

Grupo de Trabalho
B3/B5/A2.01

005

Transformadores Imersos em Líquidos Isolantes

GUIA DE MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE

Dezembro 2007





Transformadores Imersos em Líquidos Isolantes

Guia de Manutenção Centrada na Confiabilidade

Grupo de Trabalho Conjunto B3/B5/A2

Iony Patriota de Siqueira (Coordenador), Miguel Carlos Medina Pena, Jocílio Tavares de Oliveira, Maurício Maia, Carlos Kleber da Costa Arruda, Carlos Júlio Dupont, Ricardo Cunha da Fonte, Marlon de Almeida C. Silva, Luis Adriano Domingues, Hélio Amorim, Alberto José S. Junqueira, Antonio Carlos Carvalho, Cendar João Tondello, Yoshio Nomi, Markus Klein, Adriano M. B., Renato Tamasovici, Tsuyoshi Muramoto, Claudemir A. Lunghi, Maurício Ivaha, Mauro Eugênio Fernando, Leonardo Laborrere, Walter Carvalho Pereiro, Leonel Crisostenes, Rosana Coutinho, Antonio João Monteiro, João Carlos Carneiro, Luiz Carlos R. Carpes, Paulo Roberto Torres Patrocínio.

Sumário

Este documento descreve a aplicação da metodologia MCC - Manutenção Centrada na Confiabilidade (*RCM – Reliability-Centered Maintenance*) a transformadores de força imersos em líquido isolante, tal como óleo mineral ou vegetal. Todas as etapas padronizadas da MCC são documentadas, incluindo:

1. Seleção da Instalação;
2. Identificação dos Sistemas;
3. Identificação dos Componentes;
4. Identificação das Funções;
5. Identificação das Falhas Funcionais;
6. Identificação dos Modos de Falha;
7. Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA);
8. Seleção de Atividades;
9. Definição de Periodicidades;
10. Plano de Manutenção.

O estudo é resultado do Projeto Piloto do Grupo de Trabalho Conjunto (B3.01) dos Comitês de Estudo CE-B3 (Subestações), CE-B5 (Proteção e Automação) e CE-A2 (Transformadores) do Cigré-Brasil. O projeto objetivou pesquisar a aplicação da MCC a transformadores de força de grande porte, e servir de referência para aplicação da metodologia a outros tipos de equipamentos elétricos.



Summary

This document describes the application of the RCM - Reliability-Centered Maintenance (*MCC – Manutenção Centrada na Confiabilidade*) methodology to power transformers immersed in liquid insulation, such as mineral or vegetal oil. All standardized RCM phases are documented, including:

1. Instalation Selection;
2. Systems Identification;
3. Components Identification;
4. Functions Identification;
5. Functional Failures Identification;
6. Failure Modes Identification;
7. Failure Modes And Effects Analysis (FMEA);
8. Activities Selection;
9. Periodicities Selection;
10. Maintenance Plan.

The study is the result of a Pilot Project from a Joint Working Group (B3.01) from Study Committees CE-B3 (Substations), CE-B5 (Protection and Automation) and CE-A2 (Transformers) of Cigré-Brazil. The project aimed to research the application of RCM to large power transformers, and to serve as reference to the application of the methodology to other types of electric equipments.

Conteúdo

| | |
|---|------------|
| Sumário | 2 |
| Summary | 3 |
| Conteúdo | 5 |
| Índice | 7 |
| Lista de Tabelas | 9 |
| Lista de Figuras | 11 |
| Apresentação | 13 |
| Agradecimentos | 17 |
| Capítulo 1 – Introdução | 19 |
| Capítulo 2 – Transformadores | 25 |
| Capítulo 3 – Sistemas | 29 |
| Capítulo 4 – Componentes | 33 |
| Capítulo 5 – Funções | 38 |
| Capítulo 6 – Falhas | 43 |
| Capítulo 7 - Modos de Falha | 47 |
| Capítulo 8 - Efeitos de Falhas | 53 |
| Capítulo 9 - Seleção de Atividades | 57 |
| Capítulo 10 - Frequência de Atividades | 67 |
| Capítulo 11 - Plano de Manutenção | 71 |
| Anexo A – Tipos de Atividades | 78 |
| Anexo B – Níveis de Criticidade | 91 |
| Anexo C – Termo de Referência | 93 |
| Anexo D – Padronização de Descrições | 101 |
| Glossário | 106 |
| Bibliografia | 113 |
| Conteúdo do CD-ROM | 115 |

Índice

| | |
|---|-----------|
| Sumário | 2 |
| Summary | 3 |
| Conteúdo | 5 |
| Índice | 7 |
| Lista de Tabelas | 9 |
| Lista de Figuras | 11 |
| Apresentação | 13 |
| Agradecimentos | 17 |
| Capítulo 1 – Introdução | 19 |
| Objetivos..... | 19 |
| Aplicação..... | 20 |
| Organização | 21 |
| Metodologia | 23 |
| Capítulo 2 – Transformadores | 25 |
| Introdução..... | 25 |
| Padronização..... | 25 |
| Documentação | 26 |
| Relatório | 27 |
| Capítulo 3 – Sistemas | 29 |
| Introdução..... | 29 |
| Padronização..... | 29 |
| Documentação | 30 |
| Relatório | 31 |
| Capítulo 4 – Componentes | 33 |
| Introdução..... | 33 |
| Padronização..... | 33 |
| Documentação | 34 |
| Estatística | 35 |
| Relatório | 36 |
| Capítulo 5 – Funções | 38 |
| Introdução..... | 38 |
| Padronização..... | 38 |
| Documentação | 39 |
| Estatística | 39 |
| Relatório | 40 |

| | |
|---|------------|
| Capítulo 6 – Falhas..... | 43 |
| Introdução..... | 43 |
| Padronização..... | 43 |
| Documentação | 44 |
| Estatística | 44 |
| Relatório | 45 |
| Capítulo 7 - Modos de Falha..... | 47 |
| Introdução..... | 47 |
| Padronização..... | 47 |
| Documentação | 48 |
| Estatística | 49 |
| Relatório | 50 |
| Capítulo 8 - Efeitos de Falhas | 53 |
| Introdução..... | 53 |
| Padronização..... | 53 |
| Níveis de Criticidade..... | 53 |
| Estatística | 54 |
| Relatório | 55 |
| Capítulo 9 - Seleção de Atividades | 57 |
| Introdução..... | 57 |
| Visibilidade e Conseqüências..... | 57 |
| Documentação da Visibilidade | 57 |
| Seleção de Atividades | 58 |
| Documentação da Atividade..... | 60 |
| Estatística | 61 |
| Aplicabilidade e Efetividade..... | 62 |
| Relatório | 64 |
| Capítulo 10 - Frequência de Atividades | 67 |
| Introdução..... | 67 |
| Periodicidade da Manutenção | 67 |
| Distribuição das Periodicidades..... | 69 |
| Capítulo 11 - Plano de Manutenção | 71 |
| Introdução..... | 71 |
| Planos..... | 71 |
| Relatórios | 75 |
| Anexo A – Tipos de Atividades | 78 |
| Anexo B – Níveis de Criticidade | 91 |
| Anexo C – Termo de Referência | 93 |
| Anexo D – Padronização de Descrições | 101 |
| Glossário..... | 106 |
| Bibliografia | 113 |
| Conteúdo do CD-ROM | 115 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| <i>Tabela 1 – Reuniões Realizadas</i> | 15 |
| <i>Tabela 2 – Quantidade de Componentes por Sistema</i> | 35 |
| <i>Tabela 3 – Quantidade de Funções por Sistema</i> | 39 |
| <i>Tabela 4 – Quantidade de Falhas por Sistema</i> | 45 |
| <i>Tabela 5 – Quantidade de Modos de Falha por Sistema</i> | 50 |
| <i>Tabela 6 – Níveis de Criticidade por Sistema</i> | 54 |
| <i>Tabela 7 – Visibilidade e Consequência dos Modos de Falha</i> | 62 |
| <i>Tabela 8 – Classificação de Atividades de Manutenção</i> | 63 |
| <i>Tabela 9 – Critérios para Escolha da Periodicidade da Manutenção</i> | 68 |
| <i>Tabela 10 – Distribuição das Periodicidades de Manutenção</i> | 69 |
| <i>Tabela 11 – Plano de Manutenção do Sistema de Comutação</i> | 72 |
| <i>Tabela 12 – Plano de Manutenção do Sistema de Proteção</i> | 72 |
| <i>Tabela 13 – Plano de Manutenção do Sistema de Conexão</i> | 73 |
| <i>Tabela 14 – Plano de Manutenção do Sistema de Resfriamento</i> | 73 |
| <i>Tabela 15 – Plano de Manutenção do Sistema Estrutural</i> | 73 |
| <i>Tabela 16 – Plano de Manutenção do Sistema de Preservação do Óleo</i> | 73 |
| <i>Tabela 17 – Plano de Manutenção do Sistema Ativo</i> | 74 |
| <i>Tabela 18 – Plano de Manutenção do Sistema de Controle e Monitoramento</i> | 75 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| <i>Figura 1 – Diagrama de Precedência da MCC</i> | 23 |
| <i>Figura 2 – Software de RCM</i> | 24 |
| <i>Figura 3 – Documentação de Instalações</i> | 26 |
| <i>Figura 4 – Relatório de Instalações</i> | 27 |
| <i>Figura 5 – Documentação de Sistemas</i> | 31 |
| <i>Figura 6 – Relatório de Sistemas com Descrição</i> | 32 |
| <i>Figura 7 – Documentação de Sistemas</i> | 34 |
| <i>Figura 8 – Gráfico de Componentes por Sistema</i> | 35 |
| <i>Figura 9 – Relatório de Componentes com Descrição</i> | 36 |
| <i>Figura 10 – Documentação de Funções</i> | 39 |
| <i>Figura 11 – Gráfico Percentual de Funções por Sistema</i> | 40 |
| <i>Figura 12 – Relatório de Funções com Descrição</i> | 41 |
| <i>Figura 13 – Documentação de Falhas Funcionais</i> | 44 |
| <i>Figura 14 – Gráfico Percentual de Falhas por Sistema</i> | 45 |
| <i>Figura 15 – Relatório de Falhas com Descrição</i> | 46 |
| <i>Figura 16 – Documentação de Modos de Falha</i> | 48 |
| <i>Figura 17 – Matriz de Modos e Falhas</i> | 49 |
| <i>Figura 18 – Gráfico Percentual de Modos de Falha por Sistema</i> | 50 |
| <i>Figura 19 – Relatório de Modos por Componente com Descrição</i> | 51 |
| <i>Figura 20 – Gráfico Percentual de Criticidades por Sistema</i> | 55 |
| <i>Figura 21 – Relatório FMEA – Failure Mode and Effects Analysis</i> | 56 |
| <i>Figura 22 – Documentação da Árvore de Decisão</i> | 58 |
| <i>Figura 23 – Diagrama de Decisão da MCC</i> | 60 |
| <i>Figura 24 – Documentação da Seleção da Atividade</i> | 61 |
| <i>Figura 25 – Gráfico Percentual de Visibilidades e Consequências de Falhas</i> | 62 |
| <i>Figura 26 – Gráfico Percentual de Tipos de Atividades de Manutenção</i> | 63 |
| <i>Figura 27 – Relatório de Análise da MCC</i> | 65 |
| <i>Figura 28 – Gráfico Percentual de Escolha de Periodicidades</i> | 69 |
| <i>Figura 29 – Gráfico de Distribuição Temporal de Periodicidades</i> | 70 |
| <i>Figura 30 – Relatório do Plano de Manutenção por Atividade e Sistema</i> | 72 |
| <i>Figura 31 – Relatório de Plano de Manutenção por Atividade</i> | 76 |
| <i>Figura 32 – Relatório de Plano de Manutenção por Atividade e Modo de Falha</i> | 77 |
| <i>Figura 33 – Relatório de Tipos de Atividades com Descrição</i> | 78 |



Apresentação

Este guia documenta o processo de aplicação da metodologia MCC - Manutenção Centrada na Confiabilidade (*RCM – Reliability-Centered Maintenance*) a transformadores de força imersos em óleo isolante. Reúne a contribuição de muitos profissionais e empresas interessadas em um Estudo de Caso de referência, para consulta por todos aqueles encarregados da aplicação da MCC no setor elétrico, e em especial a transformadores.

Resultado de projeto piloto do Grupo de Trabalho Conjunto B3-01 sobre Manutenção Centrada na Confiabilidade de Subestações, dos Comitês de Estudos CE-B3 (Subestações), CE-B5 (Proteção e Automação), e CE-A2 (Transformadores) do Cigré-Brasil, o guia registra a contribuição das seguintes empresas, fabricantes, centros de pesquisa, consultoras, prestadoras de serviço e entidades participantes, em diferentes etapas do projeto, ao longo de dois anos de trabalho:

| | |
|-----------|--|
| CHESF | Companhia Hidro Elétrica do São Francisco |
| TECNIX | Engenharia e Sistemas Ltda. |
| CEPEL | Centro de Pesquisa de Energia Elétrica |
| ONS | Operador Nacional do Sistema Elétrico |
| ELETROSUL | Eletrosul Centrais Elétricas S.A. |
| ABB | Grupo ABB |
| MR | Maschinenfabrik Reinhausen |
| SIEMENS | Grupo Siemens |
| CEMIG | Distribuição S/A |
| DOBLE | Doble Engineering |
| VONKEL | Vonckel Brasil |
| AES | Eletropaulo |
| CPFL | Companhia Paulista de Força e Luz |
| COPEL | Companhia Paranaense de Energia |
| FURNAS | Furnas Centrais Elétricas S.A. |
| TOSHIBA | Toshiba do Brasil S.A. |
| KEMA | Kema Consulting |
| CPQD | Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Telecomunicações |
| AES | Eletropaulo |
| TRETECH | Sistemas Digitais Ltda. |
| CTEEP | Transmissão Paulista. |

A TECNIX Engenharia e Sistemas Ltda. (<http://www.tecnix.com.br>) forneceu o suporte informático, através da disponibilização de software, bases de dados, sítio da internet com serviços de FTP e HTTP, listas e fórum de discussão, além de



serviços de webmaster e webhoster para o trabalho do grupo, no endereço <http://www.tecnix.com.br/cigrercm>. Neste sítio podem ser consultados os subprodutos gerados pelo grupo e as súmulas das reuniões realizadas. Todos os relatórios, tabelas e gráficos deste Guia foram elaborados com o software Tecnix RCM da Tecnix Engenharia e Sistemas Ltda., e disponibilizados neste sítio para consulta pelo Grupo de Trabalho.

