UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI PRÓ-REITORIA DE PESQUISA	CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEL	

CONFIABILIDADE APLICADA A SISTEMAS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ELIAS GONTIJO DE ARAÚJO

AGOSTO DE 2011

SÃO JOÃO DEL-REI – MG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI PRÓ-REITORIA DE PESQUISA	CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – PPGEL	

CONFIABILIDADE APLICADA A SISTEMAS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS

ELIAS GONTIJO DE ARAÚJO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

ORIENTADOR: PROF. LEONIDAS CHAVES DE RESENDE

CO-ORIENTADOR: PROF. LUIZ ANTÔNIO DA FONSECA MANSO

AGOSTO DE 2011

SÃO JOÃO DEL-REI – MG

ELIAS GONTIJO DE ARAÚJO

CONFIABILIDADE APLICADA A SISTEMAS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS

Banca Examinadora:

Prof. João Guilherme de Carvalho Costa – UNIFEI

Prof. Eduardo Gonzaga da Silveira – CEFET-MG

Coorientador: Luiz Antônio da Fonseca Manso – UFSJ

Orientador: Leonidas Chaves de Resende – UFSJ

São João del-Rei, 09 de setembro de 2011

Dedico esta dissertação aos meus pais, Mário e Matilde,
aos meus queridos irmãos Paulo Eduardo e Mário
Henrique, e à minha noiva Cristiane.

AGRADECIMENTOS

A Deus que é minha força, meu refúgio e sempre iluminou meus caminhos.

Aos meus pais Mário e Matilde, e meus irmãos Paulo Eduardo e Mário Henrique, agradeço pelo carinho, compreensão e apoio incondicional ao longo de minha vida. Também por serem os pilares da minha existência, responsáveis por meu caráter, minha formação e todo o sucesso que obtive até então.

A minha noiva Cristiane pelo amor, carinho e compreensão em todos os momentos, por sempre estar presente, por vibrar com cada uma de minhas conquistas e principalmente por acreditar e apoiar minhas escolhas.

Ao meu orientador, Professor Leonidas, pela boa vontade e paciência na forma como compartilhou seu conhecimento ao longo de nossa convivência, sendo sempre muito presente na realização deste trabalho.

Ao professor Luiz Manso pelo apoio, orientações, direcionamento dos estudos e pelas valiosas sugestões que auxiliaram no engrandecimento deste trabalho.

Ao Professor Luiz Carlos do Nascimento pelas discussões e esclarecimentos durante a elaboração desta dissertação.

Aos amigos, colegas e professores que me auxiliaram de alguma forma durante meus estudos.

RESUMO

O planejamento adequado de um Sistema Elétrico Industrial (SEI) tem como principal objetivo manter o fornecimento de energia elétrica, com menor custo e, ao mesmo tempo, minimizar os impactos decorrentes das falhas de seus equipamentos no processo produtivo. Em sistemas complexos, como os apresentados nas indústrias de grande porte, é de extrema importância a identificação dos modos de falha, isto é, dos eventos ou condições físicas que causam interrupções no processo produtivo.

A correta representação dos principais setores de uma indústria e de como eles interferem no processo produtivo é indispensável para o planejamento da manutenção e operação de seu sistema elétrico. Em geral, a avaliação do desempenho do SEI é realizada por meio da aplicação de representações topológicas série, paralela ou uma combinação destas conexões, bem como de técnicas analíticas e de conjuntos mínimos de corte. Em se tratando de sistemas industriais, há uma carência de trabalhos relevantes que abordem a questão da confiabilidade na indústria. Os raros trabalhos encontrados na literatura não apresentam uma metodologia clara, constituída de etapas para o cálculo da confiabilidade de sistemas industriais.

Esta dissertação apresenta uma metodologia para análise da confiabilidade de um SEI, considerando a sua identificação, o levantamento e tratamento de dados, e a elaboração de um esquema equivalente de confiabilidade. Posteriormente, a identificação de vulnerabilidades e a elaboração de propostas de melhorias visam proporcionar um benefício, em termos econômicos, superior ao custo de investimento destas ações. Tais propostas de melhorias são decorrentes da substituição de equipamentos por outros mais confiáveis e de alterações nas estratégias de manutenção, operação e avaliação de níveis de estoques de equipamentos reservas. O sistema elétrico de uma empresa do ramo de mineração é utilizado para a verificação da metodologia proposta, uma vez que ele é parte vital do processo por ser a principal fonte de energia para a produção. Os resultados obtidos demonstram o excelente potencial da metodologia apresentada.

ABSTRACT

Proper planning for an Industrial Electrical System (SEI) has as main goal to keep the supply of electricity, at lower cost and at the same time minimizing the impacts of the failures of their equipment in the production process. In complex systems, such as those presented in large industries, it is extremely important to identify the failure modes, e.g., events or physical conditions which cause interruptions in the production process.

The correct representation of the main sectors of an industry and how they interfere in the productive process is indispensable for planning the maintenance and operation of your electrical system. In general, the performance evaluation of the SEI is accomplished through the application of topological representations series, parallel or a combination of these connections as well as analytical techniques and minimal cut sets. In the case of industrial systems, there is a lack of relevant work to address the issue of reliability in the industry. The few studies in the literature do not present a clear methodology, consisting of steps to calculate the reliability of industrial systems.

This work presents a methodology to analyze the reliability of an SEI, considering its identification, collection and processing of data, and drawing up a scheme equivalent reliability. Subsequently, the identification of vulnerabilities and the development of proposals for improvements aimed at providing a benefit, in economic terms, than the investment cost of these actions. These proposed improvements are due to replacing equipment with more reliable and changes in maintenance strategies, operation and evaluation of inventory levels of equipment reserves. The electrical system of a company in the business of mining is used to verify the proposed methodology, since it is a vital part of the process to be the main source of energy for production. The results demonstrate the excellent potential of the methodology presented.

ÍNDICE

LISTA DE TABELAS ..... **X**

LISTA DE FIGURAS ..... **XI**

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS ..... **XII**

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO **1**

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS **1**

1.2 DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO **4**

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO **9**

CAPÍTULO 2 CONFIABILIDADE DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO **10**

2.1 INTRODUÇÃO **10**

2.2 TERMINOLOGIAS E CONCEITOS UTILIZADOS **11**

2.2.1 PARÂMETROS DE CONFIABILIDADE DOS ELEMENTOS DE UM SISTEMA 11

2.2.2 CONJUNTOS MÍNIMOS DE CORTE 12

2.2.3 ÍNDICES DE DESEMPENHO 15

2.2.4 INDICADORES INDUSTRIAIS 18

2.3 TOPOLOGIA SÉRIE E PARALELO DOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO **19**

2.3.1 SISTEMA SÉRIE 19

2.3.2 SISTEMA PARALELO 20

2.4 MÉTODO DOS CONJUNTOS MÍNIMOS DE CORTE **21**

2.5 FATORES QUE INFLUENCIAM OS PARÂMETROS DE CONFIABILIDADE DOS COMPONENTES DO SISTEMA **24**

2.6 CONCLUSÕES **25**

CAPÍTULO 3 METODOLOGIA PROPOSTA **27**

3.1 INTRODUÇÃO **27**

3.2 ETAPA 1 - IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA **29**

3.3 ETAPA 2 - LEVANTAMENTO DE DADOS **29**

3.4 ETAPA 3 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO DE DADOS 31

3.5 ETAPA 4 - ELABORAÇÃO DO ESQUEMA EQUIVALENTE DE CONFIABILIDADE 32

3.6 ETAPA 5 - AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE 33

3.7 ETAPA 6 - IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS FRÁGEIS 34

3.8 ETAPA 7 - PROPOSTA DE MELHORIAS DO PROCESSO PRODUTIVO 34

3.9 FLUXOGRAMA PROPOSTO 37

3.10 CONCLUSÕES 39

CAPÍTULO 4 APLICAÇÕES 40

4.1 INTRODUÇÃO 40

4.2 IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA 40

4.3 LEVANTAMENTO E TRATAMENTO DE DADOS 41

4.4 EEC E AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE 45

4.5 PONTOS FRÁGEIS E PROPOSTAS DE MELHORIAS 48

4.5.1 MELHORIA - CABO MÓVEL DE ALIMENTAÇÃO 50

4.5.2 MELHORIA - TRANSFORMADORES 52

4.5.3 MELHORIA – ESTRATÉGIA OPERACIONAL 56

4.5.4 ANÁLISE DAS ALTERAÇÕES PROPOSTAS 62

4.6 CONCLUSÕES 63

CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES 65

5.1 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES 65

5.2 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE 69

ANEXO A ESCAVADEIRA HIDRÁULICA 71

A.1 ESPECIFICAÇÃO 71

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 76

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Exemplos de caminhos mínimos e conjuntos mínimos de corte 14

Tabela 2.2 – Classificação dos índices de desempenho 17

Tabela 4.1 – Levantamento de dados de produção da Frota A..... 43

Tabela 4.2 – Dados característicos dos equipamentos 44

Tabela 4.3 – Parâmetros da concessionária..... 45

Tabela 4.4 – Parâmetros estocásticos dos equipamentos 49

Tabela 4.5 – Novo parâmetro estocástico para o cabo móvel 51

Tabela 4.6 – Melhorias do SEI devido a substituição do cabo móvel..... 51

Tabela 4.7 – Confiabilidade x Número de reservas..... 54

Tabela 4.8 – Dados do Transformador 54

Tabela 4.9 – Dados da Carga 54

Tabela 4.10 – Custos de Produção 54

Tabela 4.11 – Retorno de Investimento..... 55

Tabela 4.12 – Resultados do estudo..... 56

Tabela 4.13 – Melhorias do SEI - Dimensionamento de reserva de transformadores..... 56

Tabela 4.14 – Caminhos Mínimos 59

Tabela 4.15 – Dados estocásticos dos equipamentos 60

Tabela 4.16 – Caminhos mínimos do rede de confiabilidade 61

Tabela 4.17 – Melhoria do SEI devido à inclusão de redundância. 62

Tabela 4.18 – Resultados das alterações propostas..... 62

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Modelo de sistema tipo ponte 14

Figura 2.2 – Esquema equivalente de confiabilidade 15

Figura 2.3 – Sistema com dois componentes conectados em série 20

Figura 2.4 – Sistema com dois elementos ligados em paralelo 21

Figura 3.1 – Levantamento de dados 30

Figura 3.2 – Sistema com 1 componente principal e 1 componente reserva 36

Figura 3.3 – Fluxograma proposto 38

Figura 4.1 – Diagrama unifilar do SEI de uma mineração 42

Figura 4.2 – Rede de confiabilidade para o PP01 46

Figura 4.3 – Bloco paralelo da rede de confiabilidade do PP01 46

Figura 4.4 – Rede Reduzida do bloco paralelo de PP01 47

Figura 4.5 – Conjuntos mínimos de corte do PP01 47

Figura 4.6 – Detalhes construtivos de um cabo SHD e em corte transversal 51

Figura 4.7 – Custos de investimento, interrupção e total x Número de transformadores reservas 55

Figura 4.8 – Falha ocorrida no Transformador 05 58

Figura 4.9 – Rede de confiabilidade para restabelecimento do PP01 59

Figura 4.10 – Rede reduzida de confiabilidade 61

Figura 4.11 – EEC para o PP01 considerando a estratégia operacional 61

Figura A.1 – Dimensões da escavadeira hidráulica 75

Figura A.2 – Escavadeira hidráulica em operação. 75

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	*Availability*
a.a.	Ao ano
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AENS	*Average Energy not Supplied*
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASAI	*Average Service Availability Index*
ASUI	*Average Service Unavailability Index*
CAIDI	*Custumer Average Interruption Duration Index*
CVC	Custo Variável Clientes
CVE	Custo Variável Empresarial
DBC	Diagrama de Blocos de Confiabilidade
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DEI	Duração Equivalente de Interrupção
DIC	Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
DIE	Duração da Indisponibilidade do Equipamento
DJ	Disjuntor
DMIC	Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora
DMNS	Demanda Média Não Suprida
EEC	Esquema Equivalente de Confiabilidade
EENS	Energia Esperada não Suprida
ENS	*Energy not Supplied*
ES	Equivalente Série
EX	Escavadeira
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora

FEI	Frequência Equivalente de Interrupção
FIC	Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
FIE	Frequência de Indisponibilidade do Equipamento
FOPS	*Falling-object protective structures*
FPP	Frequência de Perda de Produção
h	horas
h/ano	horas por ano
ICP	Índices de Continuidade de Produção
IDP	Índices de Descontinuidade de Produção
IEC	*International Electrotechnical Commission*
IEEE	*Institute of Electrical and Electronic Engineers*
kV	kilo Volt
LD	Linha de Distribuição
LOLC	*Loss of Load Cost*
MTTR	*Mean Time to Repair* – Tempo médio para reparo
MVA	Mega Volt-Ampere
N	Número de transformadores em operação
n	Número de transformadores reservas
P(t)	Probabilidade no instante t
PIB	Produto Interno Bruto
PMNS	Produção Média Não Suprida
PMQR	Produção Média Requerida
PP	Ponto de Produção
PPP	Probabilidade de Perda de Produção
r	Duração média da falha / Tempo médio de reparo
R$	Reais
R(t)	Confiabilidade no instante t

SAE	*Society of Automotive Engineers*
SAIDI	*System Average Interruption Duration Index*
SAIFI	*System Average Interruption Frequency Index*
SE	Subestação
SED	Sistema Elétrico de Distribuição
SEI	Sistema Elétrico Industrial
SHD	Cabo móvel
SO	Concessionária de Energia Elétrica
t	Toneladas
t/h	Toneladas por hora
TR	Transformador
Trafo	Transformador
U	Indisponibilidade
λ	Taxa de Falha

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Após a 2ª Guerra Mundial o mundo tem passado por grandes avanços. No campo tecnológico, foram decisivas as pesquisas iniciadas pela indústria bélica americana, seguidas pela automação da indústria em escala mundial, viabilizadas pela evolução da informática e telecomunicações, presentes em todos os aspectos da sociedade atual.

No campo social, este movimento resultou na dependência da sociedade contemporânea em relação aos métodos automáticos de produção, atingindo níveis suficientes para afetar o meio ambiente e a própria segurança física dos seres humanos. Em paralelo, evoluiu a consciência mundial da importância da preservação dos recursos naturais, aliada a uma necessidade ascendente de garantia de segurança física. Na atualidade, exige-se que os processos de projeto e manutenção dos meios de produção não só atendam estes anseios, mas que sejam estruturados de forma transparente e auditável, o que permite à sociedade exercer seu papel de promotora e fiscalizadora.

Sendo assim, na atual sociedade moderna, o papel dos engenheiros responsáveis pelo planejamento, operação, projeto e construção de produtos vai do desenvolvimento de simples equipamentos a complexos sistemas. Contudo, a falha

destes pode causar efeitos que vão da inconveniência e irritação a impactos bastante severos para a sociedade e o meio ambiente.

Frequentemente, as precauções adequadas contra essas situações indesejáveis só podem ser implantadas se o nível de risco envolvido puder ser muito bem avaliado, tanto quantitativamente quanto qualitativamente, indicando, desta forma, os pontos “falhos” de um produto, sistema, equipamento ou processo, de forma a proporcionar ações preventivas ou corretivas mais eficientes.

O aprimoramento do processo produtivo faz com que a otimização esteja cada vez mais presente no cenário industrial, visando encontrar uma “solução ótima” que resulte na melhor performance possível do sistema segundo um critério de desempenho previamente definido. Desta forma, as áreas com impacto significativo no processo produtivo, tais como operação e manutenção dos equipamentos, tornaram-se foco de estudos e aplicações de técnicas de engenharia, buscando sua otimização. A primeira, desde que respeitados os limites operativos, pouco interfere no equipamento, porém a manutenção interfere significativamente no equipamento, podendo aumentar ou reduzir a ocorrência de falhas, afetando a sua disponibilidade física e, consequentemente, a confiabilidade do processo produtivo [C05]. A busca por processos mais eficientes faz com que a otimização torne uma ferramenta cada vez mais presente no cenário industrial. Estes processos vão desde o planejamento da operação até a definição das melhores práticas de manutenção.

A estratégia de manutenção, seja ela baseada no tempo ou na condição do equipamento, pode ser otimizada levando em consideração as distribuições do tempo para a falha dos componentes mantidos em operação, bem como a tendência da taxa de falha do sistema. Daí a importância de se ter um sistema de manutenção adequado onde os parâmetros estocásticos do processo de falha e reparo para os principais modos de falha são bem conhecidos.

Grande parte das informações necessárias para a otimização de um processo de manutenção pode ser representada por meio da utilização de parâmetros do sistema, bem como de seus equipamentos, os quais são obtidos a partir do histórico da sua operação. Este histórico, por sua vez, deve ser criteriosamente obtido, armazenado e tratado estatisticamente a fim de evitar que informações equivocadas sejam obtidas, tais como taxas de falha, tempos médios de reparo, o que pode comprometer toda a análise a ser realizada.

A correta representação dos principais setores de uma indústria de grande porte, e de como eles interferem no processo produtivo, é indispensável para o planejamento da manutenção e operação de seu Sistema Elétrico Industrial (SEI). No estudo de caso utilizado nesta dissertação, constituído por uma mineração, o SEI é parte vital do processo, uma vez que é dele a principal fonte de energia para manter os equipamentos em funcionamento.

O planejamento adequado da manutenção e operação de um sistema elétrico, seja ele de uma concessionária ou de uma indústria de grande porte, tem como principal objetivo manter o sistema em funcionamento com menor custo e, ao mesmo tempo, minimizar os impactos decorrentes das interrupções ou falhas no sistema. Atingir este objetivo é uma tarefa extremamente complexa, pois, a redução do custo de investimento implica na queda da confiabilidade do sistema, seguida de um aumento de seus custos associados (valor da confiabilidade). Por outro lado, um sistema muito confiável, em geral, possui elevados custos de investimento. De forma geral, o conceito de confiabilidade está relacionado com a existência de redundâncias, i.e., caminhos alternativos para que um sistema se mantenha em funcionamento, ainda que alguns de seus componentes estejam avariados.

Em sistemas complexos, como os apresentados nas indústrias de grande porte, é de extrema importância a identificação dos modos de falha, isto é, eventos ou condições físicas que causam interrupções no processo produtivo [AB76a]. A correta representação dos principais setores de uma indústria e de como eles interferem no processo produtivo é indispensável para o desenvolvimento de um planejamento eficiente e econômico da manutenção e da operação de seu SEI.

Em se tratando de mineração, esta é responsável por três a cinco por cento do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro. Seu produto é normalmente usado por indústrias metalúrgicas, siderúrgicas, fertilizantes, petroquímica. Neste setor, de profunda relevância para o cenário nacional, todo o processo inicia-se a partir da extração do minério com o auxílio de escavadeiras que carregam caminhões fora-de-estrada. Estes são os responsáveis por transportar a matéria prima para o britador e em seguida para tratamento para, finalmente, chegar ao seu produto final. Por se tratar de um equipamento elétrico e constituir o ponto de partida de todo o processo, as escavadeiras devem ser bastante confiáveis, assim como sua alimentação**.** Portanto, é de fundamental importância um adequado planejamento da

manutenção e da operação do SEI de uma mineração. Desta forma, avaliações mais precisas, que garantam decisões seguras, se fazem cada vez mais necessárias em todo o processo produtivo.

Assim como utilizado para as redes de distribuição de concessionárias, os equipamentos de um SEI podem ser representados por uma rede de componentes conectados em série, paralelo, ou por qualquer combinação destas formas de conexão. Em termos topológicos, na medida em que o sistema se torna mais complexo, técnicas e modelos adicionais aos aplicados a sistemas série e paralelo devem ser empregados para simplificar e tornar sua análise mais eficaz.

Em geral, as grandes indústrias e concessionárias dispõem de programas computacionais para a avaliação de seu sistema elétrico, tais como fluxo de potência, curto-circuito, etc. Uma avaliação mais detalhada destes sistemas, considerando a natureza aleatória e estocástica dos equipamentos, pode ser realizada somente através de algoritmos de confiabilidade.

Esta dissertação tem como objetivo propor um conjunto de procedimentos para estabelecer melhorias no SEI presente em indústrias de grande porte a fim de maximizar o resultado produtivo. Como estudo de caso, será utilizada uma empresa de mineração cujo resultado produtivo está diretamente relacionado à sua capacidade de produção, dada em função da sua taxa de produtividade, a qual depende fundamentalmente de escavadeiras para a extração do minério. Será proposto, também, o sistema equivalente de confiabilidade, devidamente validado, cujos índices de desempenho terão seus parâmetros analisados para se estabelecerem melhorias: no processo de manutenção; no dimensionamento da reserva técnica de subestações unitárias [CL09a]; e no desenvolvimento de novas tecnologias.

1.2 DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO

Nesta seção é realizada uma breve revisão sobre as principais técnicas de avaliação da confiabilidade dos sistemas elétricos, com destaque para o Sistema Elétrico de Distribuição (SED), que é composto pelos equipamentos de uma concessionária de

distribuição de energia elétrica. Como será visto, a aplicação destas técnicas em SEI é ainda muito incipiente.

Atualmente, as bibliografias a respeito do cálculo de confiabilidade dos sistemas de potência mostram certo equilíbrio entre as áreas de geração, transmissão e distribuição. Fato este que não era verificado até a década de 90, quando o tema avaliação da capacidade estática de geração era responsável pelo maior volume de publicações relacionadas ao tema. A primeira publicação a este respeito surgiu cerca de setenta anos atrás.

No que se refere à avaliação de confiabilidade dos sistemas elétricos, os artigos [I78], [I72], [ABL84], [ABSS98], [ABBG94], [ABBG99], [BFB01] são referências significativas nas áreas de capacidade estática de geração, sistemas multi-área, confiabilidade composta geração-transmissão, sistemas de transmissão e distribuição, dados de falha de equipamentos e análise do custo/benefício.

