E-04	2.78E-04	2.72E-09

SISTEMA_VENTILACAO_MINA2 - Medidas de Importância -								
Cód. Evento Básico	Count	Prob	FV	RIR	RRR	Birnbaum	RII	RRI
E-CA-LT8421-B	13	9.79E-06	7.36E-05	8.51E+00	1.00E+00	2.74E-04	2.74E-04	2.68E-09
E-CA-QDMT8411-A	13	1.38E-06	1.05E-05	8.62E+00	1.00E+00	2.78E-04	2.78E-04	3.83E-10
E-CA-QDMT8421-A	13	3.82E-06	2.87E-05	8.51E+00	1.00E+00	2.74E-04	2.74E-04	1.05E-09
E-CC-EX01E02-A	5	3.35E-04	3.12E-03	1.03E+01	1.00E+00	3.40E-04	3.40E-04	1.14E-07
E-CC-EX03E04-A	5	3.39E-04	3.12E-03	1.02E+01	1.00E+00	3.36E-04	3.36E-04	1.14E-07
E-CC-GE8411-A	30	1.72E-03	6.59E-03	4.83E+00	1.01E+00	1.40E-04	1.40E-04	2.41E-07
E-CC-GE8421-A	30	1.72E-03	6.59E-03	4.83E+00	1.01E+00	1.40E-04	1.40E-04	2.41E-07
E-CC-GV01E02-A	17	5.25E-06	7.58E-07	1.14E+00	1.00E+00	5.27E-06	5.27E-06	2.76E-11
E-CC-GV03E04-A	17	5.25E-06	7.58E-07	1.14E+00	1.00E+00	5.27E-06	5.27E-06	2.76E-11
E-CS-EX9501-A	68	3.17E-07	1.52E-11	1.00E+00	1.00E+00	1.85E-09	1.85E-09	5.55E-16
E-CS-EX9502-A	68	1.66E-05	1.10E-10	1.00E+00	1.00E+00	2.42E-10	2.42E-10	4.00E-15
E-CS-EX9503-A	68	3.17E-07	1.52E-11	1.00E+00	1.00E+00	1.85E-09	1.85E-09	5.55E-16
E-CS-EX9504-A	68	1.66E-05	1.10E-10	1.00E+00	1.00E+00	2.42E-10	2.42E-10	4.00E-15
E-CS-QDMT8411-A	13	1.11E-06	8.48E-06	8.62E+00	1.00E+00	2.78E-04	2.78E-04	3.10E-10
E-CS-QDMT8421-A	13	1.11E-06	8.37E-06	8.51E+00	1.00E+00	2.74E-04	2.74E-04	3.05E-10
E-CT-GE8411-A	30	5.62E-05	2.16E-04	4.84E+00	1.00E+00	1.40E-04	1.40E-04	7.87E-09
E-CT-GE8421-A	30	5.62E-05	2.16E-04	4.84E+00	1.00E+00	1.40E-04	1.40E-04	7.87E-09
E-DJ-CCM8411-A	13	1.92E-06	1.46E-05	8.62E+00	1.00E+00	2.78E-04	2.78E-04	5.33E-10
E-DJ-CCM8421-A	13	1.92E-06	1.44E-05	8.51E+00	1.00E+00	2.74E-04	2.74E-04	5.25E-10
E-DJ-QDMT8411-A	13	1.56E-04	1.19E-03	8.62E+00	1.00E+00	2.78E-04	2.78E-04	4.34E-08
E-DJ-QDMT8421-A	13	1.56E-04	1.17E-03	8.51E+00	1.00E+00	2.74E-04	2.74E-04	4.28E-08
E-DR-EX9501-A	68	4.16E-05	2.11E-09	1.00E+00	1.00E+00	1.85E-09	1.85E-09	7.68E-14
E-DR-EX9502-A	68	2.12E-04	1.40E-09	1.00E+00	1.00E+00	2.42E-10	2.42E-10	5.12E-14
E-DR-EX9503-A	68	4.16E-05	2.11E-09	1.00E+00	1.00E+00	1.85E-09	1.85E-09	7.68E-14
E-DR-EX9504-A	68	2.12E-04	1.40E-09	1.00E+00	1.00E+00	2.42E-10	2.42E-10	5.12E-14
E-FD-GERAL-A	100	1.63E-03	3.30E-01	2.02E+02	1.49E+00	7.36E-03	7.35E-03	1.20E-05
E-FU-EX9501-A	68	2.50E-07	1.22E-11	1.00E+00	1.00E+00	1.85E-09	1.85E-09	4.44E-16