As seguintes empresas participaram como palestrantes convidadas em diversas reuniões, demonstrando softwares, experiências e produtos relacionados à metodologia MCC:

| | |
|-----------|---|
| RELIASOFT | Reliasoft Brasil |
| SQL | SQL Systems Brasil |
| ASTREIN | Astrein Informática Ltda. |
| CEPEL | Centro de Pesquisa de Energia Elétrica |
| CHESF | Companhia Hidro Elétrica do São Francisco |
| ELETROSUL | Eletrosul Centrais Elétricas S.A. |
| MR | Maschinenfabrik Reinhausen |
| SIEMENS | Grupo Siemens |
| CEMIG | Distribuição Ltda. |
| AES | Eletropaulo |
| CPFL | Companhia Paulista de Força e Luz |
| COPEL | Companhia Paranaense de Energia |
| FURNAS | Furnas Centrais Elétricas S.A. |
| TOSHIBA | Toshiba do Brasil S.A. |
| TECNIX | Engenharia e Sistemas Ltda. |

Durante as reuniões, visitas técnicas foram realizadas nos laboratórios e instalações fabris das seguintes empresas:

| | |
|---------|--|
| CEPEL | Centro de Pesquisa de Energia Elétrica |
| SIEMENS | Grupo Siemens |
| CPFL | Companhia Paulista de Força e Luz |
| TOSHIBA | Toshiba do Brasil S.A. |

Das empresas, participaram ativamente os seguintes profissionais, em diferentes etapas do projeto:

| | |
|---|-------|
| Iony Patriota de Siqueira (Coordenador) | CHESF |
| Miguel Carlos Medina Pena | CHESF |
| Jocílio Tavares de Oliveira | CHESF |
| Maurício Maia | CHESF |
| Carlos Kleber da Costa Arruda | CEPEL |
| Carlos Júlio Dupont | CEPEL |
| Ricardo Cunha da Fonte | CEPEL |
| Marlon de Almeida C. Silva | CEPEL |
| Luis Adriano Domingues | CEPEL |
| Hélio Amorim | CEPEL |



| | |
|---------------------------------|---------------|
| Alberto José S. Junqueira | CEPEL |
| Antonio Carlos Carvalho | ONS |
| Cendar João Tondello | ELETROSUL |
| Yoshio Nomi | ABB |
| Markus Klein | MR |
| Adriano M. B. | MR |
| Renato Tamasovici | MR |
| Tsuyoshi Muramoto | SIEMENS |
| Claudemir A. Lunghi | SIEMENS |
| Maurício Ivaha | SIEMENS |
| Mauro Eugênio Fernando | CEMIG |
| Leonardo Laborrere | CEMIG |
| Walter Carvalho Pereira | DOBLE/VONCKEL |
| Leonel Crisostenes | ELETROPAULO |
| Rosana Coutinho | ELETROPAULO |
| Antonio João Monteiro | ELETROPAULO |
| João Carlos Carneiro | CPFL |
| Luiz Carlos R. Carpes | COPEL |
| Paulo Roberto Torres Patrocínio | FURNAS. |

Para a consecução deste projeto, várias reuniões foram realizadas, após a aprovação da proposta e Termo de Referência nos Subcomitês de Estudos do Cigré-Brasil. A tabela a seguir detalha as reuniões realizadas, datas, locais e empresas que as sediaram:

Tabela 1 – Reuniões Realizadas

| Reunião | Data | Local |
|-------------------------|-------------|--|
| Primeira Reunião | 15/07/2005 | Sede do Cigré-Brasil – Rio de Janeiro/RJ |
| Segunda Reunião | 16/09/2005 | Sede do Cigré-Brasil – Rio de Janeiro/RJ |
| Terceira Reunião | 17/11/2005 | Sede da AES Eletropaulo – São Paulo/SP |
| Quarta Reunião | 22/03/2006 | Sede da CPFL – Campinas/SP |
| Quinta Reunião | 12/07/2006 | Sede do CEPEL – Rio de Janeiro/RJ |
| Sexta Reunião | 05/12/2006 | Sede da CEMIG – Belo Horizonte/MG |

Com a publicação deste Guia, espera-se a contribuição e crítica de muitos outros profissionais e empresas, para sua melhoria e constante atualização. Para isto, o Cigré-Brasil, promoverá revisões periódicas deste texto, através de Grupo de Trabalho Conjunto B3.01, objetivando a manutenção de sua atualização, à luz de novas tecnologias de transformadores. Sugestões, contribuições e críticas podem ser encaminhadas ao Grupo de Trabalho B3.01, no endereço cigrercm@tecnix.com.br, ou diretamente, aos Comitês de Estudo CE-B3, CE-B5 e CE-A2 do Cigré-Brasil.

Recife, PE

Iony Patriota de Siqueira



Agradecimentos

O Cigré-Brasil agradece às empresas que gentilmente cederam suas instalações para a realização das reuniões do grupo, entre elas a Siemens, Toshiba, AES Eletropaulo, CPFL, Cemig e Cepel, durante a realização desta pesquisa, com suporte logístico, transporte, palestras, documentação e visitas técnicas às suas instalações.

Os agradecimentos são extensivos às entidades e palestrantes convidados, entre elas a SQL Brasil, a Reliasoft Brasil, a Astrein e a Tecnix Engenharia e Sistemas Ltda., todas elas consultoras e fornecedoras de soluções em Manutenção Centrada na Confiabilidade, que mesmo sem terem participado ativamente das reuniões e subgrupos, contribuíram com sua experiência e recursos em algum momento dos trabalhos.

À Tecnix Engenharia e Sistemas Ltda. o Cigré-Brasil agradece em especial o suporte informático disponibilizado ao grupo, na forma de software de MCC, administração de base de dados e sítio na Internet, com serviços de editoração, ftp e http, sem os quais seria praticamente inviável conduzir este trabalho.

Finalmente, o Cigré-Brasil agradece aos profissionais e empresas da indústria elétrica que voluntariamente contribuíram com seu conhecimento, experiência e recursos na consecução deste trabalho.

Capítulo 1 – Introdução

Entre as tecnologias contemporâneas de gestão de ativos, a MCC - Manutenção Centrada na Confiabilidade (*RCM* - *R*eliability-*C*entered *M*aintenance) tem expandido sua aplicação a praticamente todos os setores industriais, atingindo o *status* de prática preferencial não apenas na indústria aeronáutica, onde se originou, mas também nas indústrias nuclear e elétrica mundiais. A MCC se distingue por adotar um processo estruturado de análise e decisão, objetivando a seleção de atividades de manutenção para qualquer ativo físico.

Para ser efetivo, o método deve ser suportado por um processo estruturado de documentação, para registro, gestão de conhecimento, revisão e auditoria, em todas as etapas. Em função da densidade das análises efetuadas, uma base de dados e um *software* especializado em MCC são necessários como suporte ao processo.

Objetivos

Constitui objetivo deste guia apresentar o resultado da aplicação desta metodologia a transformadores de potência imersos em óleo isolante. Transformadores a seco não são analisados neste guia, embora muitos dos modos de falha e soluções aplicados a transformadores imersos em líquidos isolantes possam ser estendidos a estes equipamentos. A complexidade e importância dos transformadores em sistemas elétricos, aliado à elevada capacidade unitária e valor econômico para a indústria elétrica, motivou sua escolha como projeto piloto. Pretende-se demonstrar e documentar a viabilidade de aplicação da MCC a equipamentos desta complexidade, com a parceria de fabricantes, operadores, pesquisadores, consultores, laboratórios e demais interessados. O método usado adequa-se aos padrões internacionais de MCC da IEC e SAE, e com os requisitos organizacionais e de documentação das normas ISO 9000.

De maneira geral, o Guia responde às seguintes questões conhecidas pela sigla 4Q (*4W* = What, When, Where, Why) básicas de manutenção:

- **Q**ue – tipo de manutenção deve ser realizada;
- **Q**uando – deve ser realizada a manutenção;
- **Q**nde – deve ser aplicada a manutenção;
- **P**or **q**ue – razão deve ser realizada a manutenção.

O Guia não responde a questão sobre como (*How to*) realizar a manutenção, uma vez que depende de fatores tecnológicos específicos das empresas e das atividades



selecionadas, tais como infraestrutura de oficinas, conhecimento, instrumentação e capacitação de pessoal.

Aplicação

O Guia poderá ser utilizado como roteiro de aplicação da MCC nestes equipamentos, com as necessárias adaptações às particularidades de cada instalação e empresa. Também pode ser usado como referência das falhas e modos de falha possíveis em transformadores, para utilização em sistemas informatizados de gestão da manutenção (*CMMS – Computerized Maintenance Management Systems*) e na elaboração de guias de inspeção em campo de transformadores. Pode ser usado também como guia de consulta sobre as frequências recomendadas de manutenção, e como fonte de referência sobre as políticas adotadas pela indústria em sua manutenção, ou recomendadas por fabricantes para novos equipamentos. Poderá ainda subsidiar o processo de especificação de novos transformadores, definindo um padrão de manutenção a ser modificado e acordado pelo comprador e fornecedor, ou como modelo de política de manutenção negociado em contratos de terceirização, ou mesmo como modelo de relatório sobre a aplicação da MCC a qualquer tipo de instalação.

Genericamente o Guia reflete o nível de conhecimento atual da indústria sobre os processos de falha e manutenção de transformadores, e das atividades de caráter preventivo disponíveis com a tecnologia atual. Em especial, a escolha do método utilizado para definição da periodicidade revela o grau de conhecimento atual sobre os mecanismos de falha destes equipamentos. A quase totalidade da frequência das atividades de manutenção é escolhida através da experiência das empresas, ou por definição dos fabricantes. A indisponibilidade de dados estatísticos e modelos específicos para cada modo de falha impedem o setor de adotar métodos mais sofisticados de escolha, baseados em modelos estatísticos e métodos de otimização. Maiores pesquisas são necessárias nesta área.

O Guia não se propõe a explicar ou ensinar a metodologia MCC, mas apenas documentar os resultados de sua aplicação por um grupo de especialistas de diferentes empresas a um equipamento completo. Para aprender ou revisar os métodos adotados pela MCC, sugere-se ao leitor consultar uma das muitas referências sobre o assunto, incluídas na bibliografia, e a documentação fornecida pelo fabricante do equipamento específico de sua empresa. O anexo C (Termo de Referência) fornece uma descrição resumida da metodologia, suficiente para se ter uma visão Geral da MCC.

O Guia também não se propõe a ensinar ou explicar o funcionamento e teoria de transformadores, nem como executar as atividades de manutenção propostas, embora documente a funcionalidade e composição de seus sistemas. Para isto sugere-se consultar outras referências especializadas.

A instalação escolhida corresponde a um equipamento genérico, típico de uma classe ampla de componentes utilizados no setor elétrico. Assim, o julgamento



sobre aplicabilidade dos resultados a cada caso deverá ser realizado pelo usuário do Guia, não havendo, por parte do Cigré, das empresas e profissionais participantes deste estudo, qualquer responsabilidade quanto aos resultados de sua aplicação ou adequabilidade a casos específicos. Aos usuários cabem as responsabilidades da aplicabilidade do Guia a cada caso específico. A escolha de um único equipamento como exemplo de instalação analisada permitiu aprofundar a análise a níveis mais detalhados que aqueles normalmente utilizados na aplicação da MCC, aproveitando a disponibilidade de usuários, especialistas, fabricantes, operadores, pesquisadores e consultores na equipe.

Organização

A organização do Guia segue aproximadamente a sequência típica de aplicação da MCC a uma instalação. Todos os capítulos são formados por uma breve introdução da etapa correspondente da MCC, uma explicação sobre a padronização e formatação dos dados apresentados, estatística dos dados tratados, seguida de uma listagem dos resultados obtidos. A padronização de todos os textos usados no projeto foi definida em um documento de referência, para uniformização de estilo, usado por todos os participantes do projeto. As listagens são relatórios extraídos da base de dados que suportou os trabalhos do Grupo de Trabalho. Em função da dimensão destes relatórios, apenas o Plano de Manutenção é incluído na íntegra na Brochura do Guia de Manutenção. Todos os demais são incluídos integralmente no DVD ou CD-ROM que acompanha o Guia, podendo ser consultados ou impressos na íntegra.

Este primeiro capítulo, **Introdução**, resume os objetivos pretendidos, áreas de aplicação, organização do texto e metodologia adotada no restante do documento.

O segundo capítulo, **Instalação**, descreve o objeto da análise da MCC, definindo e delimitando os componentes analisados. Para os objetivos desta pesquisa, transformadores de força imersos em líquido isolante são tratados como instalações completas, podendo fazer parte de sistemas mais complexos em subestações e usinas, em outras aplicações da MCC.

O terceiro capítulo, **Sistemas**, descreve a partição da Instalação em sistemas funcionais, para efeito de análise neste Guia. A partição permite agrupar as funções e componentes inter-relacionados, segundo suas finalidades, nos capítulos seguintes.

O quarto capítulo, **Componentes**, relaciona e descreve todos os componentes e subcomponentes que compõem cada Sistema. Serve também para delimitar as fronteiras e limites físicos de cada Sistema.

O quinto capítulo, **Funções**, relaciona e descreve todas as funções desempenhadas por cada Sistema analisado. Em conjunto descrevem as finalidades de cada sistema no transformador.



O sexto capítulo, **Falhas**, relaciona e descreve todas as falhas possíveis de cada Função dos Sistemas listados. Contém as perdas possíveis de funcionalidade do transformador, além da capacidade de transformação.

O sétimo capítulo, **Modos de Falha**, relaciona e descreve todas as formas como os Componentes dos transformadores podem falhar. Resume os principais mecanismos de falha de cada peça ou parte física do transformador.

O oitavo capítulo, **Efeitos de Falhas**, contém a associação de cada Modo de Falha com as Falhas Funcionais que provocam, em uma planilha FMECA (*Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*), com uma avaliação dos impactos na funcionalidade do transformador.

O nono capítulo, **Seleção de Atividades**, documenta o processo decisório que conduziu à escolha da atividade mais adequada e efetiva para combater cada Modo de Falha. Inclui a Análise de Consequências da MCC, com o impacto esperado de cada Modo de Falha na Segurança, Operação, Economia e Meio Ambiente. Contém também uma descrição das principais atividades de manutenção típicas da tecnologia utilizada em transformadores, em complemento àquelas listadas no Anexo A. O capítulo relaciona os intervalos de execução propostos para todas as atividades preventivas selecionadas, e o método adotado para sua escolha, associando-os aos modos de falha cobertos por cada atividade.

O décimo capítulo, **Plano de Manutenção**, reúne todas as atividades propostas, com as respectivas frequências, associadas aos componentes do transformador em que se aplicam. As frequências são ajustadas aos valores máximos sugeridos para cada atividade em um mesmo sistema, e para cada modo de falha em um mesmo componente.

O Anexo A, **Tipos de Atividades**, contém uma descrição sucinta da maioria das atividades típicas de manutenção de transformadores, de onde foram selecionadas as atividades recomendadas para o plano de manutenção deste guia.

O Anexo B, **Níveis de Criticidade**, relaciona uma escala de níveis de criticidades para classificação dos efeitos produzidos pelos modos de falha, utilizada pelo Grupo de Trabalho para filtrar as falhas insignificantes, que dispensam manutenção preventiva.

O Anexo C, **Termo de Referência**, reproduz o documento original com o plano de trabalho aprovado pelo Comitê de Estudos CE-B3 do Cigré-Brasil, que deu origem ao GT, e serviu de guia para condução dos trabalhos.

O Anexo D, **Padronização de Descrições**, descreve os padrões de denominação, redação e estilo adotados para todas as etapas da MCC pelo grupo, uniformizando os documentos elaborados pelos diferentes subgrupos de análise.