Com o passar dos anos, o interesse sobre as análises de confiabilidade nas áreas de transmissão e distribuição aumentou. Não se pode precisar exatamente quando iniciou o interesse, porém as primeiras publicações mais significativas foram em 1964, com a publicação dos artigos [GMP64] e [T64]. Apesar de apresentarem conceitos completamente diferentes, ambos introduziram no cenário de avaliação de confiabilidade importantes conceitos.

A referência [GMP64] introduziu o conceito de "*tempo adverso*" no sentido de representar as mudanças das condições climáticas. A principal contribuição foi a introdução dos procedimentos de cálculo para frequência e duração média da falha. Estes dois índices fornecem uma percepção prática para a avaliação da confiabilidade na distribuição.

Os primeiros conceitos relativos às técnicas de avaliação analíticas, processo de Markov, para avaliação de sistemas de transmissão foram apresentadas em [BB68], que considerou também o efeito do tempo adverso em simples configurações em paralelo e comparou os resultados calculados com aqueles obtidos em [GMP64]. Os autores dos trabalhos [BG75a] e [BG75] apresentaram um conjunto de equações para o cálculo de sistemas série-paralelo robustos, considerando o conceito de tempo adverso, saídas programadas para manutenção e sobreposição de falhas. A

referência [BG75] também demonstra a aplicação da teoria dos conjuntos mínimos de corte (*minimal cut sets*) em configurações mistas complexas.

A referência [RG70], incorporou ações de chaveamento na avaliação de circuito de transmissão, incluindo para isso os equipamentos de proteção. As ideias mencionadas foram formalizadas em [E71], que apresentou o modelo básico de três estados, incorporando o chaveamento depois da ocorrência da falta. Esta é a estrutura básica utilizada em [GB74], que exibe um procedimento para a avaliação da confiabilidade em subestações e uma comparação quantitativa da confiabilidade considerando a configuração fundamental de uma subestação em relação a uma subestação que possui chaveamento.

As vantagens de técnicas de avaliação da confiabilidade em sistemas de transmissão e distribuição, incluindo falhas ativas e passivas, foram apresentadas em [AOB77], que mostrou a aplicação destes conceitos para sistemas de potência auxiliares. A referência [ADH79] aprimorou os conceitos básicos pra a avaliação da confiabilidade em sistemas de distribuição, com a incorporação de efeitos operacionais, tais como a perda parcial de continuidade. A referência [ADH79a] aperfeiçoou os conceitos de conjuntos mínimos de corte e incluiu as equações que consideram o efeito das falhas de modo comum em sistemas paralelos e malhados. Muitos dos conceitos citados nas referências anteriores e em outras publicações podem ser resumidos e ilustrados por meio de exemplos numéricos [BA84]. Na referência [BA84] também estão presentes os índices básicos utilizados pelas concessionárias de energia para avaliar a performance passada dos sistemas de distribuição e os índices para avaliar o desempenho futuro.

Entre 1996 e 1999 os artigos mais importantes se encontram em [BFB01]. Em 1997, dois métodos para determinar os índices de confiabilidade dos sistemas de distribuição foram propostos em [AM97], um deles é analítico (não Markoviano) e outro utiliza simulação Monte Carlo. A principal novidade é a utilização de tempos de restauração não exponenciais (no caso é empregada a distribuição lognormal).

A referência [C98] emprega as técnicas analíticas convencionais, que apenas possibilitam o cálculo dos valores médios, para calcular os índices de confiabilidade dos sistemas de distribuição, incluindo os efeitos de falhas na transmissão e geração.

A referência [BAA99] cita pela primeira vez a importância da manutenção preventiva, os autores demonstram os benefícios que esta prática gera a confiabilidade dos sistemas de distribuição.

Dentre as diversas técnicas existentes, o método dos conjuntos mínimos de corte se destaca por duas razões: por ser uma metodologia de fácil implementação computacional, o que garante uma solução rápida e eficiente; e, porque os conjuntos de corte estão diretamente relacionados aos modos de falha do sistema, indicando as maneiras pelas quais o sistema pode vir a falhar [BA94].

Técnicas como frequência e duração, modelos Markovianos, Poisson, simulação Monte Carlo, dentre outras, são aplicadas adicionalmente ao método dos conjuntos mínimos de corte para calcular os índices de confiabilidade [BA94], os quais mensuram o desempenho do sistema. Para tal, é necessário um banco de dados com um histórico operativo do sistema que forneça informações precisas sobre os elementos constituintes deste, como por exemplo: taxas de falha e tempos médios de reparo dos equipamentos. É importante ressaltar que informações equivocadas ou incompletas podem comprometer a precisão na avaliação do sistema [G06].

No ano de 2008 a referência [CLO08] apresenta uma nova metodologia probabilística para a determinação do número ótimo de transformadores reservas para uso em subestações, considerando aspectos de confiabilidade e custo. O modelo proposto é baseado na teoria dos processos estocásticos e permite estimar indicadores de confiabilidade como indisponibilidade, frequência e duração média das falhas, tempo médio entre falhas, além dos valores esperados de potência e energia não suprida. Um ano mais tarde, na referência [CL09], é dada continuidade ao trabalho incluindo a realização de análises de sensibilidade, visando identificar o comportamento dos resultados frente a situações previamente estabelecidas.

Algumas características dos sistemas de distribuição como grande extensão, instalação dos condutores predominantemente aérea e proximidade de aglomerados populacionais, os tornam o componente do sistema elétrico (geração, transmissão e distribuição) mais vulnerável à ocorrência de faltas e interrupções no fornecimento de energia. Estudos indicam que 80% das interrupções ocorridas nos sistemas de potência são causadas por faltas nos sistemas de distribuição, que notadamente são eventos estocásticos. Estes fatos afetam diretamente o SEI, uma vez que o mesmo está à jusante do SED.

Em se tratando de confiabilidade aplicada a um SEI, são raros os trabalhos encontrados na literatura. Em [B93] é apresentado um método para análise de confiabilidade de sistema de distribuição industrial que combina uma Simulação Monte Carlo com um modelo de rede elétrica. O método apresentado neste trabalho é adequado para sistemas industriais (e outros) de distribuição onde cargas sensíveis estão presentes, a manutenção de componentes é importante e/ou onde o comportamento da proteção influencia a confiabilidade.

A referência [MHS97] demonstra uma metodologia para análise de confiabilidade em plantas industriais, avaliando-se o comportamento dos processos de produção onde são apresentados resultados de análises de confiabilidade considerando interrupções no processo produtivo. Já em [MB02], é citada a importância da confiabilidade do fornecimento de energia elétrica devido aos os altos custos de interrupção associados às modernas plantas industriais, bem como a importância de quantificar a confiabilidade adequada para o sistema em estudo.

Em [HAC08], é apresentado que qualquer tipo de programa de confiabilidade, consiste na elaboração de um ou mais modelos de confiabilidade que depende significativamente da precisão dos dados trabalhados. É exposto o que é engenharia de confiabilidade e sua importância para a disponibilidade do processo, segurança e programas de manutenções preventivas nas indústrias.

Tal como exposto nesta seção, vários autores propuseram trabalhos contemplando técnicas analíticas, bem como métodos de simulação, para avaliação da confiabilidade de sistemas elétricos de distribuição. Porém, a avaliação da confiabilidade de sistemas industriais ainda apresenta uma literatura limitada, com um número baixo de trabalhos publicados. Ainda assim, estes raros trabalhos não apresentam uma metodologia clara, constituída de etapas para o cálculo da confiabilidade de sistemas industriais. Apenas uma análise crítica é geralmente abordada, sem a proposição de uma metodologia detalhada que defina sua forma de aplicação, ou o conjunto de procedimentos para realizar a análise de confiabilidade.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em 5 capítulos, os quais são brevemente descritos a seguir.

O presente capítulo discorreu a respeito da importância dos sistemas elétricos, relatando a atual conjuntura na qual eles operam. Foi apresentada uma breve revisão da literatura acerca dos principais trabalhos propostos para avaliação de confiabilidade de sistemas elétricos. As principais contribuições e vantagens, bem como algumas de suas limitações foram brevemente citadas.

O Capítulo 2 aborda os principais conceitos relativos à confiabilidade dos sistemas de distribuição. São apresentadas as técnicas dos conjuntos mínimos de corte, técnicas analíticas para avaliação do desempenho de sistemas elétricos e fatores que influenciam os parâmetros estocásticos dos componentes do sistema. Este capítulo se preocupa em familiarizar o leitor acerca dos índices de desempenho do sistema através da apresentação de terminologias amplamente difundidas e aplicadas aos sistemas de distribuição, bem como algumas utilizadas em sistemas industriais.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia a ser utilizada no decorrer do trabalho. São apresentadas as etapas constituintes da metodologia proposta para a análise de confiabilidade de um SEI, considerando a identificação do sistema, levantamento de dados e seu tratamento, elaboração de um esquema equivalente de confiabilidade e identificação de pontos frágeis e propostas de melhorias para o SEI. Ao final do capítulo, todas estas etapas são sintetizadas em um fluxograma.

No Capítulo 4, a metodologia é aplicada em um SEI de uma mineração para a verificação dos conceitos e das etapas propostas. Os resultados obtidos e discutidos demonstram o seu excelente potencial para aplicação no planejamento e operação de outros sistemas industriais.

Finalmente o Capítulo 5 apresenta um resumo das discussões realizadas em cada capítulo no formato de conclusões. São apresentadas também sugestões para trabalhos futuros correlatos aos temas abordados.

CAPÍTULO 2

CONFIABILIDADE DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

2.1 INTRODUÇÃO

Os Sistemas Elétricos de Distribuição (SED) têm como função transportar, com confiabilidade adequada, a energia do sistema de transmissão até os consumidores individuais de energia elétrica. Por confiabilidade adequada, entende-se a habilidade do sistema de distribuição desempenhar sua função sob condições definidas, por um período de tempo definido, sendo consideradas as probabilidades de falha de seus componentes. Desta forma, a confiabilidade pode ser vista como o resultado da arte de projetar e operar um sistema, que é imprevisível frente aos fenômenos naturais, e assim, sujeito a falhas. Nos estudos de confiabilidade são empregadas técnicas que visam analisar o SED, possibilitando, desta maneira, o cálculo dos seus índices de confiabilidade e a avaliação de seu desempenho quanto a critérios de continuidade. As concessionárias que possuem sistemas confiáveis são as que possuem maior domínio sobre os fatores que afetam seus sistemas de distribuição [W96].

A avaliação da confiabilidade é efetuada pela análise de dados históricos de eventos causadores de interrupções, em um dado período de tempo. Em conjunto, as informações sobre a incidência de faltas e duração das interrupções permitem estimar o comportamento dos sistemas de distribuição, provendo os dados necessários para melhorar o nível de confiabilidade dos mesmos [JL03].

Os SED se apresentam topologicamente representados por uma rede de componentes conectados em série, paralelo, malhado ou por uma combinação destas conexões. Se os componentes estiverem conectados simplesmente em série e/ou paralelo, o cálculo da confiabilidade se torna mais simples. Caso contrário, técnicas de cálculos e modelos adicionais podem ser utilizados para simplificar o sistema [S02], [C98].

Dentre estas técnicas pode-se citar: método da probabilidade condicional, análise dos conjuntos de corte, diagramas em árvore, diagramas lógicos e técnicas da matriz de conexão. Comparando-as, pode-se concluir que a análise dos conjuntos de corte é aquela que se aplica melhor em sistemas de distribuição, por duas razões: pode ser facilmente programado para uma solução rápida e eficiente para qualquer rede e os conjuntos de corte estão diretamente relacionados aos modos de falha do sistema [BA83].

Depois de obtidos os conjuntos mínimos de corte para todos os pontos de carga, várias metodologias podem ser empregadas para calcular os índices de confiabilidade. Entre elas estão: técnicas baseadas em enumeração de estados juntamente com modelos Markovianos (metodologia analítica convencional), simulação Monte Carlo Cronológica aplicada no Esquema Equivalente de Confiabilidade para cada ponto de carga (metodologia mista), etc.

2.2 TERMINOLOGIAS E CONCEITOS UTILIZADOS

A seguir, são apresentadas algumas definições empregadas na área de confiabilidade de sistemas elétricos, que auxiliarão no entendimento das metodologias analisadas neste capítulo.

2.2.1 PARÂMETROS DE CONFIABILIDADE DOS ELEMENTOS DE UM SISTEMA

Qualquer componente do sistema elétrico, como, por exemplo, disjuntores, chaves seccionadoras, transformadores, etc. está sujeito a operações incorretas, resultando em falhas no sistema. Da mesma maneira, situações que acarretam falhas podem ser corrigidas por meio de reparos nos componentes falhos, ou mesmo por

manobras que reduzam a interrupção de energia nos pontos consumidores. Desta forma, componentes podem transitar entre estados operativos definindo uma taxa de transição [BA83]:

Taxa de Transição: representa o número de vezes que um componente transita de um dado estado, dividido pelo tempo total de permanência neste estado;

Taxa de Falha (λ): representa o número de vezes que um componente falhou em um dado período de tempo, dividido pelo tempo total em que o componente permaneceu em operação;

Taxa de Reparo: representa o número de vezes que um componente foi reparado em um dado período de tempo, dividido pelo tempo total em que o componente permaneceu em reparo.

O restabelecimento operacional de um sistema falho pode ser feito de duas formas [S02], [C98]:

Tempo de Chaveamento: é definido como o tempo decorrido entre a ocorrência de uma falha na qual o componente falhado é isolado e todos os componentes não danificados são recolocados em serviço. Este tempo compreende a detecção da falha, o isolamento do componente falhado e a execução de chaveamentos destinados à recolocação em serviço dos componentes sãos.

Tempo de Restauração: é definido como o tempo necessário para que um determinado componente, em estado falho, seja substituído ou reparado e posteriormente recolocado em operação.

2.2.2 CONJUNTOS MÍNIMOS DE CORTE

Algumas terminologias são inerentes a esta metodologia de modelagem de sistemas [S02], [BA83]:

Ponto de Carga: barra ou ponto do sistema onde se encontram consumidores conectados, e onde normalmente são realizadas as análises de confiabilidade.

Ramo: conjunto de componentes que se encontram conectados em série e são delimitados pelas barras de entrada e saída. Esta definição significa que se apenas um componente pertencente ao ramo estiver falhado, o ramo também se apresentará falhado.

Ramo Bidirecional: o ramo na qual a potência flui nas duas direções.

Ramo Unidirecional: o ramo na qual a potência flui somente em uma direção.

Caminho: é o conjunto de ramos do sistema que possibilitam conectar uma entrada (fonte) e uma saída (ponto de carga) do mesmo.

Caminho Mínimo: um caminho entre entrada e saída é mínimo se, neste caminho, nenhum nó entre ramos for atravessado mais de uma vez [BA83]. É um conjunto de componentes no qual a falha de qualquer um destes componentes sistêmicos faz com que o conjunto restante não seja mais considerado um caminho.

Caminho Normalmente Fechado: é um caminho mínimo onde todos os componentes se encontram em operação (energizados). São utilizados para identificar eventos de falhas que causam interrupção no fornecimento de energia no ponto de carga de interesse.

Caminho Normalmente Aberto: é um caminho mínimo onde existe pelo menos um componente que não está em operação (desenergizado). São utilizados para verificar as várias alternativas existentes no sentido de restabelecer a energia no ponto de carga de interesse.

Conjunto de Corte: é o conjunto de ramos ou componentes do sistema que quando indisponíveis (fora de operação) provocam falha no sistema. Em termos de confiabilidade de redes, esta definição pode ser interpretada como sendo o conjunto de componentes que devem falhar para ocasionar a abertura de todos os caminhos que conduzem a energia para o ponto de carga em análise.

Conjunto Mínimo de Corte: é um conjunto de ramos ou componentes do sistema que, quando se encontram simultaneamente fora de operação, causam falha do sistema. Contudo, se um dos componentes do conjunto volta a operar, o sistema também retorna à operação. É possível definir para um determinado sistema vários conjuntos mínimos de corte.

Cortes de 1ª Ordem: é considerado corte de 1ª ordem um componente ou ramo que se estiver fora de operação, acarreta perda de continuidade de serviço para o ponto de carga de interesse.

Cortes de 2ª Ordem: é considerado corte de 2ª ordem dois componentes ou ramos que, se estiverem simultaneamente fora de operação, acarretam perda de continuidade de serviço para o ponto de carga de interesse.

Para avaliar a confiabilidade do sistema, os conjuntos mínimos de corte devem ser combinados. Segundo as definições dadas, os elementos de um conjunto mínimo de corte podem ser representados em paralelo, enquanto os conjuntos podem ser representados entre si em série, indicando que a ocorrência de qualquer conjunto mínimo implica na falha do sistema.

A título de ilustração é utilizado o sistema da Figura 2.1, para o qual os caminhos mínimos e os conjuntos mínimos de corte são apresentados na Tabela 2.1.

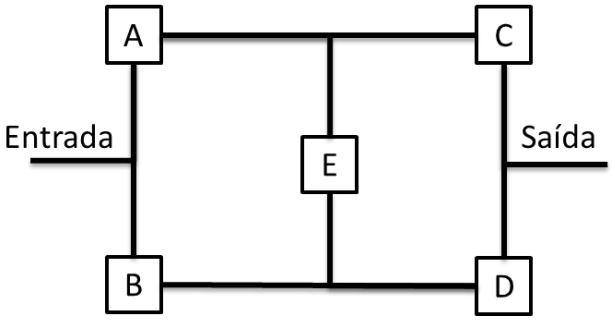


Figura 2.1 – Modelo de sistema tipo ponte

Tabela 2.1 – Exemplos de caminhos mínimos e conjuntos mínimos de corte

	Exemplos
Caminhos Mínimos	AC, BD, AED, BEC
Conjuntos Mínimos de Corte	AB, CD, AED, BEC

Esquema Equivalente de Confiabilidade (EEC): é a representação dos conjuntos mínimos de corte de um dado sistema sob análise. Os conjuntos mínimos de corte são conectados em série, sendo que os componentes de cada conjunto mínimo de corte estão conectados em paralelo.

O EEC do sistema representado na Figura 2.1 é representado da seguinte maneira, na Figura 2.2 abaixo:

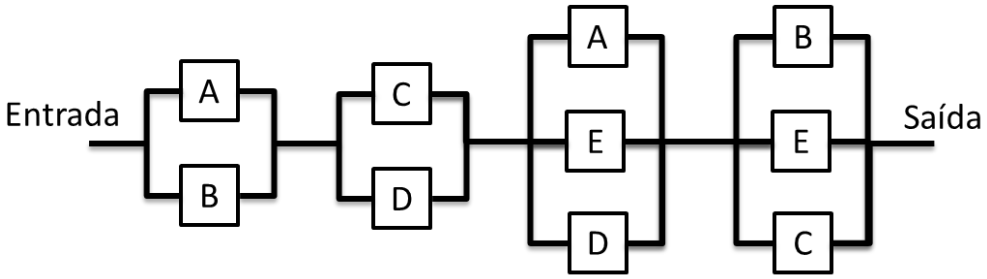


Figura 2.2 – Esquema equivalente de confiabilidade

2.2.3 ÍNDICES DE DESEMPENHO

Os índices de confiabilidade de um sistema servem para quantificar o seu desempenho, passado ou futuro, quanto à qualidade do fornecimento de energia aos pontos consumidores. Os índices mais empregados em SEDs são :

Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC): Intervalo de tempo que, em média, no período de observação, em cada unidade consumidora do conjunto considerado, ocorreu descontinuidade da distribuição de energia elétrica [ANEEL00].

Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora (DIC): Intervalo de tempo que, no período de observação, em cada unidade consumidora ocorreu descontinuidade da distribuição de energia elétrica.

Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora (DMIC): Tempo máximo de interrupção contínua, da distribuição de energia elétrica, para uma unidade consumidora qualquer.

Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC): Número de interrupções ocorridas, em média, no período de observação, em cada unidade consumidora do conjunto considerado.

Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora (FIC): Número de interrupções ocorridas, no período de observação, em cada unidade consumidora.

Modo de Falha: um evento ou condição física, que causa uma falha funcional [S99]; ou um dos possíveis estados de falha de um item, para uma dada função requerida [I00]. O modo de falha está associado ao evento ou fenômeno físico que provoca a transição do estado normal ao estado anormal do sistema [S05].

Duração média da Falha (r): representa o tempo, em média, em que a unidade consumidora ou ponto de conexão permaneceu sem fornecimento de energia por ocasião de uma falha.

Loss of Load Cost (LOLC): Representa o custo pelo não fornecimento de energia a uma unidade consumidora (ponto de conexão), ou mesmo para o sistema.

Indisponibilidade (U): representa, em média, as horas que um equipamento não está em condição de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado [ABNT94].

System Average Interruption Frequency Index (SAIFI): é o índice da frequência média de interrupções do sistema. É definido pela razão entre o número total de interrupções nos consumidores e o número total de consumidores, no período total de um ano.

System Average Interruption Duration Index (SAIDI): é o índice da duração média de interrupção do sistema. É definido como sendo a razão entre o somatório das durações das interrupções nos consumidores e o número total de consumidores, no período de um ano.

Custumer Average Interruption Duration Index (CAIDI): é o índice da duração média da interrupção para o consumidor. É definido como sendo a razão entre o somatório das durações das interrupções nos consumidores e o número total de interrupções nos consumidores, no período de um ano.

Average Service Availability Index (ASAI): é o índice de disponibilidade média de serviço. É definido como sendo a razão entre o somatório do número de horas em que o sistema está disponível para os consumidores e o número total de horas demandadas no sistema, no período de um ano.

Average Service Unavailability Index (ASUI): é o índice de indisponibilidade média de serviço. É definido como sendo a razão entre o número de horas indisponíveis para os consumidores e o número total de horas demandadas no sistema, no período de um ano.

Energy not Supplied (ENS): é o índice para a energia não suprida. Representa a energia total não fornecida pelo sistema, no período de um ano.

Average Energy not Supplied (AENS): é o índice para a energia media não suprida. É definido como sendo a razão entre o total de energia não suprida e o número total de consumidores, no período de um ano.

