



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

METODOLOGIA DE GESTÃO DE ATIVOS PARA CHAVE
SECCIONADORA 15 kV

THIAGO FERREIRA QUERINO

Belo Horizonte, 23 de Fevereiro de 2015

Thiago Ferreira Querino

**METODOLOGIA DE GESTÃO DE ATIVOS PARA CHAVE
SECCIONADORA 15 kV**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Márcio de Andrade

Área de concentração: Energia e Sustentabilidade

Linha de Pesquisa: Sistemas e Equipamentos Térmicos

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2015



Universidade Federal de Minas Gerais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Av. Antonio Carlos, 6627 – Pampulha – 31.270-901- Belo Horizonte – MG
Tel.: +55 31 3499-5145 - Fax.: +55 31 3443-3783
www.demec.ufmg.br - E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

METODOLOGIA DE GESTÃO DE ATIVOS PARA CHAVE
SECCIONADORA 15 kV

THIAGO FERREIRA QUERINO

Dissertação defendida e aprovada em de de pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia Mecânica", na área de concentração de "Energia e Sustentabilidade".

Prof. Dr. Roberto Márcio de Andrade - (Instituição de origem) – Orientador

Prof./Profa. Dr./Dra. (nome) - (Instituição de origem) – Examinador

Prof./Profa. Dr./Dra. (nome) - (Instituição de origem) – Examinador

Prof./Profa. Dr./Dra. (nome) - (Instituição de origem) – Examinador

Prof./Profa. Dr./Dra. (nome) - (Instituição de origem) - Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, Criador de todas as coisas visíveis e invisíveis, que me logrou a capacidade de realizar esse trabalho.

À minha esposa Ketley e à nossa amada Pietra pelo apoio incondicional nas horas de alegria e tristeza, vitórias e derrotas, família que me acompanhará até o dia que Deus quiser.

Aos meus pais, Manoel e Vera, pela formação moral, religiosa e pessoal, além de valores sólidos com os quais pude fundamentar meus caminhos.

À minha irmã Tatiane e sua família (meu afilhado João Gabriel e cunhado Otávio) pelo suporte emocional, espiritual e logístico (!) sempre que se fez necessário.

Ao Sílvio e sua família pela amizade, apoio e companheirismo.

Ao meu orientador, inspirador e incentivador desse trabalho, Prof. Dr. Roberto Márcio, pelas discussões realizadas, conselhos ministrados e conversas ricas em humanidade e conhecimento, sendo a primeira tão rara no ambiente da Academia.

Ao Henrique, que inspirou discussões inestimáveis sobre esse trabalho, além de me possibilitar usar de seus esforços para a conclusão do mesmo.

Aos estimados Benedito e Rafael, pelo auxílio prestado na sequência desse trabalho, realização de experimentos e discussões diversas, além dos momentos de descontração e partilha de conhecimento.

À Companhia Energética de Minas Gerais e à Agência Nacional de Energia Elétrica, por fomentar esta pesquisa.

Aos Srs. Marco Antônio, Haroldo Rezende e Carlo Tenaglia e todos os funcionários do SENAI Euvaldo Lodi pelo apoio e pelas horas liberadas para estudo e pesquisa.

E, enfim, a toda equipe do LabTerm, Flávio, Selson, William, Glenda, Cris, Victor, Miriam e todos aqueles que participaram indiretamente ou diretamente desse trabalho, que, certamente, é fruto daquilo que há de melhor em cada um de nós.

2 Cor 12,9

“Disse o Senhor: Basta-te minha graça, porque é na fraqueza que se revela totalmente a minha força. Portanto, prefiro gloriar-me das minhas fraquezas, para que habite em mim a força de Cristo”.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	08
LISTA DE TABELAS.....	10
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	11
NOMENCLATURA	13
RESUMO	14
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivo Geral	17
1.2 Objetivos Específicos	17
2 O SETOR ELÉTRICO	18
2.1 Subsistema de Transmissão.....	19
2.2 Subsistema de Distribuição.....	19
2.3 Chave Seccionadora.....	20
2.4 Teoria do contato elétrico	25
2.5 Resistência de Constrição.....	27
2.6 Resistência de Filme.....	29
2.7 Modos de Falha em Chaves Seccionadoras	31
3 GESTÃO DE ATIVOS	33
3.1 Gestão da Manutenção	33
3.2 ISO 55000: Especificação para Gestão de Ativos	35
3.3 Tomada de Decisão	39
3.4 Gestão de Ativos em Utilities	40
3.5 Monitoramento de Ativos	41
4 TERMOGRAFIA.....	44
4.1 Termografia Infravermelha	44
4.2 Temperatura	45
4.3 Incerteza de resultados em termografia.....	49

4.4 Fontes de Incerteza em Termografia	51
5 METODOLOGIA	55
5.1 Metodologia Experimental.....	55
5.2 Metodologia Teórica.....	60
5.2.1 Risco Técnico.....	60
5.2.2 Risco Econômico.....	64
6 RESULTADOS	67
6.1 Análise de Termogramas	67
6.2 Resultados experimentais	68
6.3 Resultados teóricos.....	71
6.4 Risco Técnico.....	73
6.4.1 Aplicação do Histórico do Carregamento Elétrico	73
6.4.2 Temperaturas atingidas e Formação de Camada de Óxido	76
6.4.3 Resistência de Contato.....	79
6.4.4 Influência do Aumento de Temperatura na vida útil do equipamento	80
6.4.5 Cálculo da vida útil.....	80
6.5 Risco econômico.....	83
6.6 Aplicação da metodologia no banco de dados.....	84
6.6.1 Seleção dos relatórios de inspeção no banco de dados	84
6.6.2 Risco técnico	85
6.6.3 Risco econômico	91
7 CONCLUSÃO	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	96
ABSTRACT.....	102

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1	Cadeia de Fornecimento de Energia Elétrica	18
FIGURA 2.2	Tipos de Chaves Seccionadoras	22
FIGURA 2.3 (a)	Chave Seccionadora Unipolar 15 kV vista frontal	23
FIGURA 2.3 (b)	Chave Seccionadora Unipolar 15 kV vista superior	23
FIGURA 2.4	Esquema de Formação de a-spots em um contato elétrico	26
FIGURA 2.5	Resistência de Constrição em um contato elétrico	28
FIGURA 4.1	Chave seccionadora 15 kV ligada à fonte geradora de energia	46
FIGURA 4.2	Transferência de calor por condução na chave seccionadora	48
FIGURA 4.3	Fontes de Incerteza em Termografia Infravermelha	51
FIGURA 5.1	Representação Gráfica da Metodologia Empregada no Trabalho	56
FIGURA 5.2	Layout do experimento	57
FIGURA 5.3	Posicionamento dos termopares	57
FIGURA 5.4	Interface do software IMT - Incerteza em Medições Termográficas	59
FIGURA 5.5	Limites de temperatura e elevação de temperatura NBR IEC 60694:2006	63
FIGURA 6.1	Faixas de corrente aplicadas em Chaves Seccionadoras de 15 kV entre 2007-2012 na Cemig-D	67
FIGURA 6.2	Valores de Variação de Temperatura (ΔT) obtidas em inspeções termográficas de chaves seccionadoras entre 2007-2012 na Cemig-D	67
FIGURA 6.3	Temperaturas IMT das chaves degradada e íntegra em comparação com a temperatura limite IEC 60694	68
FIGURA 6.4	Comparação de ΔT_{amb} e Faixas de Tolerância de acordo com NETA (2007)	69
FIGURA 6.5	Comparação de valores de resistência no contato entre as chaves íntegra e degradada	70
FIGURA 6.6	Comparação dos valores de temperatura do modelo teórico e experimental	71
FIGURA 6.7	Histórico de correntes de carga em cada circuito da Subestação Betim 4 no ano de 2014 (A)	74
FIGURA 6.8	Histórico de correntes de carga em cada circuito da Subestação Betim 4 no ano de 2014 (B)	75

FIGURA 6.9	Valores de temperatura máxima atingidos para os respectivos ativos	76
FIGURA 6.10	Valores de Corrente Máxima atingidos para os respectivos ativos	76
FIGURA 6.11	Histogramas dos valores de temperatura e respectivas frequências	78
FIGURA 6.12	Resultados de Camada Formada durante o período de Janeiro-Agosto 2014	78
FIGURA 6.13	Resultados de Resistência de Contato obtida no período	79
FIGURA 6.14	Representação gráfica da influência da temperatura na vida do contato	80
FIGURA 6.15	Faixas Críticas de vida de uma chave seccionadora aplicada em subestações	83
FIGURA 6.16	Comparação dos valores de Temperatura Aparente e calculada por meio do software IMT	86
FIGURA 6.17	Comparação dos valores de Δt_{ref1} e Δt_{ref2}	87
FIGURA 6.18	Comparação dos valores de Δt_{amb1} e Δt_{amb2}	88
FIGURA 6.19	Níveis de criticidade em função da pontuação atribuída	89
FIGURA 6.20	Comparação de Valores de VUR_{min} e $VUR_{máx.}$	90

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1	Efeito da força aplicada no valor da área de condução real em superfícies limpas	28
TABELA 2.2	Valores de Resistividade em função da temperatura	29
TABELA 3.1	Tipos de Ativos	36
TABELA 4.1	Vantagens e Desvantagens da Termografia	44
TABELA 5.1	Resistividade de Túnel em função do estado de degradação para contatos em cobre	61
TABELA 5.2	Valores de Referência de Resistividade Superficial, Camada Formada e Condição.	61
TABELA 6.1	Critérios e ações sugeridas pela NETA –MTS 2013	68
TABELA 6.2	Porcentagem de contribuição das fontes de incerteza para faixas de corrente ensaiadas – Chave Integra	72
TABELA 6.3	Porcentagem de contribuição das fontes de incerteza para faixas de corrente ensaiadas – Chave Degradada	72
TABELA 6.4	Vida útil Remanescente no Pior Cenário para os ativos propostos	81
TABELA 6.5	Vida útil Remanescente no Melhor Cenário para os ativos propostos	81
TABELA 6.6	Classificação das Grandezas em Faixas (Alarme)	83
TABELA 6.7	Classificação quanto à Probabilidade de Perda da Função Principal	83
TABELA 6.8	Impacto Financeiro de uma falha (em R\$)	84
TABELA 6.9	Exposição Financeira calculada para cada equipamento	84
TABELA 6.10	Dados extraídos dos relatórios de inspeção termográfica	84
TABELA 6.11	Resumo de resultados dos modelos de criticidade	91
TABELA 6.12	Resultados de exposição financeira para modelos de criticidade Cemig D e proposto	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BETQ	Subestação Betim 4
BSI	British Standard Institute
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CEMIG – D	CEMIG Distribuição SA
CEMIG-GT	CEMIG Geração e Transmissão SA
CMMS	Sistemas Computadorizados de Controle da Manutenção
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DEC	Duração Equivalente de Interrupção
DEMEC	Departamento de Engenharia Mecânica
DIC	Duração de interrupção individual por unidade consumidora
DICRI	Duração da interrupção individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora
DMIC	Duração Máxima de interrupção contínua por unidade consumidora
DRT	Resolução Digital da Temperatura
ELETROBRÁS	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
EQ	Equação
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção
FIC	Frequência de Interrupção individual por unidade consumidora
FIG	Figura
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
IAM	Institute of Asset Management
IEC	International Electrotechnical Commission – Comissão Internacional de Eletrotécnica
KPI	Key Performance Indicators – Indicadores-Chave de Desempenho
ISO	International Organization for Standardization – Organização Internacional para Padronização

IMT	Incerteza de Medição Termográfica
LCC	Life-cycle cost
ME	Mínimo erro
MMC	Método de Monte Carlo
MSR	Resolução Espacial de Medição
UM	Uniformidade da Medição
NAMS	National Asset Management Strategy Comitee
NBR	Norma Brasileira
NETA	International Electrical Testing Association
NGE	Erro gerado por ruído
NOS	Operador Nacional do Sistema
O&M	Operação & Manutenção
PAS 55	Publicly Avaliable Specification 55 Especificação Disponível ao Público 55
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PIF	Provável Indicativo de Falha
PPGMEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PP	Perda de Potência
RE	Repetitividade
RI	Risco Imediato
SE	Subestação de Energia
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SMC	Simulação de Monte Carlo
TAB	Tabela
TR	Technical Report Relatório Técnico
TS	Technical Specification
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
VIM	Vocabulário Internacional Metrológico
VUR	Vida Útil Remanescente

NOMENCLATURA

a	Raio elementar	μm
A_{sup}	Área superficial	m^2
F	Força	N
H	Dureza	MPa
h	Coefficiente total de transferência de calor	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
h_{conv}	Coefficiente convectivo médio	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
h_r	Coefficiente de transferência de calor por radiação	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
I	Corrente Elétrica	A
k	Constante de Boltzmann	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{K}^{-1}$
n_k	Constante adimensional	-
q_{cond}	Taxa de transferência de calor por condução para os cabos	W
q_{conv}	Taxa de dissipação de calor por convecção	W
q_{ger}	Taxa de geração de calor por efeito Joule	W
q_{rad}	Taxa de dissipação de calor por radiação	W
R	Resistência Elétrica	Ω
R_c	Resistência de Constricção	$\mu\Omega$
R_f	Resistência de Filme	$\mu\Omega$
R_{rc}	Resistência de Contato	$\mu\Omega$
s	Espessura da camada de óxido final	$\hat{\text{A}}$
s_a	Área de contato total	μm^2
s_o	Espessura da camada de óxido inicial	$\hat{\text{A}}$
T	Temperatura em algum ponto genérico	$^{\circ}\text{C}$
t	Coefficiente de Student	-
t	Tempo para oxidação do contato	h
T_{∞}	Temperatura Ambiente	$^{\circ}\text{C}$
T_{atm}	Temperatura Atmosférica	$^{\circ}\text{C}$
T_c	Temperatura do contato	K
$u(x)$	Incerteza padrão da variável x	-
$U(x)$	Incerteza expandida da variável x	-
$U_{95\%}(x)$	Incerteza expandida da variável x com intervalo de abrangência de 95%	-
$u_c(x)$	Incerteza combinada da variável x	-
w	Energia de ativação	eV
ν_{ef}	Número de graus de liberdade efetivos	-
ΔT_{amb}	Diferença entre temperatura ambiente e temperatura do objeto	$^{\circ}\text{C}$
ΔT_{ref}	Diferença entre temperatura do objeto e temperatura de referência	$^{\circ}\text{C}$
ξ	Coefficiente de correção em função do grau de acabamento da superfície	-
ϵ	Emissividade	-
ρ	Resistividade do material	$\Omega.\text{m}$
σ_o	Resistividade de superfície	$\Omega.\text{m}^2$

RESUMO

Face ao ambiente de negócio do setor elétrico brasileiro, cada vez mais hostil à ineficiência operacional (causa de aumento de custos) e à gestão inadequada da qualidade e quantidade de informação fornecida, as concessionárias de energia elétrica sentem a necessidade de aperfeiçoar políticas de operação e manutenção, visando a redução de custos e maximização da disponibilidade e confiabilidade de seus equipamentos, princípios esses pregados pela Gestão de Ativos. Com a finalidade de implantar tais princípios, foi proposta, nesse trabalho, uma metodologia de gestão de ativos para o equipamento chave seccionadora, partindo do modo de falha “aquecimento no contato”, usando modelo matemático de aquecimento e vida útil do contato, a partir da medição de temperatura via inspeção termográfica, com parâmetros metrológicos associados, objetivando inferir o aumento da camada de óxido, além da determinação do risco técnico do ativo a partir do modo de falha supracitado associado ao risco de perda da função do equipamento. Foi caracterizada a influência do fenômeno de incremento de temperatura na formação da camada de óxido na superfície de contato, com aumento de temperatura na ordem de 30°C, tornando a degradação do componente mais severa, minimizando sua expectativa de vida útil e aumentando o risco de uma falha catastrófica. Tal fato leva a um risco econômico cujo valor de exposição financeira é negativo, em que postergar a intervenção é menos vantajoso que realizá-la, muito em função da importância do referido ativo em atividades de manobra e operação dentro do sistema elétrico de potência. A metodologia apresentada foi aplicada em 4 ativos da distribuidora, usando dados de inspeções termográficas, obtendo resultados de risco técnico, que comparados com outros critérios de criticidade apresentados na literatura, demonstrou uma assertividade mínima de 75 %, sendo que tal metodologia é baseada em critérios fundamentados em bases científica e metrológica.

Palavras-chave: *Gestão de Ativos, Chave Seccionadora, Termografia, Risco Técnico, Risco Econômico.*

1. INTRODUÇÃO

Empresas concessionárias de distribuição de eletricidade, basicamente, têm como missão disponibilizar recursos para o transporte e entrega da energia de fontes geradoras até os pontos de consumo. Portanto, não se tratam de empresas de produção; seus lucros advêm do tamanho do parque de ativos disponibilizado e dos custos que praticam para mantê-los, entregando os níveis de serviço regulamentados. (DINIZ, 2013).

A regulação do setor elétrico é feita pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) que, desde 1997, estabelece ciclos de revisão tarifária periódica. através dos contratos com as concessionárias, a fim de avaliar o equilíbrio econômico-financeiro da concessão. Atualmente, está em vigência o 3º Ciclo de Revisões Tarifárias Periódicas, que impele à questões típicas do setor privado, como redução de custos, aumento do desempenho da cadeia produtiva e melhoria dos indicadores relacionados à qualidade do serviço prestado.

Tratando-se da redução e custos, um dos setores mais questionados é a manutenção, por tratar-se de um setor de apoio à operação produtiva que, em princípio, não agrega valor ao produto final. Contudo, sob a perspectiva do setor elétrico, a manutenção exerce papel relevante para o atingimento dos indicadores propostos pelo órgão regulamentador.

Visando aumentar a eficiência operacional do setor elétrico, várias técnicas e metodologias vêm sendo implantadas nos últimos anos, com especial destaque para a termografia, que objetiva estimar a temperatura de um corpo a partir da radiação emitida por ele,

Entretanto, essa técnica robusta tem sido usada de modo eminentemente qualitativo nos mais variados segmentos, o que se constitui um desperdício de recursos financeiros, técnicos e de tempo. O caráter quantitativo é pouco reportado na literatura, contribuindo para a subutilização da técnica. (OHLSSON, OLOFSSON 2014); (BAGAVATHIAPAN, 2013); (CHRZANOWSKI, 2001); (FERRERO, SALICONE 2006). Desconhecer ou ignorar os aspectos quantitativos envolvidos em um sistema de medição tão complexo é um forte indício de geração de resultados de medição sem qualquer confiabilidade associada, bem como a ocorrência de tomada de decisão baseada em informações que não condizem com a realidade (ou parte dela), que conduzirão à perda de tempo e recursos através de decisões errôneas e/ou precipitadas.

O uso da termografia quantitativa para análise do estado de conservação em obras de arte foi abordada por TAVARES (2006), onde a autora enfatiza a importância da determinação da incerteza de medição da temperatura para validação da técnica numa aplicação tão específica. Além disso, é ressaltada também a importância do uso adequado de valores de emissividade, a fim de fornecer dados confiáveis que não levem a falsos alarmes de irregularidades.

No trabalho de WHITENTON (2009), a termografia quantitativa é usada para estimar a temperatura da ferramenta de corte e da peça, durante o processo de fabricação mecânica usinagem, onde o material é retirado com desprendimento de resíduos metálicos conhecidos como cavacos. Nesse trabalho, o autor identifica cinco fontes de incerteza, destacando a emissividade como fonte de incerteza dominante frente a outras fontes.

LANE et al. (2013) apresentaram um estudo comparativo para avaliação de incertezas em termografia aplicada a processos de usinagem em altas velocidades com uso de método analítico e numérico, usando o método de Monte Carlo para estimar as fontes de incerteza de um ponto objeto, devido à alteração de valores de emissividade entre a ferramenta de corte, a peça usinada e a peça metálica desprendida. Observou-se que, a fonte predominante de incerteza era a emissividade, principalmente, devido ao fato de tal grandeza variar em função do tempo e da posição do ponto objeto.

O emprego da termografia como técnica de monitoramento de ativos no setor elétrico deve ser feito observando-se a criticidade do ativo e a compreensão dos mecanismos de transferência de calor atuantes, de modo a prever um estado limite quanto à vida útil do equipamento por meio de modelos matemáticos. (ABU-ELANIEN, SALAMA 2014)

DOROVATOVSKI e LIIK (2005) utilizaram a técnica no diagnóstico de emendas e conectores. Apesar de abordarem o problema quantitativamente, utilizando valores absolutos de temperatura na tomada de decisão, ainda assim, baseiam seu diagnóstico em comparações entre os objetos, não fazendo uso de modelos matemáticos e considerações metrológicas relacionadas à identificação e quantificação de fontes de incerteza.

BRAUNOVIC et al (2009) aplicaram a termografia para monitoramento da condição de conexões elétricas parafusadas, com o auxílio de um modelo auto-regressivo integrado de média móvel, que tinha a função de determinar a vida útil restante da conexão em função da temperatura de trabalho. Apesar dos resultados obtidos indicarem ganhos em termos de confiabilidade, há de se considerar que o uso desse modelo depende de um fornecimento contínuo de dados para alimentá-lo.

Deste modo, como aplicação de termografia quantitativa no setor elétrico, neste trabalho, será inicialmente usado o modelo de TEIXEIRA (2012), capaz de associar ao valor absoluto de temperatura, a sua incerteza, baseada nos métodos tradicionais (GUM) ou em simulações de Monte Carlo (SMC). Para diagnosticar o estado do contato da chave seccionadora, será usada a medição de temperatura, da qual foi extraído um modelo que descreve o balanço de energia, visando estimar a resistência elétrica de contato, que, segundo modelo proposto pela IEC TR 60943(2009), pode ser classificada de acordo com valores de vida útil ao longo de um período de tempo, em função do aumento da resistência de contato, consequência da progressiva formação de camada de óxido no contato. Com os valores de temperatura e carregamento, pode-se inferir a vida útil do contato devido á formação da camada de óxido, e, conseqüentemente, o aumento da resistência elétrica de contato.

Os resultados serão analisados sob os princípios de gestão de ativos, conforme abordados pela ISO 55000 (2014), balizados pela regulamentação do setor elétrico (ANEEL, 2008).

1.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma metodologia teórico-experimental baseada nas melhores práticas de Gestão de Ativos, para manutenção do ativo Chave Seccionadora, minimizando os riscos técnico e econômico existentes.

1.2 Objetivos Específicos

1. **Realizar análise do banco de dados de relatórios de inspeções termográficas de chaves seccionadoras**, a fim de identificar modos de falha, graus de criticidade atingidos, valores de temperatura medidos, dentre outros.
2. **Realizar experimento com Chave Seccionadora**, analisando funcionalidade, confiabilidade e integridade do ativo;
3. **Desenvolver modelo matemático da Chave Seccionadora**, de modo a entender o processo de transferência de calor durante a operação do ativo;
4. **Estimar risco técnico envolvido no manuseio do ativo Chave Seccionadora;**
5. **Estimar risco econômico** na operação da Chave Seccionadora;
6. **Aplicar modelos de risco técnico e econômico em ativos similares**, de modo a consolidar a metodologia proposta.

2. O SETOR ELÉTRICO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é geralmente dividido em sistema de geração, de transmissão e de distribuição, sendo que, no Brasil, a partir de 2005, cada divisão passou a ser de responsabilidade de uma empresa específica. Na geração de energia elétrica uma tensão alternada é produzida, a qual é expressa por uma onda senoidal, com frequência fixa e amplitude que varia conforme a modalidade do atendimento em baixa, média ou alta tensão. Essa onda senoidal propaga-se pelo sistema elétrico mantendo a frequência constante e modificando a amplitude, à medida que trafega por transformadores. Os consumidores conectam-se ao sistema elétrico e recebem o produto e o serviço de energia elétrica. (FIGUEIREDO, 2014).

A FIG. 2.1 mostra a cadeia de fornecimento de energia elétrica da geração até o consumo, tendo em vista que, a geração independe do método de geração de energia adotado (hidrelétrica, nuclear, eólica):

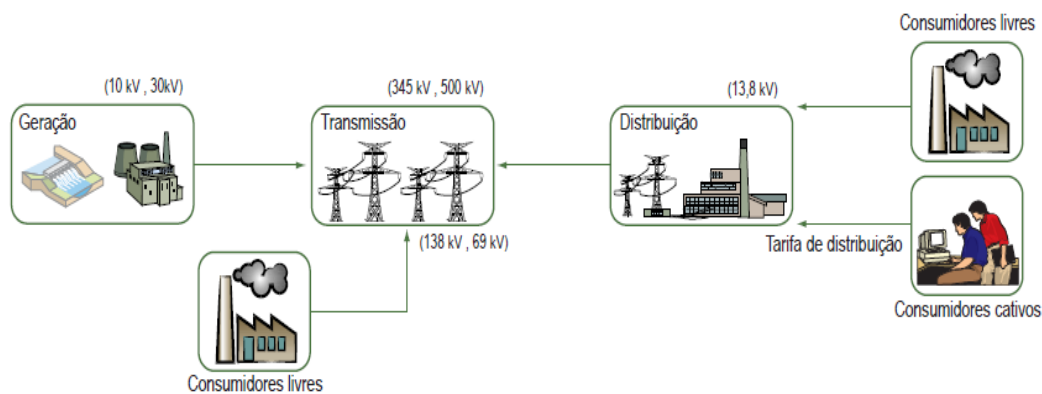


FIGURA 2.1 - Cadeia de Fornecimento de Energia Elétrica

FONTE - ANEEL (2008)

A atividade de transmissão de energia elétrica convive com o efeito Joule, que consiste na perda de potência (PP) devida à dissipação de calor que ocorre na passagem de uma dada corrente elétrica I por um corpo de resistência R . Essa potência é expressa por:

$$PP = R \cdot I^2 \quad (2.1)$$

É graças ao efeito Joule que a tensão deve ser aumentada na saída da geração para a transmissão, de modo que possa ser transportada por longas distâncias sem maiores prejuízos quanto à quantidade de energia transportada, havendo, contudo aquecimento do condutor de energia elétrica.

Nesse trabalho, em particular, são estudados as características e dados pertinentes à empresa Cemig (Companhia Energética de Minas Gerais), *holding* de controle estatal, que é constituída das empresas Cemig Distribuição S.A e Cemig Geração e Transmissão S.A.

A Cemig Distribuição S.A. é a maior distribuidora de energia elétrica do Brasil em extensão de rede, contando com, aproximadamente, 454.000 km de redes de distribuição e 17.000 km de linhas de distribuição. Já a Cemig Geração e Transmissão S.A. possui em operação 63 usinas, sendo 58 hidrelétricas, duas termelétricas e três eólicas, com 6.746 MW de capacidade instalada. Na área de transmissão, opera uma rede de 7.500 km.

2.1 Subsistema de Transmissão

Após a geração, a energia elétrica é transmitida através das linhas, formadas por redes de cabos aéreos, revestidos por camadas isolantes e fixados em grandes torres de aço. Outros elementos importantes das redes de transmissão são os isolantes de vidro ou porcelana, que sustentam os cabos e impedem descargas elétricas durante o trajeto.

Neste processo, a eletricidade passa por diversas subestações, onde aparelhos transformadores aumentam ou diminuem sua voltagem, alterando a tensão elétrica. (ELETROBRÁS, 2014). No início do percurso, os transformadores elevam a tensão, evitando a perda excessiva de energia. Quando a eletricidade chega perto dos centros de consumo, as subestações diminuem a tensão elétrica, para que ela possa chegar às residências, empresas e indústrias.

2.2 Subsistema de Distribuição

O sistema de distribuição conecta eletricamente a estrutura de transmissão às unidades consumidoras. Nas subestações de distribuição, o objetivo é reduzir a tensão dos grandes blocos de energia, que chegam através das linhas de distribuição, para valores médios de tensão e distribuí-los aos pontos de consumo através de uma malha de condutores bastante ramificada, ao longo de ruas e avenidas.

Das subestações de distribuição saem em média tensão, os chamados alimentadores, que podem ser entendidos como as subdivisões das redes de distribuição. Os alimentadores são compostos dos condutores, suas emendas e conexões, dos transformadores de distribuição, dos postes e isoladores, de equipamentos de proteção (fusíveis), de manobra (religadores e chaves de manobra) e, em alguns pontos, também existem equipamentos para controle de tensão (capacitores e reguladores). A parte final do sistema de distribuição constitui-se da chamada Rede Secundária, onde os níveis de tensão foram reduzidos ainda mais – para fins de segurança às pessoas – pelos transformadores de distribuição, e conectados às casas, através de ramais de ligação. Incluem-se, também, os equipamentos de medição de consumo de energia, popularmente denominados como “padrão” ou “relógio”. (DINIZ, 2013).