Metodologia

Os capítulos correspondem biunivocamente às etapas seguidas durante a elaboração do guia, representadas pelo diagrama de precedência da figura a seguir:

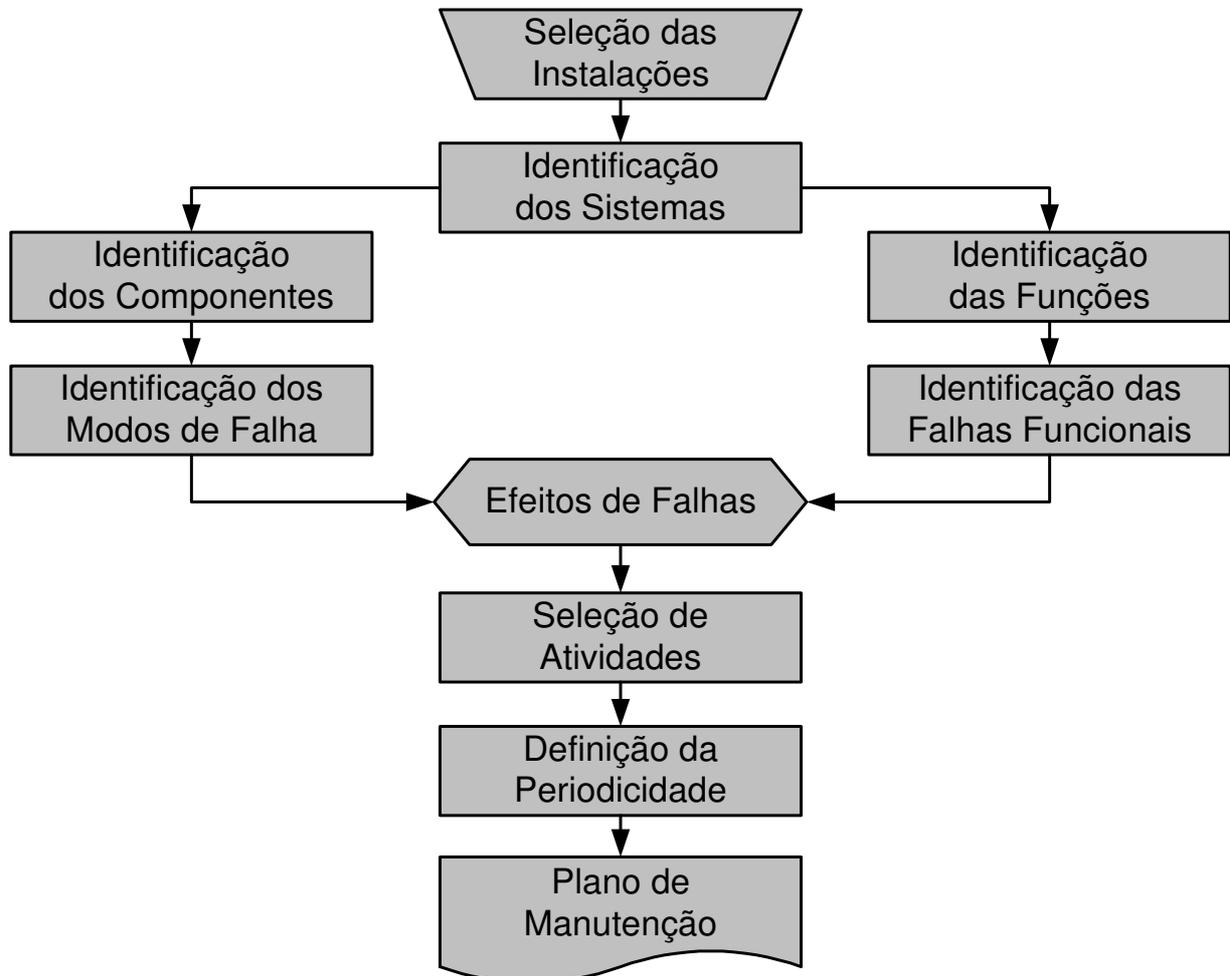


Figura 1 – Diagrama de Precedência da MCC

Esta cronologia é refletida na interface com o usuário do software de MCC utilizado no projeto, conforme ilustrada na figura seguinte. Os blocos e caixas de seleção podem facilmente ser relacionados aos blocos da figura anterior.

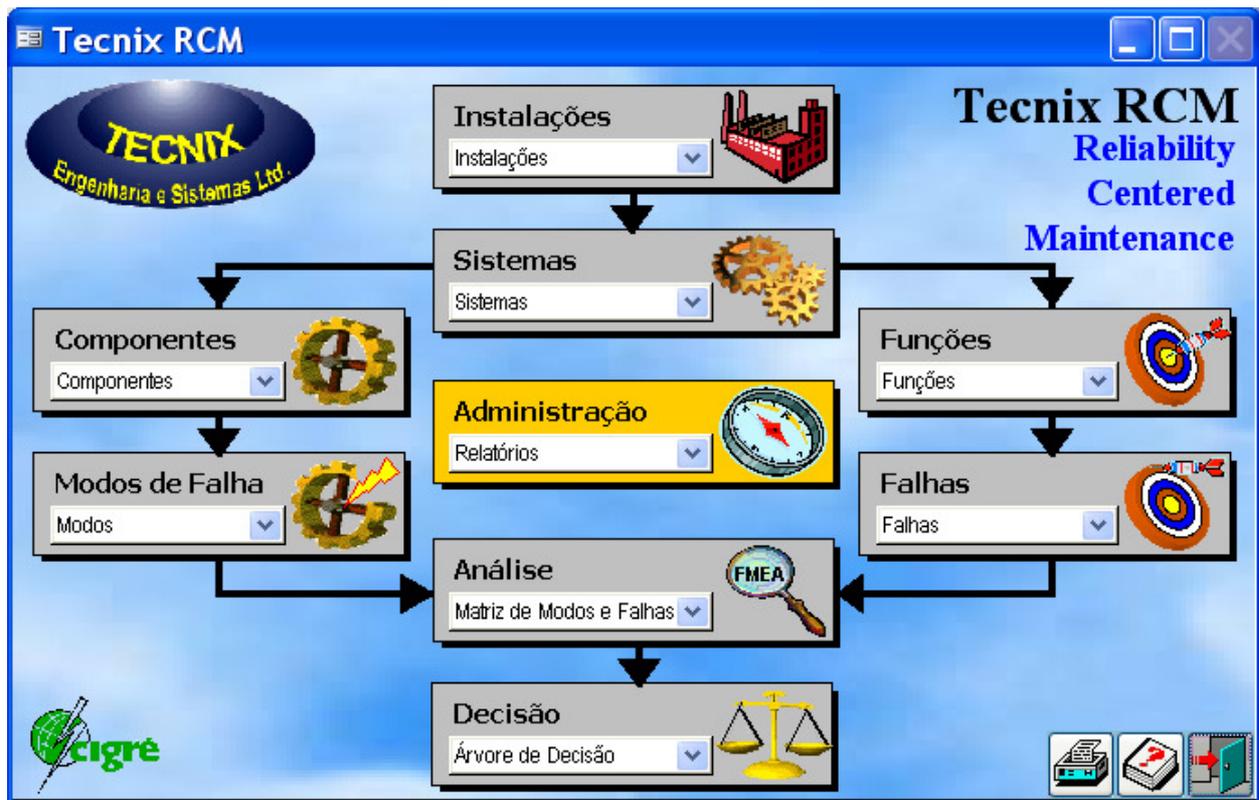


Figura 2 – Software de RCM

Destaque-se, nesta cronologia, a independência das etapas de Identificação de Componentes e Modos de Falha, das etapas de Identificação das Funções e Falhas Funcionais. Esta separação permitiu associar inicialmente os modos de falha com as características construtivas dos componentes, enquanto as falhas funcionais foram associadas inicialmente apenas às funções de cada sistema. Isto é representado pelas etapas paralelas na figura acima, permitindo sua realização de forma concorrente, inclusive por equipes independentes. A reconciliação ocorre na etapa de análise de Efeitos de Falhas (FMEA), quando então são associados os modos de falha com as falhas funcionais, segundo a metodologia MCC. De certa forma, isto representa uma contribuição metodológica do grupo aos critérios correntes da Manutenção Centrada na Confiabilidade.

Capítulo 2 – Transformadores

Introdução

Segundo a metodologia de Manutenção Centrada na Confiabilidade, instalações são conjuntos de sistemas, concretos ou abstratos, entre os quais se possa encontrar ou definir alguma relação de finalidade. Nas instalações industriais, esta relação é estabelecida com o objetivo de se atingir um ou mais objetivos, característicos da instalação.

Neste Guia, a instalação refere-se ao próprio transformador em análise. Transformadores serão analisados como instalações completas, compreendendo vários sistemas interligados. Os sistemas são compostos por componentes, internos ou externos, agregados para o atendimento a um conjunto de funções, típicas de cada sistema. Uma fotografia ou diagrama esquemático normalmente consta da descrição da instalação, podendo ser acrescentado à base de dados do software MCC (ver o CD-ROM que acompanha o Guia).

O capítulo contém também uma descrição do contexto operacional normalmente associado à instalação, que define as condições em que a mesma opera, segundo sua finalidade. Neste guia, o contexto será genérico, considerando que o transformador pode operar em várias situações nas subestações, em carga, como reserva quente ou fria, etc.

Padronização

Instalações serão caracterizadas na MCC por um código mnemônico, uma frase de título e uma descrição mais detalhada do seu significado. Para as finalidades deste Guia, as instalações na MCC serão denominados por títulos curtos, com todas as palavras com a primeira letra maiúscula, opcionalmente seguidos por termos entre parênteses, que melhor identifiquem sua finalidade e composição. A padronização destas regras encontra-se descrita no Anexo D deste Guia.

Exemplo: *Transformador Imerso em Óleo*

Apenas transformadores imersos em líquidos isolantes (óleo mineral ou vegetal) serão considerados instalações neste Guia.

Seguindo as regras de padronização, a descrição deverá limitar-se, preferencialmente, a um único parágrafo, suficiente para melhor descrever ou detalhar a sua denominação, apenas com a primeira palavra com a primeira letra

em maiúsculo. Deverá, opcionalmente, vir acompanhada de fotos, diagramas, ou outros arquivos julgados necessários, ou úteis para seu entendimento. Atenção deverá ser dada à questão dos direitos autorais dos arquivos anexados.

Exemplo:

“Equipamentos elétricos de alta tensão, destinados a transformar a tensão alterada trifásica de uma instalação elétrica, por elevação, abaixamento ou deslocamento angular, utilizado para mudar o nível ou ângulo de tensão em sistemas elétricos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.”

Documentação

A documentação de cada instalação é realizada em um registro da base de dados que suporta o processo MCC. A figura a seguir ilustra o formulário de entrada de dados destes registros, para o caso de transformadores imersos em líquido isolante.



The screenshot shows a software window titled "Instalações". At the top left is the CIGRÉ logo. The main area is titled "Instalações" and contains a form with the following elements:

- Instalação:** Transformadores de Potência Imersos em Óleo
- Código:** 1
- Replicar a Instalação --->** button
- Descrição:** Equipamentos elétricos de alta tensão, destinados a transformar a tensão trifásica de uma instalação elétrica, por elevação, abaixamento ou deslocamento angular, utilizado para mudar o nível ou ângulo de tensão em sistemas elétricos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Os transformadores Imersos em óleo utilizam o fluido isolante para realizar também o resfriamento do núcleo ativo, através da retirada, transporte e dissipação do calor no meio ambiente.
- Figura/Filme:** Two technical diagrams of transformers.
- Navigation Bar:** Includes icons for file operations and a status bar showing "Registro: 1" and "Total: 1".

Figura 3 – Documentação de Instalações

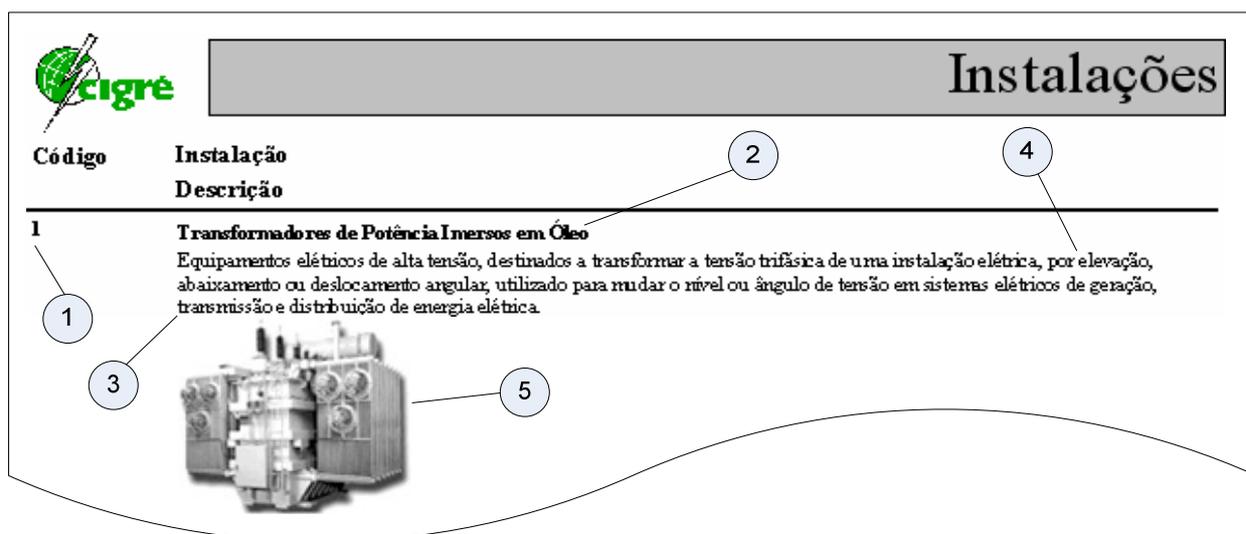
Note-se a identificação de cada instalação por um título descritivo, um código mnemônico e uma descrição textual. Uma figura ou filme da instalação pode ser acrescentado, para complementar ou ilustrar a descrição. Os demais controles deste formulário permitem a navegação e edição dos registros das instalações da base de dados

Relatório

O restante do capítulo é composto de um relatório, denominado de *Instalações*, disponível no CD-ROM anexo, gerado da base de dados MCC utilizada para armazenar os resultados, onde são identificados os seguintes aspectos da instalação:

1. **Código** Designação mnemônica associada à instalação;
2. **Instalação** Nome completo que caracteriza a instalação;
3. **Descrição** Texto contendo uma descrição mais detalhada da instalação;
4. **Contexto** Descrição do contexto operacional que caracteriza sua operação;
5. **Figura** Fotografia ou desenho opcional da instalação.

Estes tópicos são identificados e repetidos no cabeçalho de cada página do relatório, quando houver mais de uma página ou instalação analisada. A figura a seguir ilustra sua localização no layout do relatório, conforme a numeração acima.



| Código | Instalação | Descrição |
|--------|---|--|
| 1 | Transformadores de Potência Imersos em Óleo | Equipamentos elétricos de alta tensão, destinados a transformar a tensão trifásica de uma instalação elétrica, por elevação, abaixamento ou deslocamento angular, utilizado para mudar o nível ou ângulo de tensão em sistemas elétricos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. |

Figura 4 – Relatório de Instalações

Uma codificação numérica sequencial foi adotada para cada instalação, embora outras codificações possam ser adotadas. O importante é que cada instalação seja identificada univocamente por um código, e que este seja usado consistentemente em todo o processo da MCC. Recomenda-se adotar a codificação operacional ou de concepção original do projeto. Neste estudo, o código de cada instalação será utilizado na composição do código dos componentes, funções, falhas e modos de falha específicos daquela instalação. No exemplo da Figura 4, a instalação seria identificada pelo código 1.

Capítulo 3 – Sistemas

Introdução

Sistemas são conjuntos de componentes, físicos ou virtuais, entre os quais se possa encontrar ou definir alguma relação de funcionalidade em uma instalação. Nos sistemas industriais, esta relação é estabelecida com o objetivo de se desempenhar uma ou mais funções, características de cada sistema. Este capítulo contém o resultado da etapa de identificação e descrição dos sistemas que compõem cada transformador, considerado como uma instalação, e que serão objetos da análise MCC.

Como em todo estudo de MCC, a escolha dos sistemas pode conduzir a várias soluções, conforme o critério de agregação das funções. Neste Guia, os sistemas referem-se ao agrupamento de funções internas ao transformador em análise, resultado de várias interações no processo de delimitação de funções realizadas pelo grupo de análise. Uma fotografia ou diagrama esquemático pode ser acrescentado à base de dados do software MCC, para cada sistema analisado (Ver CD-ROM anexo ao Guia), visando complementar sua descrição.

Padronização

Sistemas serão caracterizados na MCC por um código mnemônico, uma frase de título e uma descrição mais detalhada do seu significado. Fotos, diagramas ou circuitos esquemáticos podem ser usados para descrever o sistema. Os sistemas serão denominados por títulos curtos, com todas as palavras com a primeira letra maiúscula, opcionalmente seguida por termos entre parênteses, que melhor identifiquem sua finalidade e composição. A padronização destas regras encontra-se descrita no Anexo D deste Guia.