No Sistema Elétrico Brasileiro, os índices de desempenho empregados são DEC, FEC, DIC, FIC e DMIC [ANEEL00]. Os índices SAIFI e SAIDI correspondem aos índices FEC e DEC respectivamente. O índice U corresponde ao índice DIC na legislação brasileira. O índice ENS pode ainda ser denominado EENS, Energia Esperada não Suprida. Este índice pode avaliar o desempenho do sistema e/ou de uma unidade consumidora (ponto de conexão) de interesse. A Tabela 2.2 apresenta a classificação geralmente utilizada para os índices de desempenho no que se refere a índices globais e individuais.

Tabela 2.2 – Classificação dos índices de desempenho

Índices de Desempenho para Pontos de Carga	r, U, ENS, AENS, DIC, FIC, DMIC
Índices de Desempenho para o Sistema	ENS, AENS, DEC, FEC, SAIFI, SAIDI, CAIDI, ASAI, ASUI, LOLC

A Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, regulamenta padrões para os índices de confiabilidade, empregados no sistema brasileiro, para que as concessionárias forneçam energia com qualidade aos seus consumidores. Desta forma, de acordo com o descrito em [ANEEL00] tem-se:

Metas de Continuidade: são os valores máximos estabelecidos para os indicadores de continuidade, que são avaliados pela agência regulatória periodicamente.

Padrão de Continuidade: valor máximo estabelecido, pela agência regulatória do sistema, para um indicador de continuidade e utilizado para a análise comparativa com os valores apurados nas concessionárias de energia elétrica.

2.2.4 INDICADORES INDUSTRIAIS

De maneira análoga aos índices de desempenho do SED, os indicadores de desempenho industriais são definidos e representam a contribuição da classe do equipamento nos índices avaliados nas empresas [S05].

Frequência de Indisponibilidade do Equipamento (FIE): este índice avalia a continuidade funcional através da frequência de indisponibilidade do equipamento, em um período, por culpa exclusiva da manutenção e do modo de falha modelado. Incluem-se neste índice as indisponibilidades acidentais durante manutenções, calculadas supondo que sejam proporcionais às intervenções.

Duração da Indisponibilidade do Equipamento (DIE): é definida pela fração de tempo do equipamento encontrar-se indisponível, em um período analisado. Além dos tempos médios de interrupção durante a manutenção, depende da topologia da linha de produção.

Frequência de Perda de Produção (FPP): este índice mede o numero de vezes que a linha de produção deixa de suprir uma fração da demanda de produtos em um intervalo de tempo, por culpa da manutenção no equipamento. A perda de produção é função da topologia da linha de produção, sendo avaliada pelas frações dos equipamentos que podem interromper a produção, da taxa de acidentalidade das equipes de manutenção e da frequência de intervenções, programadas ou não,

Probabilidade de Perda de Produção (PPP): este índice traduz a fração de tempo em que os clientes deixam de ser atendidos plenamente, por causas relacionadas a falhas ou manutenção. Representa uma fração do índice de mesmo nome utilizado no planejamento da capacidade de produção.

Demanda e Produção Média Não Suprida (DMNS e PMNS): estes índices estimam os pedidos de produtos não atendidos, continuamente, por causa do equipamento.

Frequência e Duração Equivalentes de Interrupção (FEI e DEI): expressam o número e tempo equivalentes de cortes da produção máxima (ou média) em um período, por culpa do equipamento.

Índices de Descontinuidade e Continuidade de Produção (IDP e ICP): estes índices são complementares e medem a fração da produção média requerida ($PMRQ$) e não suprida ($PMNS$), atribuída ao equipamento ($IDP = {}^{PMNS}/_{PMRQ}$).

Custo Variável Empresarial e dos Clientes (CVE e CVC): estes índices avaliam as variações nos encargos diretos, para a empresa e clientes, imputados ao equipamento. Os custos fixos não variam com a periodicidade da manutenção, podendo ser ignorados caso o interesse resida na comparação de alternativas econômicas decorrentes da manutenção.

Após uma análise dos índices relativos ao SED e ao SEI, é notória a correlação existente entre eles, como por exemplo, Frequência e Duração Equivalentes de Interrupção (FEI e DEI) são índices análogos ao FIC e ao DIC, respectivamente. O índice Produção Média Não Suprida, PMNS, é equivalente ao AENS, energia média não suprida. O índice Duração da Indisponibilidade do Equipamento (DIE), dos indicadores industriais, é análogo à indisponibilidade U, do sistema elétrico de distribuição.

2.3 TOPOLOGIA SÉRIE E PARALELO DOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Os SED's podem se apresentar, topologicamente, de várias formas. Normalmente são representados por uma rede de componentes conectados em série, paralelo, malhado ou por uma combinação destas conexões. Se os componentes estiverem conectados simplesmente em série e/ou paralelo, o cálculo da confiabilidade se torna mais simples. Primeiro são usadas equações para agrupar componentes em paralelo, resultando em componentes conectados em série. Em seguida são utilizadas equações para agrupar esses componentes em série. Esses conceitos são revisados abaixo [BA83].

2.3.1 SISTEMA SÉRIE

Do ponto de vista da confiabilidade, um conjunto de componentes constitui um sistema série, se para o mesmo funcionar, todos os componentes devem, obrigatoriamente, estar em funcionamento. Como exemplo, adotam-se dois componentes A e B em série, como mostrado na Figura 2.3. Consideram-se as taxas de falha como sendo $\boldsymbol{\lambda_A}$ e $\boldsymbol{\lambda_B}$ e os tempos de reparo como $\boldsymbol{r_A}$ e $\boldsymbol{r_B}$, respectivamente.

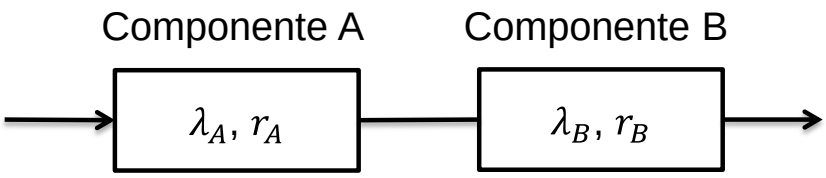


Figura 2.3 – Sistema com dois componentes conectados em série

A taxa de falha equivalente para este sistema $\boldsymbol{\lambda_S}$ é dada por:

$$\lambda_S = \lambda_A + \lambda_B \tag{2.1}$$

E o tempo médio de reparo equivalente $\mathbf{r_S}$:

$$\mathrm{r_S} = \frac{\lambda_A \mathrm{r_A} + \lambda_B \mathrm{r_B}}{\lambda_S} \tag{2.2}$$

Analogamente, pode-se deduzir que a taxa de falha e o tempo médio de reparo, para um sistema série de *n* componentes, são expressos, respectivamente, por:

$$\lambda_S = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \tag{2.3}$$

$$r_S = \frac{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i r_i}{\lambda_S} \tag{2.4}$$

Utilizando os conceitos de frequência e duração, a indisponibilidade (U_S) pode ser calculada como:

$$U_S = \lambda_S r_S \tag{2.5}$$

Consequentemente a disponibilidade (A_S) do Sistema será dada por:

$$A_S = 1 - \lambda_S r_S \tag{2.6}$$

2.3.2 SISTEMA PARALELO

Do ponto de vista da confiabilidade, um conjunto de componentes constitui um sistema paralelo, se para o mesmo funcionar, é necessário que apenas um dos componentes esteja em funcionamento. Considere-se agora o caso de um sistema contendo dois componentes A e B em paralelo, como mostrado na Figura 2.4.

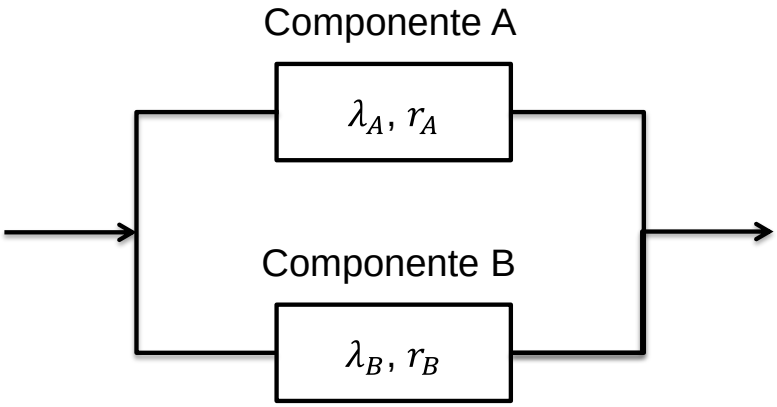


Figura 2.4 – Sistema com dois elementos ligados em paralelo

A taxa de falha equivalente para este sistema $\boldsymbol{\lambda_P}$ é dada por:

$$\lambda_P = \lambda_A \lambda_B (r_A + r_B) \tag{2.7}$$

E o tempo médio de reparo equivalente $\mathbf{r_P}$ é:

$$\mathrm{r}_P = \frac{\mathrm{r_A r_B}}{\mathrm{r}_A + r_B} \tag{2.8}$$

Utilizando os conceitos de frequência e duração, a indisponibilidade $\boldsymbol{U_P}$ pode ser calculada como:

$$U_P = \lambda_P r_P \tag{2.9}$$

Consequentemente, sua disponibilidade será dada por:

$$A_P = 1 - \lambda_P r_P \tag{2.10}$$

As equações para mais de dois componentes podem ser visualizadas em [BA92].

2.4 MÉTODO DOS CONJUNTOS MÍNIMOS DE CORTE

A grande maioria dos SED possui uma rede complexa, não sendo possível a aplicação imediata de técnicas relativas a sistemas série e/ou paralelo, para a avaliação de seus índices de confiabilidade.

Técnicas como probabilidade condicional, conjuntos mínimos de corte, diagrama de árvores, diagramas lógicos e outras podem ser implementadas para simplificar os SED. Estas metodologias modificam a topologia do sistema de tal forma a torná-lo um conjunto de componentes conectados em série e paralelo [BA92].

O método dos conjuntos mínimos de corte é uma técnica atrativa porque, dentre outros aspectos, permite a visualização dos modos de falha do sistema. Um conhecimento desta natureza possibilita a identificação de trechos críticos (i.e., mais passíveis a falhas), sendo possível, em nível de planejamento, atuar favoravelmente na melhoria da confiabilidade destas áreas, direcionando melhor os investimentos e reforços.

Definidos os conjuntos mínimos de corte do sistema, pode-se determinar o seu EEC. Conforme apresentado na Subseção 2.2.2, internamente a um EEC (ver Figura 2.2), os conjuntos mínimos são dispostos em série, porque a ocorrência de qualquer destas situações implica na indisponibilidade de energia no ponto de carga considerado. Em contrapartida, os elementos de cada conjunto são dispostos em paralelo, indicando que a falha sistêmica ocorre quando todos os componentes falham.

Mesmo com a estruturação do EEC a aplicação dos conceitos de circuito série ainda não pode ser efetuada. Isto ocorre porque um mesmo componente do sistema pode fazer parte de dois ou mais conjuntos mínimos de corte simultaneamente. Para solucionar o problema podem ser utilizados cálculos aproximados, tal como exposto em [BA92].

Na definição dos conjuntos mínimos de corte os trabalhos aumentam à medida que os sistemas se tornam maiores e mais complexos. Uma possível solução seria a definição prévia dos caminhos mínimos do sistema. Referências como [C98] e [S02] apresentam algoritmos genéricos para encontrar os caminhos mínimos.

Tendo sido definidos os caminhos mínimos do sistema, o conjunto mínimo de corte pode ser determinado tal como proposto em [BA92], [N96] e [C98]:

i) Construção de uma matriz C, onde as colunas representam os ramos do sistema e as linhas representam os caminhos mínimos definidos;

ii) Os elementos da matriz serão da forma:

- $C_{ij} = 1$ se o ramo j faz parte do caminho i;

- $C_{ij} = 0$ se o ramo j não faz parte do caminho i;

Considerando o sistema da Figura 2.1 e os dados contidos na Tabela 2.1, a matriz C para este sistema é da forma:

$$\begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} A & B & C & D & E \\ \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow \end{array} \\ C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array} \tag{2.11}$$

iii) Realiza-se uma inspeção individual em todas as colunas da matriz. O ramo cuja coluna apresentar todos os seus elementos iguais a 1 é denominado conjunto mínimo de corte de primeira ordem. Todos os correspondentes deste ramo também são definidos como conjunto mínimo de corte de primeira ordem;

iv) Os conjuntos de segunda ordem são determinados combinando-se, duas a duas, todas as colunas da matriz via álgebra Booleana (Operador “OU”). Se a coluna resultante da combinação de duas colunas possuir todos os elementos iguais a 1, os ramos correspondentes constituem um conjunto de corte, que somente será mínimo se não contiver nenhum componente que faça parte de conjuntos mínimos de ordem inferior. Desta forma, combinando-se os componentes destes ramos dois a dois, e eliminando-se aqueles componentes repetidos, tem-se conjuntos mínimos de corte de segunda ordem em relação aos componentes;

v) Para obter conjuntos de corte mínimo de ordem igual ou superior a terceira, faz-se o mesmo processo descrito no item anterior, o número de colunas a ser combinado deve ser igual à ordem desejada.

Durante a elaboração da lista de caminhos mínimos do sistema, caso seja detectado algum caminho normalmente aberto, este não será utilizado para a elaboração dos conjuntos mínimos de corte. Estes caminhos serão úteis e aplicados nas metodologias para cálculo dos índices de confiabilidade, porque servirão, em algumas situações, como caminhos alternativos de fornecimento de energia, minimizando os impactos sofridos em decorrência de alguma falha.

2.5 FATORES QUE INFLUENCIAM OS PARÂMETROS DE CONFIABILIDADE DOS COMPONENTES DO SISTEMA

Os dados de confiabilidade dos componentes pertencentes ao sistema formam um banco de dados necessário a qualquer estudo de confiabilidade. Dentre as informações mais importantes estão a taxa de falha e o tempo médio de reparo de cada elemento sistêmico [G06a].

Em relação à taxa de falha destes elementos, fatores externos, geralmente relacionados a questões ambientais, podem alterar estes dados. Isto se verifica porque com a ocorrência de alguns fenômenos e o número de falhas, em determinados trechos do sistema, pode aumentar.

A interrupção de consumidores numa determinada rede pode ocorrer devido a inúmeros fatores além das próprias falhas inerentes a cada equipamento. Animais, árvores, condições climáticas e erro humano estão entre as causas que podem acarretar em descontinuidade na distribuição de energia. Segundo [B02a], as árvores, a ocorrência de descargas atmosféricas e a presença de animais são, respectivamente, as causas que mais acarretam o aumento na ocorrência de falhas nos SED's.

A presença de árvores em grande quantidade em uma determinada área faz com que esta região seja mais susceptível a ocorrência de defeitos. A queda de um tronco, ou mesmo de árvore, pode acarretar em danos mecânicos nos ramais. Faltas podem ocorrer quando ramos destas árvores crescem e aumentam os espaçamentos entre condutores, ou mesmo quando o vento arremessa estes ramos sobre os cabos alimentadores, assim como outras situações podem acarretar também em defeitos.

Em condições climáticas normais, as falhas dos equipamentos presentes no sistema são, em geral, eventos independentes, de tal forma que a falha de um determinado componente ocorre independente da operação de qualquer outro dispositivo. Desta maneira, falhas simultâneas em equipamentos diferentes são eventos raros. Na presença de condições climáticas adversas, como por exemplo, ventos e descargas atmosféricas em demasia, muitos equipamentos podem falhar ao mesmo tempo, podendo afetar a distribuição de energia de um número maior de consumidores.

Todos estes fatores devem ser levados em consideração quando se deseja modelar o sistema e, portanto, modelar um banco de dados com taxas de falhas e tempos de reparo, compatíveis com cada equipamento e região na qual este se localiza.

Em regiões mais densamente ocupadas por árvores, os equipamentos, especialmente os condutores, devem possuir uma taxa de falha maior do que aqueles localizados em região sem grande presença vegetativa. Similarmente, em estudos realizados em períodos sazonais onde ocorrem condições climáticas adversas, deve-se ter em mente que o número de falhas dos equipamentos deve aumentar. Estas condições práticas de operação do sistema devem ser introduzidas nos estudos de confiabilidade, com o intuito de aproximar as simulações da realidade observada.

2.6 CONCLUSÕES

O SED fornece energia elétrica a todos seus consumidores, sejam eles residenciais ou industriais, e esta tarefa deve ser feita de forma a atingir determinados limites de confiabilidade pré-estabelecidos. Este capítulo discorreu sobre os principais temas relativos à confiabilidade dos sistemas de distribuição.

Foram apresentadas as principais definições empregadas na área de confiabilidade de sistemas elétricos, dando suporte à compreensão das metodologias e avaliações topológicas apresentadas neste capítulo. No tocante à topologia do sistema, este pode ser representado por uma rede de componentes conectados em série, paralelo, malhado ou por uma combinação destas conexões. Foram apresentadas as topologias série e paralelo, e apresentada a técnica de conjuntos mínimos de corte, cuja metodologia refere-se à modificação do sistema de forma a torná-lo um conjunto de componentes série e paralelo, permitindo a visualização dos modos de falha e identificação dos trechos críticos do sistema.

Foram apresentados os principais índices de confiabilidade para quantificar o desempenho de um SED, bem como os indicadores de desempenho industriais, suas definições e contribuição para avaliação nas indústrias. Os índices mais relevantes abordados nesta dissertação serão a Indisponibilidade (U) e Produção média não Suprida (PMNS).

As técnicas citadas neste capítulo servirão como base para todos os métodos de cálculo da confiabilidade utilizados nesta dissertação. O presente capítulo foi encerrado com algumas considerações referentes a fatores que influenciam os parâmetros de confiabilidade dos componentes do sistema. Como consequência, o número de falhas em determinados trechos do sistema pode aumentar devido a fatores externos, geralmente relacionados a fenômenos ambientais.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA PROPOSTA

3.1 INTRODUÇÃO

A avaliação do desempenho de um Sistema Elétrico Industrial (SEI) é feita através do cálculo de índices de desempenho que quantificam e qualificam o sistema em termos de confiabilidade. Desta forma é possível descrever a operação do SEI, identificar os seus pontos críticos e, assim, propor melhorias e modificações de forma a incrementar a sua confiabilidade.

As ferramentas empregadas neste trabalho se baseiam na topologia e nos dados estocásticos dos componentes do SEI. A modelagem adequada do sistema depende do emprego de dados que caracterizam adequadamente cada um de seus componentes. Portanto, o tratamento dos dados representa um esforço necessário e importante, inclusive para validação das técnicas empregadas no cálculo dos índices de confiabilidade.

Informações como taxas de falha, tempos de reparo e tempos de substituição de transformadores, disjuntores, bem como outros componentes do SEI, devem formar um banco de dados compatível com o sistema em estudo.

Muitas indústrias possuem um histórico de operação do sistema, mas, em geral, não possuem as informações detalhadas de cada um dos componentes. Estas informações podem ser obtidas utilizando-se o banco de dados dos indicadores de confiabilidade sistêmicos, porém, caso os mesmos não estejam disponíveis, figura-

se a necessidade de buscar estes valores em fontes alternativas. Uma possível solução seria o emprego de dados relativos a outras indústrias de mesmo porte e segmento. Mesmo assim, pode ser necessária ainda a adequação destes dados para que representem com maior verossimilhança a operação do sistema em estudo.

Outro fator interessante a ser discutido é que, mesmo que as indústrias possuam este banco de dados dos elementos de seu sistema, é necessário que estes valores sejam atualizados. Fatores ambientais tais como condições climáticas adversas e a própria vegetação local, podem alterar a taxa de falha e tempo de reparo de determinados componentes, principalmente redes aéreas de distribuição. Falhas ocorrem com maior frequência, por exemplo, em áreas onde há maior concentração de árvores em relação às regiões com menor quantidade, ou até mesmo áreas com maior índice ceráunico que outras regiões. Este índice indica o número de dias de trovoada numa determinada região por ano. Desta maneira pode não ser conveniente assumir os mesmos parâmetros estocásticos para todos os equipamentos. Tal como citado em [B02], pode-se utilizar uma proporção para adequar as taxas de falhas dos equipamentos de acordo com sua exposição aos fatores climáticos.

Em resumo, é imprescindível o emprego de dados coerentes, pois, somente desta forma, os índices de confiabilidade estimados irão corresponder ao histórico operacional do sistema, garantindo assim, um modelo de avaliação correto e resultados precisos.

Neste capítulo são apresentadas as etapas constituintes da metodologia proposta para análise da confiabilidade de um SEI. Em tais etapas são consideradas a identificação do sistema, o processo de levantamento de dados e seu tratamento, a elaboração de um EEC para avaliação da confiabilidade e posterior identificação de pontos frágeis e propostas de melhorias para o SEI. Ao final deste capítulo é apresentado um fluxograma que sintetiza todas as etapas desta metodologia.

3.2 ETAPA 1 - IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA

Segundo [D87], o termo sistema designa o “conjunto de elementos materiais ou ideais, entre os quais se possam encontrar ou definir alguma relação”. Nos sistemas industriais, esta relação é estabelecida com o objetivo de se atender a uma ou mais funções características do sistema. As funções se confundem, então, com a própria finalidade da existência dos sistemas.

A identificação dos sistemas tem o objetivo de caracterizar as funções desempenhadas. Para esta etapa não existem normas rígidas e aplicáveis a todos os casos. Entretanto, a prática revela algumas regras empíricas inerentes a uma instalação, de forma a facilitar as etapas seguintes da análise. Evitar a duplicação de componentes garante que cada componente pertença exatamente a um único sistema, e, portanto só será analisado uma única vez. A definição de fronteiras exatas entre os sistemas, além de delimitarem os sistemas, servem para identificar as interfaces entre eles, as quais estão normalmente associadas às suas funções principais.

A identificação deve produzir uma documentação que registre as informações sobre todo o sistema em estudo. A fim de documentar esta etapa e o funcionamento dos sistemas, pode-se utilizar diversas ferramentas, dentre elas encontram-se, Diagramas Esquemáticos, Diagrama de Blocos, Descrição de Fronteiras.