E-FU-EX9502-A	68	1.05E-04	6.94E-10	1.00E+00	1.00E+00	2.42E-10	2.42E-10	2.53E-14
E-FU-EX9503-A	68	2.50E-07	1.22E-11	1.00E+00	1.00E+00	1.85E-09	1.85E-09	4.44E-16

SISTEMA_VENTILACAO_MINA2 - Medidas de Importância -								
Cód. Evento Básico	Count	Prob	FV	RIR	RRR	Birnbaum	RII	RRI
E-FU-EX9504-A	68	1.05E-04	6.94E-10	1.00E+00	1.00E+00	2.42E-10	2.42E-10	2.53E-14
E-GE-8411-M	30	3.10E-02	1.19E-01	4.72E+00	1.14E+00	1.40E-04	1.36E-04	4.34E-06
E-GE-8411-P	30	1.27E-02	4.88E-02	4.79E+00	1.05E+00	1.40E-04	1.38E-04	1.78E-06
E-GE-8421-M	30	3.10E-02	1.19E-01	4.72E+00	1.14E+00	1.40E-04	1.36E-04	4.34E-06
E-GE-8421-P	30	1.27E-02	4.88E-02	4.79E+00	1.05E+00	1.40E-04	1.38E-04	1.78E-06
E-GE-GE8411-O	30	3.30E-02	1.27E-01	4.71E+00	1.15E+00	1.40E-04	1.35E-04	4.63E-06
E-GE-GE8421-O	30	3.30E-02	1.27E-01	4.71E+00	1.15E+00	1.40E-04	1.35E-04	4.63E-06
E-HF-GE8411-A	30	6.99E-03	2.68E-02	4.81E+00	1.03E+00	1.40E-04	1.39E-04	9.79E-07
E-HF-GE8421-A	30	6.99E-03	2.68E-02	4.81E+00	1.03E+00	1.40E-04	1.39E-04	9.79E-07
E-MO-EX9501-A	10	1.41E-04	8.90E-06	1.06E+00	1.00E+00	2.30E-06	2.30E-06	3.25E-10
E-MO-EX9502-A	10	7.06E-05	1.22E-07	1.00E+00	1.00E+00	6.30E-08	6.30E-08	4.44E-12
E-MO-EX9503-A	10	1.41E-04	9.83E-06	1.07E+00	1.00E+00	2.54E-06	2.54E-06	3.59E-10
E-MO-EX9504-A	10	7.90E-04	1.35E-06	1.00E+00	1.00E+00	6.23E-08	6.22E-08	4.92E-11
E-PR-LT8411-A	100	3.02E-07	6.12E-05	2.03E+02	1.00E+00	7.36E-03	7.36E-03	2.23E-09
E-QD-QDMT8411-A	13	3.79E-06	2.89E-05	8.62E+00	1.00E+00	2.78E-04	2.78E-04	1.05E-09
E-QD-QDMT8421-A	13	3.79E-06	2.85E-05	8.51E+00	1.00E+00	2.74E-04	2.74E-04	1.04E-09
E-RP-EX9501-A	10	4.41E-05	2.78E-06	1.06E+00	1.00E+00	2.30E-06	2.30E-06	1.01E-10
E-RP-EX9502-A	10	6.70E-03	1.16E-05	1.00E+00	1.00E+00	6.30E-08	6.25E-08	4.22E-10
E-RP-EX9503-A	10	4.41E-05	3.07E-06	1.07E+00	1.00E+00	2.54E-06	2.54E-06	1.12E-10
E-RP-EX9504-A	10	6.77E-03	1.16E-05	1.00E+00	1.00E+00	6.23E-08	6.18E-08	4.22E-10
E-RP-QDMT8411-A	13	4.41E-05	3.36E-04	8.62E+00	1.00E+00	2.78E-04	2.78E-04	1.22E-08
E-RP-QDMT8421-A	13	4.41E-05	3.31E-04	8.51E+00	1.00E+00	2.74E-04	2.74E-04	1.21E-08
E-RP-TP8411-A	13	4.41E-05	3.36E-04	8.62E+00	1.00E+00	2.78E-04	2.78E-04	1.22E-08
E-RP-TP8421-A	13	4.41E-05	3.31E-04	8.51E+00	1.00E+00	2.74E-04	2.74E-04	1.21E-08
E-SP-SE345KV-A	100	3.42E-07	6.94E-05	2.03E+02	1.00E+00	7.36E-03	7.36E-03	2.53E-09