Oito sistemas foram identificados como típicos da maioria dos transformadores imersos em líquido isolante:

- Sistema de Comutação
- Sistema de Proteção
- Sistema de Conexão
- Sistema de Resfriamento
- Sistema Estrutural
- Sistema de Preservação do Óleo
- Sistema Ativo
- Sistema de Controle, Supervisão e Monitoramento.



Note-se que as funções de Controle, Supervisão e Monitoramento foram incluídas em um único sistema, considerando a proximidade e interconexão destes conjuntos. Outras agregações também são possíveis.

Apenas os transformadores com comutadores de derivação terão o sistema de comutação descrito neste capítulo. Os demais sistemas são comuns à maioria dos transformadores imersos em líquidos isolantes, embora outras denominações sejam possíveis.

Seguindo as regras de padronização, a descrição dos sistemas deverá limitar-se, preferencialmente, a um único parágrafo, suficiente para melhor descrever ou detalhar a sua denominação, apenas com a primeira palavra com a primeira letra em maiúsculo. Deverá, opcionalmente, vir acompanhada de fotos, diagramas, ou outros arquivos julgados necessários, ou úteis para seu entendimento. Atenção deverá ser dada à questão dos direitos autorais dos arquivos anexados. O texto seguinte ilustra a descrição de um sistema, segundo este formato:

Sistema de Proteção: “Conjunto composto pelos relés, sensores, atuadores e demais funções destinadas a proteger o transformador e seus acessórios, promovendo seu desligamento em caso de defeito ou anormalidade.”

Documentação

Cada sistema deve ser documentado em um registro da base de dados que suporta o processo MCC. A figura a seguir ilustra o formulário de entrada de dados destes registros, exemplificado para o caso do sistema ativo de transformadores imersos em líquido isolante.



Figura 5 – Documentação de Sistemas

Note-se a identificação de cada sistema por um título descritivo, um código mnemônico, uma descrição textual, e a instalação ao qual ele pertence. Uma figura ou filme do sistema pode ser acrescentado, para complementar ou ilustrar a descrição. Os demais controles deste formulário permitem a navegação e edição dos registros dos sistemas existentes na base de dados

Relatório

O restante deste capítulo é composto de um relatório, denominado de *Sistemas com Descrição*, disponível no CD-ROM anexo, gerado da base de dados MCC utilizada para armazenar os resultados da análise, onde são identificados os seguintes aspectos de cada sistema:

- | | |
|----------------------|---|
| 1. IN | Designação mnemônica associada à instalação do sistema; |
| 2. Instalação | Nome completo que caracteriza a instalação do sistema; |
| 3. SI | Designação mnemônica associada ao sistema; |
| 4. Sistema | Nome completo que caracteriza o sistema; |
| 5. Descrição | Texto contendo uma descrição mais detalhada do sistema; |
| 6. Figura | Fotografia ou desenho opcional do sistema. |

Estes tópicos são identificados e repetidos no cabeçalho de cada página do relatório, quando houver mais de uma página ou instalação analisada. A figura a

seguir ilustra sua localização no layout do relatório, conforme a numeração acima. O relatório está incluído na íntegra no CD-ROM que acompanha este Guia.

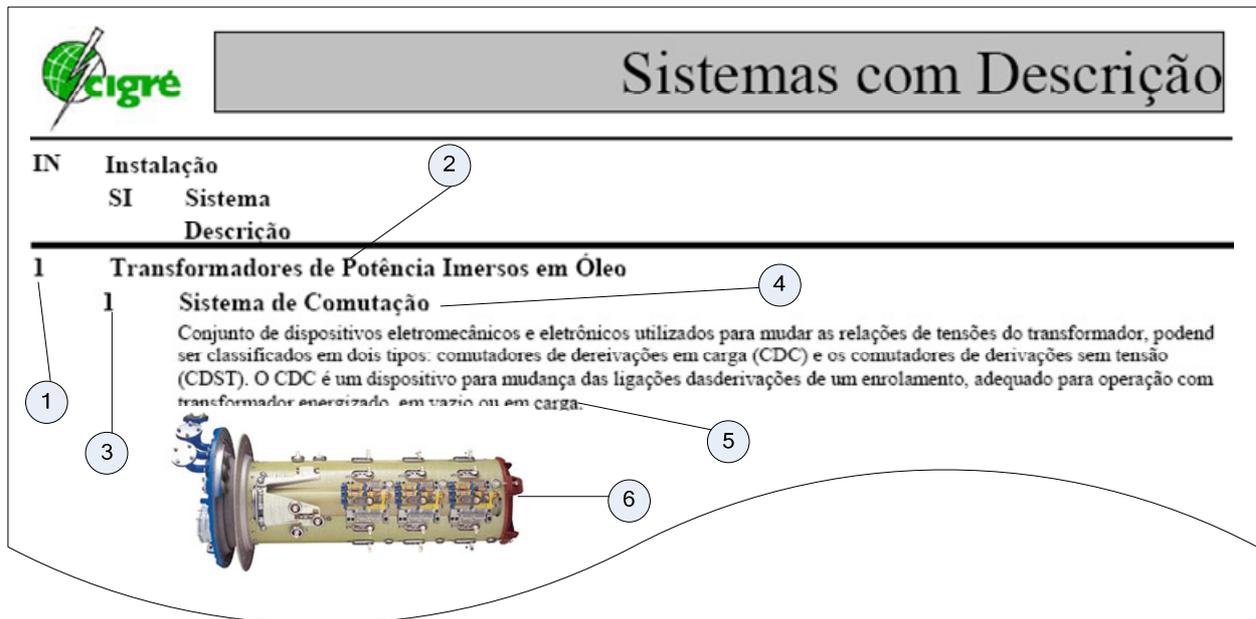


Figura 6 – Relatório de Sistemas com Descrição

Uma codificação numérica sequencial foi adotada para cada sistema, em cada instalação, embora outras codificações possam ser adotadas. O importante é que cada sistema seja identificado univocamente por um código, e que este seja usado consistentemente em todo o processo da MCC. Neste estudo, o código de cada sistema será utilizado, junto com o código da instalação, na composição do código dos componentes, funções, falhas e modos de falha daquela instalação. Assim, o código de cada sistema será composto pela justaposição do código da instalação com o código do sistema, separados por um ponto. No relatório da Figura 6 o sistema seria identificado pelo código 1.1.

Capítulo 4 – Componentes

Introdução

Componentes representam as partes constitutivas dos sistemas, sejam eles físicos (*hardware*), abstratos (*software*), mistos (*firmware*), sólidos, líquidos ou gasosos. Este capítulo contém o resultado da etapa de identificação e descrição dos componentes que compõem cada sistema dos transformadores, e que serão objetos da análise MCC.

Na MCC o componente representa também a menor parte da instalação submetida à manutenção. Ou seja, qualquer parte ou subcomponente que não faça parte da política de manutenção adotada não será submetida à análise da MCC. Este critério norteia o nível de profundidade e detalhamento do processo de identificação e catalogação dos componentes.

Padronização

Componentes serão caracterizados na MCC por um código mnemônico, uma frase de título e uma descrição mais detalhada do seu significado. Os componentes serão denominados por títulos curtos, com todas as palavras com a primeira letra maiúscula, opcionalmente seguidos por termos entre parênteses, que melhor identifiquem sua finalidade e composição dentro do sistema. A denominação deverá, se necessário, ser complementada com a indicação do sistema de origem, sempre que houver possibilidade de interpretação errada sobre o sistema proprietário do componente. Estas regras constam no padrão de descrição incluído no Anexo D deste Guia. Os textos a seguir ilustram exemplos de identificação de componentes:

*Relé Diferencial Monofásico (NEMA 87);
Bucha de Alta Tensão;
Óleo Isolante do Comutador.*

A descrição dos componentes deverá limitar-se, preferencialmente, a um único parágrafo, suficiente para melhor descrever ou detalhar a sua denominação, apenas com a primeira palavra com a primeira letra em maiúsculo. Deverá, opcionalmente, vir acompanhada de fotos, diagramas, ou outros arquivos julgados necessários, ou úteis para seu entendimento. Atenção deverá ser dada à questão dos direitos

autorais dos arquivos anexados. O texto seguinte ilustra a descrição de um componente:

Relé Diferencial Monofásico: “Dispositivo alimentado por transformadores de corrente, destinado a detectar e desligar o transformador quando da ocorrência de curtos-circuitos internos à sua zona de proteção.”

Neste Guia, convencionou-se que os componentes seriam identificados apenas até o primeiro nível abaixo imediatamente dos sistemas. Ou seja, não foram detalhados os subcomponentes dos componentes, para efeito de manutenção. Uma fotografia ou diagrama esquemático pode ser acrescentado à base de dados do software MCC, para cada componente analisado (Ver CD-ROM anexo ao Guia), visando complementar sua descrição.

Documentação

Os componentes de cada sistema devem ser documentados em registros da base de dados que suporta o processo MCC. A figura a seguir ilustra o formulário de entrada de dados destes registros, exemplificado para o caso da Chave Seletora do Comutador, de transformadores imersos em líquido isolante.



The screenshot shows a software window titled "Componentes" with a blue header. Inside, there is a form for entering component data. At the top left is the Cigré logo. The form includes several fields and dropdown menus:

- Instalação:** Transformadores de Potência Imersos em Óleo (dropdown)
- Código:** 1 (dropdown)
- Sistema:** Sistema de Comutação (dropdown)
- Código:** 1 (dropdown)
- Componente:** Chave Seletora do Comutador (text field)
- Código:** 47 (text field)
- Sistema:** Sistema de Comutação (dropdown)
- Parte de:** (dropdown)

Below the form, there are two columns: "Descrição" and "Figura/Filme".

Descrição: Dispositivo capaz de estabelecer, conduzir e interromper corrente, combinando as funções de um seletor de derivações e de uma chave comutadora. Connects a common terminal to a multiplicity of leads connected to the tap-winding of a transformer. Tap selectors are usually arranged beneath the tap-changer oil compartment and are immersed in the insulating oil of the transformer main tank. A tap-changer with change-over selector allows the tap selector to move through a second revolution and thus can increase the tapping range.

Figura/Filme: A photograph of a transformer tap selector assembly.

At the bottom of the window, there is a toolbar with icons for file operations and navigation. On the right side of the toolbar, there are two summary boxes:

- Registro:** 6
- Total:** 6

Figura 7 – Documentação de Sistemas

Note-se a identificação de cada componente por um título descritivo, um código mnemônico, uma descrição textual, a instalação e o sistema ao qual ele pertence. Uma figura ou filme do sistema pode ser acrescentado, para complementar ou

ilustrar a descrição. Os demais controles deste formulário permitem a navegação e edição dos registros dos componentes existentes na base de dados

Estadística

A tabela a seguir resume a quantidade de componentes identificados em cada um dos oito sistemas típicos da maioria dos transformadores imersos em líquido isolante:

Tabela 2 – Quantidade de Componentes por Sistema

| SISTEMA | COMPONENTES |
|---|--------------------|
| Sistema de Comutação | 70 |
| Sistema de Proteção | 22 |
| Sistema de Conexão | 34 |
| Sistema de Resfriamento | 23 |
| Sistema Estrutural | 23 |
| Sistema de Preservação do Óleo | 29 |
| Sistema Ativo | 29 |
| Sistema de Controle, Supervisão e Monitoramento | 45 |
| TOTAL | 275 |

Note-se a preponderância de componentes no Sistema de Comutação (70), seguida pelo Sistema de Controle, Supervisão e Monitoramento (45), revelando a complexidade e diversidade normalmente associada a estes sistemas. A distribuição percentual dos 275 componentes nos diversos sistemas do transformador encontra-se representada no gráfico a seguir:

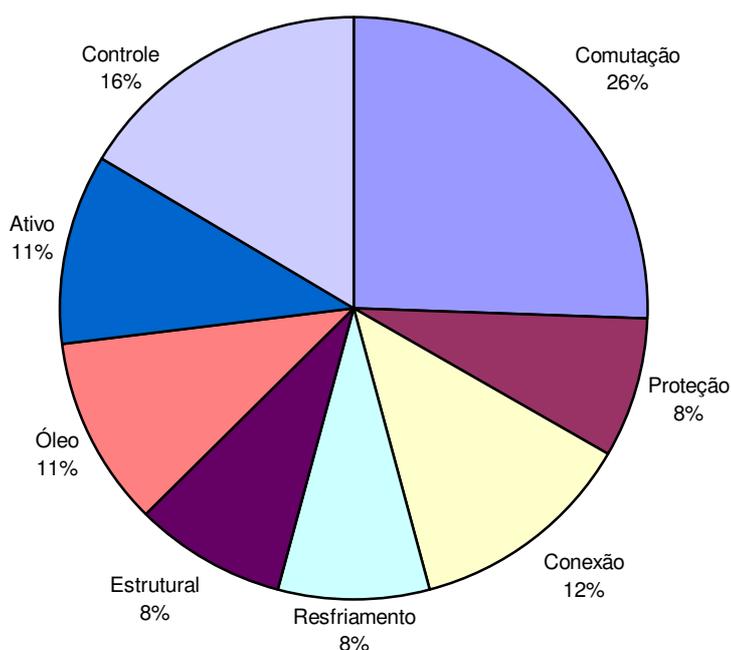


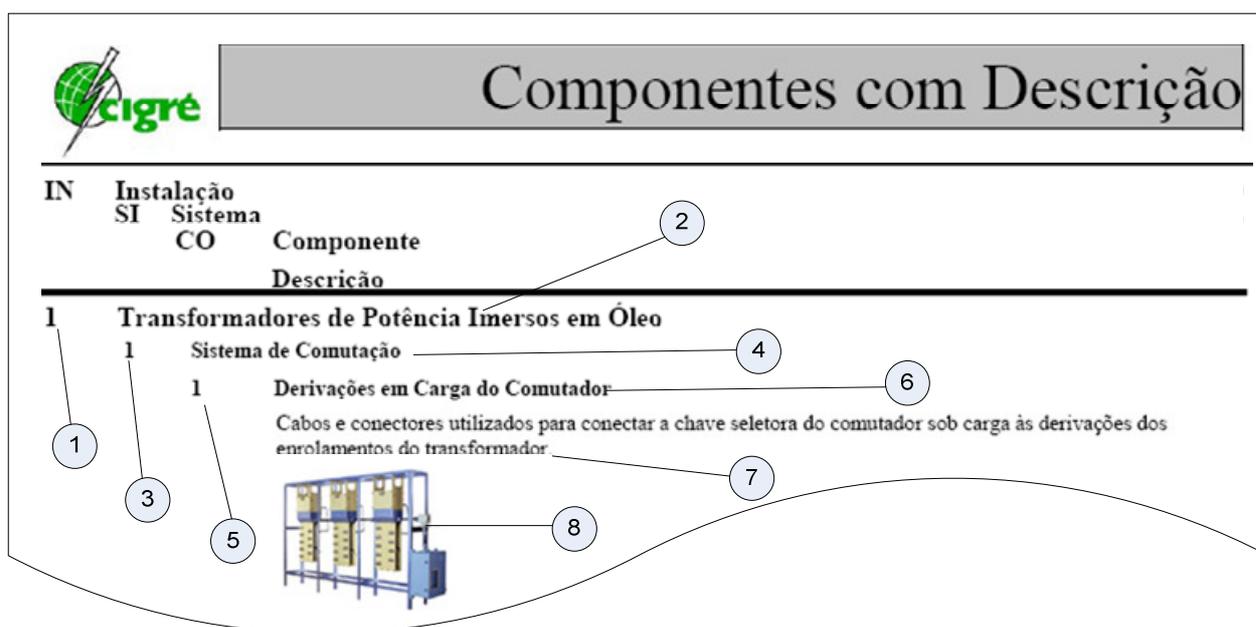
Figura 8 – Gráfico de Componentes por Sistema

Relatório

O restante deste capítulo contém um relatório, denominado de *Componentes com Descrição*, gerado da base de dados MCC utilizada para armazenar os resultados, onde são identificados os seguintes aspectos dos componentes:

1. **IN** Designação mnemônica associada à instalação do Sistema;
2. **Instalação** Nome completo que caracteriza a instalação do sistema;
3. **SI** Designação mnemônica associada ao sistema;
4. **Sistema** Nome completo que caracteriza o sistema;
5. **CO** Designação mnemônica associada ao componente;
6. **Componente** Nome completo que caracteriza cada componente;
7. **Descrição** Texto contendo uma descrição mais detalhada do componente;
8. **Figura** Fotografia ou diagrama opcional que descreve o componente.