2.3 Chave Seccionadora

Um dos componentes mais importantes de uma Subestação é a Chave Seccionadora, que é um dispositivo que pode operar com ou sem carga, cuja função é interromper a passagem de corrente em um determinado ponto ou bloquear parte do circuito para manutenção e/ou em casos especiais (segurança, por exemplo)

A chave seccionadora é um dispositivo mecânico de manobra capaz de abrir e fechar o circuito quando uma corrente de intensidade desprezível é interrompida ou restabelecida ou quando não ocorre variação de tensão significativa através dos terminais de cada polo do seccionador. É também capaz de conduzir correntes sob condições normais do circuito e, durante o tempo especificado, correntes sob condições anormais, tais como curto-circuito. (NBR IEC 60694,2006)

A FIG. 2.2 representa os tipos de chaves seccionadoras existentes em Sistemas Elétricos de Potência, descritos logo a seguir:

- Secionador Monopolar Tipo Faca: Secionador de operação vertical, constituído por duas colunas isolantes fixas, sendo uma o suporte do contato fixo e a outra suporte da articulação do contato móvel (faca), provida de argola para operação por vara de manobra, dispondo normalmente de trava de segurança.
- Secionador de Abertura Lateral: Secionador de operação lateral constituído por duas colunas isolantes, sendo uma, suporte do contato fixo e a outra rotativa, suporte do contato móvel e pela qual se faz a operação da chave, devendo o terminal da coluna móvel permitir sua rotação.

- **Secionador de Dupla Abertura Lateral:** Secionador de operação lateral e corte duplo, constituído por três colunas isolantes, sendo duas fixas externas, suportes dos contatos fixos e uma coluna central rotativa, suporte do contato móvel, que, na posição aberta, divide a distância de abertura em duas partes.
- **Secionador de Abertura Vertical:** Secionador de operação vertical constituído por três colunas isolantes, sendo duas fixas, suportes dos contatos fixo e móvel e uma rotativa que aciona o contato móvel, sendo que, na posição aberta, o contato móvel (lâmina) encontra-se na posição vertical e, quando se fecha, passa a posição horizontal.
- **Secionador Abertura Vertical Reversa:** Secionador de operação vertical e suportes independentes, constituído por um contato fixo superior suportado por uma coluna isolante fixa ou barramento e o conjunto do contato móvel (lâmina) e seu suporte, constituído por uma coluna fixa que tem a função de suporte e uma coluna rotativa que aciona o contato móvel.

Nesse trabalho, o objeto de estudo é o seccionador tipo faca, descrito anteriormente. Tal equipamento, ainda de acordo com a NBR IEC 60694 (2006), é composto dos seguintes itens, conforme o descritivo abaixo e a FIG. 2.3 (a) e FIG. 2.3 (b):

1. **Base** - Parte da chave onde são fixados os corpos isolantes e que serve também para fixação mecânica da chave na estrutura;
2. **Trava de Segurança** - Dispositivo mecânico que permite o travamento da chave na posição fechada, acionado apenas pelo olhal, de modo a impedir uma abertura acidental da chave;
3. **Olhal** - Dispositivo acoplado à lâmina que permite a introdução do cabeçote da vara de manobra, de modo a permitir a operação da chave (tanto abertura quanto fechamento);
4. **Gancho** - Dispositivo incorporado na parte superior do contato fixo, de maneira a possibilitar o acoplamento da ferramenta de abertura sob carga, servindo também como guia mecânico para a lâmina;
5. **Lâmina de contato móvel** - Elemento condutor móvel que, devido ao seu movimento relativo durante uma operação da chave, acopla e desacopla os contatos, fechando ou abrindo o circuito;
6. **Guia da Lâmina** - Dispositivo incorporado ao terminal de contato fixo da chave seccionadora de faca unipolar que direciona as lâminas da faca na operação de fechamento;

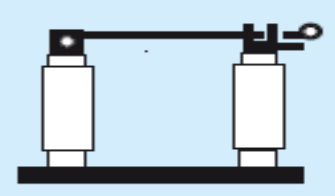
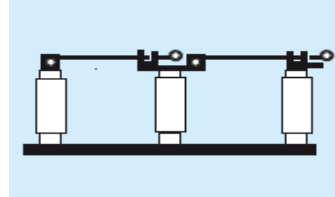
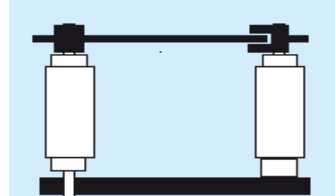
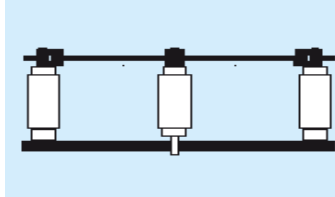
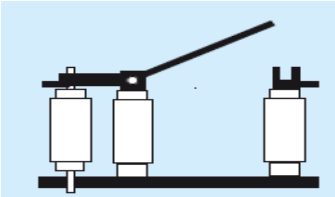
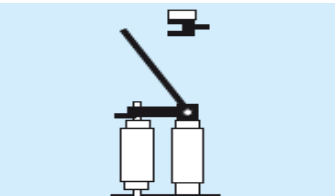
REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA	DESCRIÇÃO
	Secionador Monopolar Tipo Faca
	Secionador Monopolar Tipo Faca em Tandem (GB + 2TD)
	Secionador de Abertura Lateral
	Secionador de Dupla Abertura Lateral
	Secionador de Abertura Vertical
	Secionador Abertura Vertical Reversa

FIGURA 2.2 - Tipos de Chaves Seccionadoras

FONTE - Catálogo WEG Seccionadoras para Alta Tensão (adaptado)

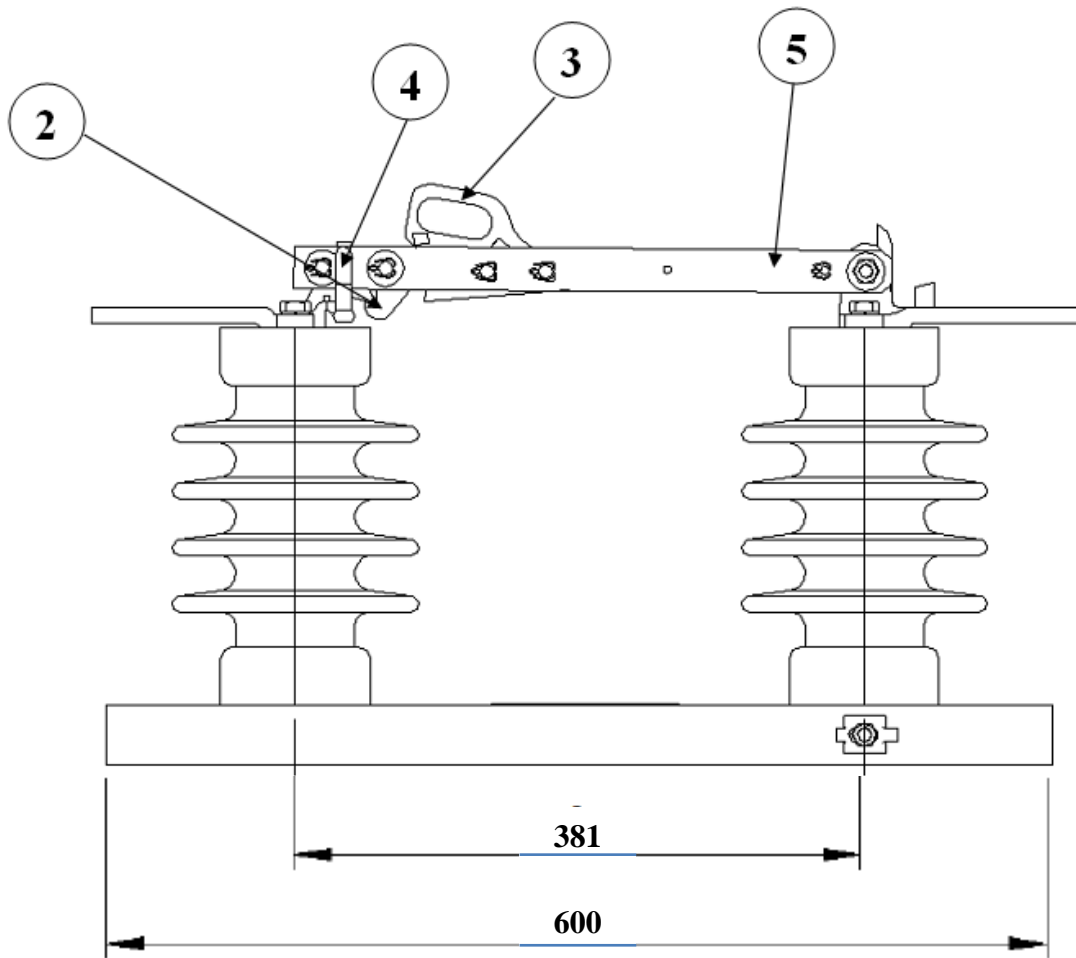


FIGURA 2.3 (a) - Chave Seccionadora Unipolar 15 kV vista frontal

FONTE - Catálogo DELMAR Mod.: DP

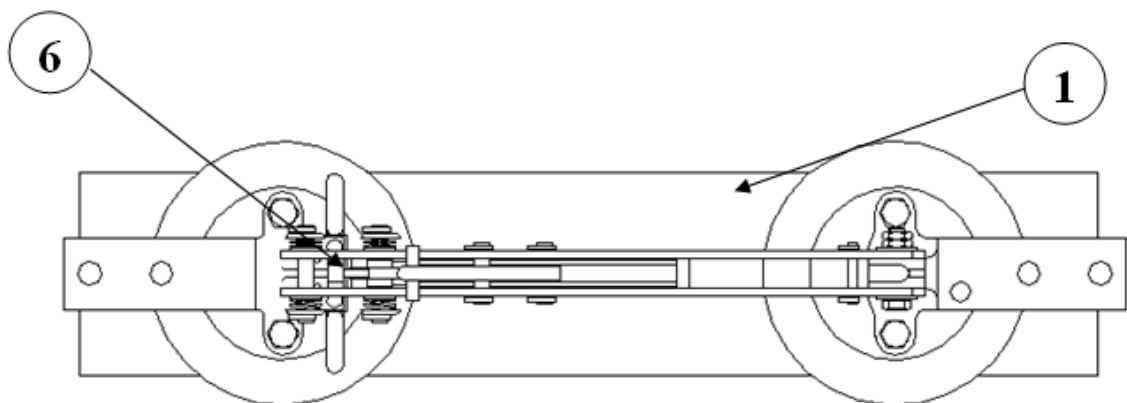


FIGURA 2.3 (b) - Chave Seccionadora Unipolar 15 kV vista superior

FONTE - Catálogo DELMAR Mod.: DP

O estudo de chaves seccionadoras, detecção de falhas de operação e sua correta alocação no Sistema Elétrico de Potência é alvo de alguns estudos, conforme descrito a seguir:

- No trabalho de DE SOUZA JR et al (2012), considera-se uma conexão em boas condições aquela que apresenta a menor resistência possível à passagem de corrente, sendo idealmente um curto-circuito com impedância zero. A melhor maneira de avaliar a qualidade de uma conexão é medir sua resistência, mas isso é trabalhoso e exige equipamentos e treinamento específico. Normalmente utiliza-se uma grandeza correlacionada: a temperatura. Como a dissipação de potência em uma conexão é diretamente proporcional à sua resistência, quanto maior sua variação de temperatura, maior é sua resistência. Contudo, a temperatura também é influenciada por outros fatores como a corrente que atravessa o circuito, tipo do material e temperatura ambiente.

- LAMBERT et al (2008) descreveu uma sistemática de monitoramento da operação de abertura e fechamento de seccionadoras tripolares de 345 kV baseada em algoritmos de Redes Neurais. Nesse estudo, foram simuladas operações de fechamento e abertura de chaves seccionadoras, com o registro das curvas de corrente, para criação de padrões de funcionamento que seriam comparados com o algoritmo baseado em redes neurais. Entretanto o foco do trabalho era na identificação de uma falha em potencial, sem entender a relação causa-efeito existente.

- SOUZA (2002) desenvolveu uma metodologia para dar suporte para a determinação de quando efetuar manutenção numa chave seccionadora de alta tensão, fazendo análise das curvas da corrente do motor de acionamento verificando suas variações, em função dos problemas que possam ocorrer, determinando se esta análise poderá trazer informações importantes para a manutenção.

- MARDEGAN (2013) cita uma parada de uma planta química no Brasil devido à falha no fechamento de um polo de uma chave seccionadora de 138 kV. Essa falha ocorreu devido a um problema no alinhamento da lâmina da chave seccionadora, gerando arco elétrico na fase correspondente.

- DE ASSIS et al (2012) trabalha com uma abordagem multiobjetiva para alocação de chaves seccionadoras afirmando que, uma alternativa para melhorar a confiabilidade e minimizar a energia não fornecida é através da alocação de chaves na rede. A instalação de chaves seccionadoras (normalmente fechadas - NF) minimiza o tempo de interrupção, isolando a área da rede à montante da falha. Chaves seccionadoras juntamente

com as de manobras (normalmente abertas - NA) são usadas para realizar a transferência de carga à jusante da falha, utilizando alimentadores adjacentes durante o processo de recuperação. Assim, uma alocação cuidadosa pode resultar em ganhos significativos na confiabilidade do sistema.

- De acordo com DE FIGUEIREDO (1986), além de suas funções típicas, chaves seccionadoras funcionam sob condições bem mais exigentes que as de projeto, sendo substituídas de disjuntores, em manobras envolvendo linhas de transmissão, transformadores e interligação de sistemas elétricos, devendo, portanto, envolver procedimentos de máxima segurança.

- No trabalho de COLAÇO et al (2010) é desenvolvido um sistema de monitoramento de chaves seccionadoras semi-pantográficas em redes de 230 kV e 500 kV com uso de imagens digitais e algoritmo baseado em redes neurais. Contudo (tratando-se de um sistema de medição) não são citadas fontes de incerteza associadas ao resultado de medição.

Embora existam muitos trabalhos na literatura sobre chaves seccionadoras, não foram encontrados trabalhos que tratam de modelos matemáticos que associem a vida útil de uma chave seccionadora a partir de um modo de falha e uma grandeza mensurável, em que, além de associar parâmetros metrológicos, atribuem-se níveis de criticidade de acordo com princípios de confiabilidade - caracterizando o risco técnico - além de inferir os valores de exposição financeira a esse risco. (DREIFUERST, 2012);(MENSAH,2011); LINDQUIST *et al* (2005).

2.4 Teoria do Contato Elétrico

De acordo com a IEC TR 60643 (2009), a resistência de contato é definida como a resistência à circulação de corrente elétrica, através da interface de contato entre dois materiais condutores. Nessa região onde a corrente elétrica passa ocorre aquecimento por efeito Joule, que é perda de energia por dissipação de calor; além disso, ocorre também o envelhecimento do contato devido à reação química do material do contato com o meio circundante.

Quando tais materiais estabelecem entre si tal resistência de contato, não ocorre um perfeito assentamento entre as faces dos contatos, em função do grau de rugosidade existente em qualquer material manufaturado, independente do processo utilizado. Os pontos

onde esses dois materiais se tocam são chamados de contatos elementares (ou *a-spots*), representados através do esquema da FIG. 2.4:

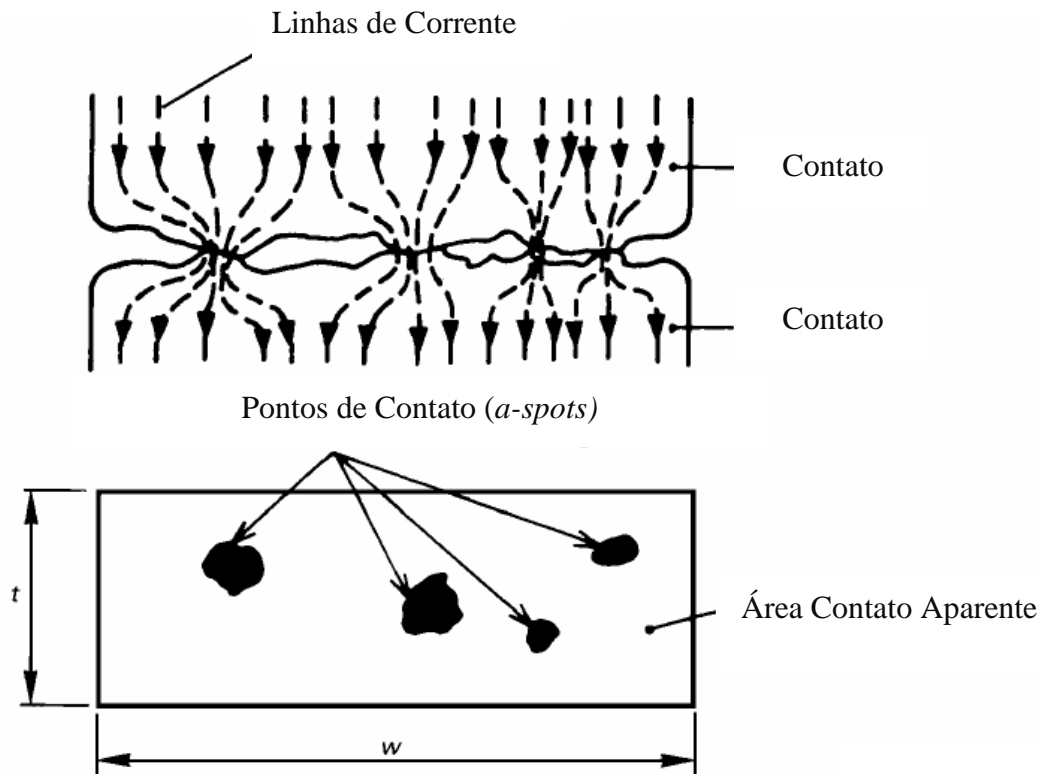


FIGURA 2.4 - Esquema de Formação de *a-spots* em um contato elétrico

FONTE - IEC TR 60943:2009 (adaptado)

A presença dos *a-spots* tem consequência direta na formação de vazios no contato, onde o oxigênio e outros agentes corrosivos podem se infiltrar e reagir com o metal exposto.

Pode-se assumir que a área de seção transversal efetiva é igual à área de contato total S_a , produto entre os n contatos elementares existentes e as respectivas áreas (considerando sua seção transversal redonda). Assim sendo, pode-se calcular S_a através da EQ. (2.2):

$$S_a = n\pi a^2 \quad (2.2)$$

O valor de S_a depende do valor da força F aplicada que pressiona os contatos, bem como da dureza superficial H do material que constitui os contatos, além do acabamento

superficial. Partindo do princípio que a pressão exercida nos contatos é igual à dureza do material tem-se:

$$\frac{F}{S_a} = \xi H \quad (2.3)$$

Contudo, de acordo com a IEC TR 60643 (2009) a EQ. (2.3) só deve ser aplicada para $F \geq 50$ N.

De tal forma, podem-se igualar as EQ. (2.2) e (2.3), obtendo:

$$S_a = n\pi a^2 = \frac{F}{\xi H}$$

Onde ξ é um coeficiente de correção em função do grau de acabamento da superfície: se a superfície for extremamente polida, a resistência de contato tende a diminuir por causa da redução dos *a-spots* e a razão entre força e dureza tende a unidade. Usualmente adotam-se valores oscilando entre 0,3 (contatos com desgaste) e 0,6 (contatos novos).

Expressando as demais variáveis em função do raio elementar a é deduzida uma fórmula para o cálculo de tal grandeza:

$$a = \sqrt{\frac{F}{n\pi H \xi}} \quad (2.4)$$

O número de contatos elementares é dado por

$$n = n_k H^{0,625} F^{0,2} \quad (2.5)$$

Onde $n_k = 2,5 \times 10^{-5}$ (unidades no SI).

A resistência de contato é composta de duas parcelas, que são respectivamente a Resistência de Constrição e a Resistência de Filme. Ambos os conceitos são definidos a seguir, bem como as equações matemáticas envolvidas, assim como as variáveis que compõem tais equações.

2.5 Resistência de Constrição

A Resistência de Constrição trata-se da resistência elétrica obtida da restrição imposta pelo exercício do esforço mecânico existente entre os contatos, facilitando a passagem da corrente elétrica por esse ponto. Esse fenômeno é representado na FIG. 2.5:

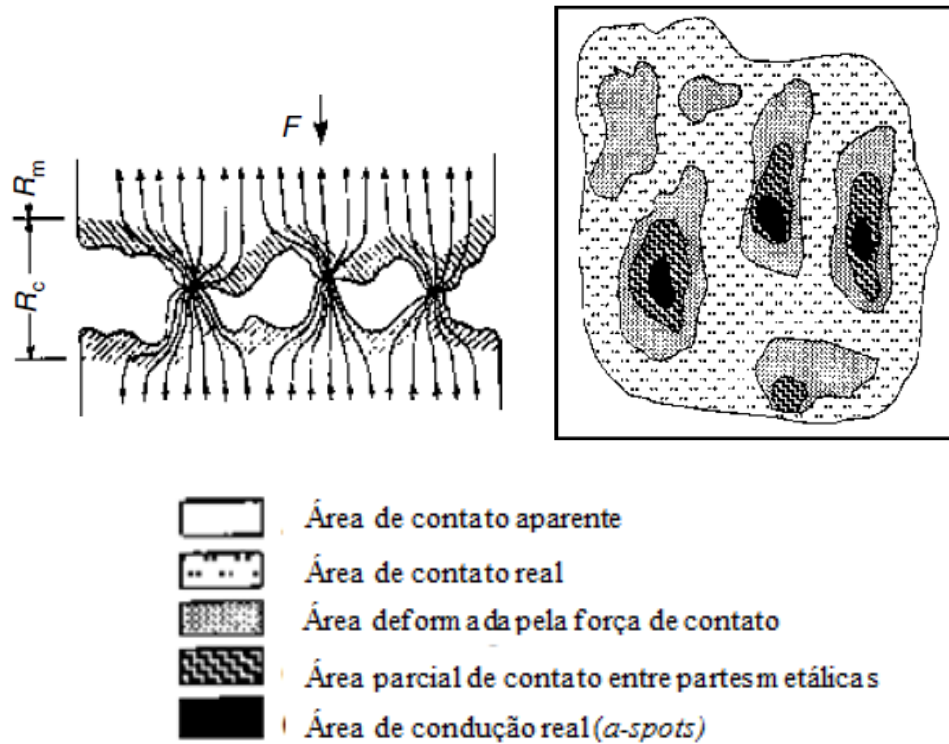


FIGURA 2.5 - Resistência de Constrição em um contato elétrico

FONTE - Braunovic *et al* 2006 (adaptado)

BRAUNOVIC *et al.* (2006) atestam que a área de condução real (que corresponde ao valor de S_a) geralmente é menos de 1% da área de contato aparente. A razão entre as áreas de contato real e contato aparente em função de vários valores de força é expressa na TAB. (2.1) para cobre recozido:

TABELA 2.1

Efeito da força aplicada no valor da área de condução real em superfícies limpas

Material/Carga Aplicada	Área de condução real/Área de contato aparente (%)		
	10 N	100 N	1000 N
Cobre Recozido	0,008	0,08	0,8

FONTE - BRAUNOVIC *et al* (2006)

O valor da Resistência de Constrição para n contatos elementares é expresso em função da resistividade do material ρ e do raio elementar a , donde se obtém:

$$R_c = \frac{\rho}{2na} \quad (2.6)$$

O valor da resistividade ρ é dado em função do material aplicado no contato, que pode variar em função da temperatura ambiente. Para o cobre recozido os valores de resistividade estão descritos na TAB. (2.2):

TABELA 2.2

Valores de Resistividade em função da temperatura

Temperatura (°C)	Resistividade ($10^{-8} \Omega.m$)
0	1,5881
20	1,7241
36,85	1,838
60	1,995

FONTE: IEC TR 60643 (2009)

Os valores do número de contatos elementares n e o raio do contato elementar a são calculados a partir das EQ. (2.4) e (2.5).

2.6 Resistência de Filme

Os pontos onde existem contatos elementares geralmente não têm uma interface livre de corrosão. Na verdade, em qualquer superfície de metal puro, inicialmente torna-se coberta com uma camada de oxigênio molecular, levando após algum tempo à formação de uma camada homogênea de óxido de poucos nanômetros de espessura. Se esta camada for suficientemente compacta e uniforme, de modo a proteger o metal, a oxidação pode parar e o metal sofre passivação, fenômeno de típica ocorrência em materiais como o alumínio e o aço inoxidável a temperaturas normais.

Para outros metais (cobre, níquel e estanho, na presença de oxigênio; prata na presença de gases sulfurosos), a formação da primeira camada de produto da reação produzido por oxidação ou corrosão diminui-se a reação subsequente, que, no entanto continua, mas com velocidades progressivamente menores.

A formação de uma determinada camada de óxido de espessura s pode ser alterada em função do tempo t e temperatura termodinâmica T . Segundo a IEC TR 60643 (2009) esse princípio é retratado por meio da EQ. (2.7):

$$s = X \cdot \exp\left(-\frac{w}{2kT}\right) \cdot \sqrt{t} \quad (2.7)$$

Onde w é a energia de ativação (eV), X é uma constante e k é a constante de Boltzmann ($1,3806488 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$)

A resistividade de túnel σ_o (ou resistividade de superfície) é a grandeza utilizada para caracterizar as propriedades condutoras da camada de óxido formada, sendo expressa em Ωm^2 , onde tal resistividade depende da natureza do óxido (ou outros produtos de reação com a atmosfera) e a sua espessura.

SIMMONS (1963) elaborou um trabalho onde o valor da resistividade superficial foi calculado em função da camada de óxido formada em uma fina película isolante, onde a relação entre os valores da resistividade superficial e da camada de óxido formada apresentaram comportamento próximo de uma reta ascendente.

Os valores de resistividade de túnel em função do efeito de constricção foram estudados por NAKAMURA e MINOWA (1989), onde os autores usaram de análise por elementos finitos para simular o comportamento da condutância na região de interface do contato, obtendo aumento do valor da resistividade superficial com sensível redução do efeito de constricção.

Ainda de acordo com a IEC TR 60643 (2009), se a camada de óxido abrange a área de contato real S_a de modo uniforme, a resistência R_f aparente entre as duas faces será expressa pela EQ. (2.8):

$$R_f = \frac{\sigma_o}{S_a} \quad (2.8)$$

Como o valor de S_a é calculado pela EQ. (2.2), pode-se reescrever a EQ. (2.8) como a seguir:

$$R_f = \frac{\sigma_o}{n\pi a^2}$$

A Resistência de Contato pode ser expressa como a soma algébrica entre as Resistências de Constricção e de Filme, de acordo com a IEC TR 60643 (2009):

$$R_{rc} = R_c + R_f \quad (2.9)$$

$$R_{rc} = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi\xi}{n_k}} H^{0,1875} F^{-0,6} + \sigma_0 \xi H F^{-1} \quad (2.9)$$

Substituindo os valores das EQ (2.6) e (2.8) na EQ. (2.9) obtém-se:

Assume-se um valor de $\xi=0,45$ para simplificação matemática.

2.7 Modos de Falha em Chaves Seccionadoras

O termo “falha” diz respeito ao término da capacidade de um item desempenhar a função requerida, sendo que essa última é definida como função ou combinação de funções de um item que são consideradas necessárias para prover um dado serviço. (NBR 5462 1994)

O modo de falha é definido por ALVES et al (2006) como o efeito pelo qual uma falha é observada em um item que falhou, ou seja, é como se pode observar o defeito.

Tendo em vista essa definição, pode-se inferir que os modos de falha presentes em chaves seccionadoras estão essencialmente relacionados com:

- Aquecimento excessivo de algumas partes da chave, tais como contato principal, mecanismo de articulação e conexões;
- Quebra e/ou ruptura de partes da chave devido à perda de resistência mecânica, tais como molas e ganchos;
- Acoplamento inadequado entre o contato e a lâmina da chave durante operação do equipamento.