3.3 ETAPA 2 - LEVANTAMENTO DE DADOS

Neste tópico será apresentado um método estruturado de levantamento de dados para a análise estatística e posteriores elaborações de propostas de melhorias para o SEI a partir de informações oriundas de um banco de dados coorporativo. Para a composição dos dados para estudos, foram adotadas as etapas apresentadas na Figura 3.1, análogas à metodologia da Manutenção Centrada na Confiabilidade [S05a].

Com este procedimento obtêm-se as informações descritivas sobre o funcionamento, projeto e contexto operacional do sistema objeto da análise,

associando-o às funções desempenhadas, definindo-se os limites do sistema a partir de um registro de eventos relacionados a cada componente.

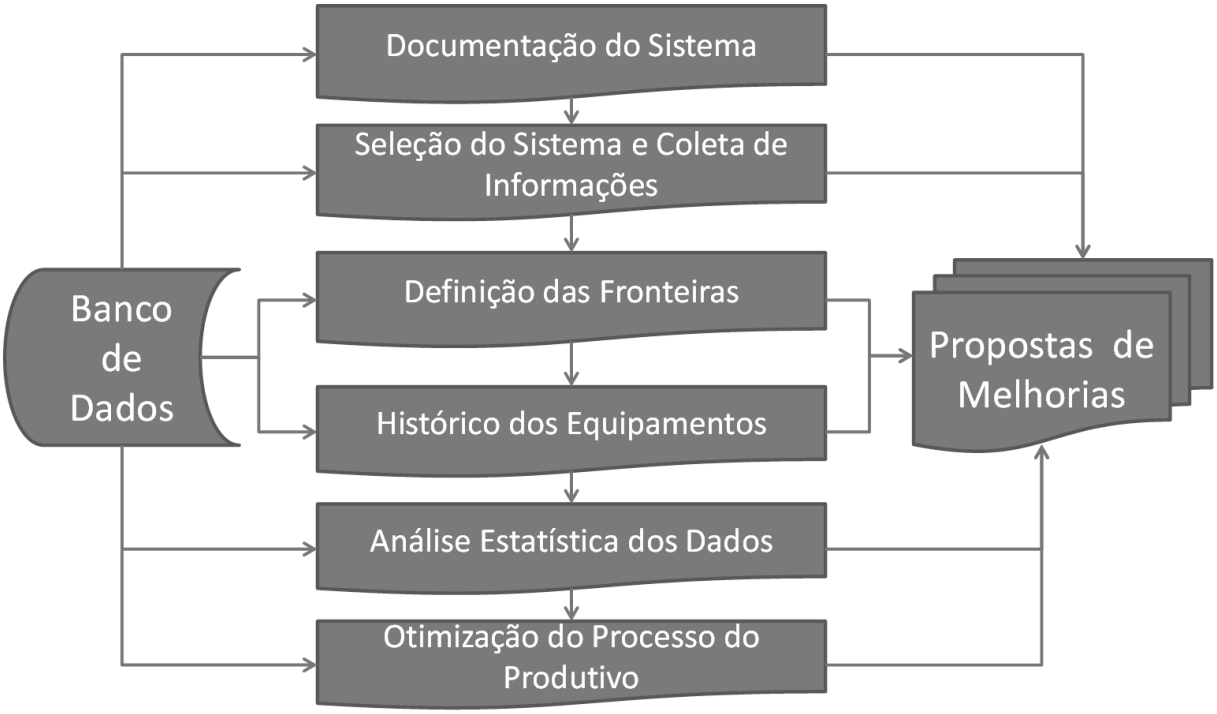


Figura 3.1 – Levantamento de dados

Conforme pode ser observado, a primeira etapa objetiva identificar o sistema ou processo que será submetido à análise. São realizadas análises da descrição textual do sistema, definições do contexto operacional, caracterização das fronteiras e interfaces entre os subsistemas. É identificado também o diagrama funcional e lógico funcional do sistema. Nesta etapa, utiliza-se de informações descritivas sobre o funcionamento, projeto e contexto operacional do sistema objeto da análise.

A Seleção do Sistema e Coleta de Informações destina-se à identificação precisa de cada sistema analisado, associando-o às funções desempenhadas. Após esta etapa é realizada a definição das Fronteiras dos sistemas, onde é feita a identificação precisa dos limites que separam cada sistema da instalação, através da documentação dos componentes e subsistemas que compõem cada fronteira, e a interface de comunicação com os sistemas vizinhos. Desta forma, é possível impedir que o mesmo componente pertença a mais de um sistema, evitando a duplicidade da análise.

O Histórico do Equipamento destina-se ao registro temporal de todos os eventos relacionados ao sistema, viabilizando a análise estatística e parametrização dos modelos de otimização. De posse deste histórico é feita a Análise Estatística dos Dados, a qual permite o cálculo dos parâmetros para os equipamentos em estudo, a fim de identificar as causas prováveis de eventos passados, que remete a provável ocorrência de eventos futuros. Após esta análise, é possível realizar a otimização do processo produtivo, definindo os melhores caminhos para se obter o máximo do sistema em estudo, propondo, desta forma, melhorias e modificações para o mesmo.

A partir das definições e dados levantados conforme apresentado na Figura 3.1, acrescidos de informações obtidas em campo, foi possível estimar parâmetros para cada um dos equipamentos em estudo, e.g. taxas de falha e tempos médios de reparo. Estes parâmetros estimados permitem a representação adequada dos processos de funcionamento e de avaria dos equipamentos e, consequentemente, a estimação da frequência de encontro e da duração média de residência dos estados do SEI, possibilitando a análise de seu desempenho.

3.4 ETAPA 3 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO DE DADOS

Nesta etapa de tratamento estatístico de dados é realizada uma análise exploratória dos dados, onde são realizadas as primeiras manipulações do banco a fim de obter conclusões a partir dos dados observados. São realizadas distribuições de frequência acompanhadas de algumas medidas descritivas. Esta fase pode ser muito útil para identificação de elementos desajustados e erros não identificados até então. É prudente a comparação com resultados de outras referências confiáveis a fim de avaliar a qualidade do levantamento de dados efetuado.

Este tratamento estatístico de dados determina a taxa de falhas e o tempo médio entre falhas de equipamentos e produtos. Normalmente, este procedimento depende muito da fonte dos dados, que podem ser coletados do campo ou através de ensaios.

A partir dos dados coletados conforme determinado na etapa anterior, os mesmos são tratados, de forma a se obter uma planilha de dados de equipamentos onde são

apresentados os dados estocásticos dos equipamentos na forma de tabelas contendo as taxas de falhas, tempo médio de reparo, indisponibilidade, dentre outros que se fizerem necessários.

3.5 ETAPA 4 - ELABORAÇÃO DO ESQUEMA EQUIVALENTE DE CONFIABILIDADE

A avaliação do desempenho de um SEI é feita através de índices que quantificam e qualificam o sistema em termos de confiabilidade. Para esta avaliação, faz-se necessário, após a correta identificação e caracterização do sistema em estudo, levantamentos de dados e tratamento estatísticos dos mesmos, a definição dos parâmetros pertinentes para a análise e o modelo adequado para a tomada de decisão.

A confiabilidade do sistema depende seriamente de métodos probabilísticos. Para tal é imprescindível a descrição adequada do sistema e a definição adequada de um modelo de confiabilidade. Existem diferentes técnicas e métodos desenvolvidos ao longo do tempo que podem ser utilizados para elaboração deste modelo. Para esta definição, podem ser utilizadas uma ou mais técnicas, tais como: Esquemas Equivalentes de Confiabilidade (EEC), Árvores de Faltas, processos Markovianos, etc.. Existem outras técnicas, porém estas são as mais comuns.

Para o presente trabalho será abordado a utilização de um EEC, que, conforme citado anteriormente, trata-se da representação dos conjuntos mínimos de corte de um dado sistema em análise. A sua representação é feita através de Diagramas de Blocos de Confiabilidade (DBC) [F98] que consistem na representação dos componentes do sistema na forma de blocos que operam independentemente com respeito às falhas e a confiabilidade do sistema.

A interpretação do DBC está associada com a ideia de continuidade do sistema. Se o elemento do sistema está operável, então o bloco correspondente do DBC é assumido ser capaz de transmitir energia para os blocos aos quais se liga. Se um elemento está não operável, a energia não passa por ele. Se a energia consegue passar por todo DBC, o sistema é considerado como operável.

3.6 ETAPA 5 - AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE

Até o presente momento, foi abordada apenas a taxa de falha de apenas um componente. Neste tópico será abordado não mais a confiabilidade de um único elemento, mas a de um grupo formado por um conjunto funcional conforme definido por seu EEC apresentado na Seção 3.5. Este conjunto será formado pela interdependência de vários elementos.

Para esta análise, algumas considerações estatísticas deverão ser utilizadas e definidas conforme usualmente encontradas na prática:

- ✓ Os componentes do sistema são estatisticamente independentes com respeito a confiabilidade, isto é, falhas em diferentes componentes do sistema surgem independentemente em cada um deles;
- ✓ Os dados de entrada (estatísticas), que descrevem a confiabilidade dos componentes do sistema (taxa de falha das unidades elementares) correspondem às condições operacionais reais de uso (carga, temperatura, vibração, etc.).

Serão adotadas metodologias analíticas para o cálculo da confiabilidade de sistemas em série, em paralelo e misto. No sistema série a falha de qualquer um dos componentes provoca a falha de todo o sistema, ficando completamente inoperante. O funcionamento deste sistema dependerá da plena capacidade de cada componente e sua confiabilidade varia em função da confiabilidade e número de componentes.

O sistema paralelo tem seus componentes dispostos de tal forma que a falha do sistema ocorrerá apenas quando todos os componentes falharem. Neste sistema, a confiabilidade atingirá altos valores.

O sistema misto apresenta característica de ambos os sistemas série e paralelo.

Para estas avaliações serão utilizadas as mesmas equações apresentadas na seção 2.2 que trata sobre a topologia dos sistemas de distribuição.

3.7 ETAPA 6 - IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS FRÁGEIS

Realizadas as etapas anteriores, o sistema foi identificado, os dados referentes ao mesmo foram levantados e tratados estatisticamente, o EEC foi obtido, bem como sua análise de confiabilidade foi realizada. De posse de toda esta lógica estruturada é possível determinar os pontos vulneráveis do SEI em estudo.

Para a identificação destes pontos frágeis, faz-se necessária a avaliação dos modos dos dados estatísticos, de forma a identificar os componentes do sistema que mais contribuem para uma baixa confiabilidade do sistema.

É necessário, portanto, a avaliação individual de dados como taxa de falha, tempo médio de reparo, indisponibilidade, horas de interrupção.

3.8 ETAPA 7 - PROPOSTA DE MELHORIAS DO PROCESSO PRODUTIVO

Nesta etapa são feitas análises dos pontos frágeis do sistema identificados na etapa anterior e propostas melhorias nestes pontos de forma a incrementar a confiabilidade de todo o SEI. A troca de equipamentos, as alterações nas estratégias de manutenção e a avaliação de níveis de estoques de equipamentos reservas são ações que atuam diretamente na confiabilidade do sistema e devem ser analisadas como alternativas para aperfeiçoar o processo produtivo.

A troca de equipamentos em final de vida útil é um ponto que deve ser considerado, pois nesta etapa da vida do componente há um aumento na taxa de falhas decorrentes do desgaste natural, deterioração e envelhecimento do item que será tanto maior quanto mais passar o tempo.

A substituição destes equipamentos em final de vida útil, ou não, por outros que apresentem melhor conjuntos de dados estocásticos, isto é, com taxa de falha e/ou tempo de reparo menores, é uma proposta que deve ser avaliada uma vez que poderá incrementar a confiabilidade do SEI em estudo.

Outro ponto que deve ser analisado diz respeito à manutenção que, para ser estratégica precisa estar voltada para os resultados empresariais da organização. É preciso, sobretudo, deixar de ser apenas eficiente para se tornar eficaz; ou seja, não basta apenas reparar o equipamento ou instalação tão rápido quanto possível, mas é preciso, principalmente, manter a função do equipamento disponível para a operação reduzindo a probabilidade de uma parada de produção não planejada.

Alterações na estratégia de manutenção implicam em ações que levam em consideração sua aplicabilidade e sua efetividade em prevenir ou corrigir falhas. Por efetividade, entende-se a economicidade e viabilidade de sua aplicação, considerando os recursos disponíveis e necessários, os retornos esperados em relação a outras alternativas. Esta estratégia propõe a seleção de atividades de manutenção objetivando identificar, corrigir e prevenir falhas significativas do sistema ou, caso contrário, diminuir seus efeitos e consequências a níveis aceitáveis. Para que esta estratégia seja efetiva contra uma determinada falha ela deve atender simultaneamente aos seguintes critérios de efetividade: ser aplicável tecnicamente; ser viável com os resultados disponíveis; produzir os resultados esperados; e ser executável em um intervalo razoável.

Outro aspecto que pode ser avaliado para melhoria do SEI é a otimização da reserva técnica de seus componentes cuja determinação é dada pelo nível de confiabilidade requerido e pelos custos agregados à operação do sistema. Estes custos podem ser compostos por investimentos na aquisição de equipamentos reservas, pelo custo de armazenamento e manutenção destes equipamentos e pela perda de faturamento decorrente de interrupções do processo produtivo.

Equipamentos como transformadores e disjuntores apresentam taxas de falha que variam ao longo de sua vida operativa. Na região de vida útil [BA94], a taxa de falha tende a ser constante, o que implica em tempos de funcionamento exponencialmente distribuídos. No que se refere aos transformadores de subestações unitárias industriais, as falhas podem ser de dois tipos: (i) reparáveis no campo e (ii) não-reparáveis no campo (catastróficas). Uma ação de reparo leva normalmente de 1 a 10 dias para a sua conclusão, sendo comparável ao tempo de instalação de um equipamento reserva (de 1 a 5 dias), porém muito menor que o tempo necessário para aquisição de um equipamento novo, o qual pode levar de 6 a

18 meses. Assim, pode-se observar que a utilização do estoque está ligada às falhas do tipo (ii).

A distribuição de Poisson permite calcular a probabilidade de um evento ocorrer um determinado número de vezes em um intervalo de tempo definido. Se os eventos são distribuídos de acordo com Poisson, eles ocorrem a taxas médias constantes, com somente um de dois resultados possíveis [L06]. A Equação 3.1 a seguir apresenta a probabilidade de um equipamento com taxa de falha *λ* falhar *x* vezes em um intervalo de tempo *t*:

$$P_x(t) = \frac{e^{-\lambda t}(\lambda t)^x}{x!} \tag{3.1}$$

Esta distribuição de probabilidades pode ser utilizada no cálculo de confiabilidade de sistemas do tipo *standby*, contendo componentes reservas, conforme apresentado na Figura 3.2.

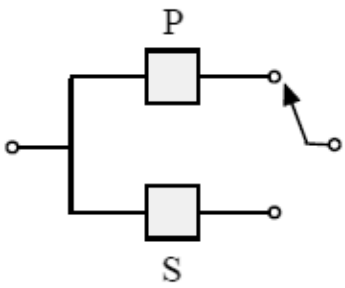


Figura 3.2 – Sistema com 1 componente principal e 1 componente reserva

Neste modelo, admite-se que após a falha do componente principal (P), o componente reserva (S) entra em operação imediatamente. A confiabilidade de um sistema para um instante *t* futuro corresponde à probabilidade dele sobreviver além de *t*. Para se calcular a confiabilidade $R(t)$, deve-se somar as probabilidades dos eventos em que o sistema funciona. Assim, considerando o sistema da Figura 3.2, tem-se

$$R(t) = P_0(t) + P_1(t) \tag{3.2}$$

Onde $P_0(t)$ e $P_1(t)$ representam, respectivamente, a probabilidade de ocorrer 0 e 1 falha no período de tempo *t*. Combinando as duas equações anteriores, tem-se

$$R(t) = e^{-\lambda t}(1 + \lambda t) \tag{3.3}$$

Generalizando para *N* transformadores principais e "*n*" reservas, vem

$$R(t) = e^{-N\lambda t} \sum_{k=0}^{n} \frac{(N\lambda t)^k}{k!} \tag{3.4}$$

Observe que a confiabilidade aumenta com o número de reservas, mas a cada equipamento adicionado ao estoque, o acréscimo em $R(t)$ é menor devido ao rápido crescimento do denominador de cada parcela.

Note ainda que tal comportamento não é observado com relação ao custo de investimento, reforçando a necessidade de um dimensionamento adequado do número de componentes reservas.

Em sistemas com estoques de reservas, a caracterização *standby* é possível desde que a substituição do componente principal (que sofreu a avaria) por um reserva seja feita em um tempo relativamente pequeno se comparado ao tempo médio de funcionamento, o que é particularmente verdadeiro no caso dos transformadores de subestações unitárias.

3.9 FLUXOGRAMA PROPOSTO

Nesta seção é apresentado o fluxograma da metodologia proposta por meio da Figura 3.3, cujo conteúdo retrata todas as sete etapas para análise e melhoria da confiabilidade de SEI.

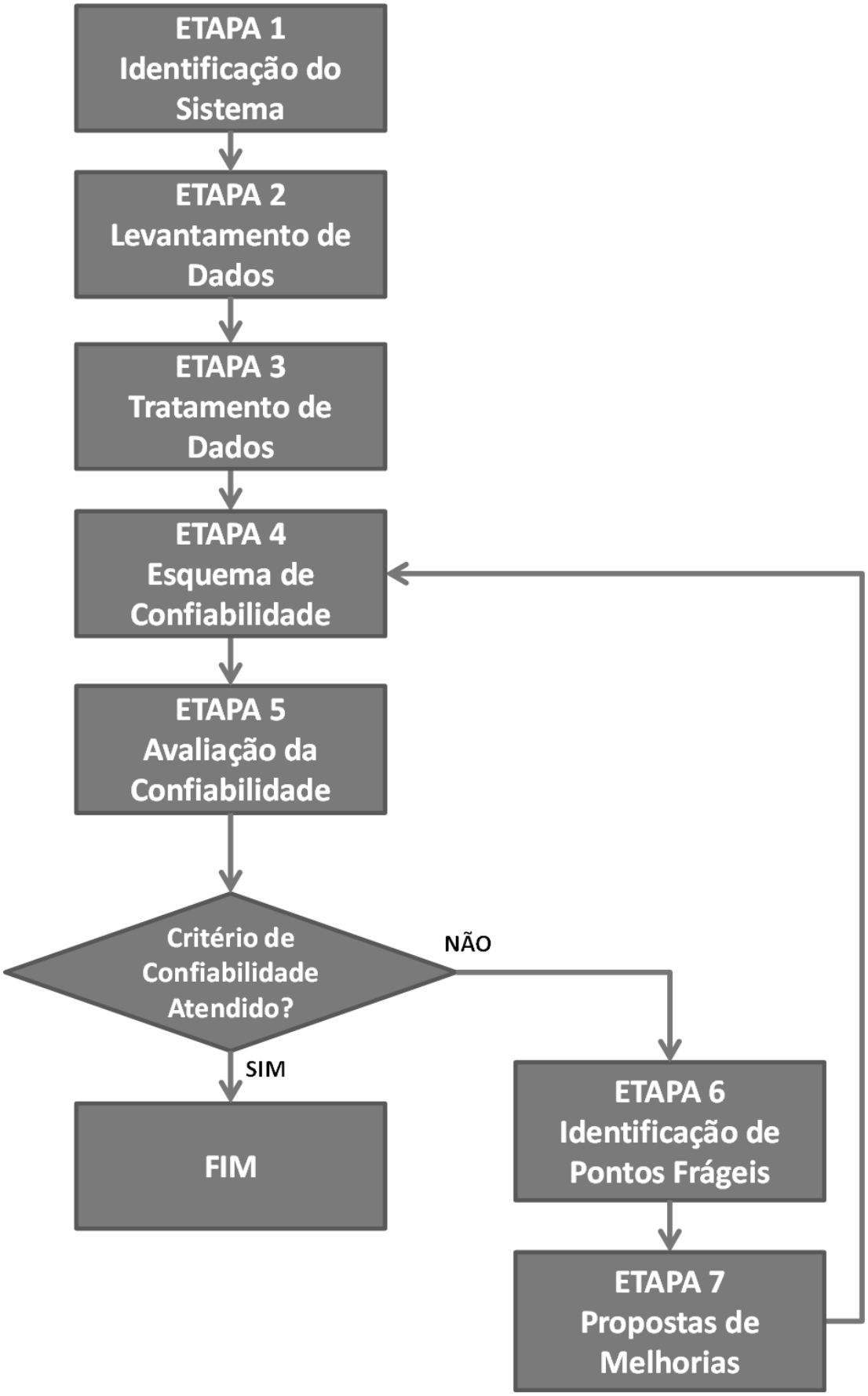


Figura 3.3 – Fluxograma proposto

3.10 CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou uma metodologia para avaliação do desempenho de um SEI através do cálculo de índices de desempenho cuja finalidade é quantificar e qualificar o sistema em termos de confiabilidade. Para tal, foram empregadas ferramentas que se baseiam na topologia e confiabilidade dos componentes, bem como sua modelagem adequada através de dados confiáveis extraídos de um histórico confiável.

A primeira etapa desta metodologia consiste na identificação do sistema, de forma a caracterizar as funções desempenhadas e produzir uma documentação que registre as informações sobre todo o sistema em estudo.

A segunda etapa representa uma forma estruturada para levantamento de dados a fim de obter informações descritivas sobre o funcionamento, projeto e contexto operacional do sistema objeto da análise.

Na terceira etapa é feito o tratamento estatístico dos dados, sendo realizadas algumas manipulações no banco de dados e avaliação da qualidade do levantamento de dados. Nesta fase são definidos os dados estocásticos dos equipamentos.

Na quarta etapa é obtido o modelo de confiabilidade através da utilização de um Esquema Equivalente de Confiabilidade, EEC, que trata da representação dos conjuntos mínimos de corte para o sistema em análise. Posteriormente, na Etapa 5, é realizada a avaliação da confiabilidade, através de metodologias analíticas.