E-TP-TF8411-A	13	6.25E-06	4.76E-05	8.62E+00	1.00E+00	2.78E-04	2.78E-04	1.74E-09
E-TP-TF8421-A	13	6.25E-06	4.70E-05	8.51E+00	1.00E+00	2.74E-04	2.74E-04	1.71E-09
I-CC-EX841E842	1	2.81E-06	7.70E-02	2.74E+04	1.08E+00	1.00E+00	1.00E+00	2.81E-06
I-CE-EX9501-A	5	2.24E-05	1.16E-03	5.29E+01	1.00E+00	1.89E-03	1.89E-03	4.24E-08

SISTEMA_VENTILACAO_MINA2 - Medidas de Importância -								
Cód. Evento Básico	Count	Prob	FV	RIR	RRR	Birnbaum	RII	RRI
I-CE-EX9503-A	5	2.24E-05	1.16E-03	5.28E+01	1.00E+00	1.89E-03	1.89E-03	4.23E-08
I-CE-GE8411-A	30	7.50E-06	2.88E-05	4.84E+00	1.00E+00	1.40E-04	1.40E-04	1.05E-09
I-CE-GE8421-A	30	7.50E-06	2.88E-05	4.84E+00	1.00E+00	1.40E-04	1.40E-04	1.05E-09
I-CT-EX9501-A	5	5.62E-05	2.92E-03	5.29E+01	1.00E+00	1.89E-03	1.89E-03	1.06E-07
I-CT-EX9503-A	5	5.62E-05	2.91E-03	5.28E+01	1.00E+00	1.89E-03	1.89E-03	1.06E-07
I-HD-EX9501-A	5	2.38E-04	1.24E-02	5.29E+01	1.01E+00	1.89E-03	1.89E-03	4.51E-07
I-HD-EX9503-A	5	2.38E-04	1.23E-02	5.28E+01	1.01E+00	1.89E-03	1.89E-03	4.50E-07
I-HD-GE8411-A	30	2.38E-04	9.14E-04	4.84E+00	1.00E+00	1.40E-04	1.40E-04	3.33E-08
I-HD-GE8421-A	30	2.38E-04	9.14E-04	4.84E+00	1.00E+00	1.40E-04	1.40E-04	3.33E-08
I-HF-EX9501-A	5	1.41E-03	7.32E-02	5.28E+01	1.08E+00	1.89E-03	1.89E-03	2.67E-06
I-HF-EX9503-A	5	1.41E-03	7.32E-02	5.27E+01	1.08E+00	1.89E-03	1.89E-03	2.67E-06
I-SS-EX9501-A	5	1.63E-04	8.48E-03	5.29E+01	1.01E+00	1.89E-03	1.89E-03	3.10E-07
I-SS-EX9503-A	5	1.63E-04	8.47E-03	5.28E+01	1.01E+00	1.89E-03	1.89E-03	3.09E-07
I-SS-GE8411-A	30	1.63E-04	6.28E-04	4.84E+00	1.00E+00	1.40E-04	1.40E-04	2.29E-08
I-SS-GE8421-A	30	1.64E-04	6.28E-04	4.84E+00	1.00E+00	1.40E-04	1.40E-04	2.29E-08
M-AC-EX9501-A	130	2.22E-05	2.50E-06	1.11E+00	1.00E+00	4.11E-06	4.11E-06	9.11E-11
M-AC-EX9502-A	130	4.65E-04	4.96E-05	1.11E+00	1.00E+00	3.89E-06	3.89E-06	1.81E-09
M-AC-EX9503-A	130	2.22E-05	2.50E-06	1.11E+00	1.00E+00	4.12E-06	4.12E-06	9.13E-11
M-AC-EX9504-A	130	4.65E-04	4.96E-05	1.11E+00	1.00E+00	3.89E-06	3.89E-06	1.81E-09
M-CC-EX01E02-A	26	2.33E-05	1.66E-04	8.12E+00	1.00E+00	2.60E-04	2.60E-04	6.04E-09
M-CC-EX03E04-A	26	2.33E-05	1.66E-04	8.13E+00	1.00E+00	2.60E-04	2.60E-04	6.06E-09
M-EI-EX9501-A	130	1.39E-05	1.57E-06	1.11E+00	1.00E+00	4.11E-06	4.11E-06	5.73E-11
M-EI-EX9502-A	130	7.81E-05	8.33E-06	1.11E+00	1.00E+00	3.89E-06	3.89E-06	3.04E-10
M-EI-EX9503-A	130	1.39E-05	1.58E-06	1.11E+00	1.00E+00	4.12E-06	4.12E-06	5.75E-11