O aquecimento excessivo de partes da chave está relacionado com vários fatores, como a quantidade de corrente elétrica que passa pelas partes supracitadas, afrouxamento de conexões, presença de sujidades, particulados, umidade, corpos estranhos, dentre outros, assim como ausência de atividades periódicas de limpeza, reaperto e lubrificação. Esse aquecimento excessivo é tratado nas inspeções termográficas como anomalia térmica e representou, cerca de, 42% das manutenções em subestações de 138 kV da região central do estado de Minas Gerais no ano de 2011. (LOPES, 2013)

A dissipação de calor pelas várias partes da chave, constituídas de materiais dissimilares entre si, pode causar perda de características mecânicas, lembrando que esse equipamento está sujeito também a esforços mecânicos provenientes da operação de abertura e fechamento do contato. Assim sendo, é razoável considerar a resistência mecânica de itens que sofrem diretamente esses esforços, sendo, por muitas vezes, tais esforços de natureza cíclica e aleatória, aumentando o nível de incerteza quanto à definição de parâmetros adequados de serviço. Nessa situação encontram-se os ganchos de abertura e a mola, que sendo fabricados em aço fundido e aço cromo vanádio são itens suscetíveis à oscilação de calor proveniente do ambiente e da carga a qual o equipamento está exposto.

Quando do funcionamento da chave seccionadora, existe a possibilidade de um mau contato ou acoplamento inadequado entre o contato e a lâmina da chave devido à interferência mecânica excessiva, deformação plástica causada anteriormente por abertura forçada do contato já submetido a ciclos de aquecimento severo, além de desalinhamento entre as partes móveis. Esse mau contato pode causar aumento significativo da resistência elétrica, com respectivo aumento da temperatura, levando à ocorrência de anomalia térmica ou, até mesmo, de falha abrupta do equipamento.

Dentre os modos de falha citados, será abordado ao longo do trabalho o modo de falha relacionado com o aquecimento excessivo de partes da chave, levando à ocorrência de anomalia térmica. Os demais modos de falha foram relegados a segundo plano devido a dois fatores:

1º- tais modos de falha – *a priori* – podem ser identificados por meio da medição de temperatura do ponto em questão, devido à provável dissipação de calor existente no local e,

2º- por não serem tão significativos para o modelo de chave abordada nesse estudo (chaves de 15 kV).

3. GESTÃO DE ATIVOS

3.1 Gestão da Manutenção

De acordo com SLACK et al (2009), manutenção é o termo usado para abordar a forma pela qual as organizações tentam evitar as falhas ao cuidar de suas instalações físicas, sendo uma parte importante da maioria das atividades de produção, especialmente aquelas cujas instalações físicas tem papel fundamental na produção de seus bens e serviços. O autor ainda afirma que em operações como centrais elétricas, hotéis, companhias aéreas e refinarias petroquímicas, as atividades de manutenção são responsáveis por parte significativa do tempo e da atenção da gerência de produção.

Entre os modelos de manutenção existentes destacam-se os seguintes:

- **Manutenção Corretiva:** Trata-se do modelo de manutenção em que a intervenção dá-se após a falha do equipamento, causando a parada do processo produtivo e/ou sua menor eficácia.
- **Manutenção Preventiva:** Também denominada de manutenção baseada no tempo, determina períodos de tempo adequados para a intervenção no equipamento, antes mesmo da proximidade da falha.
- **Manutenção Preditiva:** É conhecida como manutenção baseada na condição, em que se pretende, por meio do monitoramento contínuo de parâmetros operacionais mensuráveis, garantir a operação do equipamento durante o máximo de tempo possível.

Atualmente, tais modelos de manutenção não são excludentes, sendo empregados em conjunto para garantir o desempenho adequado de instalações industriais dos mais diversos segmentos, de modo a assegurar custos adequados para as organizações.

Naturalmente, cada modelo possui vantagens e desvantagens em seu emprego, que são, essencialmente, analisadas sob a ótica dos conceitos de Mantenabilidade, Confiabilidade e Disponibilidade, descritos a seguir:

- **Mantenabilidade:** Capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso específicas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos.
- **Confiabilidade:** Capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo.
- **Disponibilidade:** Capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados. (NBR 5462 1994)

Entende-se que o motivo de existir a função manutenção (ou seja, sua missão) é garantir a disponibilidade e confiabilidade das instalações, com um mínimo de manutenibilidade possível. Ao compreenderem a importância da função manutenção em seus processos de negócio, várias organizações tratam de elaborar sua própria missão da manutenção, como, por exemplo, o grupo Vallourec, multinacional líder na fabricação de tubos com costura e sem costura, cuja missão da manutenção é:

“Manter uma boa qualidade de serviço, assegurando que o equipamento funcione sem problemas, e ajudar a produção para aperfeiçoar o uso de recursos de produção.”(VALLOUREC,2014)

Há até pouco tempo, o conceito predominante era de que a missão da manutenção era de restabelecer as condições originais dos equipamentos/sistemas. Hoje, a missão da manutenção é garantir a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações de modo a atender a um processo de produção ou de serviço, com confiabilidade, segurança, preservação do meio ambiente e custo adequados.(OLIVEIRA e SILVA,2013)

Ao mesmo tempo em que a manutenção se consolida como função estratégica, surge entre os países do antigo império britânico uma linha de pensamento, advinda de indústrias altamente estruturadas e reguladas, como as forças armadas, companhias aéreas e setor nuclear, e, posteriormente, *utilities* (concessionárias de serviço público), que estende a penetração da manutenção dentro do contexto estratégico empresarial. Pioneiros como Roger Byrne e Jim Kennedy, na Austrália, ou John Woodhouse e Colin Labouchere, na Inglaterra,

argumentavam que a manutenção precisava ir além de simplesmente garantir o atendimento à demanda atual (ou disponibilidade) ao menor custo, mas considerar como esta demanda se alterará no futuro e decidir o quanto gastar agora para antecipar estas mudanças, trazendo um forte componente econômico à discussão (WALLSGROVE, 2011).

LLOYD (2012) atesta que, ao redor de todo o mundo, os negócios relacionados com infraestrutura (como Energia Elétrica, Água, Gás) e outras organizações dependem fortemente da disponibilidade e confiabilidade dos seus ativos físicos para o sucesso do negócio e vem atingindo conclusões similares sobre a necessidade de mais e melhores estratégias de como operar seus ativos.

Dessa forma, na tomada de decisão de uma empresa, por exemplo, entre realizar a manutenção de um ativo danificado, ou adquirir um ativo novo, é necessário conhecer os custos envolvidos em cada uma das etapas, ou seja, os custos de aquisição, operação, manutenção e descarte. Por isso, o custo compreendendo todas as fases é chamado de custo de ciclo de vida, em inglês *life-cycle cost* (LCC), o qual consiste na metodologia para estimativa de custos reais dos ativos e também para gerir a vida econômica de tais ativos. (CESCA, 2012).

Essa abordagem traz à tona um componente econômico antes inexistente para gestores de manutenção, que atualmente é amplamente divulgada pelo termo Gestão de Ativos Físicos.

3.2 ISO 55000: Especificação para Gestão de Ativos

Um dos primeiros marcos da Gestão da Ativos foi a publicação, em 1993, do *Australian Asset Management Manual* pelo NAMS - *National Asset Management Strategy Comitee*, focado na gestão da infraestrutura das cidades australianas. Em 1997 foi fundado o IAM - *Institute of Asset Management* - na Inglaterra, porém focado nas ferramentas de gestão da manutenção (*softwares*). (DINIZ, 2013).

Em 1998, o NAMS publicou um manual internacional, denominado *International Infrastructure Management Manual*, que curiosamente não levava o termo Ativo por recear o comitê que haveria confusão com o contexto financeiro (WALLSGROVE, 2011). Destes manuais originou-se uma especificação de gestão de ativos de âmbito internacional, publicada em 2004 pelo BSI - *British Standards Institution* - sob a liderança do IAM, denominada PAS-55, ou *Publicly Available Specification 55 - Asset Management*, tendo sido revisada, em 2008, após diversas contribuições de mais de cinquenta instituições, empresas ou indivíduos por

todo o mundo, principalmente do Reino Unido e Europa. Na Grã-Bretanha, a aderência à especificação por parte das concessionárias de serviço público é hoje mandatária; nos Estados Unidos, sua disseminação ainda é restrita (MAKANSI; HURST, 2012).

Conforme MCKEOWN (2014) no ano de 2014, após o trabalho de comitês representando 31 países durante 3 anos, foi publicada a série de normas ISO 55000, composta dos seguintes documentos:

- ISO 55000: Gestão de Ativos: Definição, Princípios e Terminologia.
- ISO 55001: Gestão de Ativos: Gerenciamento de Sistemas – Requisitos.
- ISO 55002: Gestão de Ativos: Gerenciamento de Sistemas – Orientações para aplicação da ISO 55001.

Ao criar esses três documentos distintos, os itens que outrora foram combinados na PAS 55-1, agora estão divididos entre as normas ISO 55000 e ISO 55001. A norma ISO 55002 corresponde diretamente à PAS 55-2, fornecendo orientações sobre a interpretação e aplicação dos requisitos da ISO 55001. (WOODHOUSE, 2014). As palavras que compõem o termo “Gestão de Ativos” serão discutidas adiante, a fim de fornecer argumentos para uma definição mais aprofundada.

O termo “Ativo” segundo a ISO 50000(2014) trata-se de item, objeto ou entidade que tem valor real ou potencial para uma organização. Na TAB. (3.1) estão descritos os tipos de ativos existentes e suas respectivas definições:

TABELA 3.1
Tipos de Ativos

Humanos:	conhecimento e habilidade dos empregados
Financeiros:	capital, moeda, cotas societárias, ações
Informacionais:	dados e informações sobre o negócio, e sua qualidade, metodologias
Intangíveis:	reputação, imagem, marca
Físicos:	máquinas, instalações, produtos, edifícios, terrenos, estoques...

FONTE: DINIZ (2013)

De modo similar a PAS-55, a ISO 55000 é focada em ativos físicos. Contudo MCKEOWN (2014) reforça que, num cenário econômico e mercadológico em que se busca aumentar continuamente o desempenho dos ativos físicos, naturalmente se agrega valor à imagem da companhia, bem como a marca, que também são ativos.

As palavras Gerir ou Gerenciar são amplamente empregadas no universo corporativo atual, em que coletar rapidamente dados mensuráveis, analisar situações em tempo mínimo e tomar decisões assertivas dos pontos de vista financeiro, mercadológico e operacional são pré-requisitos para uma organização ter o mínimo de sucesso, sendo aqui sucesso compreendido como manter-se atuante no mercado, com o mínimo de lucro. Dentro dessa ótica, pode-se afirmar que Gerir ou Gerenciar é basicamente decidir por análise de dados.

Deste modo, pode-se inferir que o termo Gestão de Ativos diz respeito ao processo de tomada de decisão (embasada por dados e informações relevantes e quantificáveis) sobre qualquer item, entidade ou objeto que tem valor real ou potencial para a organização.

Segundo a ISO 55000 (2014), Gestão de Ativos é: “Toda atividade coordenada de uma organização para obter valor de seus ativos” (Tradução Livre, p. 4, 2014).

Embora seja uma definição curta, é cheia de significado, como visto a seguir:

- Atividade coordenada: Coordenação pressupõe organização e planejamento, ou seja, no ambiente de Gestão de Ativos as ações são planejadas, programadas, executadas e avaliadas sistematicamente, objetivando a melhoria contínua dos processos. MCKEOWN (2014) afirma que, a Gestão de Ativos traduz as metas estratégicas da organização em métricas financeiras e técnicas, que embasam planos de ação a serem executados por setores próprios.
- Organização: O ambiente de Gestão de Ativos é o ambiente organizacional, ou seja, deve envolver todas as partes interessadas do negócio: acionistas, funcionários, comunidade, fornecedores, dentre outros.
- Valor: É o resultado da realização de tarefas que contribuem efetivamente para uma determinada operação, ou seja, nessa etapa de um dado processo, um determinado ativo estará gerando valor se contribuir efetivamente para o processo para o qual foi especificado. (BATTAGLIA; BERGAMO, 2010)

Ao expressar sua preocupação com a geração de valor, a ISO 55000 oferece um nível superior no ato de se executar a Gestão de Ativos dentro das organizações; associando essa geração de valor com um nível de risco determinado em conjunto com o ciclo de vida do ativo tem-se uma metodologia com grande potencial de fundamentar o processo de tomada de

decisão em métricas quantificáveis, que não são reféns unicamente da opinião de gestores ou do instinto de alguma das partes interessadas, agregando um grau de incerteza quantificável, que pode justificar (ou não) uma determinada ação.

Sendo uma atividade coordenada, a Gestão de Ativos deve estar intrinsecamente relacionada com o planejamento estratégico da organização que, segundo SLACK et al (2009), é o padrão global de decisões e ações que posicionam a organização em seu ambiente e têm o objetivo de fazê-la atingir seus objetivos de longo prazo. De fato, o desenvolvimento de um sistema de gestão de ativos deve nascer dentro do planejamento estratégico das organizações, garantindo que, as decisões a serem tomadas sobre os ativos estejam alinhadas às demais estratégias da empresa, todas contribuindo para o resultado final. (DINIZ, 2013).

Como a ISO 55000 objetiva a estruturação de um sistema de gestão, ela coloca como primeiros requisitos para a gestão de ativos que uma organização elabore e transforme em documentos elementos denominados Políticas, Estratégias, Objetivos e Planos de Gestão de seus ativos, sendo que tais elementos devem estar alinhados com os objetivos estratégicos estabelecidos anteriormente.

A Política de Gestão de Ativos é uma espécie de “carta de intenções” da organização, sendo, portanto, um documento capaz de determinar regras e limites a serem usados para balizar planos e estratégias, bem como nível de comprometimento, da organização para com os seus ativos.

A Estratégia de Gestão de Ativos traduz os objetivos do planejamento estratégico da organização e da política de Gestão de Ativos em um plano de ação de longo prazo. Pode-se afirmar que esse elemento é que garante a fidelidade da Gestão de Ativos em relação ao Planejamento Estratégico da organização, pois ela vai direcionar os níveis de serviço a serem entregues pelos ativos assistidos, os custos envolvidos em atividades rotineiras, de investimento, de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), atualização do ativo, aquisição e/ou reforma de peças de reposição, revisão de planos anuais de manutenção, bem como rotinas de inspeções preditivas, dentre outros.

Para tanto, é essencial à organização conhecer seus ativos, de modo a possuir um conjunto de dados e informações fidedignas sobre os ativos que compõem o parque fabril. Não é complexo dispor de um sistema computadorizado que realize o controle de serviços realizados nos ativos, popularmente conhecidos como CMMS'S, contudo, a maior parte das empresas possui tal sistema por comodismo ou exigência normativa, como no caso de empresas do segmento automobilístico e autopeças, em que a existência e uso de um sistema como esse é requisito obrigatório da TS 16949:2009, logo caracterizando, na maior parte dos

casos, em dados com baixa qualidade, não preenchimento de campos em formulários eletrônicos como descrição de serviços executados, horário, datas, dentre outros, numa lista extensa de itens que, salvo exceção do gestor, não são observados pela maior parte dos envolvidos no processo.

Como *saída* da Estratégia de Gestão de Ativos, tem-se a formulação dos Objetivos de Gestão de Ativos, que sempre que possível devem ser objetivos *SMART*, que segundo GEORGES, FALSARELLA (2014) é um acrônimo de *Specific* (específico), *Measurable* (mensurável), *Attainable* (exequível), *Realistic* (realista), *Time Bond* (limitado no tempo); tais objetivos podem ser expressos por KPI's relacionados à disponibilidade, manutenibilidade, confiabilidade, satisfação do cliente atendido, conformidade com requisitos impostos por terceiros (agentes reguladores, governo, sociedade civil).

É válido ressaltar que, obrigatoriamente dentre os objetivos estabelecidos, deve ser criada uma hierarquização, de modo que, num caso onde ocorram objetivos conflituosos entre si, exista uma priorização de um objetivo A em detrimento de um objetivo B.

Já os Planos de Gestão de Ativos referem-se às ações desdobradas dos objetivos propostos para a Gestão de Ativos anteriormente, devidamente alinhados com os recursos necessários para tal, quem são os responsáveis pela execução e controle de tais planos, os riscos envolvidos na ineficácia ou não atingimento dos objetivos estipulados.

Como em todo sistema de gestão, é essencial que toda essa documentação possua um caráter dinâmico, em que a melhoria contínua permeie todos os níveis do referido sistema, tornando-o simbiótico com o planejamento estratégico da organização.

3.3 Tomada de Decisão

LLOYD (2012) destaca que a mudança de cultura, juntamente com a atitude das pessoas e seus valores pessoais, bem como o ambiente organizacional e os objetivos estratégicos da organização, são os principais aspectos numa incorporação de uma prática de Gestão de Ativos eficaz, auxiliando num processo de tomada de decisão mais rápido e assertivo.

A tomada de decisão é um dos problemas-chave na teoria e prática contemporânea de direção dos sistemas e da sociedade. Esta situação configura-se até certo ponto normal, pois o ato de tomada de decisão é o momento central de qualquer processo de direção e gestão. A tomada de decisão está presente em todas as funções de direção e gestão, sendo a própria decisão o resultado principal esperado no trabalho ou funcionamento do sistema. A

decisão origina a informação necessária na direção e gestão, que transporta até ao nível executivo sob forma de tarefas, planos, normas, comandos e serve de base para as ações objetivas subsequentes. Todos os processos, no nosso ponto de vista, devem ser vistos como atos de tomada de decisão. (CUREVA, 2014).

ANGELONI (2003) afirma que o grande desafio dos tomadores de decisão é o de transformar dados em informação e informação em conhecimento, minimizando as interferências individuais nesse processo de transformação.

Sob esta ótica, o Gestor de Ativos deve ser uma figura proeminente no processo de tomada de decisão, usando de conhecimentos técnicos, gerenciais e financeiros para decidir sob a ótica desse novo universo que se vislumbra, onde se busca balizar o risco em função do ganho obtido ou potencial, agregando valor ao negócio da organização, sob a forma de ganhos financeiros, participação no mercado e valorização da marca junto às partes interessadas.

3.4 Gestão de Ativos em *Utilities*

É vital para as *utilities* (concessionárias de obras públicas em nível municipal ou regional) para manter e gerenciar estas redes de distribuição de serviços públicos de uma forma eficaz, eficiente e sustentável. As concessionárias são cada vez mais exigidas, diante das expectativas do público e novas exigências regulamentares para a proteção do bem estar público, saúde e meio ambiente, assim como o uso eficiente dos recursos públicos. (YOUNIS; KNIGHT, 2014).

A atividade das companhias de eletricidade, gás, água e outras, é a prestação de serviços de fornecimento de energia ou combustível ou água tratada, com qualidade, segurança e continuidade, entregue às portas das casas. Mas o seu negócio consiste em manter seus ativos operacionais, em boas condições e principalmente, gerando valor. Trata-se de um negócio inserido numa realidade na qual, por um lado, os Governos (através das agências reguladoras) exigem melhor desempenho em termos de segurança, confiabilidade e universalidade do fornecimento; por outro, os consumidores são mais críticos em relação às tarifas e ao nível de serviço entregue; e há ainda os acionistas, sempre desejando maior lucro, retorno para os investimentos e valor agregado. (DINIZ, 2013).

Levando em consideração todos esses requisitos conflitantes, as empresas têm sido impelidas a analisar qualitativamente e quantitativamente suas despesas e investimentos, especialmente no que tange á manutenção de seus ativos, buscando um denominador comum

entre as exigências regulatórias, os riscos envolvidos e os custos praticados para atender tais exigências.

REDER (2005) comparou a abordagem tradicional com a abordagem no ambiente de Gestão de Ativos em sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, destacando que a primeira tem se concentrado na gestão da infraestrutura de uma área geográfica mínima através de uma SE, a fim de administrar a quantidade de energia entregue ao mercado consumidor e o crescimento e funcionamento do sistema local. Essa abordagem resulta em:

1. Despesas que provavelmente não são implantados para aperfeiçoar o desempenho de todo o sistema (e não somente daquela subestação).
2. Diferenças entre infraestrutura de subestações diferentes.
3. Ausência de pro atividade para compartilhar recursos entre as subestações.

Ainda de acordo com a autora, nesse tipo de abordagem as decisões são tomadas unicamente em função do benefício da SE, não levando em conta o impacto global no sistema. A tolerância ao risco é mínima, e há uma propensão para trabalhar unicamente dentro do microuniverso da SE, em vez de buscar a melhoria de todo o sistema, caracterizando uma ausência clara de visão holística por parte dessa abordagem.

Por tudo aqui exposto, se faz claramente necessária uma abordagem gerencial por parte dos departamentos de operação e manutenção das concessionárias de energia elétrica baseada nas premissas da PAS 55 e da ISO 55000, levando seus ativos a um nível de desempenho superior, aumentando o resultado operacional da organização.

Uma das formas de operacionalizar as premissas da Gestão de Ativos é através da melhoria das inspeções e medições que são rotineiras dentro da abordagem tradicional da manutenção, com a ressalva de que dentro do ambiente de Gestão de Ativos essas técnicas e sistemas de medição devem fornecer dados com nível de confiabilidade assegurada por padrões metrológicos mínimos ou, quando não for possível ou viável economicamente, respaldados por normas internacionalmente aceitas, que estejam em consonância com a realidade da instalação inspecionada ou grandeza medida.

A redução constante dos intervalos de inspeção é perfeitamente considerável, desde que os custos envolvidos sejam menores que os custos de uma eventual falha, uma vez que tal redução implica num aumento da confiabilidade da medição, com a contrapartida de um aumento de custo operacional.

3.5 Monitoramento de Ativos

O monitoramento de Ativos consiste em acompanhar variáveis e grandezas relacionadas diretamente com o atendimento da função requerida por parte dos ativos, de modo que, quando tal variável ou grandeza apresenta uma variação significativa tem-se uma resposta em relação ao nível de desempenho da função (*a priori*), caracterizando, portanto, um provável dano ou, no pior dos cenários, uma falha.

Como essa condição não é válida para todos os ativos e todas as condições existentes dentro de uma instalação, em sistemas cuja interrupção da função de um dado ativo acarreta em impactos indesejáveis dentro da ótica gerencial existem os chamados Sistemas Supervisórios, que são *softwares* dedicados à coleta e armazenamento de dados operacionais especificados anteriormente.

No caso do Monitoramento de Ativos não basta somente acompanhar a evolução das variáveis, mas sim controlar, ou seja, o acompanhamento deve gerar uma ação junto ao ativo, baseada num dado coletado que será contextualizado mediante a condição de operação momentânea, de modo a fornecer uma informação adequada para a tomada de decisão adequada (intervir ou não no equipamento).

Tal acompanhamento dá-se através da mensuração de grandezas ou parâmetros tais como temperatura, nível de vibração, quantidade de particulados suspensos presentes em uma substância líquida, presença de descontinuidades superficiais e/ou subsuperficiais.

O monitoramento nasce de uma necessidade comum à área de manutenção: cerca de um terço das atividades de manutenção preventiva (aquela disparada por tempo, ou por número de operações) mostra-se desnecessária, pois, durante a intervenção, conclui-se que havia, ainda, plenas condições do equipamento desempenhar suas funções por mais tempo, sem risco de quebra (ALMEIDA, 2009). Essa situação é originada pela premissa errônea de que é possível prever a falha de um ativo a partir do histórico de manutenções realizadas, lembrando que nem sempre as informações coletadas em intervenções anteriores e armazenadas nos CMMS's são fidedignas, além de que, diante de uma realidade mercadológica cada vez mais competitiva, o uso errôneo ou inadequado de um dado ativo para cumprir com um determinado objetivo em detrimento da violação da função primeira para a qual o equipamento foi projetado é recorrente.

Uma característica comum aos equipamentos elétricos é a presença de mecanismos de transferência de calor quando da passagem de corrente elétrica (BRAUNOVIC et al, 2006), eventualmente causando danos às propriedades mecânicas da região de contato entre os metais dissimilares ou idênticos típicos de uniões que constituem os

chamados contatos elétricos, que compõem diversos equipamentos do SEP, como o objeto de estudo desse trabalho, bem como cabos, contatores, disjuntores, conexões, emendas, etc.

Os danos causados nessa região levam a vários efeitos indesejáveis, dentre eles o mais notório, o chamado mau-contato, que acentua o dano citado, resultando num ciclo que geralmente culmina com o aumento da resistência elétrica até a falha do ativo.

O monitoramento de tal situação requer um equilíbrio tênue entre o custo operacional de tal sistema de medição, o risco de uma eventual falha por falta de monitoramento e o atendimento à normas de continuidade e qualidade no fornecimento do serviço contratado, no caso, fornecimento de energia elétrica.

Baseado nessa premissa há de se considerar o uso de modelos matemáticos que levem em consideração todas as condições operacionais e demais parâmetros e características dos ativos que possam influenciar o tempo de operação até a falha ou a sua vida útil num determinado período, sendo que tais modelos deverão ser validados por práticas experimentais consistentes e com resultados mensuráveis, assim como tais resultados devem ter um nível de incerteza associado.

Assim, o processo de gestão de ativos, associado com o monitoramento da resistência de contato (tal como qualquer outro parâmetro de equipamentos quaisquer), pode ser então detalhado como a seguir (DINIZ, 2013 *apud* CIGRÈ, 2006):

1. Monitoramento: compreende a aquisição e armazenagem de dados, seja de resultados de inspeção ou de ensaios em equipamentos não energizados, de sensores especiais (monitoramento da condição) ou de sensores para variáveis de processo (supervisão e controle), incluindo variáveis da proteção e dados básicos da placa de identificação (cadastro).

2. Análise: refere-se ao tratamento da base de dados recente e histórica, procurando evidências de anormalidade, em um primeiro nível de indicação (feita através de uma notificação ao responsável).

3. Diagnóstico/Prognóstico: níveis onde diagnósticos da condição ou das causas de falha podem ser feitos, e prognósticos com indicação de ações a tomar podem ser determinados, a partir de métodos científicos.

4. Análise de Risco e Gerenciamento: compreende avaliações da análise do risco operativo, considerando não apenas o contexto técnico, mas também o econômico (inclusive no que tange ao aspecto estratégico para o negócio), resultando em recomendações de procedimentos mais adequados, a serem tomados acerca do parque de ativos como um todo.

4. TERMOGRAFIA

4.1 Termografia Infravermelha

Os sistemas de medição de temperatura podem ser classificados em medição com contato e sem contato.

Em medições sem contato, é notório o uso de técnicas não invasivas denominadas NDTE (*Nondestructive testing and evaluation*), em que a detecção de uma distribuição anormal de temperatura superficial torna-se indício de algum dano ao elemento inspecionado. (SUNDARAVALLI et al, 2014)

Dentro desse grupo situa-se a Termografia, técnica de medição sem contato do campo de temperatura de uma superfície, através de uma imagem gerada pela radiação térmica no espectro infravermelho emitida pela superfície. As medições de temperatura por meio de termografia dividem-se em duas categorias, a passiva e a ativa.

A termografia passiva caracteriza-se pela não estimulação térmica artificial do objeto em estudo. Os testes são realizados quando a temperatura ambiente e da amostra são naturalmente diferentes (MALDAGUE, 2000).

A TAB. (4.1) mostra as vantagens e desvantagens do uso da Termografia:

TABELA 4.1

Vantagens e Desvantagens da Termografia

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Facilidade de operação	Dificuldade na determinação da emissividade do objeto
Técnica não intrusiva e não destrutiva	Interferência das perdas de calor sobre o contraste das imagens
Possibilidade de medição de variadas condições do objeto e do ambiente	Limitação de detecção de defeitos em regiões mais profundas do objeto

A termografia passiva é essencialmente aplicada de modo qualitativo, onde o principal objetivo é localizar diferenças significativas de temperatura, associando tal diferença a uma eventual anomalia térmica. (KOMINSKY, MARTIN; 2006)

Embora a termografia passiva qualitativa seja a mais praticada, o caráter qualitativo de seus resultados não implica que cautela, planejamento e treinamento adequado

sejam dispensáveis. Para se obter melhores resultados, o técnico responsável deve ser experiente não apenas na utilização do termovisor, mas também deve conhecer as características dos equipamentos e materiais inspecionados, além de ser capaz de avaliar as condições ambientais. O ceticismo quanto à extensão da aplicabilidade da termografia se deve, na maioria das vezes, ao seu uso inapropriado, a pobres interpretações de resultados e à incapacidade de empregar a técnica correta de investigação (TITMAN, 2001).