Estes tópicos são identificados e repetidos no cabeçalho de cada página do relatório, quando houver mais de uma página ou instalação analisada. A figura a seguir ilustra sua localização no layout do relatório, conforme a numeração acima, incluída na íntegra no CD-ROM que acompanha este Guia.



| IN | Instalação | SI | Sistema | CO | Componente | Descrição |
|----|---|----|----------------------|----|----------------------------------|--|
| 1 | Transformadores de Potência Imersos em Óleo | 1 | Sistema de Comutação | 1 | Derivações em Carga do Comutador | Cabos e conectores utilizados para conectar a chave seletora do comutador sob carga às derivações dos enrolamentos do transformador. |

The image shows a screenshot of a report page titled "Componentes com Descrição". The page features a header with the Cigré logo and the title. Below the header is a table with columns for installation (IN), system (SI), component (CO), and description. The table contains one row of data. Numbered callouts (1-8) point to various elements: 1 points to the installation code, 2 to the installation name, 3 to the system code, 4 to the system name, 5 to the component code, 6 to the component name, 7 to the description text, and 8 to a photograph of a transformer component.

Figura 9 – Relatório de Componentes com Descrição

Uma codificação numérica sequencial foi adotada para cada componente, específica para os componentes de cada sistema, embora outras codificações possam ser adotadas. O importante é que cada componente seja identificado univocamente por um código, e que este seja usado consistentemente em todo o processo da MCC. Neste estudo, o código de cada sistema será utilizado, junto com o código da instalação, na composição do código dos componentes, funções, falhas e modos de falha daquela instalação. Assim, o código de cada componente será composto pela justaposição do código da instalação com o código do sistema e do



próprio componente, separados por um ponto. No exemplo da Figura 9, o componente seria identificado pelo código 1.1.1.

Capítulo 5 – Funções

Introdução

Na MCC a função representa uma relação estabelecida entre componentes de um sistema com o objetivo de atingir alguma finalidade. A função representa também a menor parte funcional da instalação submetida à manutenção. Ou seja, qualquer funcionalidade ou subfuncionalidade que não faça parte da política de manutenção adotada não será submetida à análise da MCC. Este critério norteia o nível de profundidade e detalhamento do processo de identificação e catalogação das funções.

Este capítulo contém o resultado da etapa de identificação e descrição das funções que compõem cada sistema das instalações avaliadas, e que serão objetos da análise MCC.

Padronização

Funções serão caracterizados na MCC por um código mnemônico, uma frase de título e uma descrição mais detalhada do seu significado. As funções serão denominadas por títulos curtos, com a primeira palavra composta por um verbo no infinitivo, tendo a primeira letra maiúscula e as demais minúsculas, conforme padronizado no Anexo D. O verbo definirá a ação esperada da função, seguida por um objeto que define sua aplicação, complementado, se possível, por frases curtas que definem a faixa ou nível esperado de desempenho da função. A denominação deverá ser suficiente para qualificar totalmente a função, independente do sistema a que pertença. Os exemplos a seguir ilustram alguns casos:

- *Resfriar o óleo do transformador mantendo a temperatura entre os limites X e Y em graus Centígrados*
- *Proteger o transformador contra sobrecargas acima de 120% de sua capacidade.*

A descrição das funções deverá limitar-se, preferencialmente, a um único parágrafo, suficiente para melhor descrever ou detalhar a ação ou objetivo esperado, principalmente aquelas relacionadas aos limites de desempenho esperado, apenas com a primeira palavra com a primeira letra em maiúsculo. Exemplo:

“Proteger o transformador contra excesso de carga, através da comparação da corrente eficaz, de caráter permanente, com o valor ajustado máximo de suportabilidade do transformador, para um determinado tempo.”

Neste Guia, convencionou-se que as funções seriam identificadas apenas até o primeiro nível abaixo imediatamente dos sistemas. Ou seja, não foram detalhadas as subfunções das funções, para efeito de manutenção.

Documentação

A documentação das funções de cada sistema deve ser registrada na base de dados que suporta o processo MCC. A figura a seguir ilustra o formulário de entrada de dados destes registros, exemplificado para o caso da função do Sistema Ativo de Isolar a parte ativa do transformador, de transformadores imersos em líquido isolante.



The screenshot shows a software window titled 'Funções'. At the top left is the 'cigré' logo. The main area contains a form with the following fields and controls:

- Instalação:** Dropdown menu with 'Transformadores de Potência Imersos em' selected.
- Código:** Dropdown menu with '1' selected.
- Sistema:** Dropdown menu with 'Sistema Ativo' selected.
- Código:** Dropdown menu with '7' selected.
- Código:** Text input field with '7'.
- Sistema:** Dropdown menu with 'Sistema Ativo'.
- Código:** Text input field with '4'.
- Função:** Text input field with 'Isolar a parte ativa do transformador'.
- Descrição:** A text area containing the description: 'Proporcionar isolamento elétrico entre camadas, espiras, enrolamentos, núcleo e tanque, sem redução de resistência elétrica, presença de arcos elétricos, centelhamentos, descargas parciais e potenciais flutuantes, independente da PV% no momento da análise.'
- Replicar a Função --->** A button with a dropdown arrow.
- Navigation and Statistics:** A toolbar at the bottom includes icons for home, refresh, zoom, search, print, and navigation arrows. To the right of these icons is a summary table:

| | |
|-----------|-----|
| Registro: | 38 |
| Total: | 184 |

Figura 10 – Documentação de Funções

Note-se a identificação de cada função por um título descritivo, um código mnemônico, uma descrição textual, a instalação e o sistema ao qual ele pertence. Os demais controles deste formulário permitem a navegação e edição dos registros das funções existentes na base de dados

Estatística

A tabela a seguir resume a quantidade de funções identificadas em cada um dos oito sistemas típicos da maioria dos transformadores imersos em líquido isolante:

Tabela 3 – Quantidade de Funções por Sistema

| SISTEMA | FUNÇÕES |
|---------|---------|
|---------|---------|

| | |
|---|------------|
| Sistema de Comutação | 36 |
| Sistema de Proteção | 19 |
| Sistema de Conexão | 8 |
| Sistema de Resfriamento | 8 |
| Sistema Estrutural | 14 |
| Sistema de Preservação do Óleo | 24 |
| Sistema Ativo | 33 |
| Sistema de Controle, Supervisão e Monitoramento | 43 |
| TOTAL | 184 |

Note-se a preponderância de funções no Sistema de Controle, Supervisão e Monitoramento (43), seguida pelos Sistemas de Comutação (36) e Ativo (33), revelando a complexidade e diversidade funcional normalmente associada a estes sistemas. A distribuição percentual das 184 funções nos diversos sistemas do transformador encontra-se representada no gráfico a seguir:

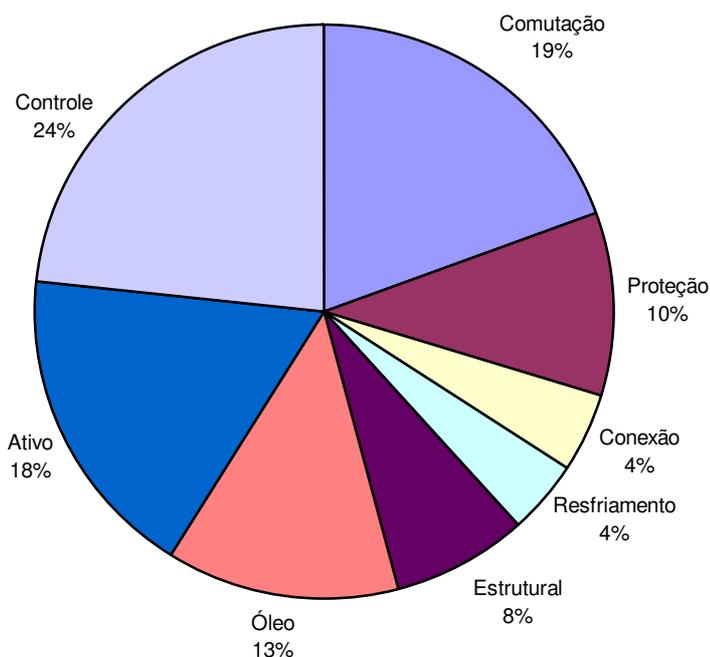


Figura 11 – Gráfico Percentual de Funções por Sistema

Relatório

O restante deste capítulo contém um relatório, denominado de *Funções com Descrição*, gerado da base de dados MCC utilizada para armazenar os resultados, onde são identificados os seguintes aspectos dos componentes:

1. **IN** Designação mnemônica associada à instalação do Sistema;
2. **Instalação** Nome completo que caracteriza a instalação do sistema;
3. **SI** Designação mnemônica associada ao sistema;
4. **Sistema** Nome completo que caracteriza o sistema;

- 5. **FU** Designação mnemônica associada a cada função do sistema;
- 6. **Função** Nome completo que caracteriza cada função;
- 7. **Descrição** Texto contendo uma descrição mais detalhada da função.

Estes tópicos são identificados e repetidos no cabeçalho de cada página do relatório, quando houver mais de uma página ou instalação analisada. A figura a seguir ilustra sua localização no layout do relatório, conforme a numeração acima, incluído na íntegra no CD-ROM que acompanha este Guia.

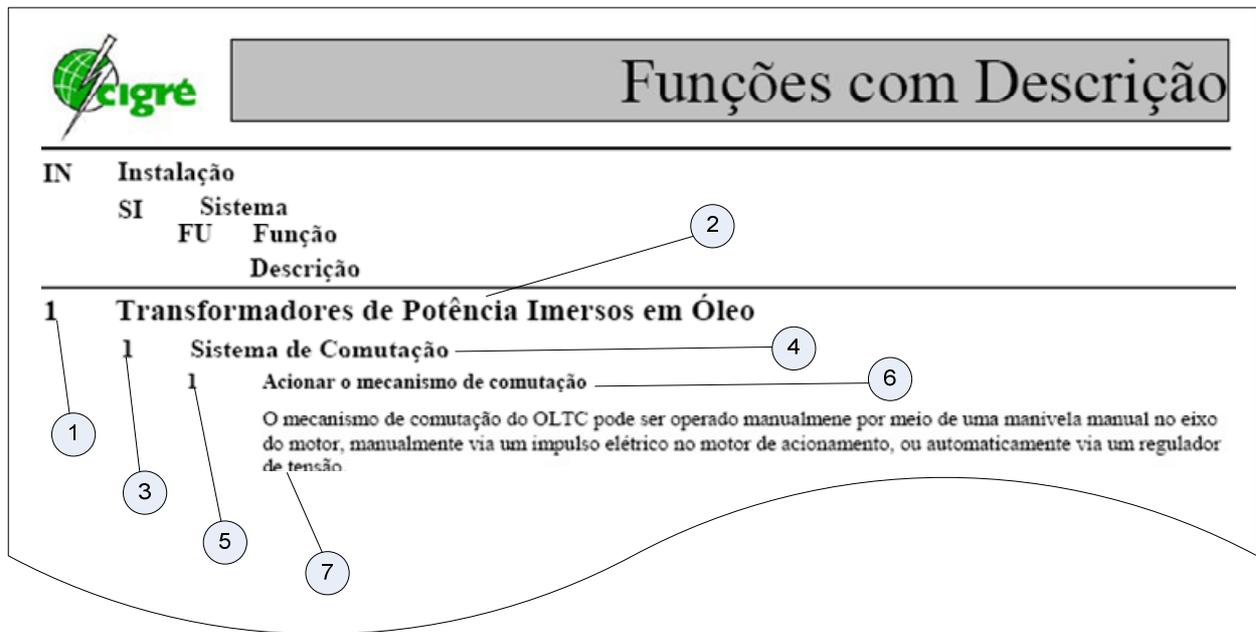


Figura 12 – Relatório de Funções com Descrição

Uma codificação numérica sequencial foi adotada para cada função, específica para as funções de cada sistema, embora outras codificações possam ser adotadas. O importante é que cada função seja identificada univocamente por um código, e que este seja usado consistentemente em todo o processo da MCC. Neste estudo, o código de cada função será utilizado, junto com o da instalação e do sistema, na composição do código das funções daquela instalação. Assim, o código de cada função será composto pela justaposição do código da instalação com o código do sistema e do componente, separados por pontos. No exemplo da Figura 12, a função seria identificada pelo código 1.1.1. Note-se que o mesmo código pode identificar um componente ou uma função. O contexto servirá para diferenciá-los.

Capítulo 6 – Falhas

Introdução

Na metodologia MCC, falhas representam estados de anormalidade de funções dos sistemas. Podem representar desde a completa ausência da função, ou apenas uma degradação parcial do nível de desempenho esperado da função no sistema associado. Falhas normalmente são independentes dos componentes que implementam a função.

Este capítulo contém o resultado da etapa de identificação e descrição das falhas de cada função que compõem cada sistema dos transformadores, e que serão objetos da análise MCC.

Padronização

Falhas serão caracterizadas na MCC por um código mnemônico, uma frase de título e uma descrição mais detalhada do seu significado. As falhas funcionais serão denominadas por títulos curtos, com a primeira palavra formada por um ou mais substantivos, derivados do verbo principal que descreva a falha, complementado por outros objetos que qualifiquem a falha, tal como os limites de desempenho ultrapassados da função, tendo a primeira letra maiúscula e as demais minúsculas. A denominação deverá ser suficiente para qualificar totalmente a falha, independente da função ou sistema a que pertença, seguindo o padrão definido no Anexo D deste Guia. Os exemplos a seguir ilustram este padrão:

- *Perda da suportabilidade mecânica das espiras dos enrolamentos*
- *Impossibilidade de comando remoto do comutador de taps.*

A descrição das falhas funcionais deverá limitar-se, preferencialmente, a um único parágrafo, suficiente para melhor descrever ou detalhar a falha, citando, se possível, a causa principal da violação dos limites de desempenho esperado da função, apenas com a primeira letra da primeira palavra em maiúsculo. Deverá iniciar-se com um substantivo, derivado do verbo principal que descreva a falha, complementado por outros objetos que a qualifiquem, com a primeira letra maiúscula e as demais minúsculas. Exemplo:

“Insuficiência da suportabilidade mecânica dos enrolamentos do transformador, provocando a deformação das espiras quando da ocorrência de correntes passantes além do limite de suportabilidade projetado.”

Neste Guia, as falhas estão diretamente associadas às funções de cada sistema. Ou seja, os sistemas não possuem falhas além daquelas associadas às suas funções.

Documentação

A documentação das falhas de cada função dos sistemas deve ser registrada na base de dados que suporta o processo MCC. A figura a seguir ilustra o formulário de entrada de dados destes registros, exemplificado para o caso da falha de *Desligamento indevido do transformador por comutador fora de passo*, da função *Proteger o transformador contra comutador fora de passo*, do *Sistema de Proteção* de transformadores imersos em líquido isolante.



| Falhas Funcionais | |
|-------------------|---|
| Instalação | Transformadores de Potência Imersos em |
| Código | 1 |
| Sistema | Sistema de Proteção |
| Código | 2 |
| Função | Proteger o transformador contra comutac |
| Código | 15 |

Código: 2 Função: Proteger o transformador contra comutador fora de pas

Falha: Desligamento indevido do transformador por comutador fora de passo

Descrição Replicar a Falha --->

Indisponibilidade ou sinalização desnecessária do transformador por atuação intempestiva de proteção contra comutador fora de passo, sem que tenha havido interrupção da comutação que justifique sua atuação.