M-EI-EX9504-A	130	7.81E-05	8.33E-06	1.11E+00	1.00E+00	3.89E-06	3.89E-06	3.04E-10
M-HF-EX9501-A	130	1.49E-02	1.68E-03	1.11E+00	1.00E+00	4.11E-06	4.05E-06	6.13E-08
M-HF-EX9502-A	130	1.49E-02	1.59E-03	1.11E+00	1.00E+00	3.89E-06	3.83E-06	5.80E-08
M-HF-EX9503-A	130	1.49E-02	1.68E-03	1.11E+00	1.00E+00	4.12E-06	4.06E-06	6.12E-08
M-HF-EX9504-A	130	1.49E-02	1.59E-03	1.11E+00	1.00E+00	3.89E-06	3.83E-06	5.80E-08

SISTEMA_VENTILACAO_MINA2 - Medidas de Importância -								
Cód. Evento Básico	Count	Prob	FV	RIR	RRR	Birnbaum	RII	RRI
M-IT-EX9501-A	130	3.25E-06	3.66E-07	1.11E+00	1.00E+00	4.11E-06	4.11E-06	1.34E-11
M-IT-EX9502-A	130	3.45E-05	3.68E-06	1.11E+00	1.00E+00	3.89E-06	3.89E-06	1.34E-10
M-IT-EX9503-A	130	3.25E-06	3.67E-07	1.11E+00	1.00E+00	4.12E-06	4.12E-06	1.34E-11
M-IT-EX9504-A	130	3.45E-05	3.68E-06	1.11E+00	1.00E+00	3.89E-06	3.89E-06	1.34E-10
M-RL-EX9501-A	130	4.17E-05	4.70E-06	1.11E+00	1.00E+00	4.11E-06	4.11E-06	1.71E-10
M-RL-EX9502-A	130	3.50E-04	3.73E-05	1.11E+00	1.00E+00	3.89E-06	3.89E-06	1.36E-09
M-RL-EX9503-A	130	4.17E-05	4.71E-06	1.11E+00	1.00E+00	4.12E-06	4.12E-06	1.72E-10
M-RL-EX9504-A	130	3.50E-04	3.73E-05	1.11E+00	1.00E+00	3.89E-06	3.89E-06	1.36E-09

APÊNDICE G – MEDIDAS DE IMPORTÂNCIA PARA O CASO DO SISTEMA SEM COMPONENTES REPARÁVEIS E COM COMPONENTES TESTADOS PERIODICAMENTE (STANDBY).

SISTEMA_VENTILACAO_MINA2 - Medidas de Importância -								
Cód. Evento Básico	Count	Prob	FV	RIR	RRR	Birnbaum	RII	RRI
A-CC-CEX841E842	1	3.34E-04	6.04E-04	1.81E+00	1.00E+00	4.47E-01	4.46E-01	1.49E-04
A-FO-SE8411-A	4	3.57E-03	1.21E-04	1.02E+00	1.00E+00	8.34E-03	8.31E-03	3.00E-05
A-FO-SE8421-A	4	3.57E-03	1.21E-04	1.02E+00	1.00E+00	8.34E-03	8.31E-03	3.00E-05
A-PC-SE8411-A	4	7.97E-03	2.71E-04	1.01E+00	1.00E+00	8.34E-03	8.28E-03	6.69E-05
A-PC-SE8421-A	4	7.97E-03	2.71E-04	1.01E+00	1.00E+00	8.34E-03	8.28E-03	6.69E-05
A-PL-GE8411-A	30	2.83E-02	2.50E-02	1.35E+00	1.01E+00	2.00E-01	1.93E-01	6.27E-03
A-PL-GE8421-A	30	2.83E-02	2.50E-02	1.35E+00	1.01E+00	2.00E-01	1.93E-01	6.27E-03
A-PL-SE8411-A	4	6.69E-03	2.27E-04	1.01E+00	1.00E+00	8.34E-03	8.29E-03	5.61E-05
A-PL-SE8421-A	4	6.69E-03	2.27E-04	1.01E+00	1.00E+00	8.34E-03	8.29E-03	5.61E-05
A-SW-SE8401-A	1	5.71E-04	1.03E-03	1.81E+00	1.00E+00	4.47E-01	4.46E-01	2.55E-04
A-SW-SE8411-A	4	5.71E-04	1.94E-05	1.02E+00	1.00E+00	8.34E-03	8.34E-03	4.79E-06