4.2 Temperatura

A temperatura é associada à agitação ou movimento das partículas (átomos ou moléculas) que compõe um corpo ou substância. Seu valor é dado em função da energia interna apresentada pelo corpo ou substância e se altera em função de trocas de calor e trabalho com a vizinhança. Logo, a temperatura de um objeto pode ser determinada pelo resultado de um balanço de energias, calculado a partir dos mecanismos de transferência de calor presentes nos corpos.(DINIZ,2013)

Existem 3 mecanismos de calor, que são condução, radiação e convecção, ainda que esse último mecanismo não seja unicamente um mecanismo de transferência de calor porque o seu funcionamento também depende de transporte de massa. Contudo, como em tal mecanismo também ocorre transmissão de energia de regiões de alta temperatura para regiões de baixa temperatura, é razoável afirmar que o uso do termo transferência de calor por convecção seja aceito. (KREITH,2010)

No desenvolvimento de seu modelo matemático para cálculo de temperatura de conectores elétricos usados no Sistema Elétrico de Potência, FERREIRA (2013) sugeriu que a modelagem matemática do processo de aquecimento de tais conectores é a determinação do campo de temperatura em função das condições impostas. Essa abordagem foi usada pelo mesmo autor no desenvolvimento do modelo de aquecimento de uma chave seccionadora de 15 kV, conforme descrito na sequência desse trabalho.

A FIG 4.1 mostra uma chave seccionadora modelo Unipolar 15kV com a marcação das áreas do contato principal e da articulação à esquerda e à direita, respectivamente.

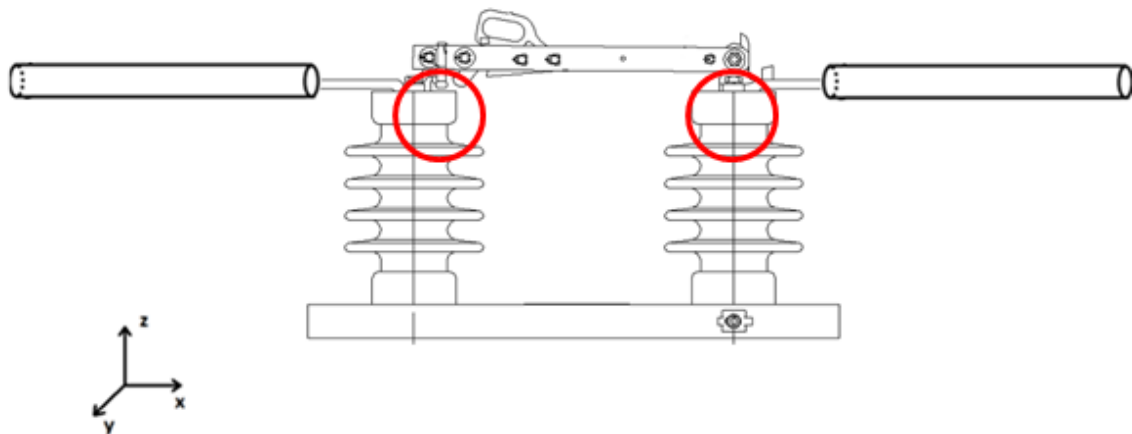


FIGURA 4.1 - Chave seccionadora 15 kV ligada à fonte geradora de energia.

De maneira geral, essas duas regiões oferecem uma maior resistência à passagem de corrente elétrica quando a linha está energizada. Associado a isso, inicia-se um processo de geração de calor (dissipação de energia elétrica) por efeito Joule, sendo que todo o calor gerado é dissipado através dos modos básicos de transferência de calor: convecção, radiação e condução térmica. Em regime permanente, esses mecanismos estão relacionados segundo a EQ (4.1):

$$q_{ger} - (q_{cond} + q_{conv} + q_{rad}) = 0: \quad (4.1)$$

Onde:

$$q_{ger} = Ri^2 \quad [W] \quad (\text{Taxa de geração de calor por efeito Joule})$$

$$q_{cond} = -kA_{sr} \frac{dT}{dx} \quad [W] \quad (\text{Taxa de transferência de calor por condução para os cabos})$$

$$q_{conv} = hA_{sup}(T - T_{\infty}) \quad [W] \quad (\text{Taxa de dissipação de calor por convecção})$$

$$q_{rad} = h_r A_{sup}(T - T_{\infty}) \quad [W] \quad (\text{Taxa de dissipação de calor por radiação})$$

Essa equação representativa do balanço de energia pode ser resolvida em termos de variáveis globais (formulação integral), sendo de solução mais simples em comparação com a formulação diferencial. No entanto, sua aplicação requer certos cuidados, uma vez que

as variações locais de temperatura podem ser significativas e, com essa abordagem, a temperatura é avaliada segundo um valor médio.

A geometria particular do contato principal e da articulação da chave seccionadora pode ser simplificada como a composição de geometrias mais simples como placas verticais, horizontais e cilindros (no caso do contato), para as quais existem na literatura correlações empíricas específicas que se propõem a modelar a convecção. Portanto, essa idealização permite simplificar o cálculo do coeficiente convectivo médio que representa o processo de transferência de calor por convecção, conforme a EQ (4.2):

$$h_{conv} = \frac{1}{A_t} \sum_{i=1}^n h_i A_i \quad (4.2)$$

Ou seja, o coeficiente convectivo médio para a convecção na região de interesse pode ser calculada como a média ponderada (pela área) dos coeficientes convectivos individuais obtidos para cada elemento que compõe o conjunto.

Como a chave seccionadora apresenta, em geral, uma resistência elétrica superior a dos cabos condutores, é natural que exista uma diferença de temperatura entre um ponto do componente e um ponto do cabo. Essa diferença de temperatura pode ser entendida como uma diferença de potencial térmico, a qual promove um fluxo de calor oriunda da região de maior temperatura (maior potencial) em direção à região de menor temperatura (menor potencial).

Da mesma forma que a chave tende a perder energia térmica através da transferência de calor por condução para os cabos, esse fenômeno também ocorre em direção a outras duas regiões de menor temperatura: a base da chave (por onde não ocorre geração de calor) e as lâminas de contato (onde a resistência elétrica é menor). A FIG. 4.2 ilustra as direções preferenciais de transferência de calor por condução partindo do contato principal e da articulação da chave seccionadora.

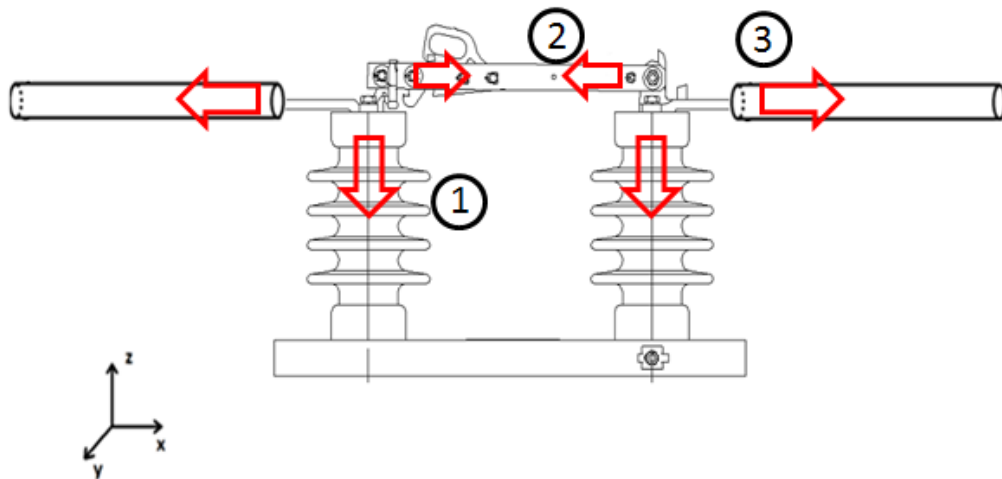


FIGURA 4.2 - Transferência de calor por condução na chave seccionadora

Cada componente do fluxo de calor por condução recebe tratamento específico por se tratarem de casos diferentes de transferência de calor por condução. No primeiro caso, o isolador não gera calor; no segundo, as lâminas de contato têm seção reta retangular e possuem geração de calor; e, no terceiro caso, os cabos têm seção circular, geram calor e podem apresentar uma camada de isolamento. A equação diferencial de cada caso é dada a seguir.

Caso 1

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{h_T P}{k A_{Sr}} (T - T_\infty) = 0 \quad (4.3)$$

Caso 2

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{h_T P}{k A_{Sr}} (T - T_\infty) + \frac{\rho i^2}{k A_{Sr}^2} = 0 \quad (4.4)$$

Caso 3

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{2\pi k_i}{k A_{Sr} \ln(r_e/r_i)} (T_i - T_e) + \frac{\rho i^2}{k A_{Sr}^2} = 0 \quad (4.5)$$

Para a solução de tais equações estudaram-se as diferenças entre a resolução por meio de solução numérica e analítica para cabos montados com conectores aparafusados usados em Subestações, comparando os valores do modelo com dados experimentais. Ao modelar o processo de aquecimento de conexões elétricas, os resultados experimentais mostram que a taxa de transferência de calor por condução é, em geral, significativa. Foi demonstrada que a solução numérica é a maneira mais indicada para solução, uma vez que sua formulação admite variações locais das propriedades físicas, enquanto que a solução analítica por coeficientes constantes depende fortemente da precisão na determinação dos valores médios desses parâmetros. Além disso, a solução numérica permite o cálculo de um comprimento de referência, a partir do qual os valores de temperatura medidos não são influenciados pela proximidade com um ponto de anomalia térmica, uma informação extremamente útil para as equipes de manutenção de componentes elétricos desse tipo, auxiliando no diagnóstico e no processo de tomada de decisão. (FERREIRA, ANDRADE, 2014)

O modelo de medição de temperatura com uso de termovisores foi estudado por TEIXEIRA (2012), onde o autor determinou as relações matemáticas que regem a interação entre as grandezas envolvidas nesse sistema de medição, bem como as eventuais variações associadas ao resultado, por meio de rotina de programação no ambiente MatLab[®]. Nesse trabalho o mesmo modelo foi adotado devido à robustez de resultados proporcionada, elevando a qualidade das medições praticadas por meio de termovisores.

4.3 Incerteza de resultados em Termografia

Todo e qualquer sistema de medição tem por finalidade expressar quantitativamente o comportamento aproximado de uma grandeza da natureza submetida à medição, o que pode ser expresso como *mensurando*. (VIM, 2007). O valor atribuído a tal grandeza é denominado *Valor Verdadeiro*, que é o valor consistente com a definição de uma dada grandeza específica. Contudo, todo sistema de medição propicia um valor que não expressa de modo fidedigno (*indicação*) o comportamento do mensurando, sendo essa diferença expressa pelo termo *Erro de Medição*, que é expresso matematicamente como:

$$E = I - VV \quad (4.6)$$

Onde E=erro de medição / I= Indicação /VV=Valor Verdadeiro

De acordo com ALBERTAZZI, SOUZA (2008), o erro de medição não é constante e varia em função alguns fatores tais como:

- Ação do operador
- Variação das condições ambientais
- Passagem do Tempo
- Outros

Uma vez não sendo necessariamente constante, é importante compreender quais são as parcelas que compõem o erro de medição. A primeira parcela refere-se aos *erros sistemáticos*, que correspondem ao valor médio do erro de medição. A segunda parcela trata-se dos *erros aleatórios*, que dizem respeito à parcela imprevisível do erro de medição, responsável pelas variações encontradas em medições repetidas. O erro de medição é expresso por um número (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

A toda medição existe um erro associado. Uma vez que não se pode evitar a modificação introduzida pelo instrumento de medição ou as possíveis variações do mensurando, nunca se obterá o valor exato da grandeza, a avaliação sempre será imprecisa. O melhor que se pode fazer é conhecer e considerar uma faixa provável dentro da qual deve situar-se o valor verdadeiro associado ao mensurando. (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

Essa faixa, denominada incerteza do resultado de medição, ou simplesmente *incerteza*, é de acordo com o VIM (2007) o parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentadamente atribuídos a um mensurando.

Todo fator que dá origem á dúvidas no resultado de um processo de medição é denominado fonte de incerteza.

A **Incerteza padrão (u)** corresponde a uma medida da intensidade da componente aleatória do erro de medição. Corresponde ao desvio-padrão dos erros de medição (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008). É expressa por:

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(I_i - I)^2}{n - 1}} \quad (4.7)$$

Onde

s = desvio padrão da amostra

I = Média das Indicações

I_i = i -ésima indicação

n = número de medições repetidas realizadas

4.4 Fontes de Incerteza em Termografia

Em oposição ao número expressivo de trabalhos voltados para as aplicações da termografia (BAGAVATHIAPAN, 2013), estão as publicações dedicadas à análise da qualidade dos resultados obtidos por ela. A escassez de trabalhos publicados sobre este assunto evidencia a utilização das técnicas de obtenção de imagens térmicas apenas como uma ferramenta qualitativa pelos setores de manutenção. Todavia, um procedimento de inspeção termográfica não seria completo se o grau de confiabilidade dos resultados não fosse conhecido. Do contrário, um termograma representaria apenas uma imagem colorida com valores de temperatura que podem estar corretos ou totalmente equivocados.

Dessa maneira, os trabalhos de CHRZANOWSKI (2001), TAVARES (2006) e TEIXEIRA (2012) contribuem de maneira significativa acerca das fontes de incerteza em Termografia, identificando-as e quantificando-as em aplicações da técnica nos mais diversos segmentos, buscando manter padrões metrológicos minimamente aceitáveis.

A FIG. 4.3 ilustra as fontes de incerteza existentes em medição por Termografia infravermelha, de acordo com TAVARES (2006) e CHRZANOWSKI (2001):

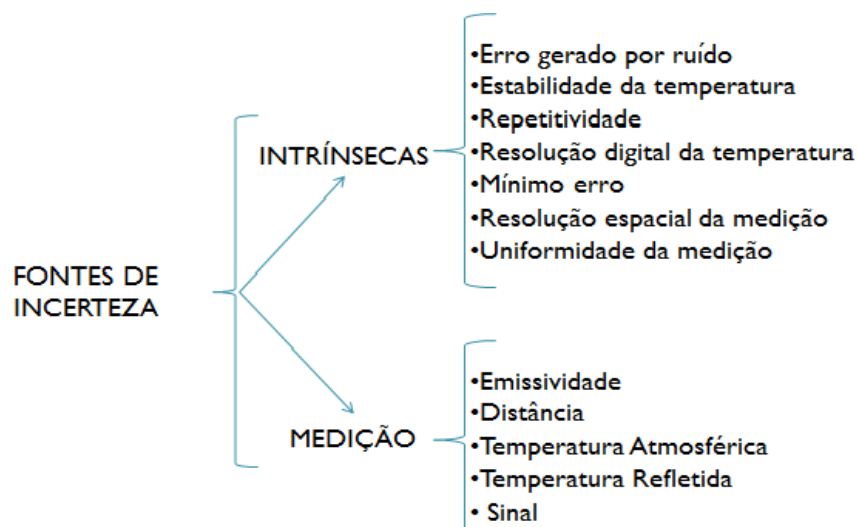


FIGURA 4.3 - Fontes de Incerteza em Termografia Infravermelha

As fontes de incerteza de medição podem ser divididas em intrínsecas, próprias dos componentes internos do termovisor, e de medição (ou externas), associadas ao conhecimento incompleto dos parâmetros radiométricos necessários para a caracterização do mensurando e das condições ambientais (CHRZANOWSKI, 2001).

As fontes intrínsecas de incerteza de um termovisor são atribuídas aos seguintes componentes: erro gerado por ruído (NGE), estabilidade da temperatura (TS), repetitividade (RE), resolução digital da temperatura (DRT), mínimo erro (ME), resolução espacial da medição (MSR), e a uniformidade da medição (MU).

Essas fontes são detalhadas a seguir:

- Erro gerado por ruído (NGE): desvio padrão da leitura de temperatura devido aos ruídos internos do sistema.
- Estabilidade da temperatura (TS): faixa na qual os resultados de medição, em diferentes temperaturas ambientes, estão localizados.
- Repetitividade (RE): precisão da medição sob condições de repetitividade.
- Resolução Digital da Temperatura (DRT): menor diferença entre dois níveis de temperatura que podem ser distinguidos devido às limitações do canal digital do termovisor.
- Mínimo erro (ME): dispersão do valor registrado pelo termovisor, em relação à temperatura do mensurando para medições realizadas em condição de calibração.
- Resolução Espacial de Medição (MSR): mínima dimensão angular do mensurando que não produz influência sobre o resultado de medição.
- Uniformidade da Medição (MU): faixa que abrange os resultados da medição para diferentes posições do mensurando dentro do campo de visão do termovisor.

As fontes de incerteza de medição externas são atribuídas ao conhecimento incompleto dos parâmetros presentes no modelo matemático da medição, a menos do sinal S , todos os demais parâmetros devem ser ajustados pelo usuário no termovisor para caracterizar o mensurando e as condições ambientais locais.

De acordo com TEIXEIRA (2012), das quatro variáveis a que o usuário tem acesso, a emissividade é a mais crítica, porém, é também a mais negligenciada. Seu valor deve ser determinado experimentalmente, o que, na maioria das aplicações, não é possível. Por conseguinte, os usuários são levados a adotar valores tabelados ou aproximações que não refletem a verdadeira emissividade do mensurando, uma vez que, esta também é função das condições superficiais do material que compõe o objeto.

Incerteza Combinada (u_c) - Corresponde ao valor do desvio padrão resultante da ação combinada das componentes aleatórias de todas as fontes de incerteza que afetam um processo de medição. Para estimar a incerteza combinada de n fontes de incerteza, todas estatisticamente não correlacionadas (independentes) usa-se a EQ. (4.8):

$$u_c^2 = u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + \dots + u_n^2 \quad (4.8)$$

Onde

u_c =incerteza combinada

u_i = incerteza padrão da i -ésima fonte de incerteza

Incerteza Expandida (U) - É o intervalo dentro do qual, para uma probabilidade de 95% (geralmente) espera-se encontrar a componente aleatória dos erros de um processo de medição. É dada pela seguinte equação:

$$U = t \cdot u_c \quad (4.9)$$

Onde

U = incerteza expandida do processo de medição

t = coeficiente de Student correspondente ao número de graus de liberdade efetivos e a 95% de probabilidade

u_c =incerteza combinada:

O número de graus de liberdade efetivos é o número de medições repetidas menos um correspondente ao valor da incerteza combinada. Ele é expresso pela fórmula de Welch Satterthwaite:

$$\frac{u_c^4}{v_{ef}} = \frac{u_1^4}{v_1} + \frac{u_2^4}{v_2} + \frac{u_3^4}{v_3} + \dots + \frac{u_n^4}{v_n} \quad (4.10)$$

Onde:

u_c =incerteza combinada

v_{ef} = número de graus de liberdade efetivos

u_n = incerteza padrão da i -ésima fonte de incerteza

v_i = número de graus de liberdade da i -ésima fonte de incerteza

O resultado de uma medição (RM) pode ser expresso por meio da EQ.(4.11):

$$RM = RB \pm U_{95\%} \quad (4.11)$$

Onde:

RB = resultado base

$U_{95\%}$ = incerteza expandida com intervalo de abrangência de 95%

O cálculo da incerteza de um mensurando é, na maioria das vezes, complexo e demanda recursos humanos e financeiros, o que o torna inviável (do ponto de vista operacional) para muitas aplicações que não no âmbito da Academia e em atividades laboratoriais. Entretanto, sua verdadeira importância reside no fato de que a presença de uma faixa de incerteza associada à indicação do sistema de medição é um atestado claro de preocupação com o risco presente naquele resultado, uma vez que existe um tratamento estatístico dos dados coletados, além de atribuir um valor de probabilidade para ocorrência de um determinado efeito.

5. METODOLOGIA

A metodologia empregada nesse trabalho está sintetizada na FIG. 5.1. Consiste numa prática experimental (com o intuito de obter informações sobre o comportamento do ativo em atmosfera controlada) e no desenvolvimento de um modelo teórico, que objetivou estimar a vida útil do ativo por meio de padrões tecnicamente mensuráveis, embasado pelos resultados do experimento.

Inicialmente foi feita uma análise do banco de dados de relatórios de inspeções termográficas da Cemig-D, no período de 2007 a 2012, referentes à atividade da concessionária na Região Metropolitana de Belo Horizonte. Nesse banco de dados foram selecionados todos os termogramas referentes às inspeções termográficas em chaves seccionadoras, bem como informações relevantes, tais como o nível de tensão aplicada (consequentemente o tipo de chave), horário e data da inspeção, valor de temperatura medido, localização da anomalia térmica, grau de criticidade atingido, dentre outros.

5.1 Metodologia Experimental

Após essa etapa, foi elaborado o planejamento do experimento a ser realizado com uma chave retirada de operação (sem quaisquer informações sobre o equipamento, como temperatura de falha, motivo de retirada de operação, etc.) e com uma chave que nunca havia entrado em operação, objetivando coletar dados sobre o comportamento da chave em função de sua degradação em um ambiente controlado.

Usou-se a infraestrutura do Laboratório de Termometria para realização de tais experimentos, que consiste basicamente nos seguintes itens:

- Chave seccionadora faca unipolar Tensão 15 kV, Corrente Nominal 630 A;
- Termocâmera FLIR SC660;
- Fonte de corrente LET-1000-RD, EuroSMC;
- Módulo de aquisição *Agilent*, modelo 34490A interligado ao computador;
- Termopares (tipo T)
- Cabo condutor de alumínio 170 mm² (336 AWG);
- Termômetro-higrômetro de bancada;
- Microhmímetro Instrum de 10 A;

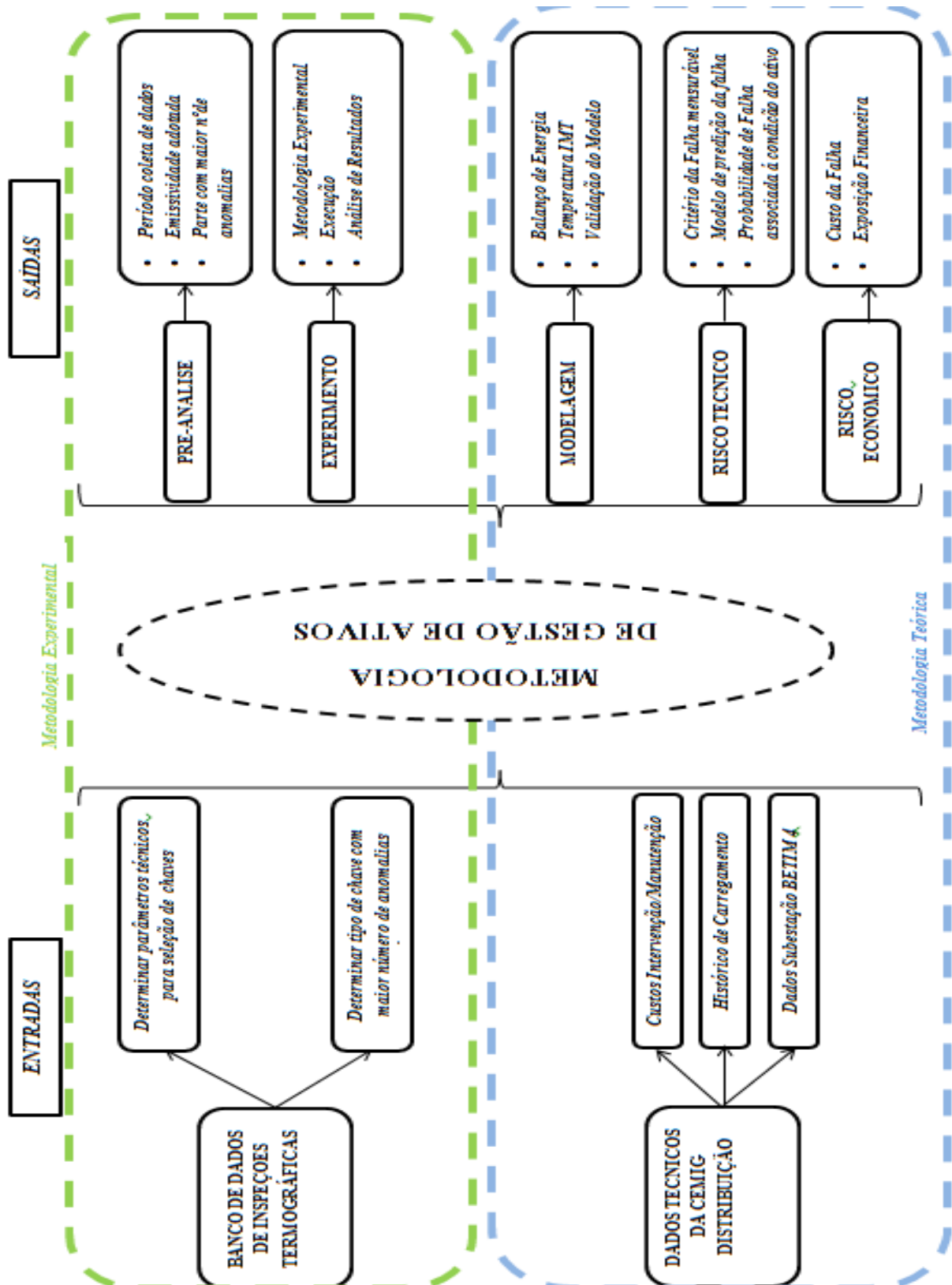


FIGURA 5.1 - Representação Gráfica da Metodologia Empregada no Trabalho

O layout do experimento é demonstrado na FIG. 5.2:

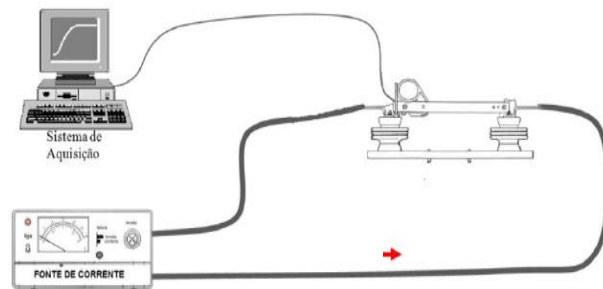


FIGURA 5.2: Layout do experimento

A chave seccionadora foi ligada à fonte de corrente por meio dos cabos condutores conectados. A fonte de corrente era ajustada para valores sequenciais arbitrários de 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550 e 630 A. Os termopares conectados ao módulo de aquisição de dados foram fixados nos contatos fixo e móvel, além da lâmina de contato, conforme indicado na FIG. 5.3. A câmera termográfica foi ajustada para capturar imagens a cada 5 minutos, a uma distância de 0,8 metros da bancada. Os ensaios foram realizados de modo sequencial para esses valores de corrente e a cada faixa de corrente ajustada, as medidas da resistência, da corrente, da umidade relativa do ar e da temperatura ambiente eram obtidas após se atingir o regime permanente (na prática esta condição é satisfeita quando a variação não excede 1 K por hora). Um novo ciclo de ensaios era iniciado após o retorno da temperatura do equipamento para o valor da temperatura ambiente. A metodologia experimental foi aplicada nas duas chaves (designadas aqui como Chave Íntegra e Chave Degradada), contudo, vale-se ressaltar a necessidade de um acabamento superficial para medições mais adequadas dos valores de resistência na Chave Degradada. Ademais, as chaves foram usadas em seu estado original, afim de guardar a maior semelhança com condições operacionais praticadas (como por exemplo altos valores de refletividade)

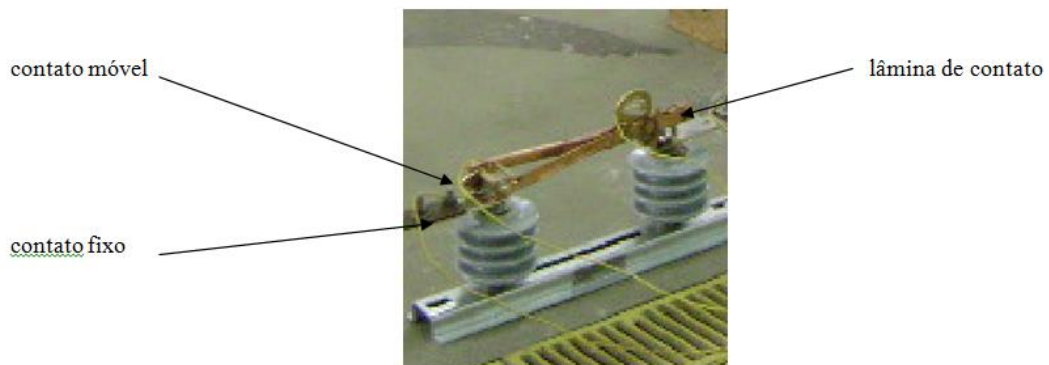


FIGURA 5.3: Posicionamento dos termopares

Ao término dos 22 ciclos térmicos (11 ciclos para a chave íntegra e 11 ciclos para a chave degradada) os termogramas obtidos foram selecionados, extraindo-se 44 termogramas de cada chave (em média 35 % dos termogramas capturados), que foram exportados para um computador para a determinação da emissividade por meio do método radiométrico direto com uso do *software Quick Report* da FLIR Technologies e das informações de temperatura obtidas pelos termopares, segundo Perin (2009 *apud* Andrade Júnior et al, 2014). Esses termogramas foram selecionados em função do atingimento do regime permanente e da análise qualitativa das imagens (como a ausência de refletividade, por exemplo).