Registro: 13
Total: 408

Figura 13 – Documentação de Falhas Funcionais

Note-se a identificação de cada falha por um título descritivo, um código mnemônico, uma descrição textual, a função associada do sistema, e a instalação ao qual ele pertence. Os demais controles deste formulário permitem a navegação e edição dos registros das falhas funcionais existentes na base de dados

Estatística

A tabela a seguir resume a quantidade de falhas funcionais identificadas em cada um dos oito sistemas típicos da maioria dos transformadores imersos em líquido isolante:

Tabela 4 – Quantidade de Falhas por Sistema

| SISTEMA | FALHAS |
|---|------------|
| Sistema de Comutação | 80 |
| Sistema de Proteção | 40 |
| Sistema de Conexão | 18 |
| Sistema de Resfriamento | 15 |
| Sistema Estrutural | 26 |
| Sistema de Preservação do Óleo | 49 |
| Sistema Ativo | 74 |
| Sistema de Controle, Supervisão e Monitoramento | 106 |
| TOTAL | 408 |

Note-se a preponderância de falhas funcionais no Sistema de Controle, Supervisão e Monitoramento (106), seguida pelos Sistemas de Comutação (80) e Ativo (74), revelando a complexidade e diversidade funcional normalmente associada a estes sistemas. A distribuição percentual das 408 falhas nos diversos sistemas do transformador encontra-se representada no gráfico a seguir:

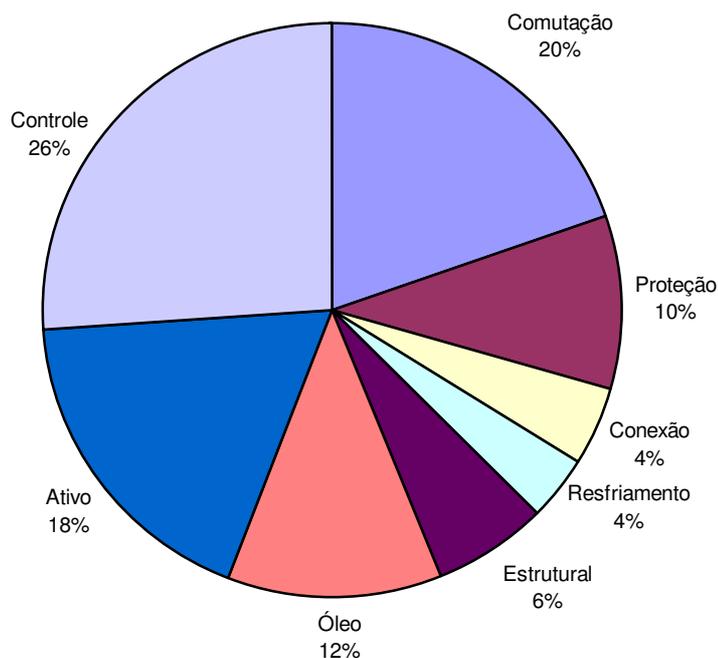


Figura 14 – Gráfico Percentual de Falhas por Sistema

Relatório

O restante deste capítulo contém um relatório, denominado de *Falhas com Descrição*, gerado da base de dados MCC utilizada para armazenar os resultados, onde são identificados os seguintes aspectos das falhas funcionais:

1. **IN** Designação mnemônica associada à instalação do Sistema;
2. **Instalação** Nome completo que caracteriza a instalação do sistema;
3. **SI** Designação mnemônica associada ao sistema;
4. **Sistema** Nome completo que caracteriza o sistema;

- 5. **FU** Designação mnemônica associada a cada função do sistema;
- 6. **Função** Nome completo que caracteriza cada função;
- 7. **FA** Designação mnemônica associada a cada falha funcional do sistema;
- 8. **Falha** Nome completo que caracteriza cada falha funcional;
- 9. **Descrição** Texto contendo uma descrição mais detalhada da falha funcional.

Estes tópicos são identificados e repetidos no cabeçalho de cada página do relatório, quando houver mais de uma página ou instalação analisada. A figura a seguir ilustra sua localização no layout do relatório, conforme a numeração acima, incluída na íntegra no CD-ROM que acompanha este Guia.

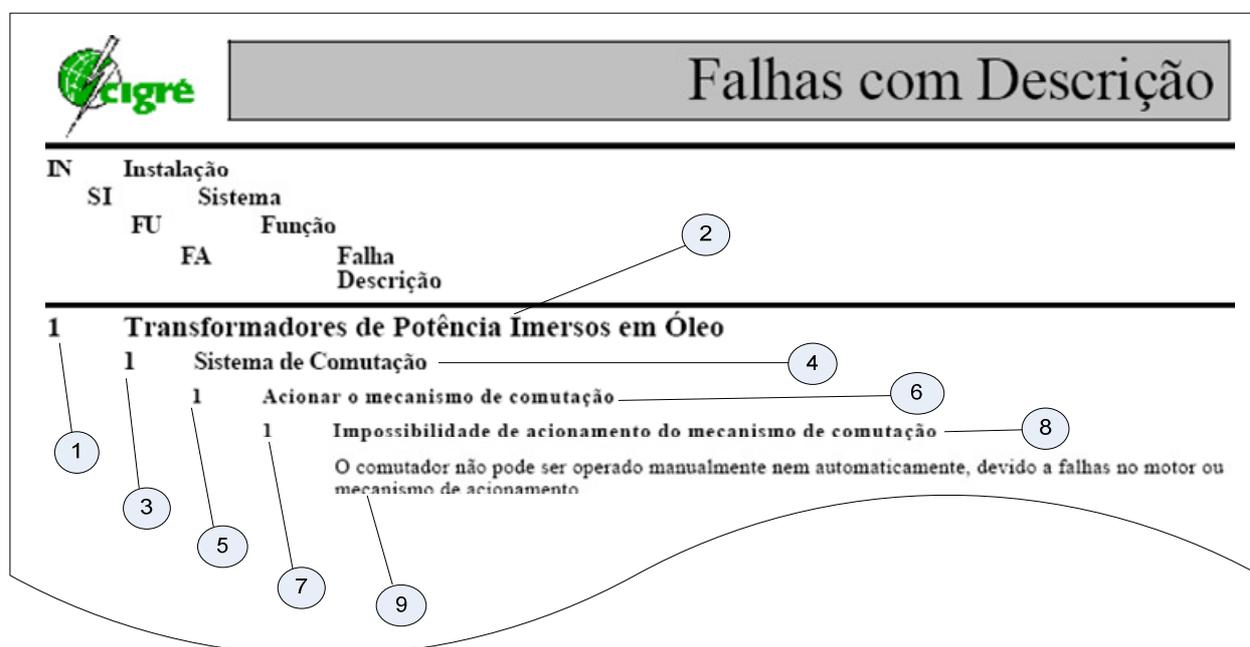


Figura 15 – Relatório de Falhas com Descrição

Uma codificação numérica sequencial foi adotada para cada falha, específica para as falhas das funções de cada sistema, embora outras codificações possam ser adotadas. O importante é que cada falha seja identificada univocamente por um código, e que este seja usado consistentemente em todo o processo da MCC. Neste estudo, o código de cada falha será utilizado, junto com o da instalação, do sistema e da função, na composição do código das falhas daquela instalação. Assim, o código de cada falha será composto pela justaposição do código da instalação com o código do sistema, da função e da falha, separados por pontos. No exemplo da Figura 15, a falha funcional seria identificada pelo código 1.1.1.1.

Capítulo 7 - Modos de Falha

Introdução

Modos de falhas representam eventos de anormalidade em componentes dos sistemas que compõem a instalação. Podem representar desde a completa danificação do componente, ou degradação parcial de uma determinada característica importante para alguma função do sistema. Na MCC, os modos de falha que interessam são aqueles que interferem no desempenho das funções dos sistemas. Representam o objeto de ação das atividades de manutenção.

Este capítulo contém o resultado da etapa de identificação e descrição dos modos de falha dos componentes que compõem cada transformador, e que serão objetos da análise MCC.

Padronização

Modos de falha serão caracterizados na MCC por um código mnemônico, uma frase de título e uma descrição mais detalhada do seu significado. Seguindo as regras estabelecidas no Anexo D, os modos de falha serão denominadas por títulos curtos, com a primeira palavra maiúscula composta por um ou mais substantivos, derivados do verbo principal que descreva a falha, complementado por outros objetos que qualifiquem a falha, tendo a primeira letra maiúscula e as demais minúsculas. A denominação deverá ser suficiente para qualificar totalmente o modo de falha, independente do componente ou sistema a que pertença, devendo preferencialmente obedecer ao padrão:

<modo> do(a) <componente>,

onde *<modo>* = denominação do Modo de Falha, e
<componente> = denominação do Componente correspondente.

Exemplos:

- *Excesso de umidade do papel isolante do enrolamento*
- *Sobretensões ressonantes superiores à suportabilidade do isolamento do enrolamento.*

A descrição dos modos de falha deverá limitar-se, preferencialmente, a um único parágrafo, suficiente para melhor descrever ou detalhar o modo de falha, citando, se possível, a causa principal da violação dos limites de desempenho esperado do componente, apenas com a primeira letra da primeira palavra em maiúsculo. Deverá

iniciar-se com um substantivo, derivado do verbo principal que descreva o modo de falha, complementado por outros objetos que o qualifiquem, com a primeira letra maiúscula e as demais minúsculas.

Exemplo:

“Presença de umidade em excesso no papel, oriundo da migração de água ou ar dissolvido no óleo para o isolante sólido, quando da elevação da temperatura, reduzindo sua capacidade isolante e suportabilidade mecânica.”

Neste Guia, os modos de falhas estão diretamente associados aos componentes de cada sistema. Ou seja, os sistemas não possuem modos de falhas além daqueles associados aos seus componentes.

Documentação

Os modos de falha de cada componente dos sistemas devem ser registrados na base de dados que suporta o processo MCC. A figura a seguir ilustra o formulário de entrada de dados destes registros, exemplificado para o caso do modo de falha *Velocidade insuficiente dos Ventiladores de Resfriamento do Sistema de Resfriamento* de transformadores imersos em líquido isolante.



| Modos de Falha | |
|----------------|---|
| Instalação | Transformadores de Potência Imersos em Líquido Isolante |
| Sistema | Sistema de Resfriamento |
| Componente | Ventiladores de Resfriamento |
| Modo de Falha | Velocidade insuficiente dos Ventiladores de Resfriamento |
| Componente | Ventiladores de Resfriamento |
| Críticidade | Crítico |
| Descrição | Baixa velocidade dos ventiladores, provocada por subtensão, obstrução parcial do eixo, problemas de lubrificação, etc., reduzindo sua ação de resfriamento. |
| Efeito | |

Registro: 1435
Total: 1436

Figura 16 – Documentação de Modos de Falha

Note-se a identificação de cada modo de falha por um título descritivo, um código mnemônico, uma descrição textual, o componente associado do sistema, o nível de criticidade e o efeito resultante na instalação ao qual ele pertence. Os demais

controles deste formulário permitem a navegação e edição dos registros dos modos de falha existentes na base de dados

O relacionamento entre os modos de falha e as falhas funcionais é registrada por uma matriz de correlação, conforme ilustrado no formulário da figura seguinte, para cada sistema, função e componente da instalação.



| Modo de Falha | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 | X7 | X8 | X9 | X10 | X11 | X12 | X13 | X14 | X15 | X16 | X17 | X18 | X19 | X20 | X21 | X22 | X23 |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Abertura indevida da Válvula ou Bujão | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Atuação indevida quando não solicitado | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Circulação insuficiente do Ar de Resfriar | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Conexões folgadas no Quadro de Cont | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Conexões folgadas no Quadro de Cont | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Figura 17 – Matriz de Modos e Falhas

Cada linha da matriz identifica um modo de falha que é associado às falhas funcionais relacionadas nas colunas da matriz, para cada sistema, função e componente da instalação. Cada marca na célula da matriz significa que o modo de falha da linha provoca a falha funcional listada na coluna correspondente. Os demais controles deste formulário permitem a navegação e edição dos registros da matriz dos modos e falhas existentes na base de dados

Estatística

A tabela a seguir resume a quantidade de modos de falhas identificados em cada um dos oito sistemas típicos da maioria dos transformadores imersos em líquido isolante:

Tabela 5 – Quantidade de Modos de Falha por Sistema

| SISTEMA | MODOS |
|---|--------------|
| Sistema de Comutação | 342 |
| Sistema de Proteção | 135 |
| Sistema de Conexão | 123 |
| Sistema de Resfriamento | 147 |
| Sistema Estrutural | 136 |
| Sistema de Preservação do Óleo | 200 |
| Sistema Ativo | 122 |
| Sistema de Controle, Supervisão e Monitoramento | 231 |
| TOTAL | 1436 |

Note-se a preponderância de modos de falhas funcionais no Sistema de Comutação (342), seguida pelos Sistemas de Controle, Supervisão e Monitoramento (231) e Preservação do Óleo (200), revelando a complexidade normalmente associada a estes sistemas. A distribuição percentual das 1436 modos de falhas nos diversos sistemas do transformador encontra-se representada no gráfico a seguir:

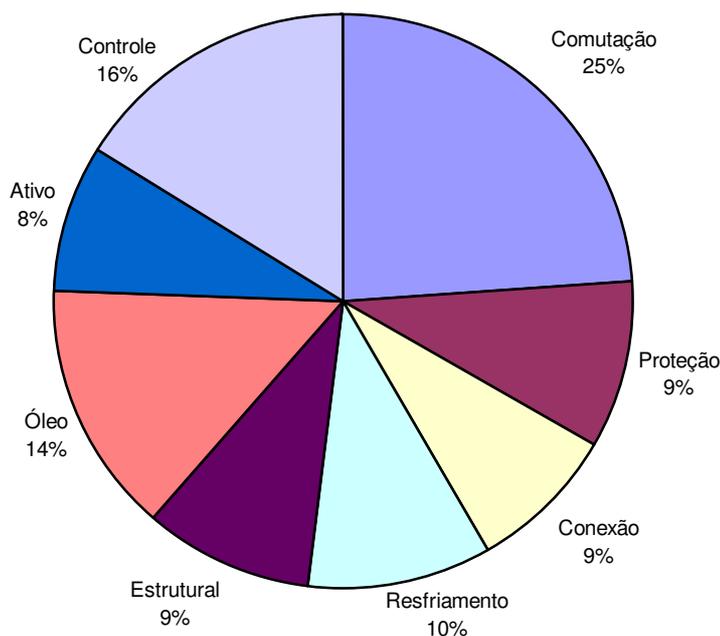


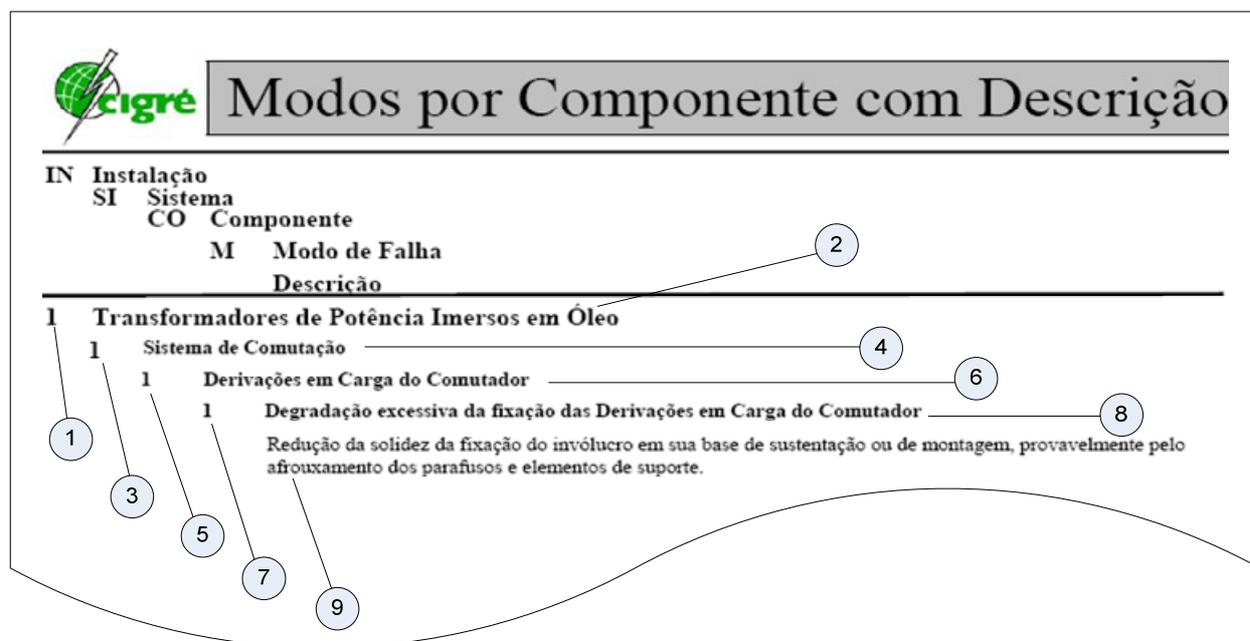
Figura 18 – Gráfico Percentual de Modos de Falha por Sistema