A-SW-SE8421-A	4	5.71E-04	1.94E-05	1.02E+00	1.00E+00	8.34E-03	8.34E-03	4.79E-06
E-BS-CCM8411-A	13	8.00E-05	3.09E-05	1.16E+00	1.00E+00	8.86E-02	8.86E-02	7.63E-06
E-BS-CCM8421-A	13	1.61E-04	6.21E-05	1.16E+00	1.00E+00	8.86E-02	8.86E-02	1.54E-05
E-BS-EX9501-A	68	2.19E-04	8.89E-12	1.00E+00	1.00E+00	1.00E-08	1.00E-08	2.20E-12
E-BS-EX9502-A	68	1.84E-05	8.89E-12	1.00E+00	1.00E+00	1.19E-07	1.19E-07	2.20E-12
E-BS-EX9503-A	68	2.19E-04	8.89E-12	1.00E+00	1.00E+00	1.00E-08	1.00E-08	2.20E-12
E-BS-EX9504-A	68	1.84E-05	8.89E-12	1.00E+00	1.00E+00	1.19E-07	1.19E-07	2.20E-12
E-BS-QDMT8411-A	13	8.00E-05	3.09E-05	1.16E+00	1.00E+00	8.86E-02	8.86E-02	7.63E-06
E-BS-QDMT8421-A	13	8.00E-05	3.09E-05	1.16E+00	1.00E+00	8.86E-02	8.86E-02	7.63E-06
E-CA-CCM841-A	13	2.60E-04	1.00E-04	1.16E+00	1.00E+00	8.86E-02	8.86E-02	2.48E-05
E-CA-CCM8411-A	13	2.60E-04	1.00E-04	1.16E+00	1.00E+00	8.86E-02	8.86E-02	2.48E-05
E-CA-CCM842-A	13	2.60E-04	1.00E-04	1.16E+00	1.00E+00	8.86E-02	8.86E-02	2.48E-05
E-CA-CCM8421-A	13	2.60E-04	1.00E-04	1.16E+00	1.00E+00	8.86E-02	8.86E-02	2.48E-05
E-CA-LT8411-B	13	5.37E-03	2.07E-03	1.16E+00	1.00E+00	8.87E-02	8.82E-02	5.12E-04
E-CA-LT8421-B	13	5.37E-03	2.07E-03	1.16E+00	1.00E+00	8.87E-02	8.82E-02	5.12E-04

SISTEMA_VENTILACAO_MINA2 - Medidas de Importância -								
Cód. Evento Básico	Count	Prob	FV	RIR	RRR	Birnbaum	RII	RRI
E-CA-QDMT8411-A	13	2.60E-04	1.00E-04	1.16E+00	1.00E+00	8.86E-02	8.86E-02	2.48E-05
E-CA-QDMT8421-A	13	2.60E-04	1.00E-04	1.16E+00	1.00E+00	8.86E-02	8.86E-02	2.48E-05
E-CC-EX01E02-A	5	3.85E-03	3.13E-05	1.00E+00	1.00E+00	2.01E-03	2.00E-03	7.74E-06
E-CC-EX03E04-A	5	3.85E-03	3.08E-05	1.00E+00	1.00E+00	1.98E-03	1.97E-03	7.62E-06
E-CC-GE8411-A	30	4.93E-02	4.35E-02	1.34E+00	1.02E+00	2.02E-01	1.91E-01	1.10E-02
E-CC-GE8421-A	30	4.93E-02	4.35E-02	1.34E+00	1.02E+00	2.02E-01	1.91E-01	1.10E-02
E-CC-GV01E02-A	17	6.25E-05	7.21E-09	1.00E+00	1.00E+00	2.85E-05	2.85E-05	1.78E-09
E-CC-GV03E04-A	17	6.25E-05	7.21E-09	1.00E+00	1.00E+00	2.85E-05	2.85E-05	1.78E-09
E-CS-EX9501-A	68	1.98E-04	8.04E-12	1.00E+00	1.00E+00	1.00E-08	1.00E-08	1.99E-12
E-CS-EX9502-A	68	1.66E-05	8.04E-12	1.00E+00	1.00E+00	1.19E-07	1.19E-07	1.99E-12
E-CS-EX9503-A	68	1.98E-04	8.04E-12	1.00E+00	1.00E+00	1.00E-08	1.00E-08	1.99E-12
E-CS-EX9504-A	68	1.66E-05	8.04E-12	1.00E+00	1.00E+00	1.19E-07	1.19E-07	1.99E-12