Visando estabelecer um critério metrológico adequado para o trabalho, após a determinação das emissividades foram marcados os pontos de interesse para avaliação da temperatura com uso do *software ThermaCAM Researcher PRO 2.10*, desenvolvido pela Flir, em formato. *MAT* e estimadas as temperaturas externas para as faixas de corrente aplicadas, assim como as incertezas de medição termográfica, que foram calculadas usando o modelo de TEIXEIRA (2012) e o *software* IMT (Incerteza de Medição Termográfica) considerando o intervalo de abrangência de $\rho = 95\%$. As incertezas foram calculadas pelos métodos GUM (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*) e MMC (Método de Monte Carlo). A FIG.5.4 mostra a interface gráfica do IMT, com a imagem térmica de um dos ciclos térmicos aplicados ao longo do experimento.

Em paralelo com os experimentos realizados nas chaves degradada e íntegra, foi desenvolvido o modelo matemático do processo de transferência de calor do ativo, desenvolvido a partir da aplicação de um balanço de energia nos dois pontos críticos observados na análise dos termogramas, respectivamente, no contato principal e na articulação, utilizando a conceituação básica dos mecanismos de transferência de calor disponível na literatura. A seguir, o modelo foi validado por meio da comparação com os resultados do experimento realizado em ambiente laboratorial.

Partindo dos valores do balanço de energia e conforme os dados disponíveis na literatura, foram elaborados os modelos de risco técnico e de risco econômico para a chave seccionadora.



FIGURA 5.4 - Interface do software IMT - Incerteza em Medições Termográficas

5.2 Metodologia Teórica

5.2.1 Risco Técnico

O risco técnico trata da avaliação das consequências ou impactos de um evento indesejado, medidos em termos de parâmetros técnicos. Esses parâmetros técnicos podem ser grandezas da natureza cujo comportamento seja significativo para o desempenho do ativo e que sejam mensuráveis, afim de que sejam monitoradas por meio de um sistema de medição qualquer.

Assumindo que o modo de falha prioritário em chaves seccionadoras de 15 kV é o aquecimento no contato principal, pode-se inferir que o aumento de temperatura provoca um aumento de resistência elétrica de contato, que pode ser calculada através da EQ. (2.9).

A EQ.(2.9) requer vários parâmetros de entrada, sendo cada um deles discretizado nas linhas seguintes.

O coeficiente de correção ξ trata-se de um valor adimensional que caracteriza o grau de acabamento da superfície; tal valor será maior quanto melhor for o acabamento superficial da região do contato, com efeitos de rugosidade minimizados. Conforme citado na no Capítulo 2, o valor desse coeficiente varia entre 0,3 e 0,6, sendo adotado para esse trabalho o valor de **0,45**, mesmo valor adotado pela IEC TR 60943(2009) para fundamentar a EQ. (2.9).

A dureza de um material (caracterizada neste trabalho pela variável H) é definida tradicionalmente como a resistência que um material oferece a um esforço externo de penetração. De acordo com a IEC TR 60943 (2009), o valor da dureza do material estudado (cobre) foi assumida como 350 MPa.

O valor da força F aplicada no contato responsável pelo fenômeno de constrição, elucidado no Capítulo 2, foi calculado a partir da seguinte métrica: a norma IEC TR 60943 (2009) estabelece que a EQ. (2.3) só deve ser usada para casos onde a força é de no mínimo 50 N. Contudo, a IEC 60694 (2006) preconiza que o esforço máximo para carregamento da mola de abertura e fechamento da chave seccionadora é de 250 N. Tomando por base esses valores limítrofes calculou-se a média aritmética dos dois valores, chegando-se a um valor de $F = 150$ N.

Com base nas premissas acima, foi calculado o valor **da Resistência de Constrição** utilizando o valor de resistividade do cobre para 20°C, de acordo com a TAB. (2.2) e a EQ. (2.6), onde o valor do raio do contato elementar foi calculado usando as EQ. (2.4) e (2.5).

A resistência de constricção foi considerada constante uma vez que, segundo SILVEIRA et al. (1981), a força de constricção em um contato submetido à corrente alternada apresenta variação significativa para temperaturas acima de 673 K.

Em função dos valores de temperatura atingidos durante os testes e de acordo com o valor máximo admissível de temperatura, a dureza não é alterada, pois não ocorre a temperatura de recozimento do Cobre, que é 190 °C.

Para o cálculo da **Resistência de Filme** os valores adotados da Resistividade Superficial σ_o estão descritos na TAB. (5.1):

TABELA 5.1
Resistividade de Túnel em função do estado de degradação para contatos em cobre

METAL	ESTADO DE DEGRADAÇÃO	$\sigma_o(\Omega m^2)$
Cobre	Novo	2×10^{-12} a 3×10^{-11}
	Oxidado	1×10^{-10}

FONTE - IEC TR 60943 (2009)

Os valores do número de contatos elementares n e o raio do a-spot a foram assumidos de acordo com o exposto nos parágrafos anteriores.

De acordo com a TAB. (5.1), a IEC TR 60943 (2009) estabelece níveis de degradação em função do valor da resistividade, além de afirmar que o valor de s geralmente não excede a 10 nm e a camada inicial s_o é de 20×10^{-10} m, de acordo com os estudos de HOLM (1967) e assumindo a relação entre essa grandeza e a espessura da camada de óxido s foi estipulada a condição exposta na TAB. (5.2):

TABELA 5.2
Valores de Referência de Resistividade Superficial, Camada Formada e Condição.

σ_o (Ωm^2)	s (Å)	Condição
2×10^{-12}	20	Novo
1×10^{-10}	100	Degradado

$1 \text{ \AA} = 1 \times 10^{-10} \text{ m}$

Assim sendo, usando-se da técnica de mínimos quadrados foi possível traçar a função que relaciona o aumento da camada s (Y) em função do aumento da resistividade de túnel σ_o (X), que é:

$$y = 22,06e^{1,56*10^{10}x} \quad (5.1)$$

Também é indicada pela IEC TR 60943 *apud* HOLM (1967) a EQ. (5.2), que é resultado da EQ. (2.7) para o cobre exposto à atmosfera, onde se relaciona a espessura de camada inicial s_o , a espessura de camada final s com o tempo t de ocorrência desse fenômeno, a uma dada temperatura T_c :

$$s = \sqrt{s_o^2 + t \cdot e^{(34,31 - \frac{11700}{T_c})}} \quad (5.2)$$

Reescrevendo a EQ. (5.2) pode-se calcular o tempo necessário para se alcançar uma situação crítica s (no caso $s = 100 \text{ \AA}$) a uma dada temperatura T_c :

$$t = \frac{s^2 - s_o^2}{e^{(34,31 - \frac{11700}{T_c})}} \quad (5.3)$$

A temperatura T_c de acordo com a FIG.5.5 deste trabalho varia em função da parte do equipamento analisada e do material que a compõem.

Para a situação em estudo, têm-se contatos em ligas de cobre nu expostos ao ar, o que indica uma temperatura máxima admissível de 75°C. Admite-se, portanto, que a condição limite do equipamento dá-se mediante um aquecimento de 75°C, com uma resistividade superficial de $1 \times 10^{-10} \Omega m^2$ e com uma camada final de 100 Å.

Natureza da parte, do material e do dielétrico (Ver pontos 1, 2, 3) (ver nota)	Valor máximo	
	Temperatura	Elevação de temperatura para uma temperatura ambiente não excedendo 40°C
	°C	K
1 Contatos (ver ponto 4) Cobre nu ou liga de cobre nu - no ar - no SF ₆ (ver ponto 5) - no óleo Prateados ou niquelados (ver ponto 6) - no ar - no SF ₆ (ver ponto 5) - no óleo Estanhados (ver ponto 6) - no ar - no SF ₆ (ver ponto 5) - no óleo	75 105 80 105 105 90 90 90 90 90	35 65 40 65 65 50 50 50 50
2 Conexões, aparafusadas ou equivalente (ver ponto 4) Cobre nu, liga de cobre nu ou liga de alumínio nu - no ar - no SF ₆ (ver ponto 5) - no óleo Prateadas ou niqueladas (ver ponto 6) - no ar - no SF ₆ (ver ponto 5) - no óleo Estanhadas - no ar - no SF ₆ (ver ponto 5) - no óleo	90 115 100 115 115 100 105 105 100	50 75 60 75 75 60 65 65 60
3 Todos os outros contatos ou conexões feitos de metais nus ou revestidos de outros materiais	(ver ponto 7)	(ver ponto 7)
4 Terminais para conexão a condutores externos através de parafusos (ver ponto 8) - nus - prateados, niquelados ou estanhados - outros revestimentos	90 105 (ver ponto 7)	50 65 (ver ponto 7)
5 Dispositivo de manobra a óleo (ver pontos 9 e 10)	90	50
6 Partes metálicas atuando como molas	(ver ponto 11)	(ver ponto 11)
7 Materiais isolantes e partes metálicas em contato com isolantes das seguintes classes (ver ponto 12) - Y - A - E - B - F - Esmalte: à base de óleo sintético - H - C outros materiais isolantes	90 105 120 130 155 100 120 180 (ver ponto 13)	50 65 80 90 115 60 80 140 (ver ponto 13)
8 Qualquer parte metálica ou material isolante em contato com óleo, exceto contatos	100	60
9 Partes acessíveis - possibilidade de toque em operação normal - sem necessidade de ser tocado em operação normal	70 80	30 40
NOTA Os pontos referidos nesta tabela são aqueles de 4.4.3.		

FIGURA 5.5 Limites de temperatura e elevação de temperatura NBR IEC 60694:2006

Partindo dos resultados dos valores de balanço de energia e correntes aplicadas foi deduzida a EQ. (5.4) pelo método dos mínimos quadrados que relaciona o valor da corrente (X) e o valor da temperatura atingida (Y).

$$Y = 20,03e^{(0,0023X)} \quad (5.4)$$

Os dados de carregamento extraídos referem-se à chaves de entrada e saída da subestação, uma vez que tais chaves são críticas por não apresentarem substitutas imediatas (*by-pass*), necessitando de uma transferência de carga que nem sempre é possível. Esses dados são coletados automaticamente em intervalos de 15 minutos para cada fase do sistema (vermelho azul e branco).

Usando os dados de carregamento disponibilizados pela Cemig D, as temperaturas foram estimadas para cada instante de $t=15$ minutos (0,25 h) e usando a EQ. (5.2) foi calculada a formação de camada de óxido para o instante de tempo de aquecimento, partindo da premissa que durante esse intervalo de tempo o aquecimento foi constante.

O acúmulo de óxido sobre o contato promove um aumento no valor da camada s que pode ser estimado ao término de um dado período como é o caso, onde após o cálculo desse acúmulo a vida útil do ativo foi determinada por meio de índices de confiabilidade usados por DINIZ (2013) em seu trabalho, tomando a premissa de que a chave seccionadora possui, de acordo com a ANEEL, uma vida útil contábil de 15 anos. Considerando 365 dias de trabalho no ano e 24 horas/dia de trabalho, tem-se uma vida útil de operação (que coincide com a vida contábil) de 131.400 horas.

5.2.2 Risco Econômico

O risco econômico é caracterizado como a ocorrência de perdas ou ganhos financeiros em função da probabilidade de ocorrência de um determinado evento. Para o cálculo do risco econômico, adotou-se a abordagem de Exposição Financeira, que, segundo DINIZ (2013), ocorre da seguinte forma: dada a probabilidade p_j de um risco j se materializar a um determinado impacto financeiro associado IF_j (positivo ou negativo), a exposição financeira (EF) correspondente, caso se aceite o risco, é dada por:

$$EF = \sum_j^N p_j \cdot IF_j \cdot (1 + i) \quad (5.5)$$

Onde i = taxa unitária de desconto, a fim de considerar o valor do dinheiro no tempo.

Ainda de acordo com DINIZ (2013), a proposta é decidir entre realizar a manutenção ou não, aceitando um risco de falha p . Se a manutenção for adiada, o impacto financeiro é a economia de C_{man} com uma probabilidade $(1 - p)$, pois esta é a probabilidade do ativo não falhar. Caso a falha aconteça, o impacto será um custo incorrido C_f , negativo. As perdas adicionais de energia $Perd$ são sempre negativas e com probabilidade 1. Além disso, foi considerado que as perdas aumentam a uma taxa $m = 3\%$, referente á média dos valores de taxa de crescimento de mercado nos últimos 5 anos. A taxa unitária de desconto será $i = 11,4\%$, que corresponde ao valor médio de taxa de retorno sobre o capital do setor elétrico com imposto. Portanto, a EQ. (5.5) pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$EF = [(1 - P)C_{man} - pC_f - Perd \times (1 + m)^{(N-1)}] (1 + I)^{(N-1)} \quad (5.6)$$

Onde N = período de tempo, em anos.

O custo da falha C_f , quando da ocorrência de uma interrupção no sistema elétrico, é composto de:

- Custo do atendimento à ocorrência (recomposição do sistema e custo do *call-center*),
- Custo do reparo propriamente dito, ou descarte do equipamento avariado,
- Custo do não faturamento de energia, ou lucro cessante,
- Custo advindo de penalidades regulatórias (multas, compensação a consumidores e redução na tarifa),
- Custo com a perda da remuneração referente ao ativo, caso venha a ser descartado,
- Custo de gestão e engenharia (dedicação de executivos para contingenciar a falha, análise da falha, arranjos de emergência, sobreavisos etc.),
- Custo à imagem da empresa (implica gastos com campanhas, propaganda, gastos com projetos excepcionais etc.), com perda de valor de mercado.

De tal forma que se pode expressar matematicamente o custo da falha C_f , como:

$$C_f = Atend. + Rep. + LC + Penal. + \tilde{N}rem. + G\&E + Imag. \quad (5.7)$$

Os custos de atendimento são determinados, considerando que 5% dos consumidores afetados irão recorrer ao atendimento, a um custo médio de R\$ 0,92 por 2 minutos de ligação por consumidor afetado. Estes custos foram obtidos em sites de empresas prestadoras do serviço, à época desta pesquisa.

O custo de reposição do sistema foi baseado em dados de precificação de serviços da Cemig-D, para o caso de uma chave seccionadora tripolar necessitar de manutenção corretiva serão necessários três funcionários durante 3 horas para realizar a tarefa, reestabelecendo a função do ativo. O custo dessa tarefa é de R\$ 957.

Para o reparo ou descarte do equipamento, devem-se considerar os custos do material empregado e das taxas administrativas (20%) afetas. Para a chave seccionadora tripolar tem-se um custo aproximado de R\$ 2733.

O lucro cessante é determinado assumindo que o tempo total de interrupção de energia causada pela falha é de 1 hora. Durante esse período, será considerado o montante de energia que deixou de ser consumida nesse período na proporção média das classes de consumidores (Residencial: 89% e Comercial 11%, com custos respectivos de 540,59 R\$/MWh e 455,75 R\$/MWh). De acordo com a ANEEL (2013), é preciso ainda, considerar um fator de 0,35 para se obter a parcela que efetivamente vai para a distribuidora, razão entre os valores das parcelas A e B que compõem a Receita Requerida.

Para o cálculo do custo com compensação a consumidores, será considerado também que os indicadores estarão no limite das metas e utilizado o valor de R\$ 9963 por hora de violação como base para os cálculos. Esse valor foi calculado tendo em vista a regulamentação vigente, onde existe compensação direta ao consumidor em caso de violação dos indicadores DIC, FIC, DMIC e DICRI. Os valores podem ser de até 20 vezes o valor da energia que seria consumida pelo cliente durante o período de interrupção.

Os demais custos citados ($\dot{N}rem. + G\&E + Imag$) não serão levados em consideração nesse trabalho, devido ao mínimo efeito causado ao custo da falha e/ou por serem de difícil determinação. Contudo (visando uma melhor compreensão do impacto financeiro causado pela ocorrência da falha) bastaria somá-los às demais parcelas supracitadas.

Após usar os modelos de risco técnico e econômico nos ativos selecionados, a metodologia proposta será aplicada em resultados obtidos de relatórios de inspeção termográfica constantes do banco de dados e seus resultados serão comparados a metodologias para determinação de criticidade de ativos disponíveis na literatura.

6. RESULTADOS

6.1 Análise de Termogramas

A análise dos relatórios de inspeção termográfica fornecidos pela Cemig-D demonstrou que cerca de 83% das 445 anomalias térmicas detectadas dão-se em chaves seccionadoras de código F, que correspondem a uma faixa de tensão de 11-20 kV. Dentre esse percentual, foi identificado que cerca de 70% das anomalias térmicas acontecem no contato principal do equipamento,

Os valores de corrente são demonstrados em um gráfico de setores, que compõe a FIG. 6.1. Já os valores de elevação de temperatura são mostrados na FIG. 6.2

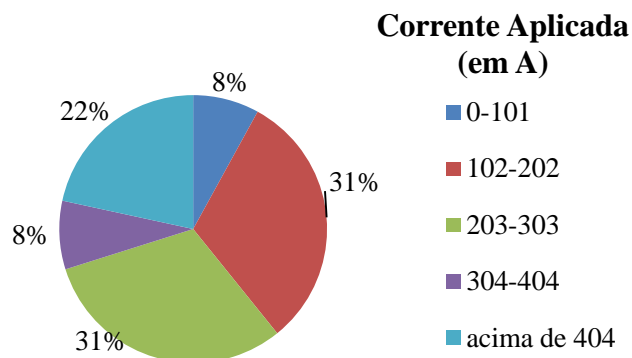


FIGURA 6.1 - Faixas de corrente aplicadas em Chaves Seccionadoras de 15 kV entre 2007-2012 na Cemig-D

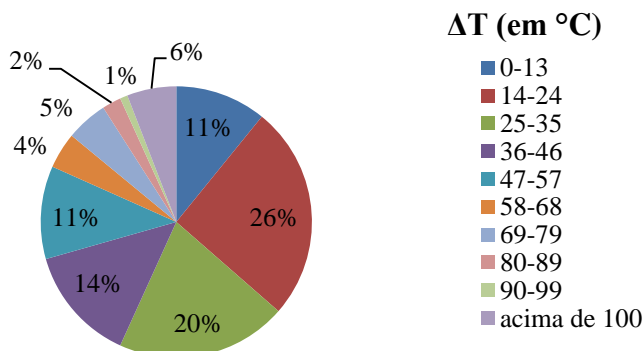


FIGURA 6.2 - Valores de Variação de Temperatura (ΔT) obtidas em inspeções termográficas de chaves seccionadoras entre 2007-2012 na Cemig-D.

Um dos critérios vastamente aplicados em inspeções termográficas no setor elétrico para o cálculo de ΔT , corresponde à diferença entre a temperatura do equipamento supostamente em falha e a temperatura de um equipamento idêntico que funciona sob condições similares. Tendo em vista os resultados apresentados nas FIG (6.1) e (6.2), nota-se que, em 70% dos termogramas é observada uma ocorrência de faixas de corrente de 0 a 400 A, com uma predominância de correntes de 100 a 300 A. Dentro dessa faixa, cerca de 71% dos termogramas apontam para valores de ΔT de até 46°C. Valendo-se da TAB. (6.1), nota-se que cerca de 64% dos termogramas indicam valores de ΔT que extrapolam os limites especificados pela NETA.

TABELA 6.1

Critérios e ações sugeridas pela NETA –MTS 2013

ΔT_{pref}	ΔT_{amb}	Ação Recomendada
1°C - 3°C	1°C - 10°C	Possível Indicativo de falha
4°C - 15°C	11°C - 20°C	Provável Indicativo de falha
----	21°C - 40°C	Monitorar até medidas corretivas sejam tomadas
>15°C	> 40°C	Reparo imediato

FONTE - NETA –MTS (2013) adaptado

6.2 Resultados experimentais

A realização dos experimentos com as chaves seccionadoras íntegra e degradada tem seus resultados expostos a seguir, iniciando pela FIG. 6.3:

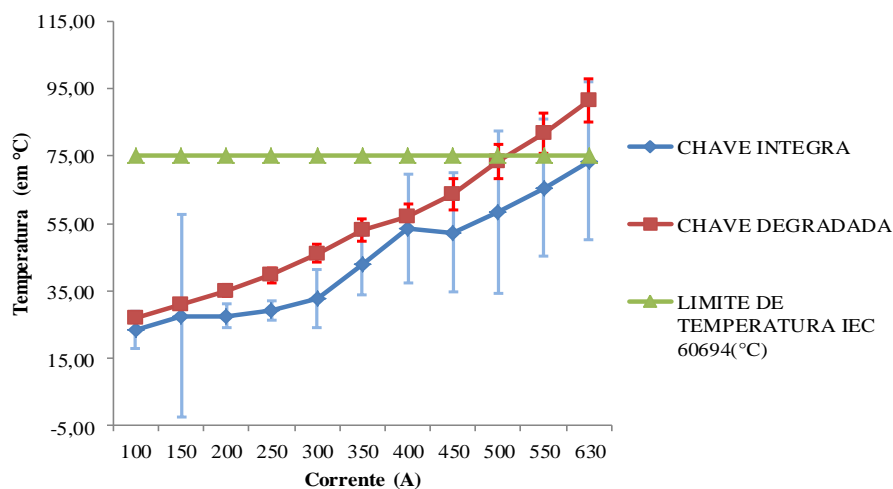


FIGURA 6.3 - Temperaturas IMT das chaves degradada e íntegra em comparação com a temperatura limite IEC 60694

O gráfico de linhas referente à FIG.6.3 é constituído de dois eixos que relacionam os valores de temperatura medida no experimento com a devida incerteza associada e os valores de corrente empregados no ensaio. Observa-se o efeito da emissividade sobre a incerteza de medição nas inspeções termográficas, efeito esse traduzido nos grandes intervalos de abrangência existentes para os valores que compõem a curva de temperatura da chave íntegra. Em aproximadamente 55% das faixas de corrente do experimento, o intervalo de abrangência engloba os valores de temperatura da chave degradada, o que demonstra a coerência do experimento, que, considerando os parâmetros metrológicos adotados, indica claramente o aquecimento do contato em temperaturas acima dos limites especificados pela IEC 60694 (2006).

Outro critério amplamente usado para cálculo do ΔT é o ΔT_{amb} , usado na determinação do grau de degradação de um dado equipamento no sistema elétrico baseado na NETA, expresso pela EQ. (6.1), consistindo na diferença entre a temperatura medida e a temperatura ambiente no qual o mensurando está inserido:

$$\Delta T_{amb} = T_p - T_{amb} \quad (6.1)$$

onde T_p é a temperatura do objeto e T_{amb} refere-se à temperatura ambiente.

A FIG. 6.4 descreve, por meio de um gráfico de linhas que relaciona as grandezas ΔT_{amb} e corrente, o comportamento de ΔT_{amb} para a Chave Íntegra e para a Chave Degradada:

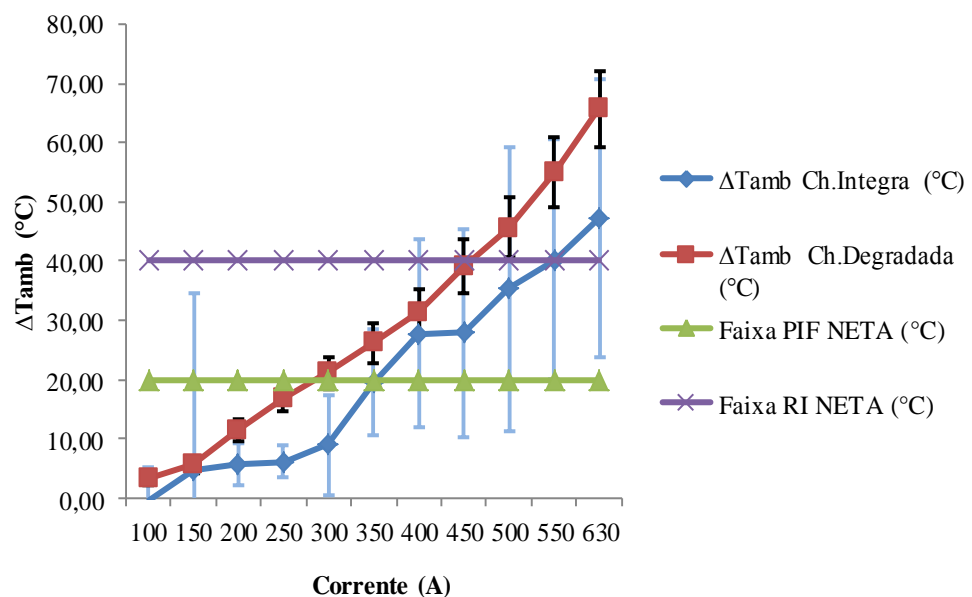


FIGURA 6.4 - Comparação de ΔT_{amb} e Faixas De Tolerância de acordo com NETA (2013)

Nota-se a grande oscilação nos valores de ΔT_{amb} para a chave íntegra, oscilação essa que, associada com os grandes intervalos de abrangência provocados por baixos valores de emissividade, provocam dubiedade na interpretação dos resultados em relação às faixas PIF (Provável Indicativo de Falha) e RI (Risco Imediato), ou seja, o ativo pode pertencer a 2 faixas de criticidade, podendo ser considerado inapto à sua função, sem ter chegado ao término de sua vida útil, como também pode ser considerado apto, mas apresentar falha abrupta, incorrendo em perda da função especificada, prejuízos à imagem da organização, danos materiais e impactos econômicos diversos.

A FIG (6.5) demonstra o comportamento dos valores da Resistência de Contato no experimento ao longo das faixas de corrente citadas:

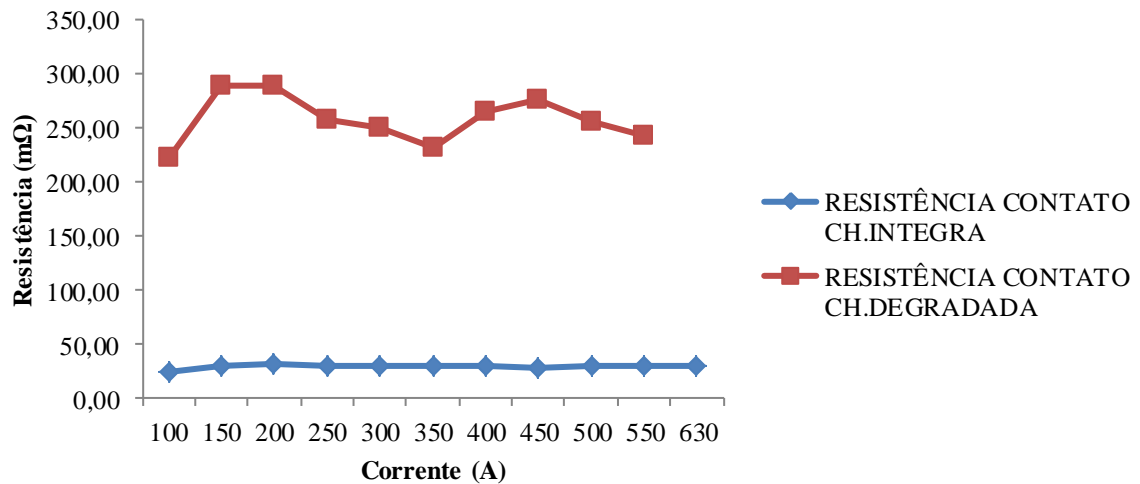


FIGURA 6.5 - Comparação de valores de resistência no contato entre as chaves íntegra e degradada.

Na FIG (6.5) é representado um gráfico de linhas composto dos eixos horizontal (corrente) e vertical (resistência elétrica do contato); percebe-se que a oscilação dos valores de resistência no contato da chave degradada foi cerca de 30 vezes maior que nos valores de resistência no contato da chave íntegra, caracterizando a ocorrência de dano ao contato. Essa oscilação no valor da resistência de contato para a chave degradada é devido à formação de camada de óxido em sua superfície, devido ao aquecimento e à exposição às intempéries ambientais, tais como tempestades, ventos, sol, agentes biológicos, dentre outros.