Na Etapa 6 é feita a identificação dos pontos frágeis. Finalmente, na Etapa 7 são propostas ações como substituição de equipamentos desgastados ou que apresentam baixo desempenho, alterações nas estratégias de manutenção e avaliação de níveis de estoques de equipamentos reservas. Estas ações afetam positivamente a confiabilidade do sistema em estudo, reduzindo as interrupções do processo produtivo e, consequentemente, aumentando o faturamento da empresa.

Para finalizar o capítulo foi apresentado um fluxograma retratando as 7 etapas propostas para análise de confiabilidade de um SEI.

CAPÍTULO 4

APLICAÇÕES

4.1 INTRODUÇÃO

As informações necessárias para o desenvolvimento do presente trabalho foram obtidas por meio de um levantamento detalhado de dados de manutenção e operação dos equipamentos, os quais foram retirados do sistema informatizado da indústria, de forma a garantir sua rastreabilidade e procedência. A partir do histórico de operação referente a um período de 2 anos, obtiveram-se dados de disponibilidade, utilização, confiabilidade, horas de manutenção preventiva e corretiva, e números de interrupção preventiva e corretiva de todos os equipamentos envolvidos. Porém existem componentes que, mesmo em operação a mais de 2 anos, não apresentam histórico de falhas, sendo, portanto, considerado para estes os dados típicos segundo o IEEE [PSRS97].

Nas próximas seções a metodologia proposta é aplicada a um SEI com o objetivo de verificar o comportamento de todas as suas etapas.

4.2 IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA

A etapa de identificação tem como principal objetivo caracterizar o SEI, definindo fronteiras entre os sistemas e suas interfaces associadas às suas principais funções. Neste trabalho foi utilizada uma fração de um complexo SEI de uma mineração,

constituído para atender na totalidade as necessidades produtivas da área da mina. Na Figura 4.1 é apresentado o digrama unifilar deste sistema, sendo possível notar a característica de radialidade com recurso.

Este sistema se inicia na alimentação de entrada feita por uma linha de transmissão de 138 kV proveniente da concessionária até a subestação principal da mineração. Nesta subestação é feito o rebaixamento da tensão para o nível de 13,8 kV através da utilização de dois transformadores de grande porte de 138/13,8 kV – 45 MVA. No nível de tensão de 13,8 kV é feita a distribuição de energia através de redes aéreas de distribuição interna até a chegada nas subestações unitárias.

Estes equipamentos são responsáveis por fazer o abaixamento do nível de tensão de distribuição interna para o nível de operação das escavadeiras. Desta forma, é feito o rebaixamento de 13,8 kV para 7,2 kV, sendo este último, o nível de tensão das escavadeiras elétricas. Através de uma rede aérea convencional e cabo de força portátil de alta tensão para trabalho pesado, a ser utilizado em circuitos que não ultrapassem determinado limite de tensão, é feita a alimentação das escavadeiras.

Estas escavadeiras, que se encontram no extremo do sistema, são os principais equipamentos responsáveis pela movimentação esperada de minério do SEI. Na Figura 4.1, são representadas pela simbologia de motores elétricos e codificadas com “EX”. Para cada Ponto de Produção (PP), a movimentação esperada de minério é dada em função de sua taxa de produtividade e da capacidade de produção da respectiva escavadeira. Para modelar a indisponibilidade de uma escavadeira é utilizado o seu fator de utilização, o qual considera, além da falha do equipamento, o impacto de aspectos não modelados nesta dissertação, tais como, troca de operadores, condições climáticas adversas, restrições operacionais, etc.

4.3 LEVANTAMENTO E TRATAMENTO DE DADOS

Esta etapa é utilizada para obtenção de informações descritivas sobre o funcionamento, projeto e contexto operacional do SEI em análise, associando-o às funções desempenhadas, definindo-se os limites do sistema a partir de registros e históricos da indústria relacionados a cada componente.

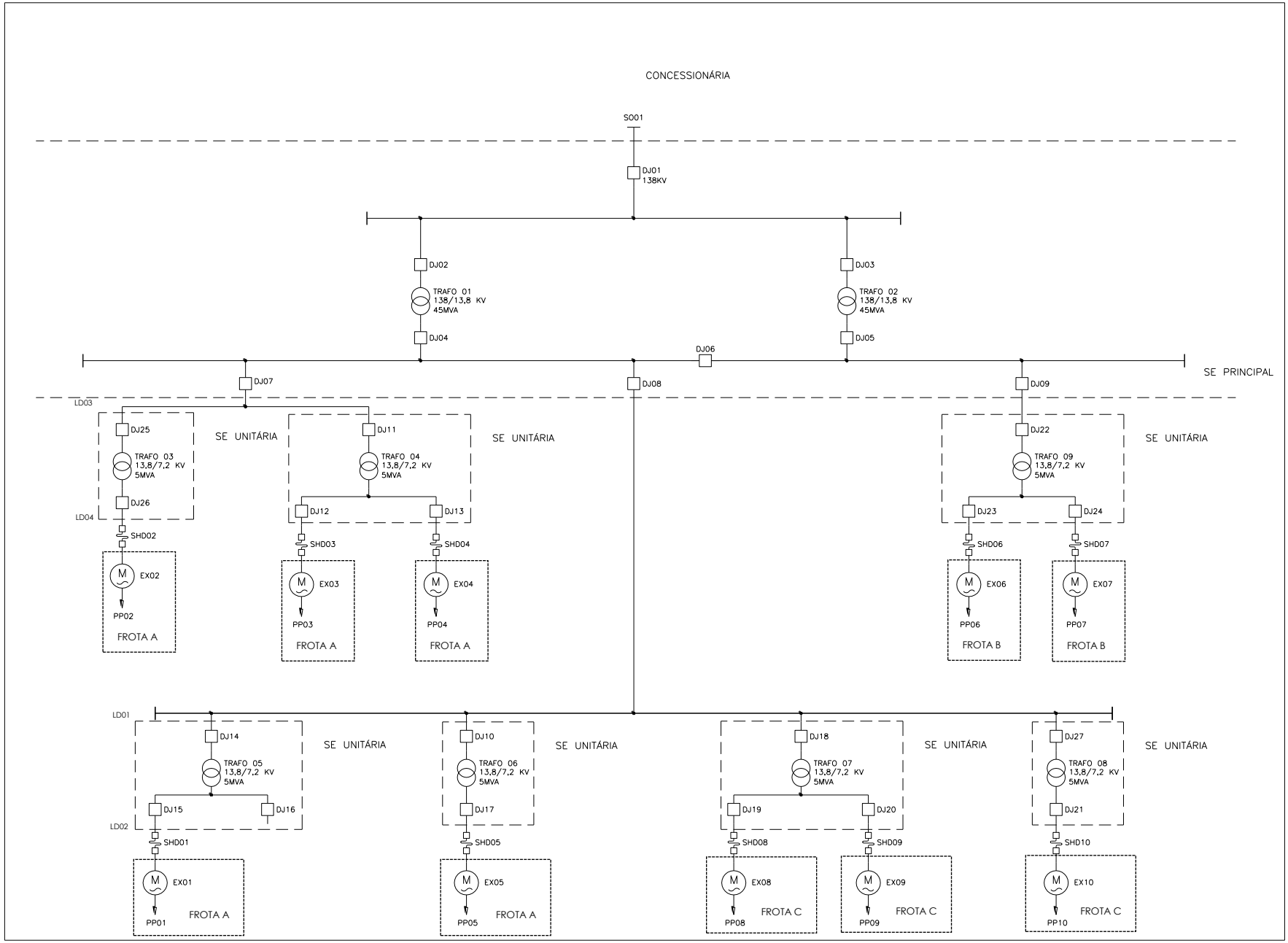


Figura 4.1 – Diagrama unifilar do SEI de uma mineração

A mineração está dividida em várias áreas e cada área com seus Pontos de Produção. Na área da mina existem 10 PPs, porém neste trabalho serão abordados apenas 5 PPs, formados por equipamentos com características construtivas e taxas de produtividade semelhantes. As escavadeiras, principais equipamentos do processo produtivo da mineração, são agrupadas em 3 frotas distintas, classificadas conforme suas características construtivas e princípio de acionamentos. Para este estudo, foram utilizadas as escavadeiras da Frota A, por se tratarem de equipamentos mais novos e com maior taxa de produtividade. Porém, nada impede que este tipo de estudo seja ampliado e aplicado para os outros PPs inseridos na mineração.

Durante um período de dois anos foi realizado um intenso levantamento de informações obtidas em campo a fim de obter dados representativos do sistema apresentado na Figura 4.1. A Tabela 4.1apresenta os dados anuais de produção e de disponibilidade das escavadeiras pertencentes à Frota A.

Tabela 4.1 – Levantamento de dados de produção da Frota A

Equipamento	Produção [t]	Horas Efetivas [h]	Taxa Produtividade [t/h]	Disponibilidade Verificada [%]
EX01	5.863.557,67	2.782,77	2107,12	89,25
EX02	6.842.436,17	2.807,42	2.437,27	82,15
EX03	6.252.024,67	3.179,83	1.966,15	90,05
EX04	5.040.461,50	2.643,13	1.907,00	73,05
EX05	3.258.980,00	1.410,27	2.310,90	83,00
GLOBAL	**27.257.460,01**	**13.231,87**	**2059,98**	**83,50**

Os dados apresentados na Tabela 4.1 fornecem, para a Frota A: (i) os dados de produção, em toneladas, acumulados durante o período de um ano; (ii) as horas efetivas dos equipamentos, isto é, o número de horas de operação nas quais a escavadeira movimentou material; (iii) a taxa de produtividade do equipamento, a qual é dada pela relação entre a produção e o total de horas efetivas; e, (iv) a disponibilidade das escavadeiras que representa o percentual do tempo em que o equipamento esteve sob a responsabilidade da operação.

Após o levantamento dos dados de operação e produção dos componentes elétricos constituintes do sistema de alimentação do PP01, isto é, tempos de funcionamento, tempos de reparo e eventos de falha, foi possível obter os parâmetros estocásticos dos equipamentos. Por meio de um tratamento estatístico de dados chegou-se ao tempo médio de reparo e a taxa de falha, através, respectivamente, da média aritmética das interrupções no processo produtivo e pela relação entre o número de eventos de interrupção dividido pelo tempo de exposição à falha, i.e., tempo de operação [BA92]. Estes dados estão dispostos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Dados característicos dos equipamentos

Equipamento	Código	Taxa de Falha (λ) [falhas/ano]	Tempo Médio de Reparo (r) [h]	Indisponibilidade (λ×r) [h/ano]
DISJUNTOR DE ENTRADA 138 kV*	DJ01 / DJ02 / DJ03	0,033	10,00	0,333
TRANSFORMADOR 138/13,8 kV - 45 MVA*	TR01	0,363	11,22	4,074
DISJUNTOR DE ENTRADA BARRAMENTO 13,8 kV	DJ04 / DR05 / DJ06	1,000	5,000	5,000
DISJUNTOR DE SAÍDA BARRAMENTO 13,8 kV	DJ08	1,500	5,000	7,500
RDA - 13,8 kV	LD01	1,000	3,000	3,000
DISJUNTOR DE ENTRADA SE UNTÁRIA 13,8 kV	DJ14	1,500	5,000	7,500
TRANSFORMADOR 13,8 / 7,2 KV - 5 MVA	TR05	0,470	20,00	9,400
DISJUNTOR DE SAÍDA SE UNITÁRIA 7,2 kV	DJ15	2,000	5,000	10,00
RDA - 7,2 kV	LD02	1,000	3,000	3,000
CABO MÓVEL	SHD01	4,000	3,000	12,00

*Parâmetros estocásticos extraídos de [I97]

Vale ressaltar que as taxas de falhas dos disjuntores referem-se a aberturas indevidas e atuação devido a falhas não identificadas de equipamentos.

Após o levantamento dos parâmetros estocásticos do SEI, apresentados na Tabela 4.2, verifica-se que não foi possível obter tais parâmetros para a escavadeira e para o fornecimento de energia da concessionária.

Os parâmetros estocásticos para as escavadeiras não foram apresentados, pois para tal, faz-se necessário uma análise detalhada, uma vez que se trata de um complexo equipamento eletromecânico dependente de variáveis exógenas ao SEI, tais como estratégia de manutenção baseadas em peças de reposição de estoque, equipes treinadas, recursos e equipamentos especiais, dentre outros. Para avaliação da confiabilidade dos Pontos de Produção foi adotado o valor de disponibilidade verificada real para a escavadeira conforme apresentado na Tabela 4.1.

Em relação ao fornecimento de energia, optou-se por adotar os parâmetros estabelecidos em contrato firmado entre a empresa de mineração e a concessionária. Tais parâmetros são reproduzidos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Parâmetros da concessionária

	Código	Disponibilidade [%]	Indisponibilidade	
			[%]	[h/ano]
FORNECIMENTO DE ENERGIA	SO01	98,35	1,65	144,54

4.4 EEC E AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE

Após o levantamento e o tratamento de dados dos equipamentos do SEI em estudo, faz-se necessário a avaliação de desempenho do mesmo através da utilização de parâmetros e modelos adequados que auxiliem na tomada e decisão.

Como a avaliação da confiabilidade do SEI depende de seu modelo probabilístico, é imprescindível a sua descrição adequada e a identificação da rede de confiabilidade para cada PP (e.g., escavadeira). Em seguida deve ser obtido o EEC que representa os seus conjuntos mínimos de corte. A Figura 4.2 apresenta a rede de confiabilidade (diagrama de blocos) para o PP01, o qual corresponde à escavadeira 01 e será utilizado para ilustrar a aplicação das etapas da metodologia proposta.

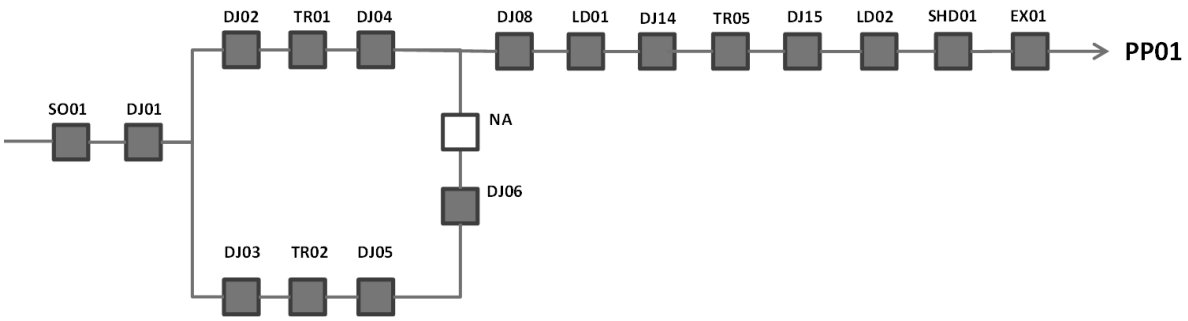


Figura 4.2 – Rede de confiabilidade para o PP01

Após a definição da rede de confiabilidade e de maneira análoga à realizada para um SED [G06], foi realizada a validação do modelo do SEI. Durante o período de 2 anos de levantamento de dados, identificou-se uma taxa de produtividade média de 2.107 toneladas por hora por ano para a escavadeira 01. Foi considerada a operação media anual de 3.191 horas para a mesma escavadeira. O cálculo da disponibilidade do PP01 é realizado a seguir. Ao analisar a Figura 4.2 é possível identificar equipamentos em paralelo apresentados na Figura 4.3.

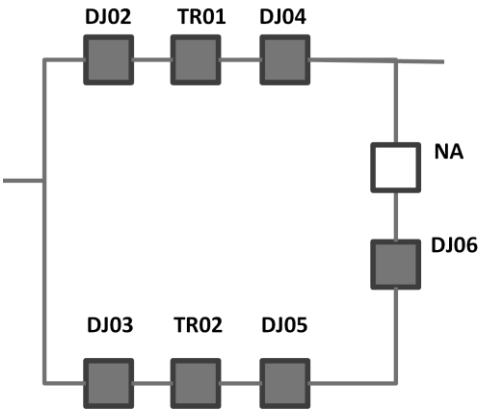
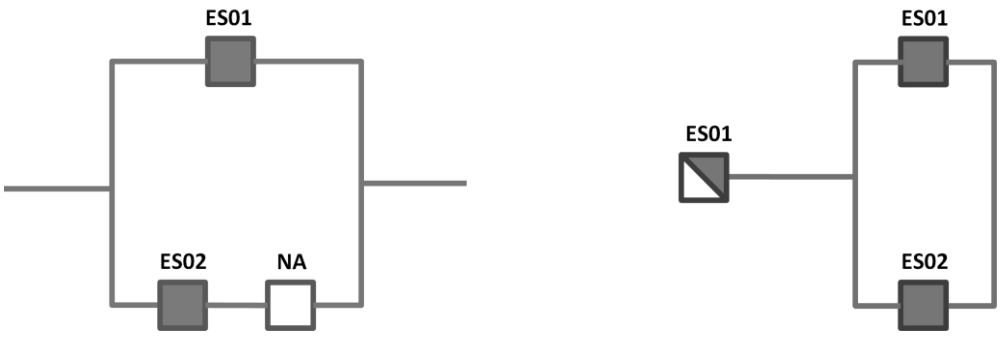


Figura 4.3 – Bloco paralelo da rede de confiabilidade do PP01

A rede reduzida do bloco paralelo, dada pela Figura 4.4a, é utilizada para a identificação dos conjuntos mínimos de corte envolvendo os equipamentos equivalentes série (ES), conforme ilustra a Figura 4.4b.



a) Rede reduzida **b) Conjuntos de corte**

Figura 4.4 – Rede Reduzida do bloco paralelo de PP01

É importante salientar que a representação do conjunto mínimo de corte de primeira ordem ES01 considera um tempo médio de chaveamento um pouco inferior ao tempo de manobra (e.g., 10 minutos) da chave Normalmente Aberta apresentada na Figura 4.2. O tempo de chaveamento, assim como o tempo de reparo, é dado por um valor médio conhecido, o qual segue uma distribuição exponencial. Podem ocorrer situações em que o tempo de chaveamento será maior que o tempo de reparo. Para efeito de cálculo, se for considerado apenas o tempo de chaveamento, as situações não serão consideradas. A fim de representá-las adequadamente será considerado um valor igual ao paralelo entre os tempos de reparo e de chaveamento, o que resulta em um tempo médio de chaveamento de aproximadamente de 9,92 minutos.

Diante das redes reduzidas apresentadas, a Figura 4.5 ilustra o esquema equivalente de confiabilidade, representado pelos seus conjuntos mínimos de corte. Para o cálculo da disponibilidade do PP01, são utilizadas as Equações (2.3), (2.4), (2.7) e (2.8) e os dados estocásticos dos equipamentos apresentados na Tabela 4.2.

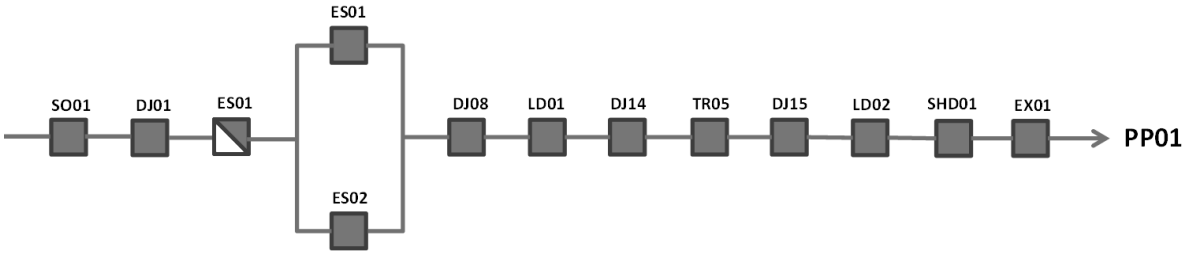


Figura 4.5 – Conjuntos mínimos de corte do PP01

Segundo os dados levantados em um período de dois anos, o montante médio de minério movimentado pela escavadeira 01 foi de 5,864 milhões de toneladas por ano. Uma estimativa para este montante movimentado pode ser obtida fazendo-se o produto entre a capacidade média de produção da escavadeira (2.107 t/h), o período médio de operação (3.191 h) e a disponibilidade estimada segundo a rede de confiabilidade da Figura 4.5 (87,248%), obtendo-se a movimentação esperada de 5,866 milhões de toneladas.

O valor obtido de tonelada movimentada apresenta um desvio de 0,05% em relação ao montante movimentado no período em análise. Este desvio demonstra que o modelo adotado, bem como os parâmetros utilizados para todos os equipamentos, pode proporcionar resultados satisfatórios, os quais subsidiarão as tomadas de decisões.

4.5 PONTOS FRÁGEIS E PROPOSTAS DE MELHORIAS

Segundo os resultados apresentados na seção anterior, o PP01 do SEI apresenta uma indisponibilidade 12,752%. Este valor representa a dimensão do universo potencial de oportunidades de melhoria do desempenho do PP01. Para diminuir este valor, faz-se necessária uma avaliação individualizada de todos os componentes pertencentes ao sistema de alimentação da escavadeira 01, a fim de identificar suas fragilidades.

Definindo as prioridades para tratamento dos pontos frágeis do sistema, pode-se tomar os maiores valores de indisponibilidade como ponto de partida para a identificação de pontos vulneráveis do sistema. A partir da Tabela 4.4, verifica-se que o cabo móvel apresenta a maior indisponibilidade, no valor de 12 horas por ano. O segundo maior valor remete ao disjuntor de saída da subestação unitária, com 10 horas indisponíveis ao ano, um pouco superior ao valor de 9,4 horas apresentado pelo transformador.

Além dos parâmetros estocásticos apresentados na Tabela 4.5, é possível considerar outros fatores, tais como custos associados e/ou estratégia operacional, para definir essas prioridades. O disjuntor de saída da subestação unitária, por se tratar de um equipamento de fácil aquisição, produzido em alta escala e de baixo

custo, se comparado com o transformador, é um equipamento que possui um estoque tal, que seu tempo de reparo se refere, praticamente, ao tempo de substituição do equipamento. Por outro lado, além de proporcionar um elevado tempo de reparo/substituição (e.g., 20 horas), o transformador possui o custo de aquisição dez vezes maior que o de um disjuntor, bem como apresenta processos de aquisição e reparo mais complexos e capacidade de atendimento a dois pontos de produção simultaneamente.