E-CS-QDMT8411-A	13	6.96E-04	2.69E-04	1.16E+00	1.00E+00	8.87E-02	8.86E-02	6.64E-05
E-CS-QDMT8421-A	13	6.96E-04	2.69E-04	1.16E+00	1.00E+00	8.86E-02	8.86E-02	6.64E-05
E-CT-GE8411-A	30	9.74E-03	8.63E-03	1.35E+00	1.00E+00	1.98E-01	1.96E-01	2.14E-03
E-CT-GE8421-A	30	9.74E-03	8.63E-03	1.35E+00	1.00E+00	1.98E-01	1.96E-01	2.14E-03
E-DJ-CCM8411-A	13	4.79E-04	1.85E-04	1.16E+00	1.00E+00	8.87E-02	8.86E-02	4.57E-05
E-DJ-CCM8421-A	13	4.79E-04	1.85E-04	1.16E+00	1.00E+00	8.86E-02	8.86E-02	4.57E-05
E-DJ-QDMT8411-A	13	5.08E-02	1.95E-02	1.15E+00	1.01E+00	8.96E-02	8.47E-02	4.88E-03
E-DJ-QDMT8421-A	13	5.08E-02	1.95E-02	1.15E+00	1.01E+00	8.96E-02	8.47E-02	4.88E-03
E-DR-EX9501-A	68	2.52E-03	1.02E-10	1.00E+00	1.00E+00	1.00E-08	1.00E-08	2.53E-11
E-DR-EX9502-A	68	2.12E-04	1.02E-10	1.00E+00	1.00E+00	1.19E-07	1.19E-07	2.53E-11
E-DR-EX9503-A	68	2.52E-03	1.02E-10	1.00E+00	1.00E+00	1.00E-08	1.00E-08	2.53E-11
E-DR-EX9504-A	68	2.12E-04	1.02E-10	1.00E+00	1.00E+00	1.19E-07	1.19E-07	2.53E-11
E-FD-GERAL-A	100	3.81E-01	9.22E-01	1.73E+00	6.28E+00	8.71E-01	4.05E-01	4.65E-01
E-FU-EX9501-A	68	1.25E-03	5.07E-11	1.00E+00	1.00E+00	1.00E-08	1.00E-08	1.25E-11
E-FU-EX9502-A	68	1.05E-04	5.07E-11	1.00E+00	1.00E+00	1.19E-07	1.19E-07	1.25E-11
E-FU-EX9503-A	68	1.25E-03	5.07E-11	1.00E+00	1.00E+00	1.00E-08	1.00E-08	1.25E-11
E-FU-EX9504-A	68	1.05E-04	5.07E-11	1.00E+00	1.00E+00	1.19E-07	1.19E-07	1.25E-11
E-GE-8411-M	30	3.10E-02	2.74E-02	1.35E+00	1.01E+00	2.00E-01	1.93E-01	6.87E-03

SISTEMA_VENTILACAO_MINA2 - Medidas de Importância -								
Cód. Evento Básico	Count	Prob	FV	RIR	RRR	Birnbaum	RII	RRI
E-GE-8411-P	30	1.27E-02	1.12E-02	1.35E+00	1.01E+00	1.98E-01	1.95E-01	2.80E-03
E-GE-8421-M	30	3.10E-02	2.74E-02	1.35E+00	1.01E+00	2.00E-01	1.93E-01	6.87E-03
E-GE-8421-P	30	1.27E-02	1.12E-02	1.35E+00	1.01E+00	1.98E-01	1.95E-01	2.80E-03
E-GE-GE8411-O	30	9.49E-01	7.60E-01	1.03E+00	2.41E+00	3.40E-01	1.56E-02	3.24E-01
E-GE-GE8421-O	30	9.49E-01	7.60E-01	1.03E+00	2.41E+00	3.40E-01	1.56E-02	3.24E-01
E-HF-GE8411-A	30	6.99E-03	6.19E-03	1.35E+00	1.00E+00	1.97E-01	1.96E-01	1.54E-03
E-HF-GE8421-A	30	6.99E-03	6.19E-03	1.35E+00	1.00E+00	1.97E-01	1.96E-01	1.54E-03
E-MO-EX9501-A	10	9.37E-03	5.16E-07	1.00E+00	1.00E+00	1.36E-05	1.35E-05	1.27E-07
E-MO-EX9502-A	10	7.06E-05	4.96E-08	1.00E+00	1.00E+00	1.74E-04	1.74E-04	1.22E-08