6.3 Resultados Teóricos

O balanço de energia demonstrado anteriormente foi usado como modelo teórico base para os dados de entrada do modelo de risco técnico. Os valores de temperatura atingidos durante o experimento foram comparados com os valores teóricos e comparados com os resultados demonstrados na FIG 6.6:

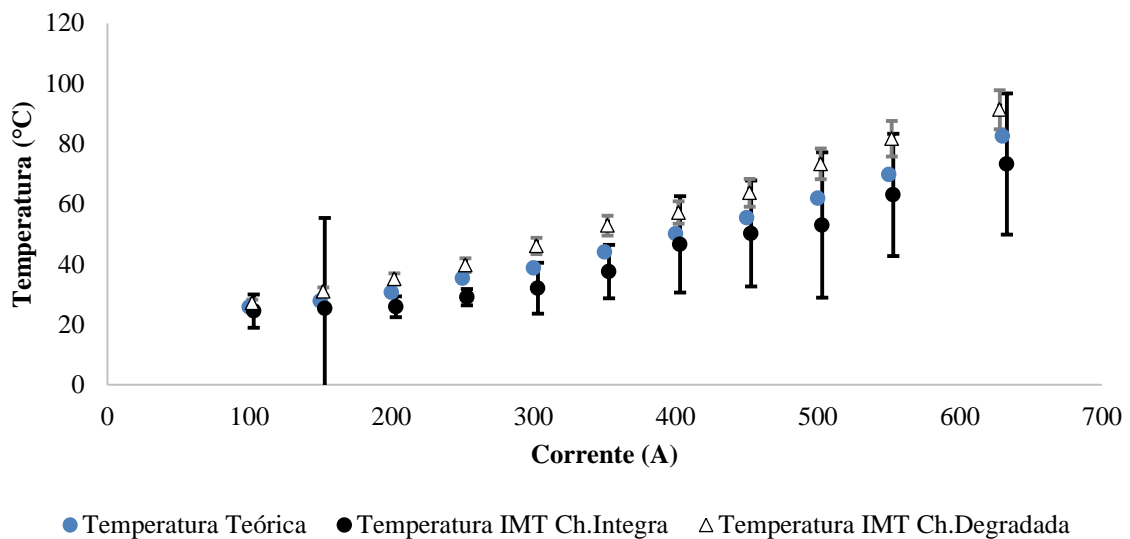


FIGURA 6.6: Comparação dos valores de temperatura do modelo teórico e experimental

A FIG 6.6 ilustra por meio de um gráfico de linhas que relaciona a temperatura atingida (em °C) a um determinado valor de corrente (em A), que o resultado do modelo teórico aproxima-se do resultado experimental em 82% das faixas de corrente sugeridas, indicando grande grau de acerto. Devem-se destacar os grandes valores de incerteza expandida dos resultados de temperatura obtidos no experimento para a chave íntegra, sendo que para a chave degradada a incerteza expandida foi cerca de cinco vezes menor, valendo-se de um intervalo de abrangência de 95% em ambas as medições

A TAB. 6.2 mostra os percentuais de contribuição das fontes de incerteza para os valores de corrente ensaiados na chave seccionadora íntegra. Durante os experimentos os valores de corrente e temperatura aumentaram na ordem de 13 e 4 vezes respectivamente, resultando numa mudança nos valores de contribuição das fontes de incerteza de medição; para baixos valores de corrente a principal fonte de incerteza de medição era a temperatura ambiente e as incertezas intrínsecas do termovisor, enquanto que para valores de corrente acima de 300 A, a fonte de incerteza de medição predominante foi a emissividade. Essa informação é relevante, pois indica que devem ser tomadas medidas preventivas quando da

ocorrência de inspeção termográfica em ativos recém-instalados e que estiverem operando abaixo de 50% de sua corrente nominal, sob o risco de se medir a temperatura refletida do ativo e não sua temperatura real, assim como o uso correto dos valores de emissividade, que é o principal parâmetro de objeto ajustado pelo usuário do termovisor e que influencia de modo substancial o valor do mensurando. Outra alternativa para reduzir a incerteza causada por baixos valores de emissividade é o uso de cobertura ou modificação da superfície inspecionada com uso de tintas, conforme demonstrado por GOMES JR et al. (2011), onde os autores conseguiram reduzir em 10 vezes o valor da incerteza de medição.

TABELA 6.2

Porcentagem de contribuição das fontes de incerteza para faixas de corrente ensaiadas – Chave Integra

Corrente (A)	ϵ	$T_{amb}(^{\circ}C)$	$T_{atm}(^{\circ}C)$	Dist.(m)	Incert.Int.
100	4%	80%	0%	0%	15%
150	29%	62%	0%	0%	9%
200	36%	45%	0%	1%	18%
250	41%	42%	0%	0%	16%
300	48%	46%	0%	0%	6%
350	68%	25%	0%	0%	7%
400	76%	20%	0%	0%	4%
450	76%	21%	0%	0%	3%
500	80%	17%	0%	0%	3%
550	83%	14%	0%	0%	3%
630	85%	12%	0%	0%	3%

A TAB. 6.3 mostra os percentuais de contribuição das fontes de incerteza para os valores de corrente ensaiados na chave seccionadora degradada:

TABELA 6.3

Porcentagem de contribuição das fontes de incerteza para faixas de corrente ensaiadas – Chave Degradada

Corrente (A)	ϵ	$T_{amb}(^{\circ}C)$	$T_{atm}(^{\circ}C)$	Dist.(m)	Incert.Int.
100	31%	19%	0%	0%	49%
150	44%	16%	0%	0%	39%
200	62%	9%	0%	0%	27%
250	71%	6%	0%	1%	23%
300	75%	4%	0%	1%	20%
350	78%	5%	0%	1%	16%
400	81%	3%	0%	1%	15%
450	84%	3%	0%	1%	12%
500	86%	2%	0%	1%	11%
550	88%	2%	0%	1%	10%
630	89%	1%	0%	1%	9%

Nota-se semelhança quanto aos valores de contribuição das fontes de incerteza do experimento da chave íntegra e da degradada, sendo que, nessa última, a emissividade é a fonte de incerteza predominante para valores de corrente a partir de 150 A, muito em função dos altos valores de emissividade envolvidos na medição, devido á formação de óxido na superfície de toda a chave, mesmo após o trabalho de acabamento superficial manual com lixa d'água. Para correntes abaixo desse valor, as incertezas intrínsecas tornam-se ligeiramente maiores que a emissividade.

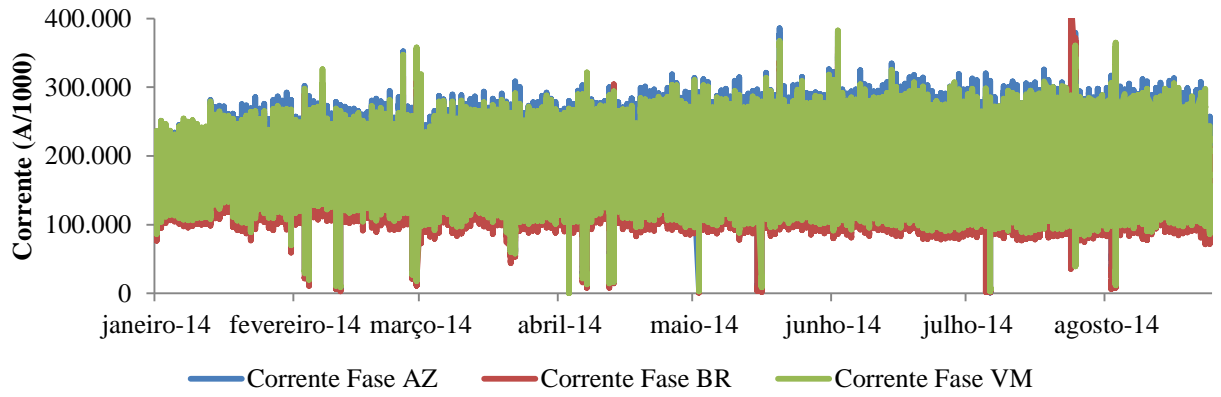
6.4 Risco Técnico

6.4.1 Aplicação do Histórico do Carregamento Elétrico

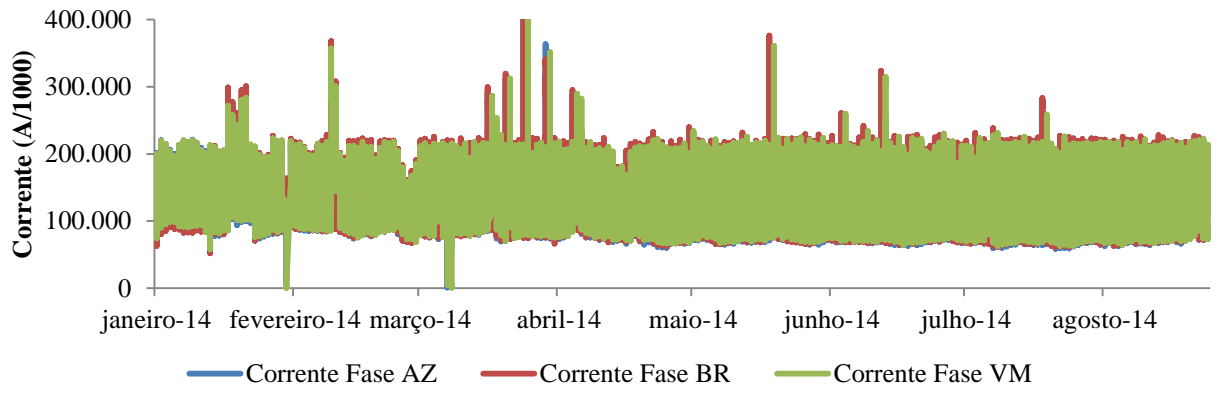
Para validação do modelo proposto foram usados dados de carregamento da subestação Betim 4, localizada na cidade de Betim, na região metropolitana de Belo Horizonte devido à sua importância para a economia daquela cidade em função do alto número de empresas concentradas na região, durante os primeiros 8 meses do ano de 2014, representados por gráficos de linhas relacionando a corrente elétrica aplicada em cada fase do circuito ao longo do período de um mês, representados nas FIG. 6.7 e 6.8.

Os dados de carregamento extraídos referem-se à chaves de entrada e saída da subestação, uma vez que são críticas por não apresentarem substitutas imediatas (*by-pass*), necessitando de uma transferência de carga que nem sempre é possível. Esses dados são coletados automaticamente em intervalos de 15 minutos para cada fase do sistema (vermelho azul e branco).

Notam-se algumas oscilações de corrente típicas de sistemas elétricos de potência, caracterizadas por transferência de carga do circuito, baixa demanda, manutenções e/ou obras, assim como demais contingências típicas do segmento. Foram suprimidos valores de carga abaixo de 1 A e valores nulos, caracterizados como ruídos no sistema de medição e que não causaram aumentos significativos de temperatura. Percebe-se também que, os valores de corrente oscilam entre 100 e 200 A em 60 % dos equipamentos estudados, com eventuais picos entre 400 A. que são muito curtos frente à duração de tempo total (cerca de 5%).

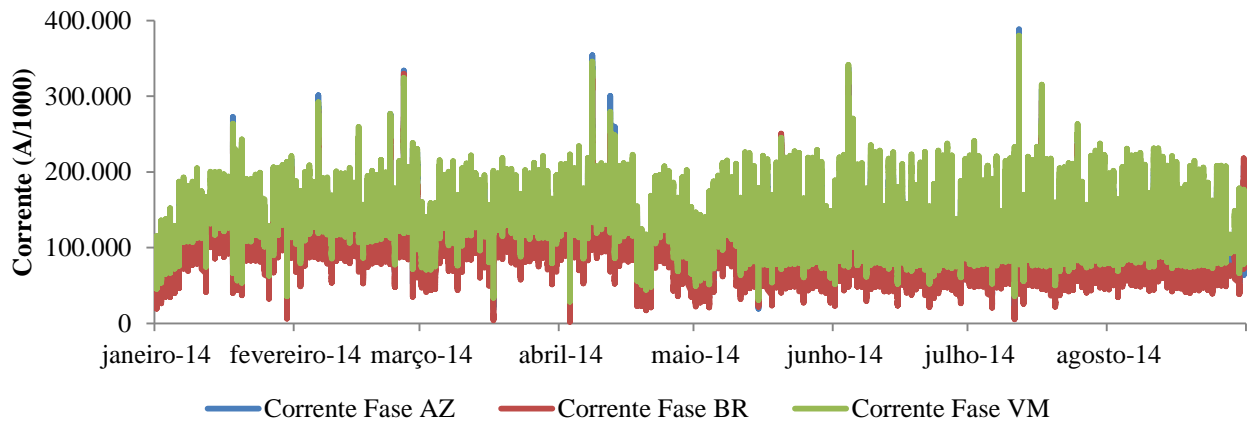


BETQ404F

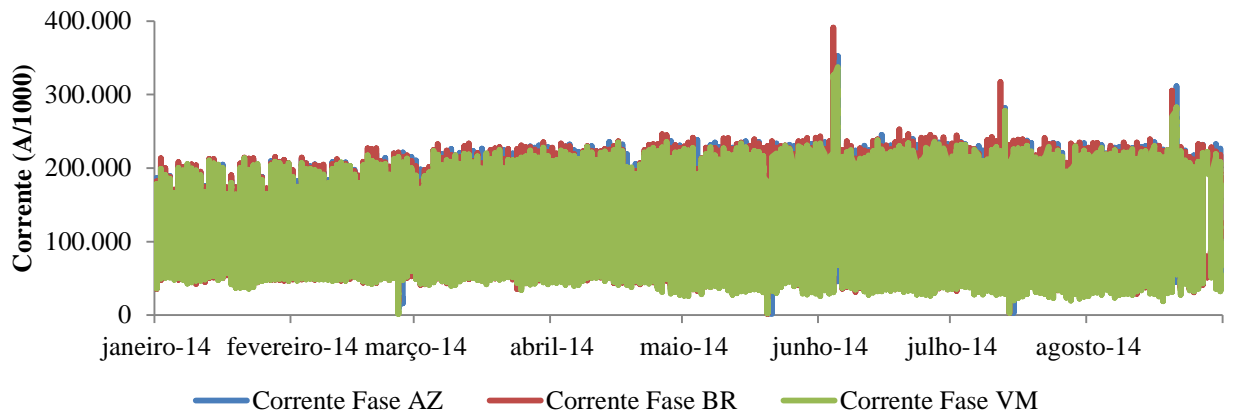


BETQ405F

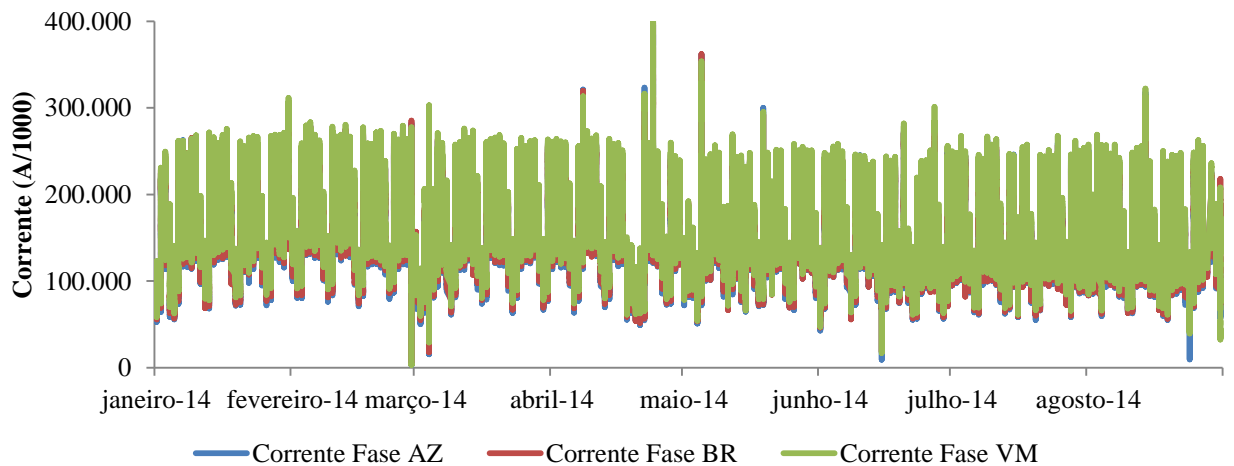
FIGURA 6.7 - Histórico de correntes de carga em cada circuito da Subestação Betim 4 no ano de 2014 (A)



BETQ407F



BETQ408F



BETQ410F

FIGURA 6.8 - Histórico de correntes de carga em cada circuito da Subestação Betim 4 no ano de 2014 (B)

6.4.2 Temperaturas atingidas e Formação de Camada de Óxido

A passagem de corrente produz um aumento de temperatura na região do contato dos ativos citados que pode ser calculado pelo modelo teórico proposto. Esse aumento de temperatura é demonstrado na FIG. 6.9:

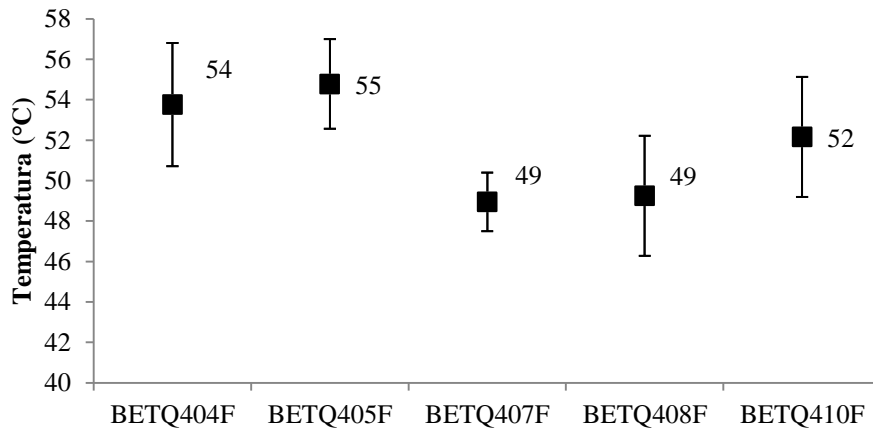


FIGURA 6.9 - Valores de temperatura máxima atingidos para os respectivos ativos

Os valores de temperatura citados na FIG.6.9 estão cerca de 25% abaixo do valor limite estabelecido pela NBR IEC 60694:2006 para contatos de cobre nu, que é de 75°C, constituindo em uma informação importante para a gestão da vida útil desses ativos, bem como operacionalização do sistema.

Os valores de corrente máxima atingidos ao longo do período de estudo também seguem esse padrão, ou seja, operam cerca de 27% abaixo da corrente nominal do equipamento, fato esse evidenciado pela FIG. 6.10 a seguir:

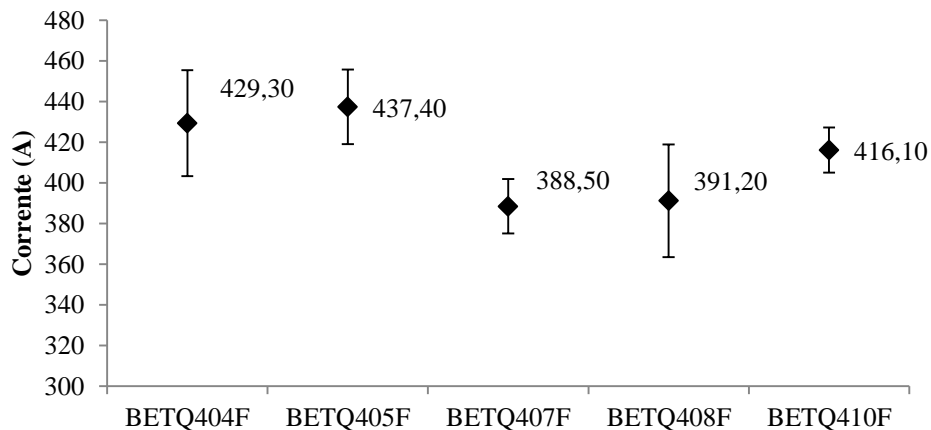
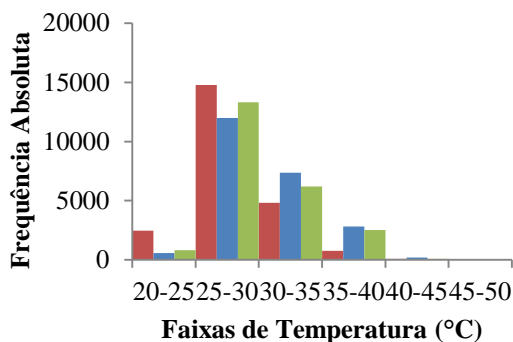


FIGURA 6.10 - Valores de Corrente Máxima atingidos para os respectivos ativos

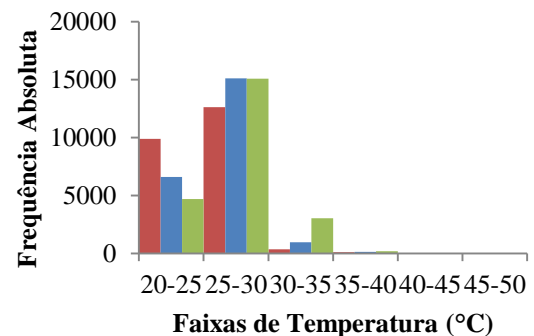
No eixo vertical são representados os valores de corrente aplicados, enquanto que no eixo horizontal são discriminados os ativos submetidos a tais correntes. Outro ponto a considerar é a duração efetiva de aquecimento do contato, pois o acúmulo de camada de óxido será tão maior quanto o aumento da temperatura, bem como do tempo de aquecimento, ou seja, o aumento do tempo de aquecimento para um valor superior de temperatura é que realmente causa o dano ao contato, caracterizado pelo aumento da camada de óxido no contato.

Nesse trabalho, a frequência de aquecimento para os ativos em estudo é representada por histogramas construídos a partir das distribuições de frequência das temperaturas em função das condições de carregamento. A FIG (6.11) demonstra esse fenômeno:



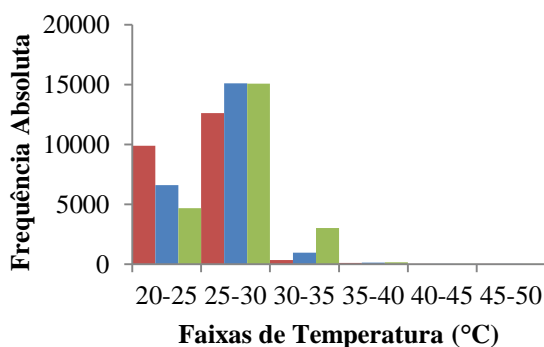
■ Fase BR ■ Fase AZ ■ Fase VM

BETQ404F



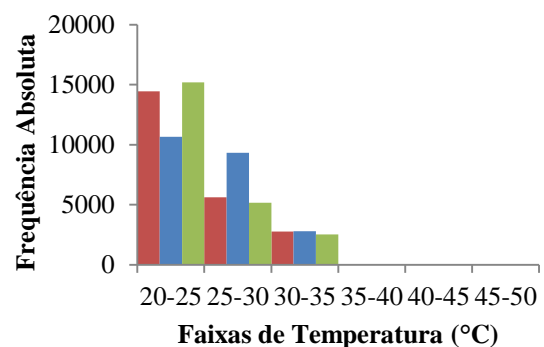
■ Fase BR ■ Fase AZ ■ Fase VM

BETQ405F



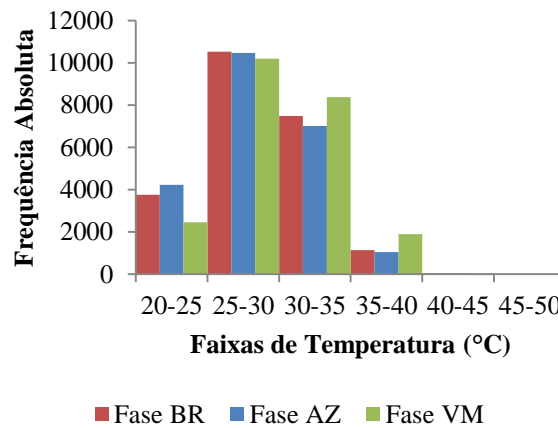
■ Fase BR ■ Fase AZ ■ Fase VM

BETQ407F



■ Fase BR ■ Fase AZ ■ Fase VM

BETQ408F



BETQ410F

FIGURA 6.11 - Histogramas dos valores de temperatura e respectivas frequências

Os histogramas mostrados anteriormente ilustram que, durante cerca de 60% do carregamento ocorrem temperaturas de aquecimento na ordem de 25 a 30°C, ou seja, temperaturas cerca de 63% abaixo do valor de temperatura limítrofe estabelecido pela IEC NBR 60694:2006. Contudo, nota-se que as chaves BETQ404F e BETQ410F possuem valores de frequência absoluta significativos para as faixas de temperatura de 30 a 35°C e 35 a 40°C, o que se constitui em um fator importante de observação, quanto à vida útil, a ser observado mais adiante nesse trabalho.

Devido ao aquecimento sofrido pelo contato por efeito Joule, tem-se a formação de uma dada camada de óxido. A FIG 6.12 expõe os resultados da aplicação da EQ (5.2) para cada um dos equipamentos, usando como dados de entradas os valores de corrente para cada fase do sistema expostos nas FIG. 6.10 e 6.11:

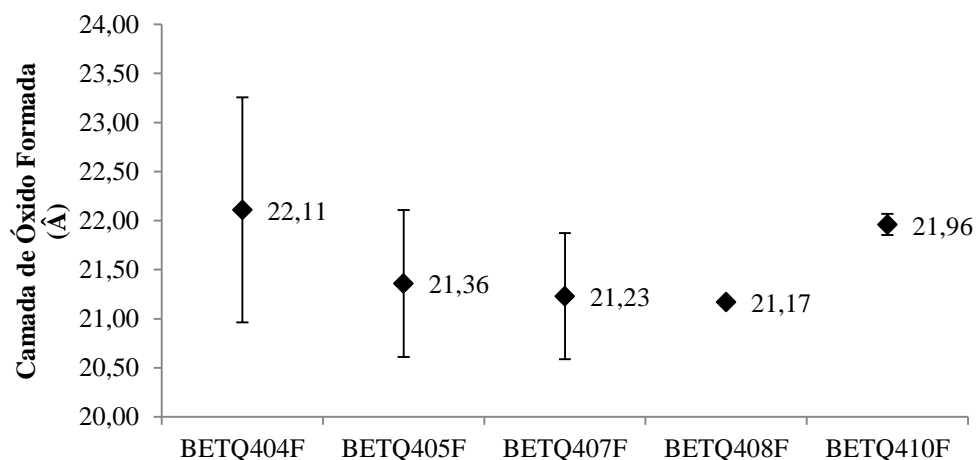


FIGURA 6.12 - Resultados de Camada Formada durante o período de Janeiro-Agosto 2014

Os equipamentos BETQ404F e BETQ410F foram os que obtiveram os maiores valores de camada formada, fato esse explicado pela maior frequência de temperaturas entre 25 e 40°C. Há de se destacar também que, em BETQ404F existe uma incerteza 10 vezes maior que BETQ410F, devido aos valores de corrente diferentes entre as fases que compõem o circuito, levando a valores dispersos entre si. Contudo, a oscilação desse valor de camada é pequena em escala, uma vez que a espessura da camada é expressa em *Angstroms* (10^{-10} m).

Esse fenômeno também é refletido nos equipamentos BETQ405F e BETQ407F pelo mesmo motivo, entretanto, o fato desses circuitos terem atingido temperaturas entre 20 e 30°C durante cerca de 70% do tempo fez com que a camada formada fosse, em média, cerca de 5% menor que os valores atingidos por BETQ404F e BETQ410F.

No equipamento BETQ408F visualiza-se o valor mais baixo de formação de camada, pelo motivo de nesse circuito haver baixos valores de temperatura (entre 20 e 25°C) durante 60 % do tempo, ou seja, a maior parte do período.

6.4.3 Resistência de Contato

A FIG.6.13 ilustra os valores de resistência de contato calculados para os referidos ativos, tomando por base o valor da temperatura máxima atingida em cada circuito estudado.