Portanto, o Transformador 13,8/7,2 kV – 5 MVA e o Cabo Móvel representam os dois principais pontos vulneráveis do sistema em estudo que necessitam de propostas de melhorias a fim de incrementar a confiabilidade do PP01 e, consequentemente, do SEI. Em conjunto, estes dois equipamentos são responsáveis por uma indisponibilidade igual a 21,37 horas por ano.

Tabela 4.4 – Parâmetros estocásticos dos equipamentos

Equipamento	Taxa de Falha (λ) [falhas/ano]	Tempo Médio de Reparo (r) [h]	Indisponibilidade (λ×r) [h/ano]
CABO MÓVEL	**4,000**	**3,000**	**12,00**
DISJUNTOR DE SAÍDA SE UNITÁRIA 7,2 kV	2,000	5,000	10,00
TRANSFORMADOR 13,8 / 7,2 KV - 5 MVA	**0,470**	**20,000**	**9,400**
DISJUNTOR DE SAÍDA BARRAMENTO 13,8 kV	1,500	5,000	7,500
DISJUNTOR DE ENTRADA SE UNTÁRIA 13,8 kV	1,500	5,000	7,500
DISJUNTOR DE ENTRADA BARRAMENTO 13,8 kV	1,000	5,000	5,000
TRANSFORMADOR 138/13,8 kV - 45 MVA	0,363	11,224	4,074
RDA - 13,8 kV	1,000	3,000	3,000
RDA - 7,2 kV	1,000	3,000	3,000
DISJUNTOR DE ENTRADA 138 kV	0,033	10,000	0,333

4.5.1 MELHORIA - CABO MÓVEL DE ALIMENTAÇÃO

Conforme identificado na seção anterior, o cabo móvel é um dos principais pontos frágeis do PP01, uma vez que representa um conjunto mínimo de corte de primeira ordem, com uma indisponibilidade de 12 horas por ano para o ponto de produção referente à escavadeira 01.

Diante dos fatos expostos no parágrafo anterior, tem-se uma excelente oportunidade de melhoria na disponibilidade do PP01, e, consequentemente, na confiabilidade do SEI. Neste caso, será trabalhada a substituição do equipamento por outro que apresente um melhor conjunto de dados estocásticos, isto é, com menor taxa de falha e mesmo tempo médio de reparo. Uma forma de alcançar este conjunto é por meio da substituição de equipamentos existentes por novos com tecnologia mais recente.

O cabo móvel se refere a um equipamento portátil de alta tensão destinado a trabalhos pesados, em ambientes abrasivos, a ser utilizado em circuitos que não ultrapassem um determinado limite de tensão. São utilizados em equipamentos móveis pesados, tais como draga de cabo, perfuratrizes, escavadeiras elétricas, dentre outros. A Figura 4.6 [A09] ilustra seus detalhes construtivos.

O atual cabo instalado possui um revestimento que, devido ao deslocamento das escavadeiras, sofre esforços mecânicos e desgastes, o que provoca a quebra de condutores internos e deteriora sua camada de isolamento, culminando em falhas do tipo fuga a terra e, consequentemente, interrupção no fornecimento de energia. O maior problema do atual cabo utilizado está em sua cobertura, que apresenta baixa resistência à abrasão, e em seu preenchimento interno que não é feito na íntegra deixando os condutores soltos no interior do cabo. Conforme apresentado na Tabela 4.4, após uma destas interrupções, leva-se, em média, 3 horas para restabelecimento completo do PP01, devido ao reparo no equipamento.

A substituição deste cabo por um equipamento projetado com materiais de isolamento e revestimento flexíveis, com maior resistência à abrasão e à umidade, totalmente preenchido, com maior resistência a torções, implicará em cabos duráveis que proporcionem uma menor taxa de falha e consequentemente, aumento da disponibilidade do PP01, uma vez que o tempo médio de reparo permanece constante.

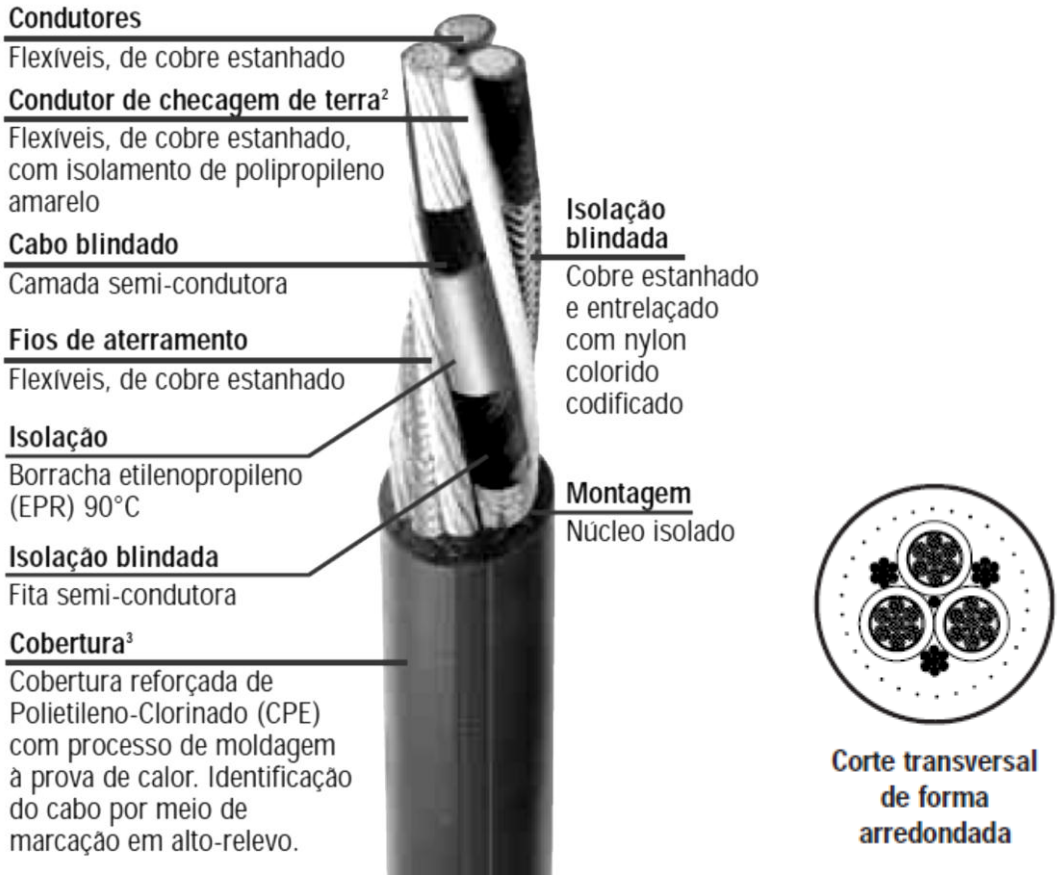


Figura 4.6 – Detalhes construtivos de um cabo SHD e em corte transversal

Ao efetuar a substituição do cabo, são utilizados os novos dados estocásticos para o componente, conforme apresentado na Tabela 4.5. Os índices de desempenho do PP01 com esta nova situação estão apresentados na Tabela 4.6

Tabela 4.5 – Novo parâmetro estocástico para o cabo móvel

Equipamento	Taxa de Falha (λ) [falhas/ano]	Tempo Médio de Reparo (r) [h]	Indisponibilidade (λ×r) [h/ano]
CABO SHD	0,500	3,000	1,500

Tabela 4.6 – Melhorias do SEI devido a substituição do cabo móvel

Ponto de Produção	Disponibilidade [%]			Incremento	
	Atual	Proposta	Δ	Movimentação [t]	Receita [R$]
PP01	87,248	87,353	0,104	14.060	1.150.539

É necessário ressaltar que este incremento na movimentação de minério da ordem de 14 mil toneladas representa um aumento de apenas 0,118% na produção anual do PP01, porém esta pequena variação pode proporcionar um incremento na receita da ordem de R$ 1,1 milhão.

Ampliando esta análise para toda a Frota A do processo produtivo, isto é, substituído estes cabos em todas as 5 escavadeiras presentes na Frota A desta indústria, a capacidade de movimentação de minério poderá atingir valores em torno de 70.000 toneladas de minério movimentado e, consequentemente, pode-se alavancar um retorno financeiro de até uma ordem de R$ 5 milhões.

4.5.2 MELHORIA - TRANSFORMADORES

De forma análoga à subseção anterior, fazendo uma análise dos parâmetros estocásticos apresentados na Tabela 4.4 é possível identificar o Transformador 13,8 kV – 5 MVA, como um ponto frágil do sistema, uma vez que seu tempo médio de reparo é de 20 horas. Analisando o tempo médio de reparo, bem como a taxa de falha, de 0,470 falhas por ano, é possível notar que este componente proporciona ao PP01, em média, 9,40 horas de interrupção por ano.

O tempo médio de reparo em questão se refere ao tempo necessário para o restabelecimento operacional por meio da substituição do transformador, isto é, refere-se ao tempo de restauração do sistema. Este tempo é bem menor que o tempo necessário para o seu reparo ou para a aquisição de um novo equipamento, os quais são, em média, de aproximadamente 1 ano.

Diante dos fatos expostos no parágrafo acima, tem-se uma excelente oportunidade de melhoria na disponibilidade do PP01 e, consequentemente, na confiabilidade do SEI. Nesta subseção será investigada a adoção de uma reserva técnica de transformadores, i.e., a utilização de transformadores reserva em estoque, por meio da adoção do modelo de Poisson, o qual é uma particularidade do modelo de Markov com a taxa de reposição igual a zero. Desta forma, elimina-se a possibilidade de reparos durante o período de interesse. Conforme citado na Seção 3.8, a distribuição de Poisson permite o cálculo da probabilidade de um evento ocorrer um determinado número de vezes em um intervalo de tempo definido.

Para o estudo em questão, é considerado um sistema com 7 componentes principais e um componente reserva. Este sistema é definido pelo número de subestações unitárias para a alimentação de escavadeiras, com um total de sete transformadores de 5 MVA, cuja taxa de falha é de 0,0072 [PSRS97] falhas por ano e tempo médio de reparo de 1 ano para que um transformador avariado seja reparado ou um novo transformador seja adquirido. Esta taxa de falha difere do levantamento apresentado na Tabela 4.2, pois, no período analisado, ocorreram 2 falhas pontuais, provocadas por erro humano, que devem ser excluídas para este estudo. Sendo, portanto, utilizada a taxa de falha praticada para este tipo de equipamento segundo o IEEE.

Por meio do modelo Poisson, utilizando 7 transformadores, com uma taxa de falha de 0,0072 falhas por ano, um equipamento reserva durante o período de um ano, e utilizando a Equação (3.3), tem-se uma confiabilidade:

$$R(1) = 0{,}99878$$

Logo, o risco de falha do sistema vale

$$1 - 0{,}99878 = 0{,}00122$$

que corresponde à probabilidade do sistema ter mais de 1 transformador falhado no período de 1 ano.

Com a variação do número de transformadores reservas no estoque, obtêm-se, pelo modelo Poisson, os valores de confiabilidade apresentados na Tabela 4.7. Observe que a cada unidade reserva adicionada ao estoque, a confiabilidade sofre um incremento menor à medida que o número de transformadores reservas aumenta, chegando ao ponto em que a adição de um transformador reserva não afeta significativamente a confiabilidade do sistema.

Apesar de importante, o conhecimento da confiabilidade, por si só, não é suficiente para se determinar o número ótimo de equipamentos a serem disponibilizados no estoque de reservas de um grupo de subestações. Este dimensionamento deve considerar da forma mais precisa possível, o custo de investimento na aquisição do estoque, reposição de equipamentos avariados, além de custos provenientes da interrupção das escavadeiras. Também podem ser utilizados os indicadores de frequência e duração, bem como de PMNS.

Tabela 4.7 – Confiabilidade x Número de reservas

n	R(t)	Acréscimo em R(t)
0	0,9508490088	-
1	0,9987717989	0,0479227900
2	0,9999794532	0,0012076543
3	0,9999997418	0,0000202886
4	0,9999999974	0,0000002556
5	1,0000000000	0,0000000026

Apesar de importante, o conhecimento da confiabilidade, por si só, não é suficiente para se determinar o número ótimo de equipamentos a serem disponibilizados no estoque de reservas de um grupo de subestações. Este dimensionamento deve considerar da forma mais precisa possível, custos de investimento na aquisição do estoque, reposição de equipamentos avariados, além de custos provenientes da interrupção dos consumidores. Neste caso, indicadores de frequência e duração, bem como valores esperados de Produção média não Suprida (PNS).

Tabela 4.8 – Dados do Transformador

Dados do Transformador		
N° de Transformadores	7	
Taxa de Falha (λ)	0,0072	oc./ano
Potência Nominal	5	MVA
Período de reposição	1	anos
Custo de Aquisição	R$ 300.000,00	R$

Tabela 4.9 – Dados da Carga

Dados de Carga	
Fator de Potência da Carga	0,9
Fator de Carregamento Médio	0,7

Tabela 4.10 – Custos de Produção

Custos de Produção		
Produção Média / S.E.	3000	t/h
Custo de Interrupção de produção	R$ 156.000,00	R$/h

Custo de Médio de Minério de Ferro	R$ 200,00	R$
Relação Esterio-Minério	1,5	
Taxa de Recuperação Usina	0,65	%

Tabela 4.11 – Retorno de Investimento

Retorno do Investimento		
Vida Útil do Trafo	30	anos
Taxa de amortização	0,15	a.a.

Através da utilização das premissas estabelecidas nas Tabelas 4.8 – 4.11, e com a utilização de um modelo matemático que leva em consideração a confiabilidade do sistema, o número médio de transformadores indisponíveis e o PNS do Sistema, é possível estabelecer o dimensionamento ótimo do estoque.

De maneira geral, o dimensionamento do estoque reserva é feito com base em uma solução de compromisso entre o custo de investimento na aquisição do estoque (compra dos equipamentos reservas) e o custo de operação do sistema, que inclui interrupção no ponto de produção, isto é, a produção média não suprida. Na Figura 4.7 apresentam-se os custos de investimento e de interrupção, bem como o custo total, quando é considerado um intervalo de 0 a 5 transformadores reserva.

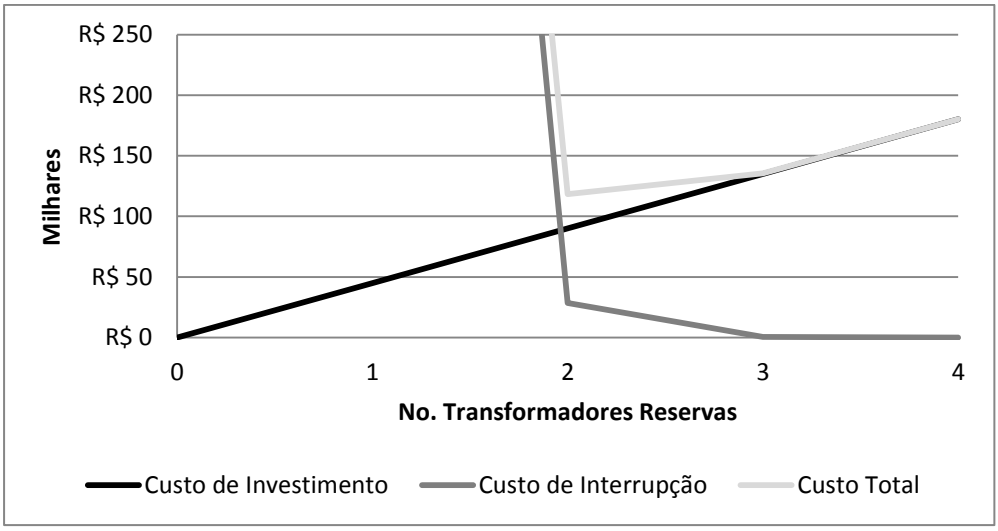


Figura 4.7 – Custos de investimento, interrupção e total x Número de transformadores reservas

O estudo em questão remete ao número ótimo de transformadores reservas para o SEI conforme apresentado na Tabela 4.12, onde estão apresentados os resultados do estudo.

Tabela 4.12 – Resultados do estudo

Custo Ótimo	*Número de Trafos Reserva*	*Disponibilidade [%]*
R$ 118.434,95	2	99,9979

Ao se estabelecer o número ótimo de transformadores reservas, são obtidas as melhorias no SEI conforme apresentado na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Melhorias do SEI - Dimensionamento de reserva de transformadores

Ponto de Produção	**Disponibilidade [%]**			**Incremento**	
	Atual	Proposta	Δ	Movimentação [t]	Receita [R$]
PP01	87,248	87,340	0,0918	12.348	1.010.436

É necessário ressaltar que este incremento na movimentação de minério da ordem de 12 mil toneladas representa um aumento de apenas 0,104% na produção anual da escavadeira 01, porém esta pequena variação pode proporcionar um incremento na receita da ordem de R$ 1 milhão.

Ampliando este trabalho para todo o âmbito do processo de carga, isto é, para as 5 escavadeiras presentes na Frota A, proporcionará o mesmo incremento de disponibilidade para cada um destes equipamentos, porém, a capacidade de movimentação poderá ser incrementada em até 60.000 toneladas de minério e, consequentemente, pode-se alavancar um retorno financeiro de até uma ordem de R$ 5 milhões.

4.5.3 MELHORIA – ESTRATÉGIA OPERACIONAL

Conforme pode ser visualizado na Figura 4.1, é possível incluir redundâncias para aumentar a continuidade de funcionamento em pontos de produção do SEI. Estas

redundâncias podem ser alcançadas a partir da ocorrência de falhas em locais, nos quais o restabelecimento do SEI seja possível apenas com alterações físicas de alimentação de equipamentos.

Neste estudo será abordada a alteração na estratégia de atendimento do SEI, isto é, do PP01, em função de falha ocorrida no transformador 05 (TR05), conforme ilustrado na Figura 4.8.

A falha apresentada implica em parada da escavadeira 01 e, consequentemente, aumento da PMNS do PP01. Com o objetivo de reduzir esta perda, é possível restabelecer a alimentação da escavadeira 01 por meio da extensão do seu cabo móvel de alimentação, conectando-o na rede LD04 conforme apresentado na Figura 4.9. Esta rede aérea está conectada à outra subestação unitária responsável, principalmente, pela alimentação da escavadeira 02.

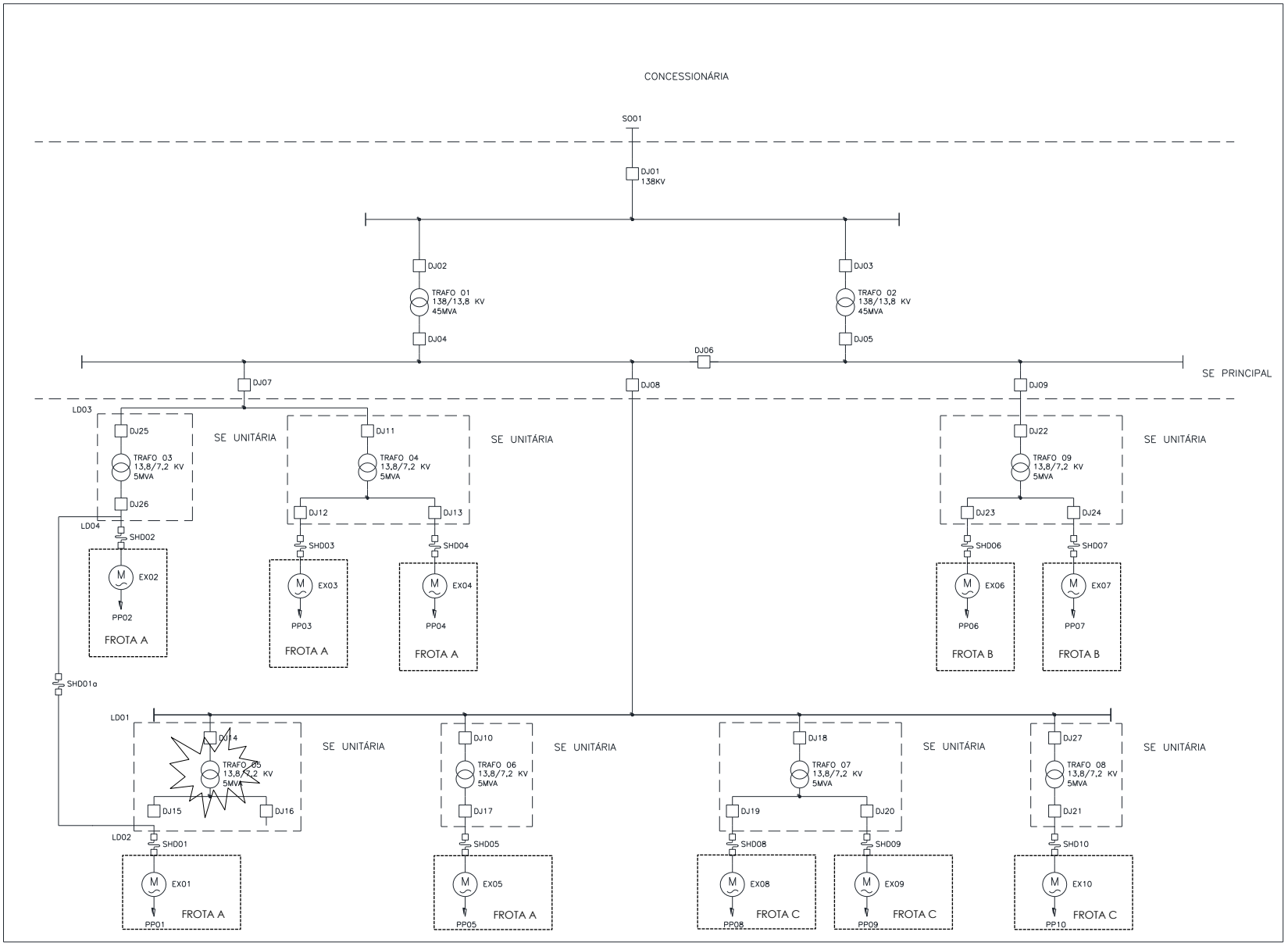


Figura 4.8 – Falha ocorrida no Transformador 05

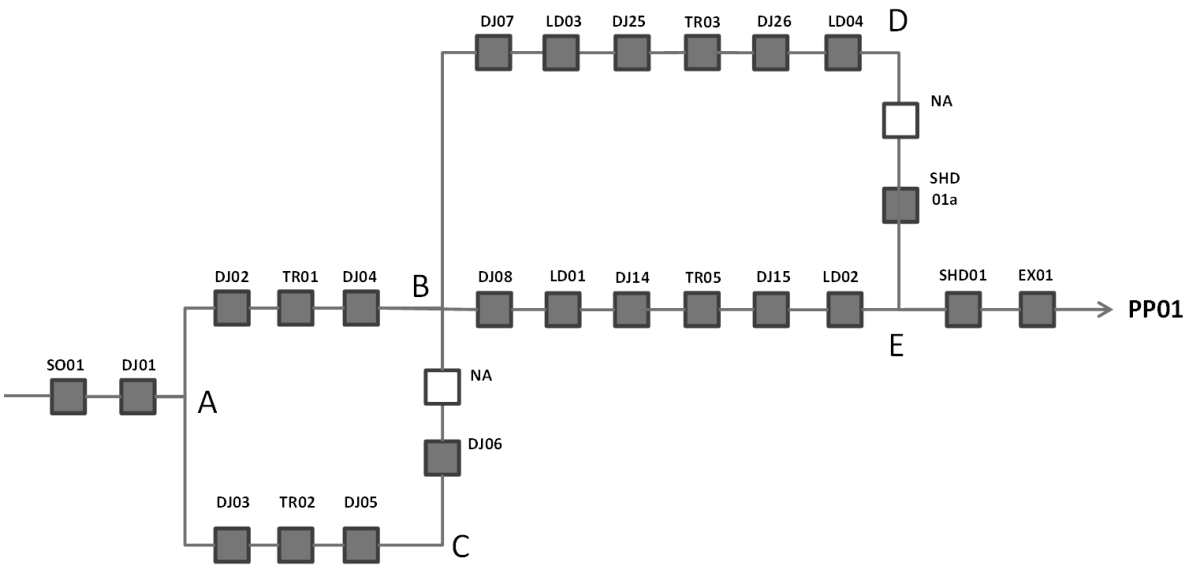


Figura 4.9 – Rede de confiabilidade para restabelecimento do PP01

Diante do exposto, tem-se uma nova configuração do sistema a qual deve ser analisada a fim de verificar seu potencial de melhoria da disponibilidade e confiabilidade do PP01. Para tal, é necessário encontrar os caminhos mínimos para esta nova rede de confiabilidade. A Tabela 4.14 apresenta os caminhos mínimos para o modelo da .