Relatório

O restante deste capítulo contém um relatório, denominado de *Modos por Componente com Descrição*, gerado da base de dados MCC utilizada para armazenar os resultados, onde são identificados os seguintes aspectos dos modos de falha:

1. **IN** Designação mnemônica associada à instalação do Sistema;
2. **Instalação** Nome completo que caracteriza a instalação do sistema;
3. **SI** Designação mnemônica associada ao sistema;
4. **Sistema** Nome completo que caracteriza o sistema;
5. **CO** Designação mnemônica associada ao componente do sistema;
6. **Componente** Nome completo que caracteriza cada componente;
7. **MO** Designação mnemônica associada ao modo de falha;
8. **Modo de Falha** Nome que caracteriza cada modo de falha do componente;
9. **Descrição** Texto contendo uma descrição mais detalhada do modo de falha.

Estes tópicos são identificados e repetidos no cabeçalho de cada página do relatório, quando houver mais de uma página ou instalação analisada. A figura a seguir ilustra sua localização no layout do relatório, conforme a numeração acima, incluída na íntegra no CD-ROM que acompanha este Guia.



| IN | Instalação | SI | Sistema | CO | Componente | M | Modo de Falha | Descrição |
|----|---|----|----------------------|----|----------------------------------|---|--|---|
| 1 | Transformadores de Potência Imersos em Óleo | | | | | | | |
| | | 1 | Sistema de Comutação | | | | | |
| | | | | 1 | Derivações em Carga do Comutador | | | |
| | | | | | | 1 | Degradação excessiva da fixação das Derivações em Carga do Comutador | |
| | | | | | | | | Redução da solidez da fixação do invólucro em sua base de sustentação ou de montagem, provavelmente pelo afrouxamento dos parafusos e elementos de suporte. |

Figura 19 – Relatório de Modos por Componente com Descrição

Uma codificação numérica sequencial foi adotada para cada modo de falha, específica para os modos de falha dos componentes de cada sistema, embora outras codificações possam ser adotadas. O importante é que cada modo de falha seja identificada univocamente por um código, e que este seja usado consistentemente em todo o processo da MCC. Neste estudo, o código de cada modo de falha será utilizado, junto com o da instalação, do sistema e do componente, na composição do código dos modos de falha daquela instalação. Assim, o código de cada modo de falha será composto pela justaposição do código da instalação com o código do sistema, do componente e do modo de falha, separados por pontos. No exemplo da Figura 19, o modo de falha seria identificado pelo código 1.1.1.1. Note-se que o mesmo código pode identificar um modo de falha ou uma falha funcional. O contexto servirá para diferenciá-los.

Capítulo 8 - Efeitos de Falhas

Introdução

Os efeitos de falhas representam os eventos resultantes de um modo de falha, sobre os demais componentes, sistemas e funções de uma instalação. Definem assim como serão as consequências resultantes de cada modo de falha.

Este capítulo contém o resultado da etapa de Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA ou FMECA), com a associação de cada falha funcional aos modos de falha que a provocam, e a descrição dos efeitos resultantes de cada modo de falha.

Padronização

A descrição dos efeitos de cada modo de falha é relativamente livre, considerando que cada modo de falha pode produzir vários efeitos. Compõe-se normalmente de uma lista de efeitos, separados usualmente por ponto ou ponto-e-vírgula. Além dos efeitos imediatos, principalmente em componentes adjacentes, listam-se os efeitos resultantes da propagação através da estrutura funcional do sistema, ou em outros sistemas da instalação. O registro na base de dados ocorre no campo correspondente do registro de cada modo de falha, conforme ilustrado na Figura 16.

Níveis de Criticidade

Além dos tópicos tradicionais da análise FMEA, o capítulo contém uma avaliação da **Criticidade** de cada modo de falha, de acordo com os efeitos listados. As seguintes classes são normalmente utilizadas para classificar a **Criticidade** na MCC, conforme descritas no Anexo B:

- **Catastrófico** – várias mortes, perda da instalação ou desastre ambiental;
- **Crítico** – ferimento severo ou morte, dano significativo ambiental ou na instalação;
- **Marginal** – ferimentos leves ou pequenos danos na instalação ou ambiente;
- **Mínimo** – consequências reduzidas na operação, segurança e ambiente;
- **Insignificante** – efeitos desprezíveis na operação, segurança e ambiente.

Neste Guia, as classes acima foram agrupados nas três níveis seguintes, conforme a atitude da manutenção diante dos efeitos gerados:

- **Crítico** – efeitos considerados Catastróficos ou Críticos;

- **Significativo** – efeitos considerados Marginais ou Mínimos;
- **Mínimo** – efeitos considerados Insignificantes.

Estes níveis também definem o critério de escolha dos modos de falha significantes, segundo a MCC, ou seja, os modos que serão avaliados no restante do processo, visando definir as atividades de manutenção. Os modos considerados não significantes (efeitos mínimos) serão apenas registrados, mas não será realizada análise subsequente. Neste estudo, apenas os modos de falha críticos ou significativos foram considerados significantes sob o ponto de vista de manutenção. Os modos cujos efeitos foram considerados mínimos serão ignorados no restante da análise. O registro na base de dados ocorre no campo correspondente do registro de cada modo de falha, conforme ilustrado na Figura 16.

Estatística

A tabela a seguir resume a classificação dos níveis de criticidade dos modos de falhas identificados em cada um dos oito sistemas típicos da maioria dos transformadores imersos em líquido isolante:

Tabela 6 – Níveis de Criticidade por Sistema

| SISTEMA | Crítico | Significativo | Mínimo |
|---|----------------|----------------------|---------------|
| Sistema de Comutação | 137 | 193 | 12 |
| Sistema de Proteção | 63 | 71 | 1 |
| Sistema de Conexão | 63 | 51 | 9 |
| Sistema de Resfriamento | 57 | 89 | 1 |
| Sistema Estrutural | 52 | 71 | 13 |
| Sistema de Preservação do Óleo | 134 | 63 | 3 |
| Sistema Ativo | 111 | 11 | 0 |
| Sistema de Controle, Supervisão e Monitoramento | 22 | 207 | 2 |
| TOTAL | 639 | 756 | 41 |

Note-se a preponderância de modos de falha críticos nos Sistemas de Comutação (137), seguida pelos Sistemas de Preservação do Óleo (134), e Sistema Ativo (111), revelando a importância normalmente associada a estes sistemas nos transformadores. Falhas nestes sistemas podem resultar em danos significantes ou perda total do transformador. A tabela relaciona também os modos de falha cujos efeitos são considerados mínimos sobre a instalação, considerando os impactos econômicos, operacionais, de segurança e ambientais. A distribuição percentual da criticidade dos 1436 modos de falhas nos diversos sistemas do transformador encontra-se representada no gráfico a seguir:

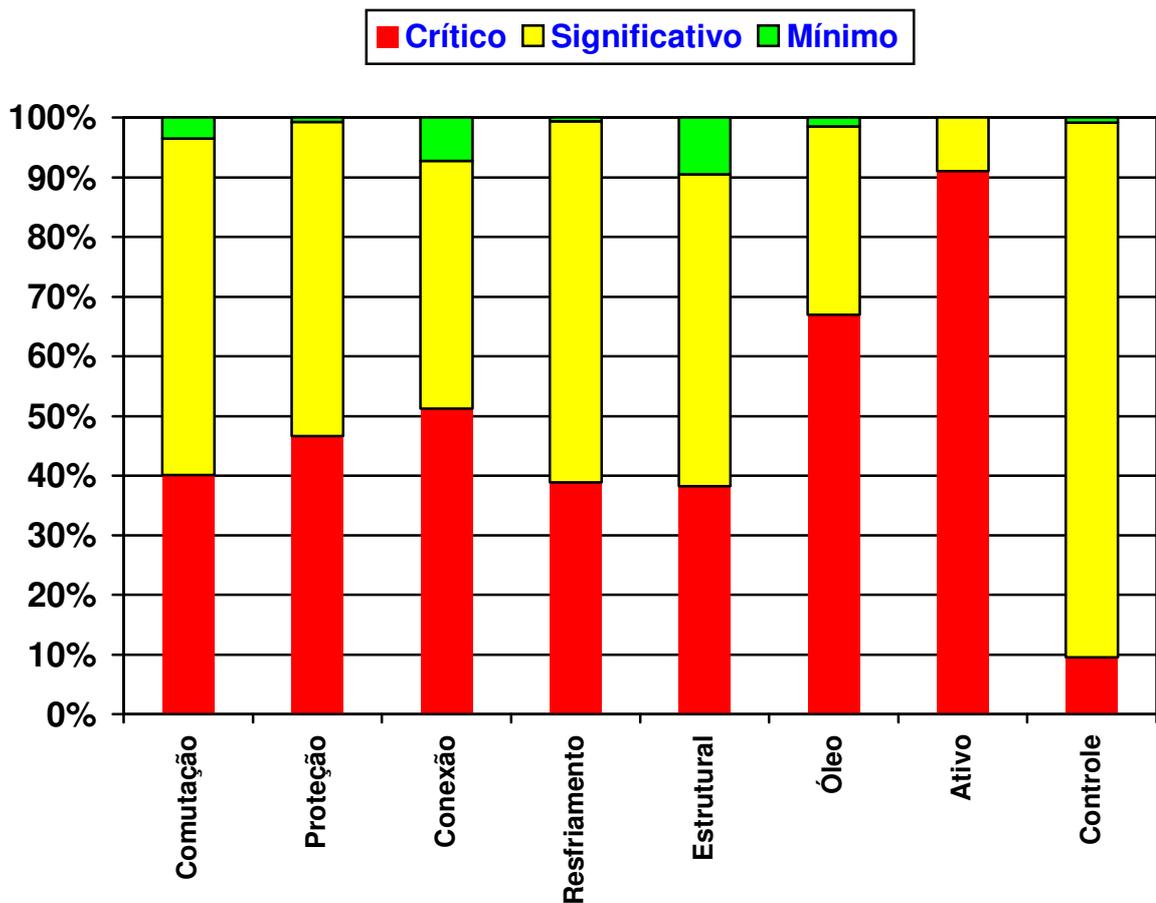


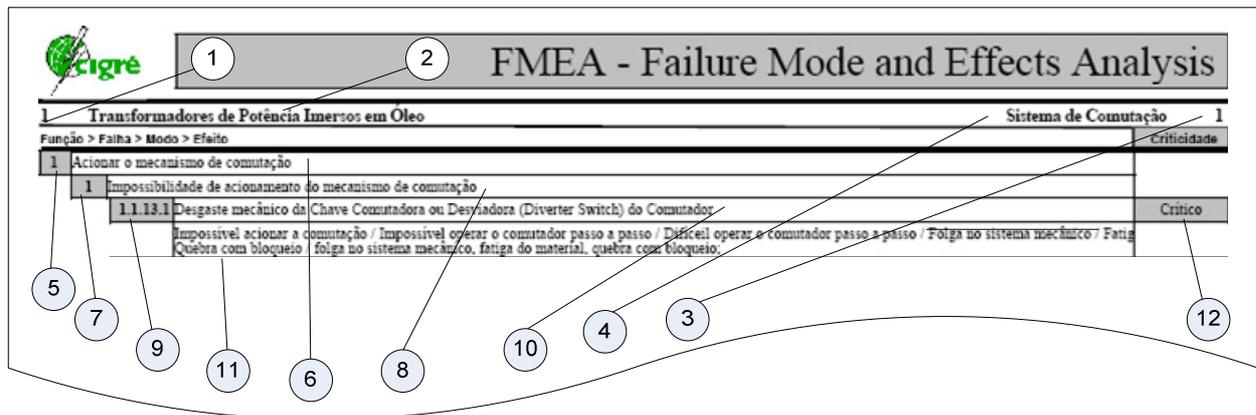
Figura 20 – Gráfico Percentual de Criticidades por Sistema

Relatório

O restante deste capítulo contém um relatório, denominado de *FMEA – Failure Mode and Effects Analysis*, gerado da base de dados MCC utilizada para armazenar os resultados, em forma de planilha tradicionalmente adotada em estudos de FMEA, onde são identificados os seguintes aspectos:

- | | |
|--------------------------|--|
| 1. IN | Designação mnemônica associada à instalação do Sistema; |
| 2. Instalação | Nome completo que caracteriza a instalação do sistema; |
| 3. SI | Designação mnemônica associada ao sistema; |
| 4. Sistema | Nome completo que caracteriza o sistema; |
| 5. FU | Designação mnemônica associada a cada função do sistema; |
| 6. Função | Nome completo que caracteriza cada função; |
| 7. FA | Designação mnemônica associada a cada falha funcional; |
| 8. Falha | Nome completo que caracteriza cada falha funcional; |
| 9. MO | Designação mnemônica associada ao modo de falha; |
| 10. Modo de Falha | Nome que caracteriza cada modo de falha associado à falha; |
| 11. Efeito | Texto contendo uma descrição do efeito do modo de falha; |
| 12. Criticidade | Classificação do nível de gravidade do modo de falha. |

Estes tópicos são identificados e repetidos no cabeçalho de cada página do relatório, quando houver mais de uma página ou instalação analisada. A figura a seguir ilustra sua localização no layout do relatório, conforme a numeração acima, incluído na íntegra no CD-ROM que acompanha este Guia.



| 1 | | 2 | | FMEA - Failure Mode and Effects Analysis | |
|--|--|---|------------------------|--|-------------|
| 1 Transformadores de Potência Imersos em Óleo | | | Sistema de Comutação 1 | | |
| Função > Falha > Modo > Efeito | | | | | |
| 1 | Acionar o mecanismo de comutação | | | | Criticidade |
| 1 | Impossibilidade de acionamento do mecanismo de comutação | | | | |
| 1.1.13.1 | Desgaste mecânico da Chave Comutadora ou Desviadora (Diverter Switch) do Comutador | | | | Critico |
| Impossível acionar a comutação / Impossível operar o comutador passo a passo / Difícil operar o comutador passo a passo / Folga no sistema mecânico / Fuga de óleo / Quebra com bloqueio / folga no sistema mecânico, fadiga do material, quebra com bloqueio. | | | | | |

Figura 21 – Relatório FMEA – Failure Mode and Effects Analysis

Note-se o uso do código mnemônico completo, neste exemplo (1.1.13.1) para identificar o modo de falha. O Relatório de FMEA é utilizado na MCC para seleção das atividades de manutenção, e respectivas frequências de execução, para cada modo de falha significativa, conforme descrito no capítulo seguinte.