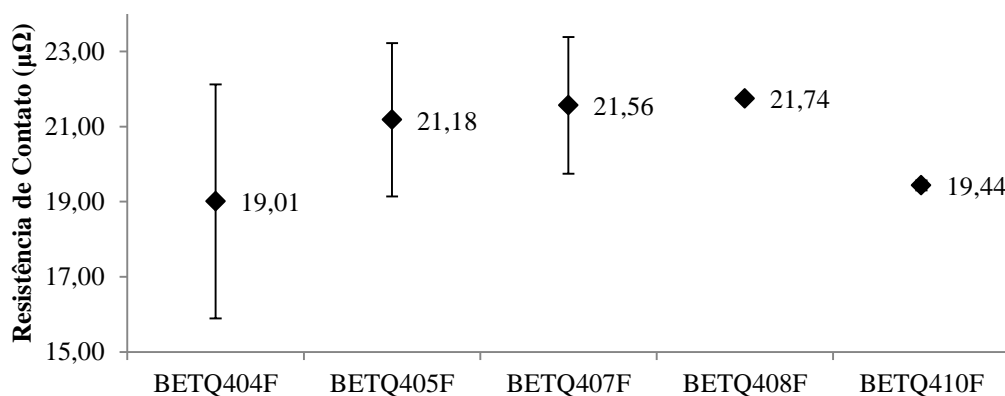


FIG 6.13 - Resultados de Resistência de Contato obtida no período

Nota-se que os valores obtidos de resistência de contato oscilam em torno de 14 % em relação aos valores nominais, contudo não caracterizando um aumento significativo da resistência elétrica, resultando em pequenas perdas por efeito Joule devido ao aumento da resistência.

6.4.4 Influência do Aumento de Temperatura na vida útil do equipamento

A influência do aumento da temperatura na vida do contato é determinada por meio da aplicação sucessiva da EQ. (5.2). Essa influência é ilustrada num gráfico que relaciona a vida útil do contato (em horas) e a temperatura do contato (em °C) exposta a seguir:

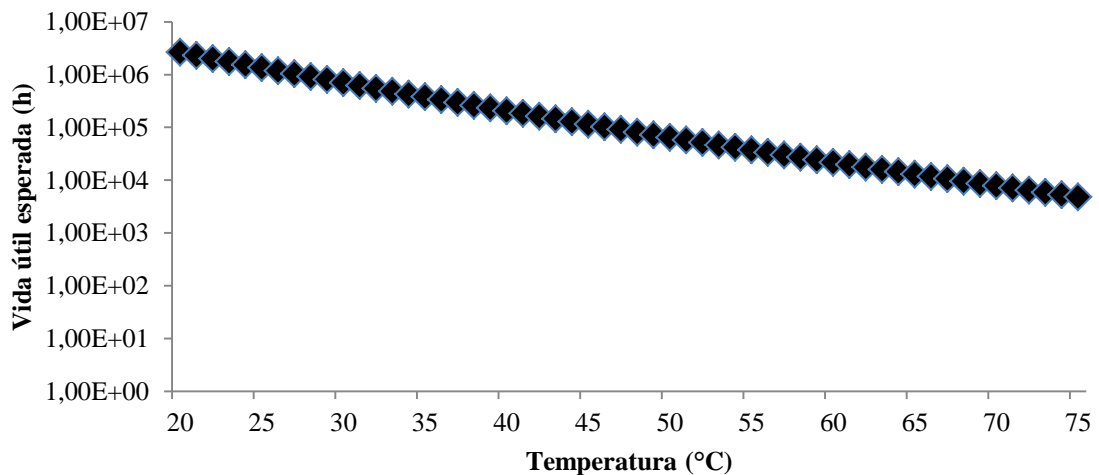


FIGURA 6.14 - Representação gráfica da influência da temperatura na vida do contato

A temperatura citada na FIG (6.14) é calculada para regime permanente, logo se pode notar que, para um valor de temperatura de 20°C, o contato terá uma vida útil esperada de 2.653.152 horas e, para uma temperatura limítrofe indicada na NBR IEC 60694:2006 de 75°C, tem-se uma vida útil esperada de 4818 horas. Para esses cálculos foram considerados valores de camada inicial de 20 Å e camada final de 100 Å.

Percebe-se uma queda acentuada da vida útil para valores de temperatura entre 20 e 25°C, onde essa queda é de, aproximadamente, 49%. Portanto se pode inferir que, o aumento de temperatura durante um período de tempo prolongado sobre regime permanente induz a uma queda significativa do valor de vida útil esperada do contato.

6.4.5 Cálculo da Vida Útil Remanescente

Levando em consideração os valores de camada formada no período como camada inicial e o aquecimento em regime permanente para o maior valor de temperatura atingido no período, a Vida Útil Remanescente (VUR) foi calculada, estimando assim a durabilidade do contato mediante a condição de exposição citada. Esse valor foi estimado

para os valores máximo e mínimo de temperatura de cada um dos ativos citados, em função da variação de temperatura entre as fases do seccionador. Para tanto, foram estimados dois cenários, intitulados “*Pior Cenário*” e “*Melhor Cenário*”. Foi considerado como tempo máximo de operação o tempo de depreciação contábil indicado pela ANEEL (2008), que é de 15 anos ou 131.400 horas, considerando um regime de trabalho contínuo. Os resultados de VUR estão expressos na TAB. (6.4):

TABELA 6.4

Vida útil Remanescente no *Pior Cenário* para os ativos propostos

	TEMPERATURA (°C)	VUR PIOR CENÁRIO (h)	% VUR PIOR CENÁRIO
BETQ404F	54	42.846	33%
BETQ405F	55	38.331	29%
BETQ407F	49	72.785	55%
BETQ408F	49	70.392	54%
BETQ410F	52	50.676	39%

Tomando por base os valores de temperatura propostos e sabendo que a camada final S é de 100 \AA , os valores de VUR indicam uma vida acima de 40.000 horas em 80% dos casos, exceção feita a BETQ405F que, devido a um valor de temperatura elevado pontual atingido durante o período de estudo, teve uma VUR calculada de aproximadamente 38.000 horas, evidenciando a influência da temperatura no cálculo da vida útil estimada do contato.

Os valores absolutos de VUR foram representados em porcentagem através da razão entre VUR e a vida de depreciação contábil prevista de 131.400 horas, buscando aperfeiçoar o uso do ativo, igualando sua vida técnica em operação à sua vida contábil.

Tendo em vista o ambiente descrito como “*Melhor Cenário*” foi elaborada a TAB. (6.5):

TABELA 6.5

Vida útil Remanescente no *Melhor Cenário* para os ativos propostos

	TEMPERATURA (°C)	VUR MELHOR CENÁRIO (h)	% VUR MELHOR CENÁRIO
BETQ404F	48	77.984	59%
BETQ405F	50	62.166	47%
BETQ407F	46	100.761	77%
BETQ408F	44	135.689	103%
BETQ410F	50	66.208	50%

Para o “*Melhor Cenário*” atingiu-se valores de vida de até 3x maiores que os valores de VUR no “*Pior Cenário*”, muito devido às temperaturas envolvidas, em média 10% menores em relação ao cenário anterior. Destaca-se o caso do ativo BETQ408F, que

extrapolou em 3% a vida útil estabelecida para o equipamento. Isto se deve em boa parte para os baixos valores de temperatura e da mínima formação de camada de óxido no contato da chave.

Orientando-se por tabelas de confiabilidade, ao avaliar o percentual de VUR, é possível classificar a condição do ativo de acordo com a TAB. (6.6). Para cada faixa da grandeza, pode-se associar uma probabilidade de falhas, conforme mostra a TAB. (6.7).

TABELA 6.6

Classificação das Grandezas em Faixas (Alarme)

CONDIÇÃO	DESCRIÇÃO	Lim.Inf.Faixa(% VUR)	Lim.Sup.Faixa(% VUR)
Normal	Valores da grandeza próximos a parâmetros de novo.	60%	100%
Alterada	Grandeza apresenta piora leve, envelhecimento normal. Acompanhar evolução confirme rotina.	20%	59%
Degradada	Grandeza indica que existe defeito ou o equipamento/ componente aproxima-se do fim de vida útil. Programar intervenção.	10%	19%
Crítica	Grandeza indica que existe defeito grave, que em curto tempo evoluirá para falha. Realizar correção urgente.	0%	9%

FONTE: DINIZ (2013)

TABELA 6.7

Classificação quanto à Probabilidade de Perda da Função Principal

CONDIÇÃO	DESCRIÇÃO
Improvável p=5%	Nenhuma grandeza está fora de limites, nem apresenta tendência de violação. p=5% Ativo em boa condição.
Remota p=20%	Uma ou mais grandezas apresentam tendência de violação de limites, porém encontram-se abaixo dos limites. Pequenos defeitos que podem aguardar correção na próxima manutenção de rotina.
Provável p=50%	Uma ou mais grandezas violaram os limites e continuam com tendência de agravamento. Defeitos importantes que requerem manutenção programada fora da rotina.
Certa p=95%	O nível de violação da grandeza é crítico, requerendo ações imediatas. Defeitos graves que requerem manutenção urgente ou retirada do equipamento de serviço.

Fonte: DINIZ (2013)

Com essas premissas, e orientado pela EQ. (6.3) ao extrapolar os dados, é possível traçar faixas que representem diferentes fases da vida do ativo FIG.6.15 (DINIZ, 2013).

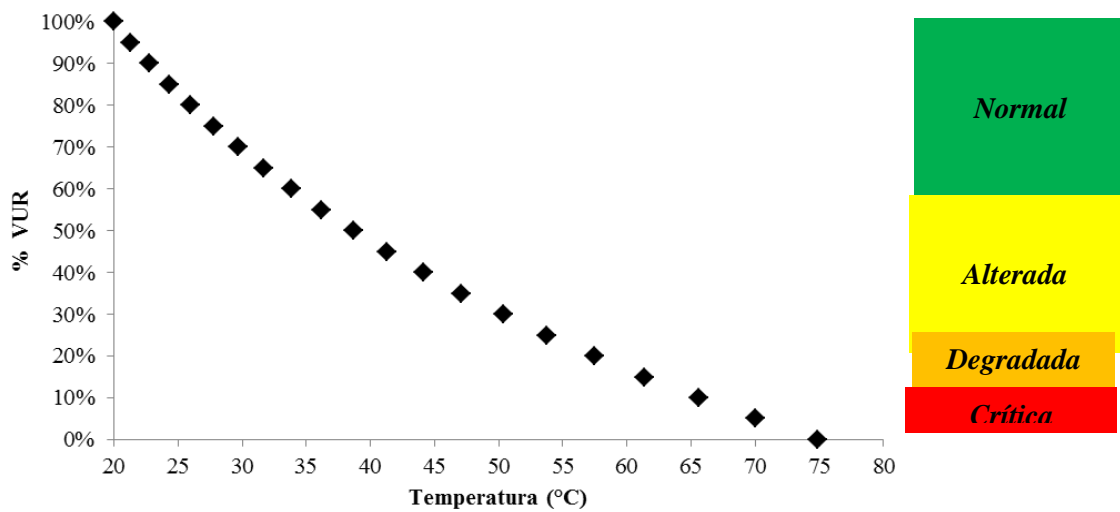


FIGURA 6.15 - Faixas Críticas de vida de uma chave seccionadora aplicada em subestações

No primeiro terço da vida, mesmo com um aumento da temperatura de até 10°C, o comportamento da chave é tão bom quanto uma nova, com VUR entre 100 e 60%. A partir de um valor limite de VUR de 60%, considera-se a chave com um envelhecimento apreciável, sendo necessário o acompanhamento por meio de inspeções tipicamente executadas pela organização. A faixa de programação de substituição do equipamento dar-se-ia atingir a faixa “Degradada”, em que a temperatura é de, aproximadamente, 58°C, sendo que intervenções urgentes iriam ser necessárias para faixas de VUR abaixo de 10%, ou seja, em temperaturas a partir de 66°C.

6.5 Risco Econômico

O impacto financeiro de eventuais falhas das chaves seccionadoras em estudo está demonstrado na TAB. (6.8), orientando-se pelas condições citadas nas TAB. (6.6) e (6.7), também levando em consideração o ponto de substituição como sendo a entrada na faixa “Degradada”, ou seja, é assumida uma probabilidade $p=0,2$ de o ativo falhar.

Em todos os casos a exposição financeira é negativa, significando que não é, financeiramente, interessante postergar a intervenção até o contato degradar-se por completo. Nesses casos, os custos de falha justificam uma intervenção antes do esgotamento da vida do contato, considerando valores de perdas de energia na ordem de centavos de reais. Esse fato pode ser observado na TAB. (6.9).

Contudo, os valores de exposição financeira (mesmo que negativos) são baixos, diante dos demais custos envolvidos, levando em consideração que estes foram os mesmos para todos os pontos operativos. Além disto, é válido recordar-se que se tratam de equipamentos sem quaisquer tipo de *by-pass*, ou seja, não possuem reserva.

TABELA 6.8

Impacto Financeiro de uma falha (em R\$)

Equipamento	Material	Atendimento	Reparo	Lucro Cessante	Penalidades	Total
BETQ404F	-2733,00	-1934,36	-957,00	-348,72	-9963,40	-15936,48
BETQ405F	-2733,00	-1934,36	-957,00	-348,72	-9963,40	-15936,48
BETQ407F	-2733,00	-1934,36	-957,00	-348,72	-9963,40	-15936,48
BETQ408F	-2733,00	-1934,36	-957,00	-348,72	-9963,40	-15936,48
BETQ410F	-2733,00	-1934,36	-957,00	-348,72	-9963,40	-15936,48

TABELA 6.9

Exposição Financeira calculada para cada equipamento

Equipamento	Pior Cenário	Melhor Cenário
	Exposição Financeira (R\$)	Exposição Financeira (R\$)
BETQ404F	-194,76	-299,54
BETQ405F	-174,86	-241,49
BETQ407F	-268,9	-413,49
BETQ408F	-268,87	-571,04
BETQ410F	-216,87	-268,95

6.6 Aplicação da metodologia no banco de dados

6.6.1 Seleção dos Relatórios de Inspeção no Banco de Dados

De posse dos relatórios de inspeção termográfica disponíveis no banco de dados foram selecionados relatórios dos ativos BETQ 408F5, BETQ404F3, BETQ407F3 e BETQ410F3 conforme TAB (6.10):

TABELA 6.10

Dados extraídos dos relatórios de inspeção termográfica

	Δt_{ref} (°C)	T_{amb} (°C)	Corrente Medida (A)	Pontuação	Prazo para intervenção (dias)	Temp. Aparente (°C)
BETQ408F5	38,1	25	150	18	60	60,00
BETQ404F3	91	23	300	25	0	113,70
BETQ407F3	21,3	29	135	12	120	52,60
BETQ410F3	78,7	29	200	25	0	111,70

Na TAB (6.10) estão dispostos dados que compõe um típico relatório de inspeção termográfica, como o valor da temperatura ambiente, a corrente aplicada no circuito quando da inspeção e o valor de elevação de temperatura Δt_{ref} , bem como a pontuação atingida em função de parâmetros citados anteriormente, o prazo recomendado para intervenção e o valor da temperatura medida durante a inspeção (aqui denominada Temperatura Aparente). Se observa que existe uma variação de 433 % nos valores de Δt_{ref} , onde os ativos BETQ 404F3 e BETQ 410F3 tiveram medições de temperatura com resultados acima dos 110 °C, indicando uma falha incipiente, razão pela qual a pontuação nesses ativos ser superior à pontuação máxima e o prazo para intervenção ser imediato.

Os valores de temperatura ambiente oscilaram cerca de 16%, em função dos horários de realização das inspeções (entre 17:00 e 20:00 horas), o que não coincidiu necessariamente com um aumento do carregamento do circuito que em 75 % dos casos permaneceu abaixo de 300 A.

De acordo com os procedimentos operacionais vigentes na Cemig-D, os valores de emissividade adotados para obtenção de tais informações são constantes e iguais a 0,75. Tal abordagem será questionada durante o levantamento do risco técnico.

6.6.2 Risco Técnico

O modelo de risco técnico apresentado nesse trabalho foi aplicado nos ativos listados na TAB (6.10). As informações constantes dessa tabela foram usadas como entradas para determinar a Vida Útil Remanescente (VUR) dos ativos, bem como comparar a metodologia proposta com outros critérios vigentes.

Para tanto, as temperaturas foram recalculadas com o uso do software IMT desenvolvido por TEIXEIRA (2012), levando em consideração os valores de emissividade encontrados na realização do experimento com a chave degradada em função das correntes aplicadas. Os resultados estão expostos na FIG (6.16)

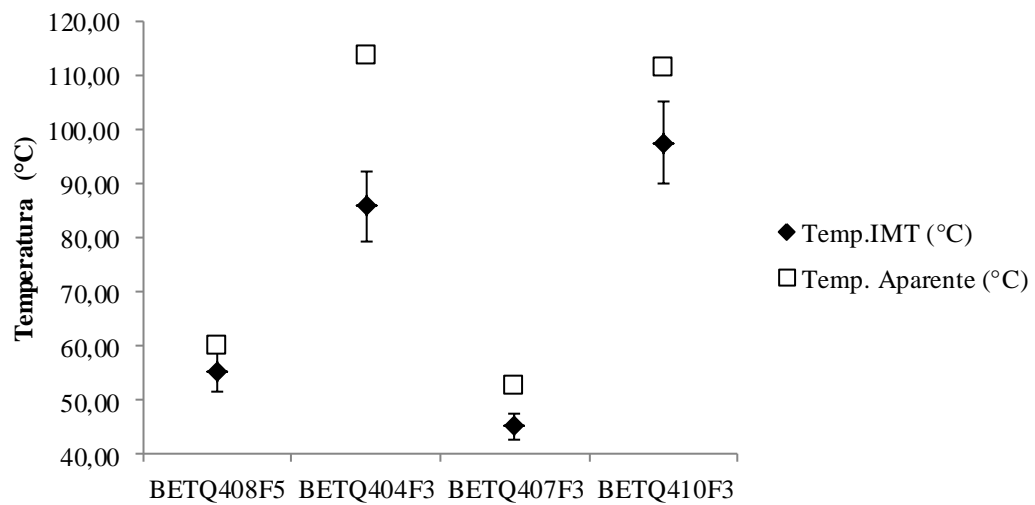


FIGURA 6.16 : Comparação dos valores de Temperatura Aparente e calculada por meio do software IMT

A FIG (6.16) é composta de dois eixos ortogonais, contendo os códigos dos ativos no eixo horizontal e os valores de temperatura em graus Celsius no eixo vertical. Observando a disposição dos dados, pode-se inferir que a uniformização dos valores de emissividade preconizados pela Cemig D induz à valores errôneos de medição da temperatura , empobrecendo a qualidade das medições realizadas. Em nenhum dos casos estudados o valor da Temperatura Aparente foi igual ao intervalo de abrangência fornecido pelo IMT, se aproximando do limite superior do intervalo de abrangência para a temperatura do ativo BETQ408F5.

Em todos os casos estudados, os valores de incerteza expandida U95% nunca foram maiores que 7,7% do Resultado Base, com destaque para a contribuição dos valores de emissividade para a incerteza de medição, que sempre foram maiores que 70%, caracterizando a importância do correto uso dos parâmetros radiométrico no uso e preparação do termovisor para inspeções termográficas.

Os valores de temperatura calculados pelo IMT para os ativos BETQ408F5 e BETQ410F3 estão acima dos valores estabelecidos pela IEC 60694:2006, contudo são cerca de 20% menores que os valores encontrados nos relatórios de inspeção, muito em função dos valores de emissividade empregados.

A FIG. 6.17 ilustra os valores de Δt_{ref} segundo o relatório de inspeção (Δt_{ref1}) e de acordo com o IMT (Δt_{ref2})

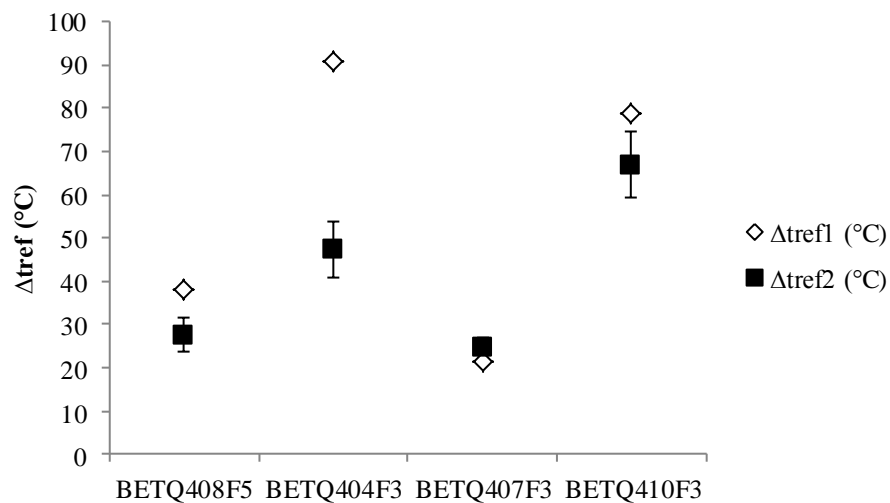


FIGURA 6.17 : Comparação dos valores de Δt_{ref1} e Δt_{ref2}

A FIG 6.17 indica os valores de Δt_{ref1} e Δt_{ref2} em relação à cada ativo estudado. Os valores de temperatura de referência para o cálculo de Δt_{ref2} foram obtidos do modelo teórico demonstrado anteriormente e subtraídos dos valores de temperatura calculados com o IMT.

Os valores apontam diferenças entre os resultados de Δt_{ref1} e Δt_{ref2} que variam até 44%, como no caso do ativo BETQ404F3, onde o valor teórico de referência é 40 % maior que o empregado no relatório, o que contribui para a diferença significativa encontrada. O valor de Δt_{ref1} para o ativo BETQ408F5 também varia além dos intervalos de abrangência em função dos valores de temperatura do modelo teórico é cerca de 6°C maior que o valor da temperatura de referência adotada no relatório. Nos demais ativos, esse parâmetro varia muito próximo dos intervalos de abrangência adotados.

A FIG 6.18 compara os valores de Δt_{amb1} (de acordo com os relatórios de inspeção) e Δt_{amb2} (em relação ao calculado por meio do IMT), por meio de um gráfico de barras em tons de preto e cinza. Em ambos os casos o valor de temperatura ambiente adotado foi o indicado no relatório de inspeção termográfica.

Na FIG 6.18 visualiza-se a grande diferença entre os valores Δt_{amb1} e Δt_{amb2} para o ativo BETQ404F3, diferença essa que se dá em função da temperatura ambiente ser a mais baixa registrada dentre os ativos estudados e a discrepância entre os valores de temperatura citados na FIG 6.16.

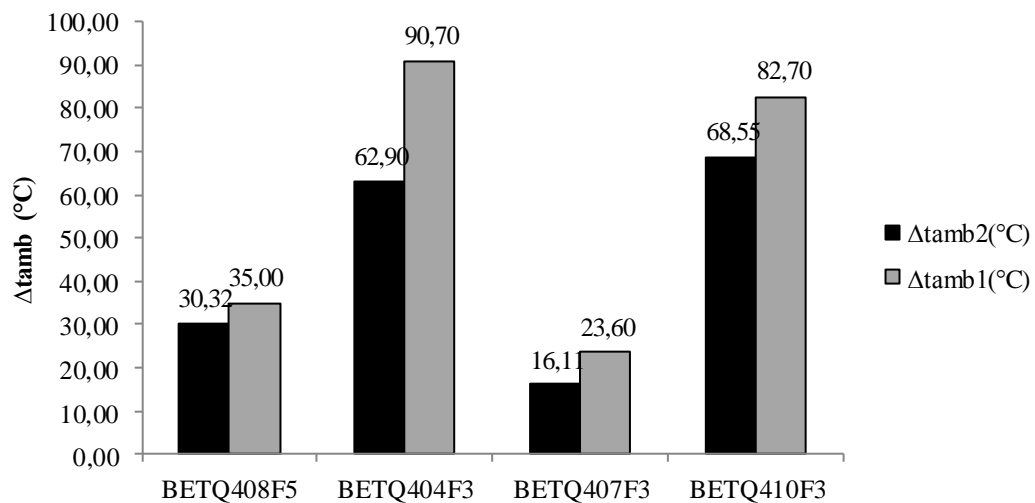


FIGURA 6.18 : Comparação dos valores de Δt_{amb1} e Δt_{amb2}

Desconhecem-se as condições de medição e, conseqüentemente, a incerteza associada ao valor da temperatura ambiente adotada pelo relatório, fator esse que pode ser preponderante na adoção desse critério de falha, uma vez que não se sabe o comportamento estatístico dessa grandeza, o que não garante dados com qualidade e confiabilidade asseguradas para uma tomada de decisão adequada.

A NBR IEC 60694(2006) estabelece que, para contatos de cobre nú, o valor máximo de elevação de temperatura para temperaturas ambientes menores que $40^{\circ}C$ deve ser igual a $35^{\circ}C$. De acordo com tal critério, os ativos BETQ404F3 e BETQ410F3 extrapolam a especificação, tanto para Δt_{amb1} e Δt_{amb2} . Para BETQ408F5 existe uma condição extrema para Δt_{amb1} , contudo Δt_{amb2} indica, levando em conta a incerteza expandida da temperatura, um valor máximo de $34,21^{\circ}C$ para 95% dos casos, onde em 5% dos casos pode ocorrer valores acima de $35^{\circ}C$. Em BETQ407F3 Δt_{amb1} e Δt_{amb2} encontram-se cerca de 40% abaixo da condição limite especificada.

A Cemig D usa uma tabela de pontuação que relaciona os valores de pontuação obtidos e um prazo máximo para intervenção no ativo. Essa pontuação foi adaptada usando as faixas de criticidade adotadas por esse trabalho, a fim de estabelecer uma base de comparação entre os modelos de criticidade. Essa adaptação é representada pela FIG.6.19:

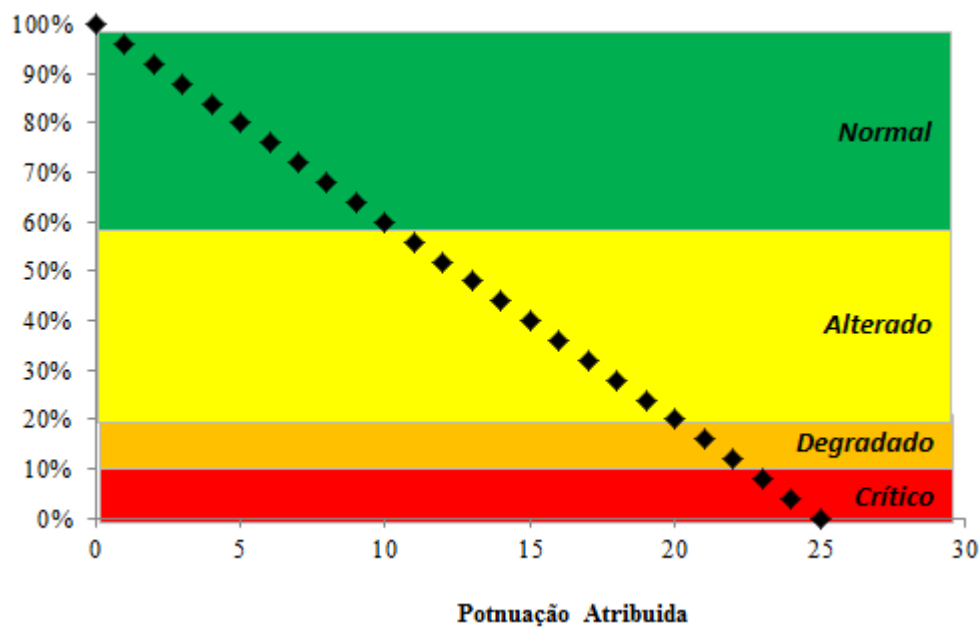


FIGURA 6.19: Níveis de criticidade em função da pontuação atribuída

No eixo vertical estão representados os valores de porcentagem de prazo para intervenção, enquanto que no eixo horizontal são representados os valores de pontuação atribuídos ao relatório. Quando o relatório indica pontuação de até 10 pontos, entende-se que o ativo requer apenas monitoramento de acordo com os planos de manutenção vigentes. Para valores de pontuação entre 10 a 20 pontos o ativo entra na faixa “alterado”, onde se entende que seu funcionamento ainda está a contento, contudo uma intervenção se faz necessária, sendo o prazo para tal intervenção entre 120 e 30 dias, para as pontuações de menor e maior expressão, respectivamente. A partir de 21 pontos o ativo entra na faixa “degradado”, que indica uma probabilidade de falha mais alta, onde não ocorrendo a intervenção num prazo de até 10 dias, pode levar o ativo a atingir a faixa “crítico”, faixa na qual o ativo tem um risco iminente de falha, com pontuação superior a 24 pontos e prazo de intervenção imediato.

Analisando a FIG (6.19) e comparando com os valores de pontuação expressos na TAB (6.10) entende-se que os ativos BETQ 404F3 e BETQ 410F3 já estariam em falha iminente, com prazo de intervenção imediato, ambos pertencentes à faixa “crítico”.