Tabela 4.14 – Caminhos Mínimos

Fechado	
SO01 - DJ01 - A - B - E – SHD01 - EX01	SO01 - DJ01 - DJ02 - TR01 - DJ04 - DJ08 - LD01 - DJ14 - TR05 - DJ15 - LD02 - SHD01 - EX01
Aberto	
SO01 - DJ01 - A - B - D - E – SHD01 - EX01	SO01 - DJ01 - DJ02 - TR01 - DJ04 - DJ07 – LD03 - DJ25 - TR03 - DJ26 – LD04 – SHD01a - SHD01 - EX01
SO01 - DJ01 - A - C - B - E – SHD01 - EX01	SO01 - DJ01 - DJ03 - TR02 - DJ05 - DJ06 - DJ08 - LD01 - DJ14 - TR05 - DJ15 - LD02 - SHD01 - EX01
SO01 - DJ01 - A - C – B - D – E – SHD01 - EX01	SO01 - DJ01 - DJ03 - TR02 - DJ05 – DJ06 - DJ07 – LD03 - DJ25 - TR03 - DJ26 – LD04 – SHD01a - SHD01 - EX01

Assim como considerado na Seção 4.4, foram utilizados os tempos de chaveamento iguais a 10 minutos e 4 horas, para os equipamentos DJ06 e SHD01a, respectivamente.

Após a definição dos caminhos mínimos e as considerações acerca dos tempos de chaveamento, é possível obter os conjuntos mínimos de corte e estimar os índices de confiabilidade do PP01. Para os cálculos são considerados os dados estocásticos dos novos equipamentos, conforme apresentado na Tabela 4.15, incluídos para representar a redundância do atendimento ao PP01.

Tabela 4.15 – Dados estocásticos dos equipamentos

Equipamento	Código	Taxa de Falha (λ)	Tempo médio Reparo (r)- [hs]	Horas de Interrupção (λ.r) – [h/ano]
DISJUNTOR DE SAÍDA BARRAMENTO 13,8 kV	DJ07	1,500	5,000	7,500
RDA - 13,8 kV	LD03	1,000	3,000	3,000
DISJUNTOR DE ENTRADA SE UNTÁRIA 13,8 kV	DJ25	1,500	5,000	7,500
TRANSFORMADOR 13,8 / 7,2 KV - 5 MVA	TR03	0,470	20,000	9,400
DISJUNTOR DE SAÍDA SE UNITÁRIA 7,2 kV	DJ26	2,000	5,000	10,000
RDA - 7,2 kV	LD04	1,000	3,000	3,000
CABO SHD EX01	SHD01a	4,000	3,000	12,000

Para o cálculo da confiabilidade necessita-se da utilização de um algoritmo devido ao elevado número de conjuntos mínimos de corte. A fim de realizar estes cálculos, é realizada uma redução da rede do sistema, conforme apresentado na Figura 4.10.

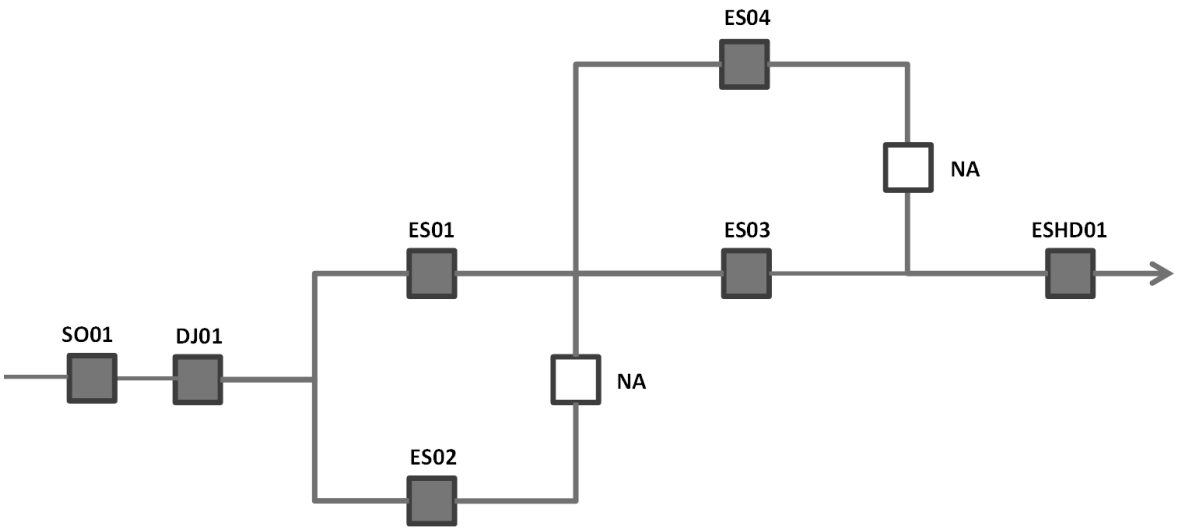


Figura 4.10 – Rede reduzida de confiabilidade

A rede da Figura 4.10 apresenta quatro caminhos mínimos conforme apresentado na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 – Caminhos mínimos do rede de confiabilidade

Fechado
SO01 - DJ01 - ES1 - ES3 - ESHD01
Aberto
SO01 - DJ01 - ES1 - ES4 - ESHD01
SO01 - DJ01 - ES2 - ES4 - ESHD01
SO01 - DJ01 - ES2 - ES3 - ESHD01

A partir destes caminhos mínimos, chega-se aos conjuntos mínimos de corte conforme apresentado na Figura 4.11.

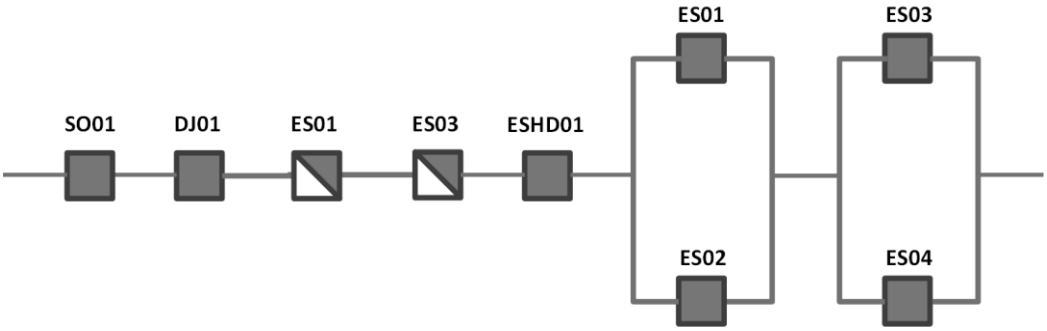


Figura 4.11 – EEC para o PP01 considerando a estratégia operacional

A partir da aplicação dos conceitos de sistemas série e paralelo ao EEC da Figura 4.11, os novos números para o PP01, considerando a estratégia operacional são apresentados na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 – Melhoria do SEI devido à inclusão de redundância.

Disponibilidade [%]			Incremento	
Atual	Proposta	Δ	Movimentação [t]	Receita [R$]
87,248	87,581	0,333	44.735	3.660.696, 00

4.5.4 ANÁLISE DAS ALTERAÇÕES PROPOSTAS

Analisados individualmente, os resultados apresentados nas subseções anteriores são bastante significativos. Ao aplicar as propostas de melhorias da reserva técnica e do cabo SHD simultaneamente espera-se um ganho ainda mais significativo. A Tabela 4.18 apresenta os resultados individuais e em conjunto. Note que o incremento de receita resultante da aplicação simultânea das melhorias é muito próximo à soma dos benefícios individuais, o que indica certa independência entre estes eventos.

Tabela 4.18 – Resultados das alterações propostas

Melhoria – PP01	Disponibilidade [%]			Incremento	
	Atual	Proposta	Δ	Movimentação [t]	Receita [R$]
Reserva Técnica	87,248	87,340	0,0918	12.348,0	1.010.436,00
Cabo SHD	87,248	87,353	0,105	14.060	1.150.539,00
Cabo SHD + Reserva Técnica	87,248	87,447	0,199	26.747,7	2.188.761,70
Estratégia Operacional	87,248	87,581	0,333	44.735,4	3.660.696,00

Os resultados apresentados na Tabela 4.18 demonstram a complementaridade das melhorias propostas, as quais combinam o aumento da eficiência de equipamentos

(cabo SHD), com ampliação da reserva técnica (transformadores) e uma estratégia operacional mais eficiente.

4.6 CONCLUSÕES

O presente capítulo apresentou, detalhadamente, a aplicação da metodologia proposta para avaliação do desempenho de um SEI de uma mineração de grande porte. Foram utilizadas informações oriundas de um histórico de operação e manutenção para identificação do sistema, levantamento e tratamento de dados, elaboração de um EEC, avaliação da confiabilidade e posterior identificação e propostas de melhorias para os pontos vulneráveis do sistema.

Primeiramente foi feita a identificação do sistema, sua caracterização, definição de fronteiras e interfaces. O sistema apresentado consiste em uma fração de um complexo SEI de uma mineração, modelado por um sistema radial com recursos constituído por subestação, linhas de distribuição, subestações unitárias, cabos de alimentação e escavadeiras.

Após sua identificação, durante um período de dois anos, foi realizado um levantamento detalhado de informações de campo a fim de se obter dados estocásticos consistentes para todos os equipamentos do SEI. Em seguida foi avaliado o desempenho do mesmo por meio da utilização de parâmetros e modelos para a tomada de decisão. Foi então, obtido um EEC constituído dos conjuntos mínimos de corte do ponto de produção de uma escavadeira.

O resultado da análise de desempenho do SEI remeteu a um universo potencial de oportunidades de melhorias, sendo, portanto, necessário uma avaliação individualizada a fim de identificar as fragilidades do sistema. Os principais equipamentos identificados como pontos vulneráveis foram o Cabo móvel SHD, o Transformador 13,8/7,2 kV e a inexistência de caminhos alternativos para o restabelecimento do processo produtivo no SEI, i.e., a carência de redundâncias.

Avaliando o atual cabo móvel de alimentação das escavadeiras, foi proposta a sua substituição por outro com taxa de falha menor, de forma a aumentar a disponibilidade do sistema de alimentação a um ponto de produção, e

consequentemente, proporcionar incrementos na produção e alavancar o retorno financeiro.

Posteriormente à análise dos parâmetros estocásticos dos equipamentos, e considerações acerca da criticidade do equipamento para o SEI, o transformador das subestações unitárias foi identificado como outro ponto crítico. Foi, então, investigada a adoção de uma reserva ótima em estoque por meio do modelo de Poisson cujo resultado para número ótimo de transformadores reserva. Esta ação implicou em incremento de produção e excelente oportunidade para aumento da receita da indústria.

No tocante a estratégia operacional, foi proposta também uma alteração baseada na inclusão de redundâncias em pontos do sistema que proporcione o restabelecimento do mesmo apenas com alterações físicas na disposição dos equipamentos. Através da aplicação das técnicas de conjuntos mínimos de corte, foi possível verificar que o SEI ficou mais confiável e, do ponto de vista operacional, mais flexível.

Diante do exposto, pode-se concluir, após análises individuais e em conjunto, que aplicando as propostas de melhorias, é possível obter resultados que contribuam significativamente para o melhor desempenho do SEI. Baseadas na aplicação de técnicas amplamente divulgadas e de simples implementação, estas propostas, além de proporcionarem um significativo ganho operacional, contribuem para o aumento da confiabilidade e flexibilidade do SEI, os quais refletem diretamente no retorno financeiro da indústria.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

5.1 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

A indústria passa por um processo evolutivo onde a eficiência da produção automatizada, dos projetos e da manutenção dos meios de produção é cada vez mais exigida. Além de atender a anseios mundiais, tais como preservação de recursos naturais, esse processo apresenta também uma necessidade ascendente de garantia de segurança física, uma vez que suas falhas podem causar efeitos que vão da inconveniência e irritação a impactos bastante severos para a sociedade e o meio ambiente.

O aprimoramento do processo produtivo faz com que a otimização esteja cada vez mais presente no cenário industrial, tornando-se uma ferramenta cada vez mais presente, passando por todas as fases, desde o planejamento da operação até a definição das melhores práticas de manutenção.

A estratégia de manutenção, seja ela baseada no tempo ou na condição do equipamento, pode ser otimizada levando em consideração as distribuições do tempo para a falha dos componentes mantidos em operação, bem como a tendência da taxa de falha do sistema. Grande parte das informações necessárias para a otimização de um processo de manutenção pode ser obtida por meio da correta representação dos principais setores da indústria e da utilização de parâmetros do

sistema, bem como de seus equipamentos, os quais são levantados a partir do tratamento estatístico de dados oriundos do histórico da operação.

O planejamento adequado da manutenção e operação de um sistema elétrico tem como principal objetivo manter o sistema em funcionamento com menor custo e, ao mesmo tempo, minimizar os impactos decorrentes das interrupções ou falhas no sistema. Atingir este objetivo é uma tarefa extremamente complexa, pois, a redução do custo de investimento implica na queda da confiabilidade do sistema, seguida de um aumento de seus custos associados (valor da confiabilidade). Por outro lado, um sistema muito confiável, em geral, possui elevados custos de investimento.

A identificação de pontos frágeis de um sistema industrial não é uma tarefa trivial, uma vez que se necessita de um grande volume de informações. Estas informações devem ser respaldadas pelo levantamento estatístico de dados para a modelagem adequada do sistema. O domínio e pleno conhecimento de todo o sistema, favorece a identificação destes pontos frágeis.

Esta dissertação procurou apresentar uma proposta de metodologia, baseada nas técnicas de análise de confiabilidade para sistemas elétricos de distribuição, de forma identificar fragilidades e a propor um conjunto de procedimentos para estabelecer melhorias no Sistema Elétrico Industrial com a finalidade de maximizar os resultados produtivos da indústria.

As principais contribuições podem ser resumidas a seguir:

- ✓ No Capítulo 2 foram apresentadas as principais definições empregadas na área de confiabilidade de sistemas elétricos, que suportarão a compreensão das metodologias e avaliações topológicas apresentadas. Foram apresentadas as topologias série e paralelo, e a técnica de conjuntos mínimos de corte. Esta técnica serviu como base para todos os métodos de cálculo de confiabilidade utilizados. O capítulo foi encerrado com algumas considerações referentes a fatores que influenciam os parâmetros de confiabilidade dos componentes do sistema;
- ✓ No capítulo 3 foi apresentada a metodologia proposta para a avaliação do desempenho de um SEI, mediante o cálculo de índices de desempenho cuja finalidade é quantificar e qualificar o sistema em termos de confiabilidade. Para tal, foram empregadas ferramentas que se baseiam na topologia e

confiabilidade dos componentes, bem como sua modelagem adequada por meio de dados extraídos de um histórico confiável;

- ✓ A primeira etapa desta metodologia consiste na identificação do sistema, de forma a caracterizar as funções desempenhadas e produzir uma documentação que registre as informações sobre todo o SEI em estudo. A segunda etapa representa uma forma estruturada para levantamento de dados a fim de obter informações descritivas sobre o funcionamento, projeto e contexto operacional do sistema objeto da análise. Na terceira etapa é feito o tratamento estatístico dos dados, sendo realizadas algumas manipulações no banco de dados e avaliação da qualidade do levantamento de dados, definido os dados estocásticos dos equipamentos. Na quarta etapa é obtido o modelo de confiabilidade através da utilização de um Esquema Equivalente de Confiabilidade que trata da representação dos conjuntos mínimos de corte para o sistema em análise. Posteriormente, na Etapa 5, é realizada a avaliação da confiabilidade, através de metodologias analíticas. Na Etapa 6 é feita a identificação dos pontos frágeis do sistema e, finalmente, na Etapa 7 são formuladas propostas visando aumentar a confiabilidade do sistema. Para finalizar o capítulo foi apresentado um fluxograma retratando as sete etapas propostas para análise de confiabilidade de um SEI;
- ✓ O Capitulo 4 apresentou a aplicação da metodologia proposta para avaliação do desempenho de um SEI de um mineração. Primeiramente foi feita a identificação do sistema, sua caracterização, definição de fronteiras e interfaces. Após esta etapa foi realizado um levantamento detalhado de informações de campo a fim de se obter dados estocásticos consistentes para todos os equipamentos do Sistema. A partir do levantamento e tratamento dos dados dos equipamentos do SEI, foi avaliado o desempenho do mesmo por meio da utilização de parâmetros e modelos para a tomada de decisão. Foi então, adotado um EEC que representa os conjuntos mínimos de corte de um subsistema do SEI em estudo;
- ✓ O resultado da análise de desempenho do SEI remeteu a oportunidades potenciais de melhorias, sendo, portanto, necessário uma avaliação individualizada a fim de identificar as fragilidades do sistema. Os principais

pontos vulneráveis do SEI foram o Cabo Móvel de alimentação, o Transformador 13,8/7,2 kV e a inexistência de redundâncias;

- ✓ Avaliando o cabo móvel de alimentação, ou cabo SHD, foi proposta a substituição do mesmo por outro que proporcione maior disponibilidade, com taxa de falha de 0,5 falhas/ano, de forma a aumentar a disponibilidade do sistema, proporcionar incrementos na produção e alavancar o retorno financeiro;
- ✓ Após análise dos parâmetros estocásticos dos equipamentos, identificou-se o elevado tempo para restabelecimento operacional devido ao tempo de substituição de um transformador das subestações unitárias. Foi investigada a adoção de uma reserva em estoque por meio do modelo de Poisson cujo resultado foi uma solução ótima para número de reservas de transformadores. Esta ação implica em incremento de produção e aumento da receita da indústria;
- ✓ Foi proposta também uma alteração da estratégia operacional baseada na inclusão de redundâncias em pontos do sistema que proporcione o restabelecimento do mesmo apenas com alterações físicas na disposição dos equipamentos. Através da aplicação das técnicas de conjuntos mínimos de corte obteve-se um SEI mais confiável e, do ponto de vista operacional, mais flexível;
- ✓ A aplicação das propostas de melhorias citadas acima contribuem significativamente para o desempenho de todo o SEI. Tratam-se de propostas de melhorias baseadas na aplicação de técnicas amplamente divulgadas e de simples implementação que proporcionam resultados significativos para a indústria. Estas propostas, além apresentarem um significativo ganho operacional, contribuem para o aumento da confiabilidade e flexibilidade do SEI. Fatos estes que refletem, diretamente, no retorno financeiro da indústria;
- ✓ A metodologia e resultados apresentados não restringem a aplicação às indústrias de mineração. Trata-se de uma ferramenta a ser utilizada em qualquer SEI que apresente um histórico confiável de eventos de falha e que permita uma modelagem fiel dos equipamentos instalados na empresa. A grande dificuldade de sua implementação encontra-se no levantamento de

dados confiáveis que remetam a uma correta representação do sistema, permitindo análises coerentes e propostas exequíveis que proporcionem ganhos operacionais e financeiros para as indústrias.