E-MO-EX9503-A	10	9.37E-03	5.67E-07	1.00E+00	1.00E+00	1.50E-05	1.48E-05	1.40E-07
E-MO-EX9504-A	10	7.90E-04	5.46E-07	1.00E+00	1.00E+00	1.71E-04	1.71E-04	1.35E-07
E-PR-LT8411-A	100	1.51E-04	4.52E-04	1.77E+00	1.00E+00	4.26E-01	4.26E-01	1.12E-04
E-QD-QDMT8411-A	13	2.19E-04	8.46E-05	1.16E+00	1.00E+00	8.86E-02	8.86E-02	2.09E-05
E-QD-QDMT8421-A	13	2.19E-04	8.45E-05	1.16E+00	1.00E+00	8.86E-02	8.86E-02	2.09E-05
E-RP-EX9501-A	10	7.70E-02	4.24E-06	1.00E+00	1.00E+00	1.36E-05	1.26E-05	1.05E-06
E-RP-EX9502-A	10	6.70E-03	4.70E-06	1.00E+00	1.00E+00	1.74E-04	1.72E-04	1.16E-06
E-RP-EX9503-A	10	7.70E-02	4.66E-06	1.00E+00	1.00E+00	1.50E-05	1.38E-05	1.15E-06
E-RP-EX9504-A	10	6.77E-03	4.68E-06	1.00E+00	1.00E+00	1.71E-04	1.70E-04	1.16E-06
E-RP-QDMT8411-A	13	7.70E-02	2.96E-02	1.15E+00	1.01E+00	9.01E-02	8.27E-02	7.43E-03
E-RP-QDMT8421-A	13	7.70E-02	2.95E-02	1.15E+00	1.01E+00	9.01E-02	8.27E-02	7.42E-03
E-RP-TP8411-A	13	7.70E-02	2.96E-02	1.15E+00	1.01E+00	9.01E-02	8.27E-02	7.43E-03
E-RP-TP8421-A	13	7.70E-02	2.95E-02	1.15E+00	1.01E+00	9.01E-02	8.27E-02	7.42E-03
E-SP-SE345KV-A	100	6.85E-05	2.05E-04	1.77E+00	1.00E+00	4.26E-01	4.26E-01	5.06E-05
E-TP-TF8411-A	13	1.25E-03	4.82E-04	1.16E+00	1.00E+00	8.87E-02	8.85E-02	1.19E-04
E-TP-TF8421-A	13	1.25E-03	4.82E-04	1.16E+00	1.00E+00	8.86E-02	8.85E-02	1.19E-04
I-CC-EX841E842	1	4.87E-04	8.80E-04	1.81E+00	1.00E+00	4.47E-01	4.46E-01	2.18E-04
I-CE-EX9501-A	5	1.40E-03	5.27E-04	1.17E+00	1.00E+00	9.21E-02	9.19E-02	1.30E-04
I-CE-EX9503-A	5	1.40E-03	5.27E-04	1.17E+00	1.00E+00	9.21E-02	9.19E-02	1.30E-04
I-CE-GE8411-A	30	3.74E-03	3.32E-03	1.35E+00	1.00E+00	1.97E-01	1.96E-01	8.21E-04
I-CE-GE8421-A	30	3.74E-03	3.32E-03	1.35E+00	1.00E+00	1.97E-01	1.96E-01	8.21E-04

SISTEMA_VENTILACAO_MINA2 - Medidas de Importância -								
Cód. Evento Básico	Count	Prob	FV	RIR	RRR	Birnbaum	RII	RRI
I-CT-EX9501-A	5	9.74E-03	3.67E-03	1.16E+00	1.00E+00	9.22E-02	9.13E-02	9.09E-04
I-CT-EX9503-A	5	9.74E-03	3.67E-03	1.16E+00	1.00E+00	9.22E-02	9.13E-02	9.09E-04
I-HD-EX9501-A	5	2.38E-04	8.97E-05	1.17E+00	1.00E+00	9.20E-02	9.20E-02	2.22E-05
I-HD-EX9503-A	5	2.38E-04	8.97E-05	1.17E+00	1.00E+00	9.20E-02	9.20E-02	2.22E-05
I-HD-GE8411-A	30	2.38E-04	2.11E-04	1.36E+00	1.00E+00	1.97E-01	1.97E-01	5.22E-05
I-HD-GE8421-A	30	2.38E-04	2.11E-04	1.36E+00	1.00E+00	1.97E-01	1.97E-01	5.21E-05
I-HF-EX9501-A	5	1.41E-03	5.31E-04	1.17E+00	1.00E+00	9.21E-02	9.19E-02	1.31E-04