Já os ativos BETQ407F3 e BETQ408F5 pertencem à faixa “alterado”, com prazo de intervenção entre 120 e 60 dias, respectivamente, o que fornece uma informação relevante do ponto de vista de programação de intervenção, podendo eventualmente priorizar a intervenção no ativo BETQ408F5 em detrimento ao ativo BETQ407F3.

A FIG.6.20 indica os valores de VUR para cada um dos ativos estudados, baseados nas temperaturas calculadas por meio do IMT, com as respectivas incertezas expandidas associadas.

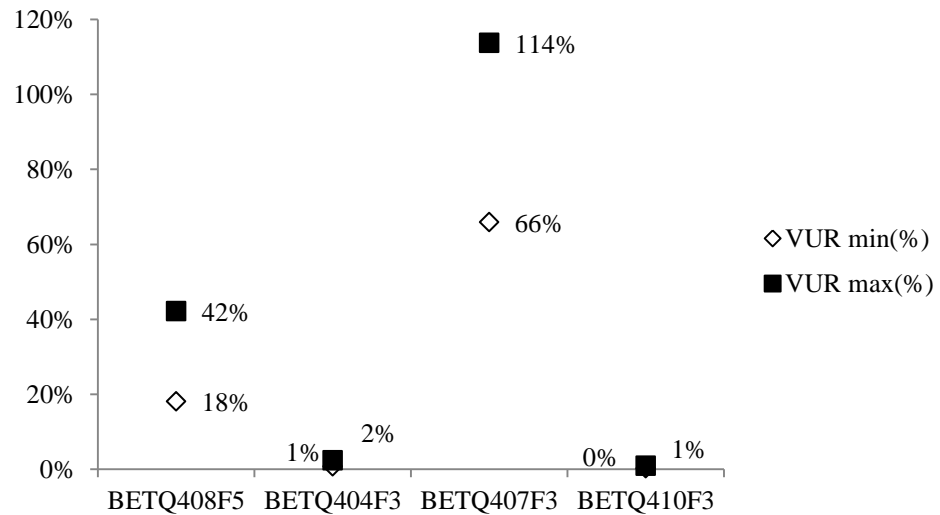


FIGURA 6.20: Comparação de Valores de VUR_{min} e $VUR_{máx}$.

Os valores de VUR indicam o término da vida útil dos ativos BETQ404F3 e BETQ410F3, indicando, no máximo, 3170 horas e 1199 horas de duração, respectivamente. Em ambos os casos, a temperatura acima do recomendado contribui para a reduzida vida útil dos ativos.

Para BETQ408F5 os valores de VUR oscilam de 42% (indicando a faixa “Alterada”) até 18% (pertencente à faixa “Degradada”). Tal variação é explicada pelos valores de temperatura utilizados e da hipótese simplificadora de aquecimento em regime permanente. Isso evidencia a importância de se realizar medições com incertezas associadas, de modo a fornecer informações de qualidade para a tomada de decisão. Contudo dentro dessa faixa a função do ativo é parcialmente prejudicada, sem que haja probabilidade de falha iminente.

Em BETQ407F3 VUR_{min} e $VUR_{máx}$ possuem valores que são categorizados na faixa “Normal”, onde a função do equipamento é desempenhada de maneira satisfatória, sendo que para $VUR_{máx}$ o valor ultrapassa a vida contábil do ativo de 131.400 horas em cerca de 17.965 horas.

A TAB.(6.11) apresenta um resumo dos resultados obtidos com a aplicação dos vários modelos de criticidade apresentados, comparando-os à metodologia proposta neste trabalho.

TABELA 6.11
Resumo de resultados dos modelos de criticidade

DADOS IMT						
Código do Ativo	NETA		CEMIG	NBR IEC 60694:2006	Metodologia Proposta	Assertividade (%)
	Critério Δt_{ref}	Critério Δt_{amb}				
BETQ408F5	RI	PIF	Alterado	Conforme	Alterado	75%
BETQ404F3	RI	RI	Crítico	Não Conforme	Crítico	100%
BETQ407F3	RI	PIF	Alterado	Conforme	Normal	75%
BETQ410F3	RI	RI	Crítico	Não Conforme	Crítico	100%

Em cada uma das colunas são apresentados os resultados de acordo com o critério de criticidade adotado. Na segunda e terceira colunas os critérios Δt_{ref} e Δt_{amb} são calculados em função dos valores de temperatura do modelo teórico e do IMT. Para efeito de comparação, admite-se que o modelo é satisfatório ao conseguir identificar se o ativo está apto ou não para cumprir sua função requerida.

Na última coluna é mostrada a assertividade da metodologia, que para os ativos BETQ404F3 e BETQ410F3 foi de 100%, o que demonstra que tais equipamentos estão inaptos para cumprir sua função requerida, pois em todos os critérios o resultado foi o mesmo.

O ativo BETQ407F3 indica uma assertividade de 75%, onde o critério Δt_{ref} foi o único que indicou falha. Tal resultado pode ser atribuído à metodologia de cálculo dessa grandeza, onde a temperatura do equipamento tomado como referência pode ser inadequada, gerando um erro de interpretação do resultado, onde o dado fornecido não possui elevada confiabilidade.

Para BETQ408F5 a assertividade foi de 75%, onde novamente o único critério que aponta para uma falha iminente do ativo é Δt_{ref} , onde a temperatura do equipamento de referência é preponderante no cálculo da variação de temperatura entre os equipamentos.

6.6.3 Risco Econômico

Os resultados da aplicação do modelo de risco econômico no banco de dados estão expostos na TAB (6.12). No cálculo do risco econômico, foram utilizados somente os critérios de criticidade do modelo da Cemig D e o proposto neste trabalho. Tais critérios foram usados por atrelarem diversos estados de conservação do ativo, e não somente caracterizar o equipamento como “bom” ou “ruim”.

TABELA 6.12

Resultados de exposição financeira para modelos de criticidade Cemig D e proposto

Código do Ativo	Exposição Financeira CEMIG (R\$)	Exposição Financeira Modelo Proposto (R\$)
BETQ408F5	-116,80	-190,51
BETQ404F3	-113,71	-118,71
BETQ407F3	-117,44	-521,00
BETQ410F3	-113,71	-114,00

Para a aplicação da metodologia foi considerada que a probabilidade de falha é de 0,2 e o tempo de vida útil igual ao exposto anteriormente nas FIG (6.22) e (6.23). Para o critério da Cemig D foi considerada que a vida útil remanescente era igual ao prazo máximo para intervenção.

Face ao exposto acima, nota-se que os valores de exposição financeira são negativos, indicando que não é vantajoso postergar a intervenção, justificando uma intervenção antes do esgotamento da vida do ativo, lembrando que se trata de equipamentos sem quaisquer tipos de *by-pass*, ou seja, não possuem reserva.

Os valores de exposição financeira para o modelo proposto é maior do que o modelo adotado pela Cemig D, sendo que nos ativos BETQ408F5 e BETQ407F3 esse valor é excepcionalmente alto, em função de serem equipamentos com vida útil remanescente mais alta que BETQ404F3 e BETQ410F3.

7. CONCLUSÃO

O presente trabalho destinou-se a desenvolver uma metodologia para definição e formulação de estratégia segundo os princípios pregados pela Gestão de Ativos, onde a chave seccionadora foi o ativo selecionado. A análise do banco de dados de inspeções termográficas da Cemig-D foi usada como ponto de início do trabalho, a fim de descobrir quais eram os tipos de chaves que possuíam um número considerável de anomalias térmicas, bem como a localização dessas anomalias, modos de falha, graus de criticidade atingidos, além de outros parâmetros controlados por esse tipo de inspeção.

O aquecimento do equipamento foi devidamente modelado através de um balanço de energia, utilizando a conceituação básica dos mecanismos de transferência de calor disponíveis na literatura.

O modelo proposto foi validado por meio de prática experimental, metodologicamente fundamentada nas normas praticadas pelo setor em ensaios de rotina do ativo, tais como a IEC NBR 60694:2006 e IEC NBR 62271:102.

Para predição da vida útil do ativo equações disponíveis na literatura foram utilizadas, de tal forma a determinar a vida útil remanescente, sob condições específicas e mensuráveis, baseado no modo de falha predominante. A seguir, foram estimados os riscos técnico e econômico envolvidos com a operação e manutenção do ativo.

A análise do banco de dados revelou que chaves entre 11 e 20 kV são responsáveis pela maioria das anomalias térmicas detectadas em inspeções termográficas na Cemig D, com correntes de trabalho entre 100 e 300 A. Tal análise indicou também que o modo de falha predominante nesse ativo é o aquecimento do contato principal, em que o valor de elevação de temperatura chega até em 46°C em aproximadamente metade dos casos.

As informações oriundas da análise do banco de dados serviram como base para a elaboração do procedimento experimental descrito na Metodologia desse trabalho. Realizando o experimento com chaves íntegra e degradada e medindo a temperatura com o termovisor, percebeu-se a disparidade na incerteza de medição, donde pode-se inferir que é possível determinar que uma chave degradada está, de fato, degradada, ao passo que isso não é possível para a chave íntegra, devido aos altos valores de incerteza associados ao resultado.

Em paralelo à execução do procedimento experimental formulou-se o processo de transferência de calor no ativo quando em operação. Após identificar os mecanismos de transferência de calor atuantes, foram estabelecidas as relações matemáticas correspondentes, de modo que foram identificadas as possibilidades de resolução pelo método analítico e numérico, onde foi adotada a solução numérica, por levar em consideração as variações locais de aquecimento. O modelo foi validado por meio da comparação dos resultados da solução numérica com os resultados obtidos na realização do procedimento experimental, sendo o modelo teórico condizente com a realidade apontada pelo experimento.

Usando o modelo teórico de aquecimento por base e as equações de cálculo de Resistência de Contato disponíveis na norma IEC TR 60943(2009) e em BRAUNOVIC et al (2006), o risco técnico do ativo foi estimado, por meio dos dados de carregamento elétrico referente ao ano de 2014 e dos valores obtidos do modelo teórico. Os ativos avaliados obtiveram resultados satisfatórios de risco técnico, situados dentro das faixas “*Normal*” e “*Alterada*”, onde ações de correção não são recomendadas, sendo necessárias somente ações de monitoramento e controle.

Baseado no risco técnico, o risco econômico foi calculado com aplicação do método da exposição financeira, que resultou em valores negativos para todos os ativos estudados, donde se conclui que uma possível postergação da intervenção é desaconselhável, devido ao alto custo envolvido na ocorrência de falha.

A fim de consolidar o modelo proposto, relatórios de inspeção termográfica da mesma subestação observada foram usados como dados de entrada para avaliação do grau de acerto da metodologia empregada, assim como outros modelos disponíveis na literatura. Foi constatado que a metodologia indicou um grau de acerto de pelo menos 75% em relação aos outros modelos de criticidade existentes.

Face aos resultados expostos, a primeira ação a ser tomada é **a investigação de outros modos de falha** existentes em chaves seccionadoras de 15 kV, bem como a **elaboração de metodologias, segundo os princípios da Gestão de Ativos**, para tais modos de falha. Essa ação justifica-se, pois o presente trabalho cobre os riscos técnico e econômico associados aos dispositivos seccionadores de 15 kV para o aquecimento do contato principal, sem levar em conta aquecimentos em outras partes do dispositivo, como o conjunto da articulação, o gancho de abertura em carga, a mola de torção, dentre outros, que constituem-se em pontos do equipamento também suscetíveis à ação da elevação de temperatura com danos à sua integridade física, propriedades mecânicas e desempenho operacional.

Além da investigação de outros modos de falha para chaves seccionadoras de 15 kV, existem outros tipos de dispositivos seccionadores com funcionamento similar, contudo com tensão de alimentação diferentes dentro do parque de ativos da Cemig-D, tornando-se, então, interessante **desenvolver modelos de risco técnico e econômico para tais equipamentos**, que geralmente – quando influenciados por uma falha – produzem impactos no desempenho operacional da SE. O trabalho de LINDQUIST *et al* (2005) constitui-se como uma boa base para o desenvolvimento de modelos de risco técnico e econômico para seccionadores com tensão de 220 kV e 400 kV.

Durante a realização da prática experimental, notou-se uma grande dispersão dos valores de emissividade para a chave seccionadora íntegra e para a chave seccionadora degradada. Esses valores introduziram nas medições faixas significativas de incerteza (especialmente para a chave seccionadora íntegra). Portanto, é de fundamental importância, quando da inspeção termográfica, **ajustar corretamente os valores de entrada (parâmetros do objeto) no termovisor**, objetivando reduzir as fontes de incerteza associadas ao sistema de medição.

Neste trabalho as fontes de incertezas associadas à termografia infravermelha foram discutidas, bem como suas influências no resultado da medição, tornando-se uma fonte rica de discussão, onde deseja-se saber qual a faixa de valores que podem ser obtidos de uma medição mediante uma dada probabilidade de ocorrência. Essa variação passa a ser um interessante objeto de estudo ao ser associado a um dado econômico na formulação de uma estratégia de Gestão de Ativos. Sendo assim, é interessante associar (sempre que possível) **parâmetros metrológicos aos resultados de medição termográfica**, a fim de garantir uma maior confiabilidade do resultado proposto, aumentando a credibilidade da técnica, tornando-a uma importante aliada do Gestor de Ativos, desde que subsidiada por modelos de risco técnico e econômico coerentes.

O modelo de risco econômico desenvolvido neste trabalho foi o mesmo adotado por DINIZ (2013), que fez uso da Exposição Financeira. Como sugestão de continuidade do trabalho, pode-se avaliar e comparar **outros modelos disponíveis na literatura**, objetivando enriquecer a discussão, como, por exemplo, o modelo trabalhado por MARQUES *et al* (2014).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR IEC 62271 -102 **Equipamentos de alta-tensão Parte 102: Seccionadores e chaves de aterramento.** 2006.

ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS IEC/TR 60943 **Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipment, in particular for terminals.** 2009.

ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR IEC 60694 **Especificações comuns para normas de equipamentos de manobra de alta-tensão e mecanismos de comando.** 2006.

ABU-ELANIEN, Ahmed EB; SALAMA, M. M. A. Asset management techniques for transformers. **Electric power systems research**, v. 80, n. 4, p. 456-464, 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Tarifas de fornecimento de energia elétrica. - Brasília: ANEEL, in: Cadernos Temáticos 4, 30 p., 2005.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA ANEEL Sub módulo 2 . 5 FATOR X Disponível em:<
http://www.aneel.gov.br/arquivos/Excel/Proret_Subm%C3%B3dulo%202.5.pdf>. Acesso em: 08 nov. 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA ANEEL. PROCEDIMENTO DE REGULAÇÃO TARIFÁRIA SUBMÓDULO 2.2 CUSTOS OPERACIONAIS. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/arquivos/Excel/Proret_Subm%C3%B3dulo%202.2.pdf. Acesso em: 08 nov. 2014.

ALBERTAZZI, Armando; SOUSA, André R. **Fundamentos de metrologia científica e industrial.** Ed. Barueri, 2008.

ALVES, DAGOBERTO et al. Gestão do Conhecimento na análise de falhas: mapeamento de falhas através de sistema de informação. **Revista Produção**, v. 16, n. 1, p. 171-188, 2006.

ALMEIDA, M. T. Manutenção Preditiva: Confiabilidade e Qualidade. Itajubá: Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 2009.

ANDRADE JÚNIOR, Benedito Carneiro de; AGUILAR, Maria Teresa Paulino; QUERINO Thiago; ANDRADE, Roberto Marcio de. **Aplicação da Termografia na Avaliação do Estado de Degradação de Condutores do Sistema Elétrico de Potência.** In: ANAIS DO III CIMMEC-CONGRESSO INTERNACIONAL DE METROLOGIA, ID. 2014.

ANGELONI, Maria Terezinha. Elementos intervenientes na tomada de decisão. **Ci. Inf**, v. 32, n. 1, p. 17-22, 2003.

ANSI/NETA MTS Standard for Maintenance Testing Specifications for Electrical Power Equipment and System. 2013.

ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA, Atlas. 3 ed. Disponível em: < http://www.aneel.gov.br/arquivos.PDF/atlas_par2_cap3.pdf>. Acesso em: 04 out. 2014.

BAGAVATHIAPPAN, S. et al. Infrared thermography for condition monitoring– a review. **Infrared Physics & Technology**, v. 60, p. 35-55, 2013.

BATTAGLIA, D; BERGAMO, E. S. Análise de valor e engenharia de valor: uma ferramenta de redução de custos em um projeto. **P&D em Engenharia de Produção**, p. 102-115.

BRAUNOVIC, M. et al. Estimation of remaining lifetime of power connections using infrared thermography. In: **Electrical Contacts, 2009 Proceedings of the 55th IEEE Holm Conference on**. IEEE, 2009. p. 234-239.

BRAUNOVIC, Milenko; MYSHKIN, Nikolai K.; KONCHITS, Valery V. **Electrical contacts: fundamentals, applications and technology**. CRC press, 2006.

BSI - BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **PAS-55: Asset Management**: Specification for the Optimized Management of Physical Assets. Londres, ING, 2008.

CESCA, Igor Gimenes. Previsão de custo de ciclo de vida e gestão econômica de ativos físicos de indústrias do setor energético. 2012.

COLAÇO, Daniel Freitas et al. Development, application and evaluation of a computational tool for management high voltage break disconnecter based on self-organizing maps and image processing. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 11, p. 2279-2284, 2010.

CHRZANOWSKI, K. Evaluation of thermal cameras in quality systems according to ISO 9000 or EN45000 standards. **Proceedings of SPIE**, v. 4360, p. 387–401, 2001 a..

Como a Energia Elétrica é Transmitida no Brasil. Disponível em: <<http://www.eletronbras.com/elb/natrilhadaenergia/energia-eletrica/main.asp?View={05778C21-A140-415D-A91F-1757B393FF92}>>. Acesso em: 05 out. 2014.

CUREVA, Manuel Mucheta. Fundamentos lógicos da tomada de decisão. **Revista Interatividade**, v. 2, n. 1, p. 2-17, 2014.

DE SOUZA JR, João et al. **Avaliação da degradação de conexões em subestações para desenvolvimento de um sistema de monitoramento em tempo real**. IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos 2012

DE ASSIS, Laura Silva et al. Algoritmo memético para alocação ótima de chaves manuais e telecomandadas em um sistema de distribuição de energia elétrica. **IEEE Transactions Power Delivery**, p. 1125-1137, 2012.

DE FIGUEIREDO, Roberto Garrido. Critérios para Realização de Manobras em Sistemas de Transmissão até 230 K v com Chaves Seccionadoras. **Revista Tecnologia**, v. 7, n. 1, 1986.

DINIZ, H.E.P., Termografia Quantitativa como Ferramenta de Gestão de Ativos do Sistema Elétrico de Potência. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - UFMG, Belo Horizonte, BRA. abr. 2013.

DREIFUERST, G. et al. Case study of the failure of two 13.8 KV control & metering transformers that caused significant equipment damage. In: **Electrical Safety Workshop (ESW), 2012 IEEE IAS**. IEEE, 2012. p. 1-3.

DOROVATOVSKI, N.; LIIK, O. Results of thermographic diagnostics of electric grid contact junctions and generators of oil shale power plants. **Oil Shale**, v. 22, n. 2, p. 243-258, 2005.

FERREIRA, R. A. M.; ANDRADE, R. **Modelagem Matemática do Efeito da Condução Térmica no Processo De Aquecimento de Cabos Condutores** – In: CONGRESSO NACIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA Á INDÚSTRIA. nov.2014.

FERREIRA, R. A. M. **Avaliação do Processo de Aquecimento de Conexões Elétricas Utilizadas em Redes de Distribuição**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) — UFMG, Belo Horizonte, BRA, 2013.

FERRERO, Alessandro; SALICONE, Simona. Decision making in the presence of measurement uncertainty: An approach in terms of the theory of evidence. In: **Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2006. PMAPS 2006. International Conference on**. IEEE, 2006. p. 1-6.

FIGLIOLA, Richard S.; BEASLEY, Donald E. **Theory And Design For Mechanical Measurements, (With Cd)**. John Wiley & Sons, 2008.

FIGUEIREDO, Fabiana de Sousa. Geração e transmissão de energia elétrica: um olhar pela sustentabilidade. 2014.

GEORGES, Marcos Ricardo Rosa; FALSARELLA, Orandi Mina. The Use Of Information Systems In The Strategy Process In Organizations.

GOMES JR., S.; TEIXEIRA, G. G. D.; FERREIRA, R. A. M.; ANDRADE, R. M. d.; DINIZ, H. E. P. Avaliação da Influência das Cores na Emissividade de Superfícies no Espectro Infravermelho. In: **Anais da XIII Semana de Engenharia da UFF**. Niterói, RJ: [s.n.], 2011. v. 1, p. 270.

HOLM, R., Electric Contacts (4th edition 1967) – Springer Verlag.

INMETRO, SENAI. Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia. Inmetro e SENAI, 5 ed., Brasília, SENAI/DN, 2007.

ISO 55000 2014. Asset management - Overview, principles and terminology.

KREITH, Frank; MANGLIK, Raj; BOHN, Mark. **Principles of heat transfer**. Cengage learning, 2010.

LAMBERT-TORRES, G. et al. Intelligent System for Detecting Failures in the Switching of Isolators in Power Substations. In: **Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008. POWERCON 2008. Joint International Conference on.** IEEE, 2008. p. 1-6.

LANE, Brandon et al. Uncertainty of temperature measurements by infrared thermography for metal cutting applications. **Metrologia.** v. 50, n. 6, p. 637, 2013.

LINDQUIST, T. M.; BERTLING, Lina; ERIKSSON, Roland. Estimation of disconnector contact condition for modelling the effect of maintenance and ageing. In: **Power Tech, 2005 IEEE Russia.** IEEE, 2005. p. 1-7.

LLOYD, Chris. **International case studies in asset management.** 2012.

LOPES, W. L. G. **Análise dos modos de Falhas de componentes de subestações da CEMIG utilizando a Termografia.** Graduação em Engenharia Mecânica UFMG, Belo Horizonte, BRA. jun. 2013.

KOMINSKY, John R.; MARTIN, Thomas F. Passive infrared thermography—a qualitative method for detecting moisture anomalies in building envelopes. **Air And Waste Management Association-Publications,** 2006.

MCKEOWN, D. **New Standard For Managing Assets.** Disponível em: <http://raconteur.net/business/new-standard-for-managing-assets>. Acesso em: 28 out. 2014.

MAKANSI, J.; HURST, T. Comprehensive Asset Management for Nuclear Plants. *Power*, v. 156, n. 2, p. 26–30, fev. 2012. ISSN 00325929.

Maintenance Mission Disponível em <http://www.vallourec.com/EN/GROUP/CAREERS/INSIDEVIEWS/Pages>
Pages Acesso em 21/11/14

MALDAGUE, Xavier. Applications of infrared thermography in nondestructive evaluation. **Trends in optical nondestructive testing,** p. 591-609, 2000.

MARDEGAN, Claudio. **Anatomia de uma falha elétrica complexa e sua análise investigativa.** Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/web/component/content/article/57-art...> Acesso em: 25 mar. 2014.

MARQUES M., CTEEP; JARDINI, J. A.; CASOLARI, R. P.; SILVA, J. O.; SOUZA, T. **Adequação das Taxas de Depreciação Contábil à Depreciação Técnica de Equipamentos do Sistema de Transmissão.** EPUSP/PEA/GAGTD1. Disponível em: ctEEP.riweb.com.br/Download.aspx?Arquivo.... Acesso em: 27 out. 2014.

MENSAH, F. K. **Condition assesment of electrical contact of disconnectors**. 2011. Tese de Doutorado. TU Delft, Delft University of Technology.

NAKAMURA, Mitsunobu; MINOWA, I. Film resistance and constriction effect of current in a contact interface. **Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, IEEE Transactions on**, v. 12, n. 1, p. 109-113, 1989.

NBR 5462. Confiabilidade e Manutenibilidade. nov. 1994.

OHLSSON, K. E. A.; OLOFSSON, Thomas. Quantitative infrared thermography imaging the density of heat flow rate through a building element surface. **Applied Energy**, v. 134, 499-505, 2014.

OLIVEIRA, J. C. S.; SILVA, A. P. Análise de indicadores de qualidade e produtividade da manutenção nas indústrias brasileiras. **GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, Bauru, Ano 8, nº 3, jul-set/2013, p. 53-69.

Produção de Energia. Disponível em: < http://www.cemig.com.br/pt-br/energia_e_voce/Paginas/como_a_energia_eletrica_e_produzida.aspx>. Acesso em: 05 out. 2014.

QUINELLO, Robson; NICOLETTI, José Roberto. Inteligência Competitiva nos Departamentos de Manutenção Industrial no Brasil. **Journal of Information Systems and Technology Management**, v. 2, n. 1, p. 21-37, 2005.

REDER, Wanda. Asset management-fact or fiction?. **Power and Energy Magazine, IEEE**, v. 3, n. 3, p. 96-93, 2005.

SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Robert. **Administração da produção**. Atlas, 2009.

SILVEIRA, V. L. A.; PORTO, M. F. S.; MANNHEIMER, W. A. Electroplastic effect in copper subjected to low density electric current. **Scripta Metallurgica**, v. 15, n. 8, p. 945-950, 1981.

SIMMONS, John G. Generalized formula for the electric tunnel effect between similar electrodes separated by a thin insulating film. **Journal of Applied Physics**, v. 34, n. 6, p. 1793-1803, 1963.

SOUZA, Antonio Fernando de et al. Sistema para monitoração da operação de chaves seccionadoras de alta tensão baseado na análise das correntes do motor de acionamento. 2002.

SUNDARAVALLI, S.; MAJUMDER, M. C.; VIJAYARAGHAVAN, G. K. Modeling and Simulation of Delaminations in FML Using Step Pulsed Active Thermography.

TAVARES, Sinthya Gonçalves. **Desenvolvimento de uma metodologia para aplicação de ensaios térmicos não destrutivos na avaliação da integridade de obras de arte**. 123 f. Exame de Qualificação para Doutorado em Engenharia Mecânica -. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

TEIXEIRA, G. G. D. **Confiabilidade Metrológica em Termografia Aplicada em Sistemas Elétricos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - UFMG, Belo Horizonte, BRA, fev. 2012.

TITMAN, D. Applications of thermography in non-destructive testing of structures. **NDT & E International**, v. 34, n. 2, p. 149–154, 2001.

WHITENTON, Eric P. Characterization of uncertainties when measuring metal cutting temperatures using infrared radiation thermography. In: **SPIE Defense, Security, and Sensing**. International Society for Optics and Photonics, 2009. p. 72990G-72990G-12.

WALLSGROVE, R. Ensaio, Asset Management - Where does the phrase come from in the first place? 2011. Disponível em: <https://www.amqi.com/index.php/sam/doc_download/354-amhf-summary>. Acesso em: 28 out. 2014.

WOODHOUSE, John. Briefing: Standards in asset management: PAS 55 to ISO 55000. 2014.

WEG Catálogo de Chaves Seccionadoras de Alta Tensão. Disponível em: <<http://www.weg.net/files/products/WEG-chaves-seccionadoras-50022911-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2014.

YOUNIS, Rizwan; KNIGHT, Mark A. Development and implementation of an asset management framework for wastewater collection networks. **Tunnelling and underground space technology**, v. 39, p. 130-143, 2014.

ABSTRACT

In view of the business environment of the Brazilian electricity sector, increasingly hostile to operational inefficiency (because of increased costs) and inadequate management of the quality and quantity of information provided, the electric utilities feel the need to improve operating policies and maintenance, aimed at reducing costs and maximizing the availability and reliability of their equipment, these principles preached by Asset Management. In order to implement these principles, it was proposed that study, an asset management methodology for the disconnect switchgear equipment, based on the failure mode "heating in contact", using the mathematical model of heating and lifetime of the contact, from the temperature measurement via thermographic inspection with associated metrological parameters, aiming to infer increased electrical resistance, in addition to the determination of the active technical risk from the aforementioned failure mode associated with the technical risk of loss of equipment function. It was characterized the influence of temperature increase phenomenon in the formation of the oxide layer on the contact surface with increase in temperature of about 30 ° C, making the degradation of the more severe component, minimizing its life expectancy and increasing the risk of a catastrophic failure. This fact leads to an economic risk which the value of financial exposure is negative, in which postponing the intervention is less advantageous than perform it, much depending on the size of that asset as of maneuvering, operating activities within the electric power system, The presented methodology was applied in 4 assets of the distributor, using data thermographic inspections, obtaining results of technical risk, which compared with other critical criteria presented in the literature, showed a minimum of assertiveness 75%, and such methodology is based on established criteria in scientific and metrological bases.

Keywords: Asset Management, Disconnect Switchgear, Thermography, Technical Risk, Economic Risk.