5.2 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

A fim de dar continuidade ao trabalho desenvolvido nesta dissertação, bem como aprofundar os conceitos propostos, algumas sugestões para trabalhos futuros são apresentadas:

- ✓ A análise de confiabilidade foi realizada para apenas um Ponto de Produção (PP). Poderia ser realizada uma análise ampla, para todos os PP's simultaneamente, através da utilização de um algoritmo que considere as características do SEI e apresente, de forma sistematizada, as principais fragilidades do sistema facilitando, assim, a tomada de decisão do usuário;
- ✓ A modelagem do sistema foi feita realizando apenas dados estocásticos dos equipamentos. Poderia ser desenvolvido um modelo que considere outros fatores tais como estratégia de produção, restrições de caminhões fora-de-estrada, possibilitando uma valoração mais aproximada dos possíveis ganhos;
- ✓ Devido a complexidade das escavadeiras, foram considerados apenas seus valores de disponibilidade real para avaliação dos Pontos de Produção. Os parâmetros estocásticos deste equipamento poderiam ser apresentados através de modelos mais detalhados, considerando suas taxas de falha e tempos de reparo. É possível propor alterações na estratégia de manutenção, considerando alterações no processo de manutenção dos equipamentos;
- ✓ A confiabilidade dos disjuntores considerou apenas as atuações indevidas do equipamento. Poderia ser considerada a confiabilidade da proteção, isto é, a habilidade do sistema atuar de forma correta e quando realmente necessário;
- ✓ O estudo de reserva técnica utilizando o modelo de Poisson foi aplicado apenas para os transformadores. Este estudo poderia ser estendido para

todos os equipamentos do sistema elétrico, aplicando o modelo de Markov, a fim de estabelecer um estoque ótimo para os componentes do SEI.

ANEXO A

ESCAVADEIRA HIDRÁULICA

A.1 ESPECIFICAÇÃO

ACIONAMENTO ELÉTRICO

- ✓ Tipo: 02 motores de indução
- ✓ Potência de saída: 2 x 900 kW
- ✓ Tensão: 7200 V
- ✓ Corrente (aproximada): 190 A
- ✓ Frequência: 60 Hz 1800 rpm

SISTEMA DE ELÉTRICO

- ✓ Sistema: 24V
- ✓ Baterias (série / paralela): 2 x 4 x 12 V
- ✓ Alternador: 2 x 100 A
- ✓ Iluminação de Trabalho: 8 Lâmpadas e XENON
- ✓ Iluminação de Serviço: 12 lâmpadas

CARRO INFERIOR

Carro inferior consiste de um *carbody* e dois *trucks*, cada um fixado por 4 pinos tratados de grande diâmetro.

- ✓ Chassi central: Tipo H
- ✓ Track: tipo caixa

ESTEIRAS

- ✓ Ajustes: hidráulico automático
- ✓ Número de sapatas: 43 cada lado
- ✓ Número de roletes superiores: 3 cada lado
- ✓ Número de roletes inferiores: 7 cada lado

SISTEMAS DE LOCOMOÇÃO E FREIO

- ✓ Controle de locomoção: 2 pedais
- ✓ Desempenho em rampas: até 60%
- ✓ Velocidade (máxima): 2,2 km/h - 1,4 MPH
- ✓ Freio de serviço: freio hidráulico
- ✓ Freio de estacionamento: discos múltiplos, banhado a óleo

SISTEMA DE GIRO

- ✓ Motores hidráulicos variáveis e unidades de acionamento: 2
- ✓ Freio de giro, serviço: Freio Hidráulico.
- ✓ Freio de giro, estacionamento: discos múltiplos, banhado a óleo.
- ✓ Engrenagem de giro: externa
- ✓ Velocidade de giro (máxima): 3,1 RPM

SISTEMA HIDRÁULICO

O sistema de potência consiste de 2 acionamentos principais. Os motores elétricos aciona 2 PTO e 3 bombas idênticas que movimentam o óleo hidráulico do tanque hidráulico despressurizado. O circuito hidráulico proporciona máximo arrefecimento e filtragem eficiente.

- ✓ Fluxo nominal (saída total): 4200 l/min
- ✓ Fluxo nominal de giro: 700 l/min
- ✓ Reservatório de óleo hidráulico: 3800 l
- ✓ Sistema hidráulico: 6000 l

SISTEMA DE ARREFECIMENTO

O sistema hidráulico consiste de dois grandes radiadores hidráulicos com reguladores de temperatura e ventiladores acionados hidraulicamente.

A alta capacidade de arrefecimento dos radiadores é proporcionada pelo acionamento hidráulico dos ventiladores para arrefecimento de alta eficiência e baixa manutenção.

SISTEMA DE LUBRIFICAÇÃO CENTRALIZADO

É composto por dois sistemas hidráulicos de lubrificação automática, contendo controles de tempo e volume. O sistema central é abastecido por um container de 300 litros. Um segundo sistema, idêntico, é responsável pela lubrificação da engrenagem de giro.

CABINE

A grande cabine do operador é construída em aço e conforme a ISO 3449 - *Earth-moving machinery* - como uma estrutura FOPS (*Falling-object protective structures*). É montada. É montada sobre 18 calços viscosos para redução de barulho e ruídos. A visão do operador está a 7,84 m de altura. A cabine é pressurizada com ar filtrado,

ar-condicionado e janela. A poltrona do operador é constituída de sistema de compensação de peso, suspensão a ar, suporte lombar variável e acento para auxiliar.

SISTEMA DE CONTROLE ELETRÔNICO

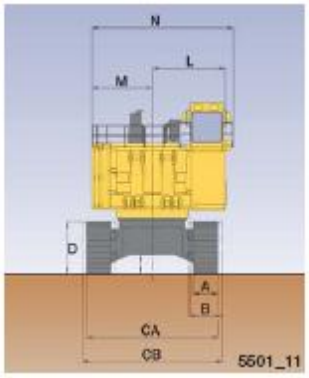
O sistema de diagnóstico digital, localizado na cabine do operador, possui letreiro eletrônico em tempo real que armazena informações sobre o status de operação da máquina. As falhas menos graves são apresentadas imediatamente ao operador. Em falhas mais críticas, os motores são imediatamente desligados, garantindo máxima proteção ao equipamento.

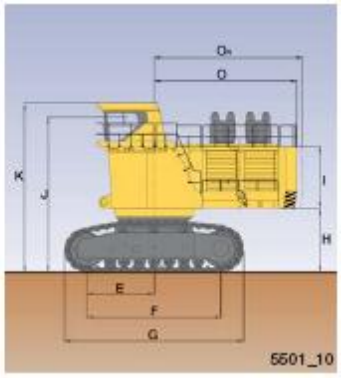
PESOS OPERACIONAIS

Peso operacional do equipamento, incluindo braço, semi-braço, caçamba, cabine do operador, lubrificante, radiador, tanque hidráulico cheio é 500 t.

DIMENSÕES

A	1350 mm	53"	H	3240 mm	10'8"
B	1800 mm	71"	I	3100 mm	10'2"
C_A	7150 mm	23'5"	J	7835 mm	25'8"
C_B	7600 mm	24'11"	K	8535 mm	28'0"
D	2600 mm	8'6"	L	3970 mm	13'0"
E	3400 mm	11'2"	M	3300 mm	10'10"
F	6800 mm	22'4"	N	7725 mm	25'4"
G	9100 mm	29'10"	O	7260 mm	23'10"
			O_R	7550 mm	24'9"





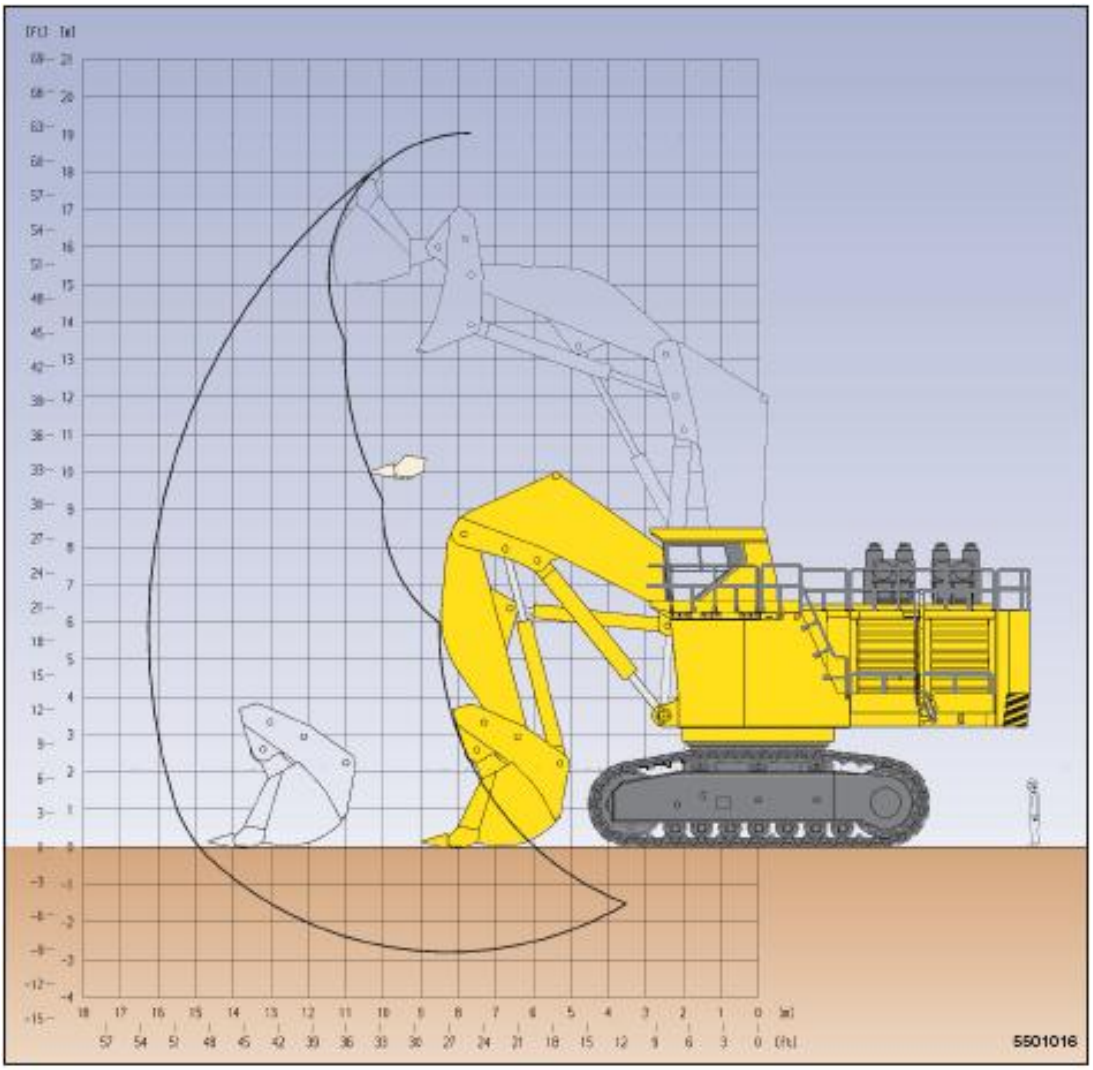


Figura A.1 – Dimensões da escavadeira hidráulica.

Figura A.2 – Escavadeira hidráulica em operação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[AB76a] R. N. Allan and R. Billinton, "An Efficient Algorithm for Deducing the Minimal Cuts and Reliability Indices of a General Network Configuration," *IEEE Trans. on reliability*, vol. R-25, nº 4, October 1976.

[ABBG94] R. N. Allan, R. Billinton, A. M. Breipohl, and C. H. Grigg, "Bibliography on the Application of Probability Methods in Power System Reliability Evaluation 1987-1991," *IEEE Trans. on Power Systems*, pp. vol.9, n 1, pp. 41-49, Feb. 1994.

[ABBG99] R. N. Allan, R. Billinton, A. M. Breipohl, and C. H. Grigg, "Bibliography on the Application of Probability Methods in Power System Reliability Evaluation 1992-1996," *IEEE trans. on Power Systems*, pp. vol 14, n. 1, pp. 51-57, Feb. 1999.

[ABL84] R. N. Allan, R. Billinton, and S. H. Lee, "Bibliography on the Application of Probability Methods in Power System Reliability Evaluation 1977-1972," *IEEE Trans. on Power Apparatus Systems*, pp. vol. PAS-103, n2, pp.275-282, Feb. 1984.

[ABSS98] R. N. Allan, S. M. Billinton, S. M. Shahidehpour, and C. Singh, "Bibliography on the Application of Probability Methods in Power System Reliability Evaluation 1982-1987," *IEEE Trans. on Power Systems*, pp. vol. 3, n. 4, pp. 1555-1564, Nov. 1998.

[ADH79] R. N. Allan, E. N. Dialynas, and I. R. Homer, "Modelling and Evaluationg the Reliability of Distributions Systems," *IEEE Trans. on Power Apparatus Systems*, pp. vol. PAS-09, n. 6, pp. 2181-2189, Nov. - Dec. 1979.

[ADH79a] R. N. Allan, E. N. Dialynas, and I. R. Homer, "Modelling Common Mode Failures in the Reliability Evaluation of Power System Networks," *IEEE Winter Poer Meeting*, 1979.

[AOB77] R. N. Allan, M. F. Oliveira, and R. Billinton, "Reliability Evaluation of the Auxiliary Electrical Systems of Power Stations," *IEEE Trans. on Power Apparatus Systems*, pp. vol. PAS-96, n. 5, pp. 1441-1449, Sep. - Oct. 1977.

[A09] AmerCable, *Cabos para Mineração de Superfície*.: AmerCable Incorporated, 2009.

[ANEEL00] ANEEL, Agência Nacional Energia Elétrica –, "Resolução Nº 24," 27 de Janeiro de 2000.

[AM97] S. Asgarporr and M. J. Mathine, "Reliability Evaluation of Distribution Systems with Non-Exponential Dow Times," *IEEE Trans. on Power Systems*, pp. vol. 12, n. 2, pp. 579-584, May 1997.

[ABNT94] Associação Brasileira de Normas Técnicas, *NB R5462, Confiabilidade e mantenabilidade - terminologia*. Rio de Janeiro, 1994.

[BAA99] L. Bertling, G. Anderson, and R. N. Allan, "Reliability Centered Maintenance Applied to Electrical Distribution Systems," in *International Conference on Electric Power Engineering PowerTech Budapest 99*, 1999, pp. pp. 261-261.

[BA92] R Billinton and R N Allan, *Reliability Evaluation of Engeneering Systems: Concepts and Techniques*, 2nd ed. New York: Plenum Press, 1992.

[BA84] R. Billinton and R. N. Allan, *Reliability Evaluation of Engineering Systems*, 1st ed. New York: Plenum Press, 1984.

[BA83] R. Billinton and R. N. Allan, *Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techiniques*, 1st ed. New York: Plenum Press,

1983.

[BA94] R. Billinton and R.N. Allan, *Reliability Evaluation of Engineering systems: concepts and techniques*, 2nd ed. New York: Plenum Press, 1992.

[BB68] R. Billinton and K. E. Bollinger, "Transmission System Reliability Evaluation Using Markov Processes," *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, pp. vol. PAS-87, n. 2, pp. 538-547, Feb. 1968.

[BFB01] R. Billinton, M. F. Firuzabad, and L. Bertling, "Bibliography on the Application of Probability Methods in Power System Reliability Evaluation 1996-1999," *IEEE Trans. on Power Systems*, pp. vol. 16, n. 4, pp. 595-602, Nov. 2001.

[BG75a] R. Billinton and M. S. Gover, "Reliability Assessment of Transmission and Distribuition System," *IEEE Tranns. Power Apparatus Syst.*, pp. vol. PAS-94, n. 3, pp. 724-732, May/Jun. 1975.

[BG75] R. Billinton and M. S. Grover, "Quantitative Evaluation on Permanent outages in Distribution Systems," *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, pp. vol. PAS-94, n. 3, pp. 733-741, May/Jun. 1975.

[B93] M. H. J. Bollen, "Method for reliability analysis of industrial distribution systems," in *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C*, 1993, pp. Volume: 140 , Issue: 6, Page(s): 497 - 502.

[B02] R. E. Brown, *Electric Poer Distribuition Reliability*, 2nd ed. New York: Marcel Dekker Inc., 2002.

[B02a] R. E. Brown, *Electric Power Distribution Reliability*, 2nd ed. New York: Marcel Dekker inc., 2002.

[C98] A M Cassula, *Avaliação da Confiabilidade de Sistemas de Distribuição Considerando Impactos da Geração e Transmissão - Dissertação de Mestrado*.: UNIFEI, 1998.

[CL09a] J. G. C. Costa and A. M. Leite da Silva, "Dimensionamento Ótimo de Reserva Técnica de Transformadores de Subestações," *X SEPOPE*, Março 2009.

[CL09] J. G. C. Costa and A. M. Leite da Silva, "Dimensionamento Ótimo de Reserva Técnica de Transformadores de Subestações," in *X Simpósio de Especialitas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica*, 2009.

[CLO08] J. G. C. Costa, A. M. Leite da Silva, and I. S. N. Oshiro, "Dimensionamento Ótimo de Transformadores de Subestações via Processos Estocásticos," *Congresso Brasileiro de automárica - CBA*, p. N. 39499, 2008.

[C05] CSN, *Manual do Sistema de Gestão da Manutenção*., 2005.

[D87] *Dicionário Aurélio*, 2nd ed.: Editora nova Fronteira, 1987.

[E71] J. Endrenyi, "Three State Models in Power System Reliability Evaluation," *IEEE Trans. on Power Apparatus Systems*, pp. vol. PAS-90, n. 4, pp. 1909-1916, Jul. - Aug. 1971.

[F98] S. Fazzoli, *Metodologia para Cálculo de Confiabilidade em Sistemas Complexos na Fase de Desenvolvimento - Tese de Doutorado*. Campinas, 1998.

[GMP64] D. P. Gaver, F. E. Montmeat, and A. D. Patton, "Power System Reliability: I - Measures and Methods of Calculation," *IEE Trans. on Power Apparatus Systems*, pp. vol. 83, n. 7, pp. 727-737, Jul. 1964.

[GB74] M. S. Grover and R. Billinton, "A computerized Approach to Substation and Switching station Reliability Evaluation," *IEEE Trans. on Power Apparatus Systems*, pp. vol. PAS-93, n.5, pp. 1488-1497, Sep. - Oct. 1974.

[G06a] Ana Carolina Rennó Guimarães, *Confiabilidade de Sistemas de Distribuição: Calibração de Dados e Mecanismos para Avaliação de Desempenho - Dissertação de Mestrado*. Itajubá, 2006.

[G06] A. C. R. Guimarães, "Confiabilidade de Sistemas de Distribuição: Calibração de Dados e Mecanismos para Avaliação de Desempenho," Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil, Dissertação de Mestrado 2006.

[HAC08] M. Houtermans, M. Al-Ghumgham, and T. V. Capele, "Improve Industrial Process Plant Safety and Availability via Reliability engineering," in *AICCSA '08 Proceedings of the 2008 IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications*, Doha, Qatar, 2008.

[I00] IEC 60300-3-11, *Gestion de la sureté de fonctionnement - Partie 3-11: Guide d'application - Maintenence basée sur la fiabilité*. Geneva, Switzerland: Commission Electrotechnique Internationale, 2000.

[I72] IEEE Committee, "Bibliography on the Application of Probability Methods in Power System Reliability Evaluation 1971-1977," *IEEE Trans. on Power Apparatus Systems*, pp. vol. PAS-91, Pt. I, pp. 649-660, 1972.

[I78] IEEE Committee, "Bibliography on the Application of Probability Methods in Power System Reliability Evaluation," *IEEE Trans. on Power Appauratus Systems*, pp. vol. PAS-97, n. 6, pp. 2235-2242, Nov.-Dec. 1978.

[I97] IEEE, "IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems," *IEEE Std 493-1997*, 1997.

[L06] J. R. B. Lafraia, *Manual de Confiabilidade, Mantenabilidade e Disponibilidade*. Rio de Janeiro, RJ: Qualitymark Editora Ltda., 2006.

[MB02] P. Massee and M. H. J. Bollen, "Reliability Analysis of Industrial Electricity Supply," in *Probabilistic Methods Applied to Electric Power*

Systems, 1991., Third International Conference on, London, UK, 2002.

[MHS97] A. Montebaur, H. J. Haubrich, and W. Schmitt, "Reliability analysis of industrial power networks considering production plants," in *Electricity Distribution. Part 1: Contributions. CIRED. 14th International Conference and Exhibition on (IEE Conf. Publ. No. 438)*, 1997, pp. Page(s): 4/1 - 4/5 vol.5.

[N96] R A. F. Nunes, *Confiabilidade dos Sistemas Elétricos*.: Apostila da UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá, Maio de 1996.

[PSRS97] Power Systems Reliabilty Subcommittee of the Power Systems Engineering Committee of the IEEE Industry Applications Society, *IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems*. New York, NY, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., December 1997.

[RG70] R. J. Ringlee and S. D. Goode, "On Procedures for Reliability Evaluation of Transmission Systems," *IEEE Trans. on Power Apparatus Systems*, pp. vol. PAS-89, n. 4, pp.527-537, Apr. 1970.

[S99] SAE International, *Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Proceses, SAE JA1011*. Warrendale, PA, USA, 1999.

[S02] W. F. Schimitt, *Confiabilidade de Sistemas de Distribuição: Metodologias Cronológicas e Analíticas - Dissertação de Mestrado*. Itajubá, MG, 2002.

[S05] I. P. Siqueira, *Manutenção centrada na confiabilidade: manual de implementação*. Rio de Janeiro, Brasil: Qualitymark, 2005.

[S05a] I. P. Siqueira, *Manutenção centrada na confiabilidade: manual de implementação*. Rioi de Janeiro, Brasil: Qualitymark, 2005.

[JL03] J. Teng and Y Liu, "A novel ACS based optimum switch relocation

method," vol. 18, no. 1, pp. 113-120, 2003.

[T64] Z. G. Todd, "A probability Method for Transmission and Distribuition Outage Calculations," *IEE Trans. on Power Apparatus Systems*, pp. vol. 83, n.7, pp. 696-701, Jul. 1964.

[W96] A. C. Warren, "Distribution reliability: what is it?," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 2, pp. 32-37, jul./aug. 1996.