I-HF-EX9503-A	5	1.41E-03	5.33E-04	1.17E+00	1.00E+00	9.21E-02	9.19E-02	1.32E-04
I-SS-EX9501-A	5	1.96E-01	7.37E-02	1.14E+00	1.04E+00	9.59E-02	7.70E-02	1.90E-02
I-SS-EX9503-A	5	1.96E-01	7.37E-02	1.14E+00	1.04E+00	9.59E-02	7.70E-02	1.90E-02
I-SS-GE8411-A	30	1.96E-01	1.70E-01	1.31E+00	1.09E+00	2.17E-01	1.71E-01	4.64E-02
I-SS-GE8421-A	30	1.96E-01	1.70E-01	1.31E+00	1.09E+00	2.17E-01	1.71E-01	4.64E-02
M-AC-EX9501-A	130	5.52E-03	1.08E-07	1.00E+00	1.00E+00	4.85E-06	4.82E-06	2.68E-08
M-AC-EX9502-A	130	4.65E-04	1.49E-08	1.00E+00	1.00E+00	7.94E-06	7.94E-06	3.69E-09
M-AC-EX9503-A	130	5.52E-03	1.08E-07	1.00E+00	1.00E+00	4.85E-06	4.82E-06	2.68E-08
M-AC-EX9504-A	130	4.65E-04	1.49E-08	1.00E+00	1.00E+00	7.93E-06	7.93E-06	3.69E-09
M-CC-EX01E02-A	26	2.76E-04	3.42E-07	1.00E+00	1.00E+00	3.06E-04	3.06E-04	8.46E-08
M-CC-EX03E04-A	26	2.76E-04	3.43E-07	1.00E+00	1.00E+00	3.06E-04	3.06E-04	8.47E-08
M-EI-EX9501-A	130	9.30E-04	1.82E-08	1.00E+00	1.00E+00	4.85E-06	4.84E-06	4.51E-09
M-EI-EX9502-A	130	7.81E-05	2.51E-09	1.00E+00	1.00E+00	7.94E-06	7.94E-06	6.20E-10
M-EI-EX9503-A	130	9.30E-04	1.82E-08	1.00E+00	1.00E+00	4.85E-06	4.85E-06	4.51E-09
M-EI-EX9504-A	130	7.81E-05	2.51E-09	1.00E+00	1.00E+00	7.93E-06	7.93E-06	6.20E-10
M-HF-EX9501-A	130	1.49E-02	2.92E-07	1.00E+00	1.00E+00	4.85E-06	4.77E-06	7.22E-08
M-HF-EX9502-A	130	1.49E-02	4.79E-07	1.00E+00	1.00E+00	7.94E-06	7.82E-06	1.18E-07
M-HF-EX9503-A	130	1.49E-02	2.92E-07	1.00E+00	1.00E+00	4.85E-06	4.78E-06	7.21E-08
M-HF-EX9504-A	130	1.49E-02	4.78E-07	1.00E+00	1.00E+00	7.93E-06	7.82E-06	1.18E-07
M-IT-EX9501-A	130	4.11E-04	8.06E-09	1.00E+00	1.00E+00	4.85E-06	4.85E-06	1.99E-09
M-IT-EX9502-A	130	3.45E-05	1.11E-09	1.00E+00	1.00E+00	7.94E-06	7.94E-06	2.74E-10
M-IT-EX9503-A	130	4.11E-04	8.07E-09	1.00E+00	1.00E+00	4.85E-06	4.85E-06	1.99E-09
M-IT-EX9504-A	130	3.45E-05	1.11E-09	1.00E+00	1.00E+00	7.93E-06	7.93E-06	2.74E-10

SISTEMA_VENTILACAO_MINA2 - Medidas de Importância -								
Cód. Evento Básico	Count	Prob	FV	RIR	RRR	Birnbaum	RII	RRI
M-RL-EX9501-A	130	4.16E-03	8.16E-08	1.00E+00	1.00E+00	4.85E-06	4.83E-06	2.02E-08
M-RL-EX9502-A	130	3.50E-04	1.13E-08	1.00E+00	1.00E+00	7.94E-06	7.94E-06	2.78E-09
M-RL-EX9503-A	130	4.16E-03	8.17E-08	1.00E+00	1.00E+00	4.85E-06	4.83E-06	2.02E-08
M-RL-EX9504-A	130	3.50E-04	1.12E-08	1.00E+00	1.00E+00	7.93E-06	7.93E-06	2.78E-09