Capítulo 9 - Seleção de Atividades

Introdução

A seleção da atividade e frequência de execução da manutenção, para cada modo de falha, compõe a etapa de decisão da metodologia MCC. O processo envolve a análise de consequências e impactos econômicos, operacionais e ambientais das falhas. Um processo estruturado de decisão é utilizado para definir a atividade de manutenção mais aplicável e efetiva para combater cada modo de falha.

Este capítulo descreve os resultados da aplicação deste processo a transformadores imersos em líquido isolante. Junto com o Capítulo 10, contém o resultado da etapa de Análise e Decisão da metodologia MCC, com a avaliação das consequências de cada modo de falha de transformadores, e a escolha da atividade e frequência de manutenção recomendada.

Visibilidade e Consequências

Na primeira etapa do processo avalia-se a visibilidade dos efeitos de cada modo de falha, classificando-o como evidente ou oculta, conforme sejam detectáveis ou não pelo operador ou usuário da instalação. Na etapa seguinte, avaliam-se as consequências resultantes, com relação aos impactos econômicos, operacionais, ambientais e de segurança, humana e da instalação, resultando em um dos seguintes classes:

- **ESA** – Evidente e Segurança ou Ambiental
- **EEO** – Evidente e Econômico ou Operacional
- **OEO** - Oculto e Econômico ou Operacional
- **OSA** - Oculto e Segurança ou Ambiental.

Documentação da Visibilidade

A documentação da análise de visibilidade de cada modo de falha também deve ser registrada na base de dados que suporta o processo. A árvore de decisão é o processo recomendado na MCC para seleção de atividades, a partir da análise de visibilidade do modo de falha. A figura a seguir ilustra o formulário de entrada de dados dos registros de visibilidade do modo de falha de *Degradação da fixação da Tampa de Inspeção do Comutador*, de transformadores imersos em líquido isolante.

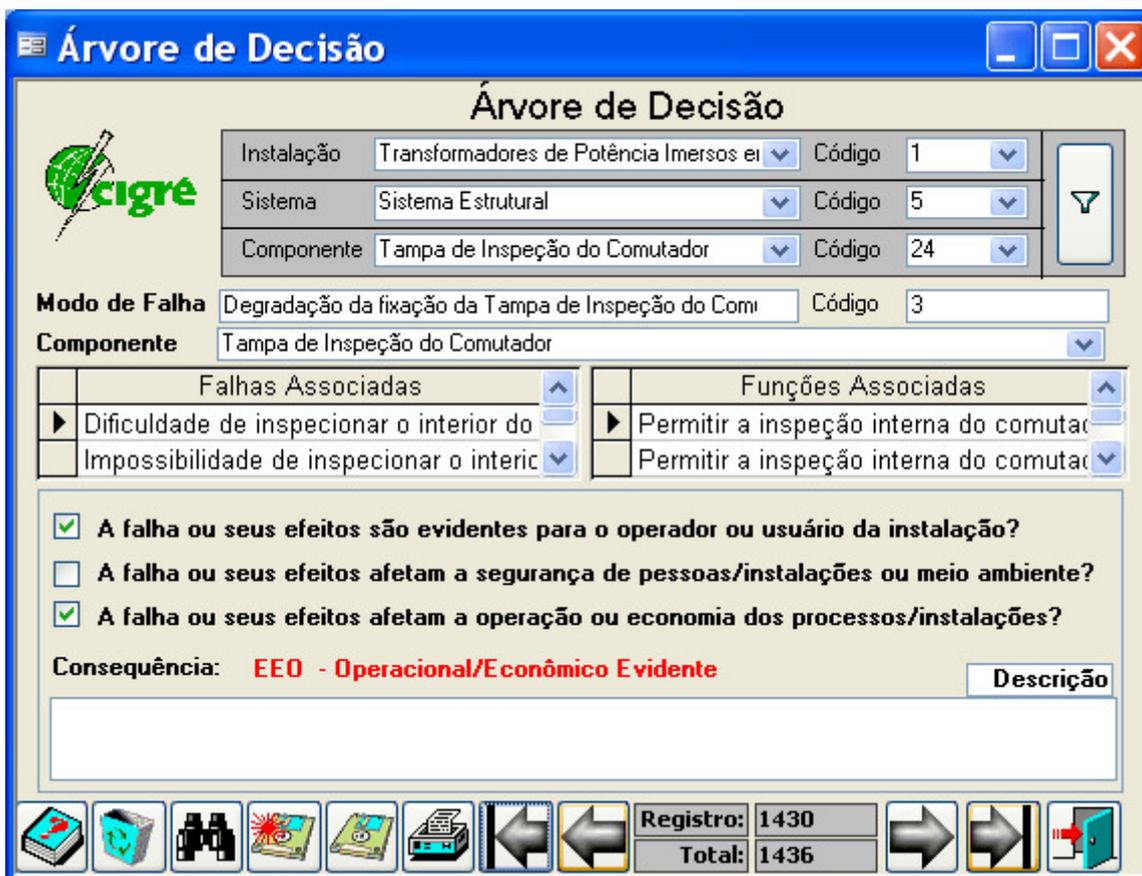


Figura 22 – Documentação da Árvore de Decisão

Neste formulário são anotadas as respostas às três questões básicas sobre a visibilidade do modo de falha, para o operador ou usuário da instalação, e as consequências associadas. Cada modo de falha é identificado pelo título descritivo, seu código mnemônico, o componente, sistema e instalação a que pertence. As falhas e funções associadas ao modo de falha também são listadas, como suporte ao processo de decisão. Os demais controles deste formulário permitem a navegação e edição dos registros da visibilidade dos modos de falha existentes na base de dados.

Seleção de Atividades

Estabelecida a visibilidade do modo de falha, é possível avaliar e selecionar a atividade mais aplicável e efetiva para a manutenção. A metodologia MCC padroniza os tipos de atividades de manutenção em oito tipos, assim denominados:

- **Serviço Operacional (SO):** tarefas realizadas pelo operador da instalação;
- **Inspeção Preditiva (IP):** tarefas destinadas a detectar a evolução de falhas;
- **Restauração Preventiva (RP):** recuperação periódica de componentes;
- **Substituição Preventiva (SP):** tarefas de reposição periódica de componentes;



- **Inspeção Funcional (IF):** simulação da funcionalidade oculta de componentes;
- **Manutenção Combinada (MC):** junção de duas ou mais atividades preventivas;
- **Modificações de Projeto (MP):** adequações na funcionalidade dos sistemas;
- **Reparo Funcional (RF):** restauração da função após uma falha funcional.

Dependendo da visibilidade, e da consequência de cada modo de falha, avalia-se sequencialmente a aplicabilidade e efetividade de cada tipo de atividade, no combate ao modo de falha. A figura seguinte ilustra o fluxo de atividades deste processo.

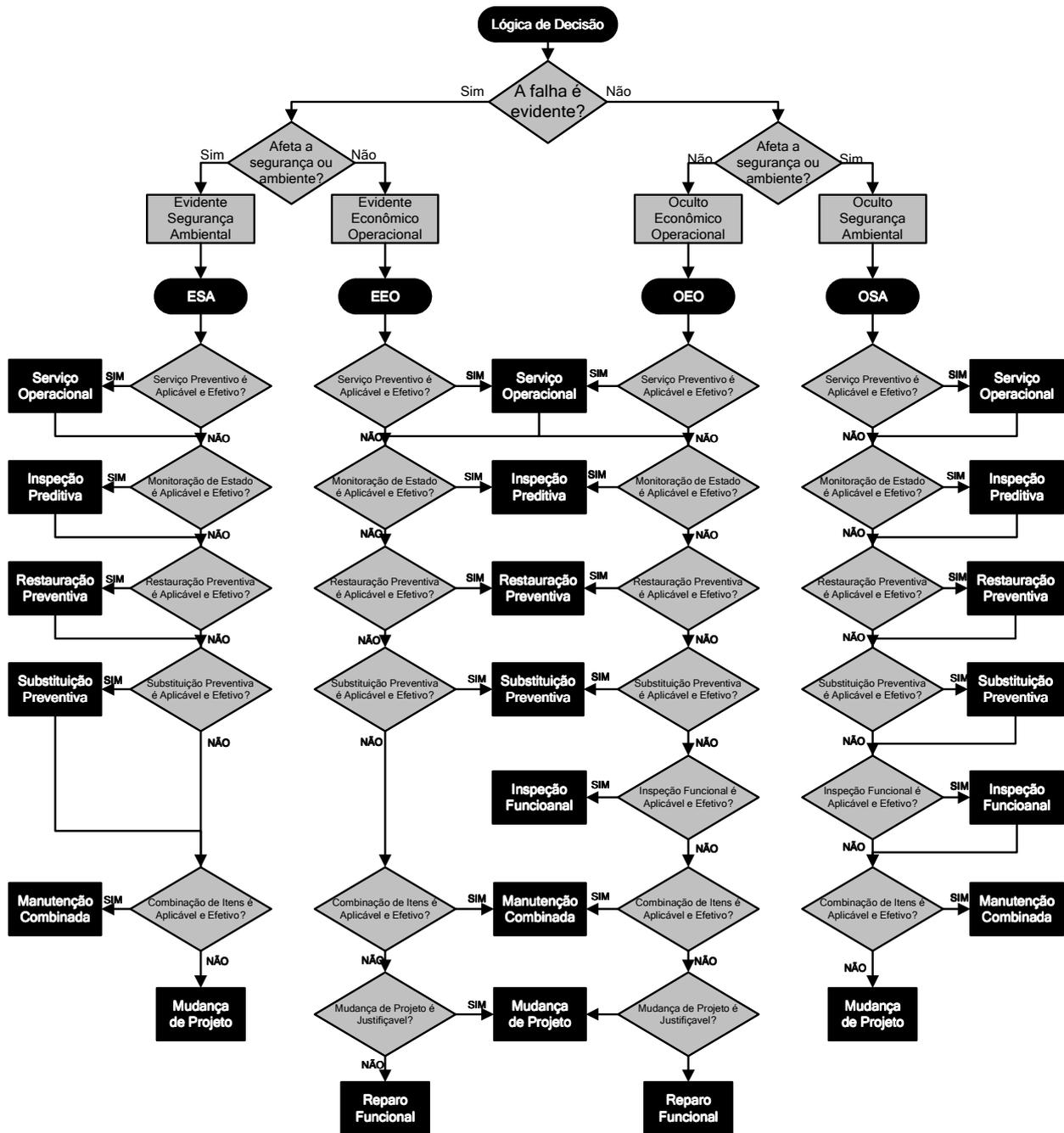


Figura 23 – Diagrama de Decisão da MCC

Documentação da Atividade

As decisões tomadas com base neste diagrama são registradas na base de dados que suporta o processo. A figura a seguir ilustra o formulário de entrada de dados dos registros do processo de seleção da atividade mais aplicável e efetiva para o modo de falha de *Degradação da fixação da Tampa de Inspeção do Comutador*, de transformadores imersos em líquido isolante.

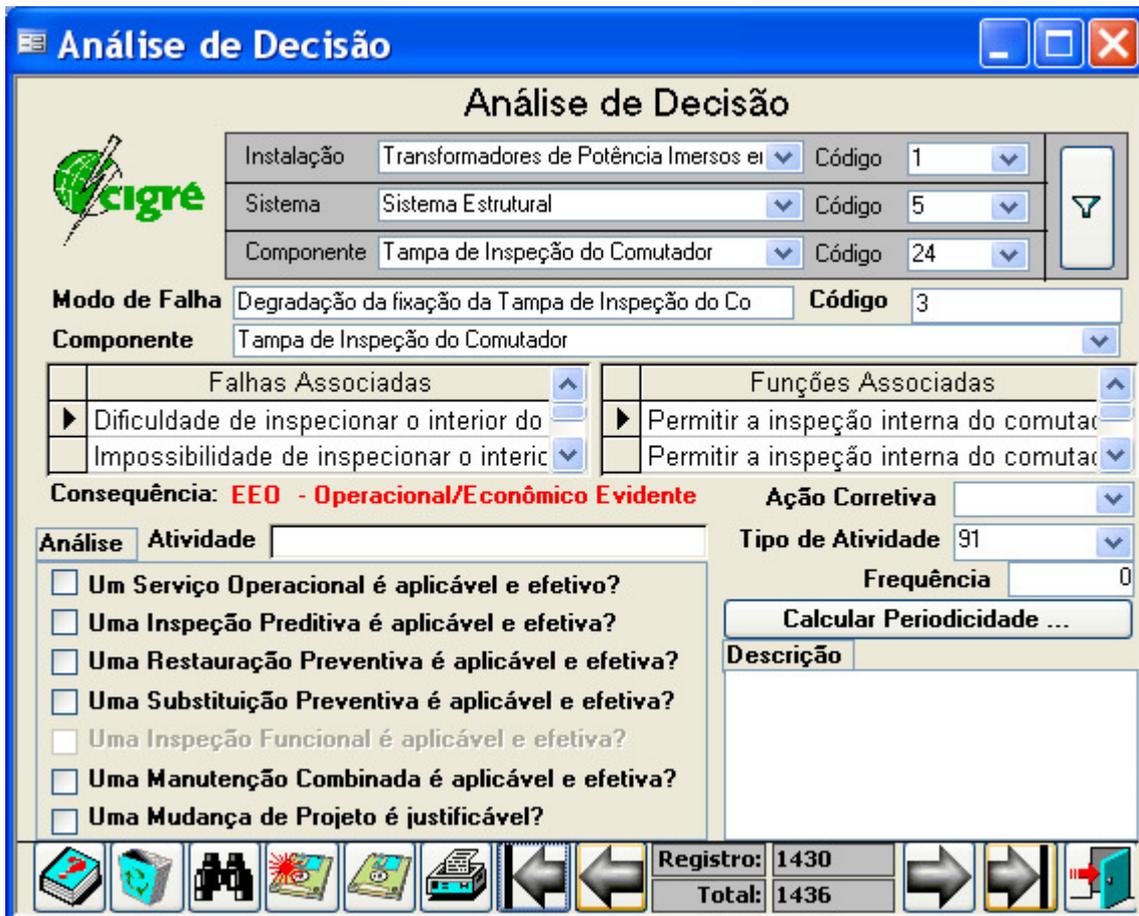


Figura 24 – Documentação da Seleção da Atividade

Neste formulário são anotadas as respostas às três questões básicas sobre a visibilidade do modo de falha, para o operador ou usuário da instalação. Cada modo de falha é identificado pelo título descritivo, seu código mnemônico, o componente, sistema e instalação a que pertence. As falhas e funções associadas ao modo de falha também são listadas, como suporte ao processo de seleção. Os demais controles deste formulário permitem a navegação e edição dos registros da visibilidade dos modos de falha existentes na base de dados.

Estatística

A tabela a seguir resume a classificação da visibilidade para o operador e a consequência dos modos de falhas identificados em transformadores imersos em líquido isolante:

Tabela 7 – Visibilidade e Consequência dos Modos de Falha

| VISIBILIDADE | CONSEQUÊNCIA | TIPO | MODOS |
|---------------------|-------------------------|-------------|--------------|
| Evidente | Econômico & Operacional | EEO | 433 |
| | Segurança & Ambiental | ESA | 93 |
| Oculto | Econômico & Operacional | OEO | 378 |
| | Segurança & Ambiental | OSA | 532 |
| TOTAL | | | 1436 |

Note-se a preponderância de modos de falhas ocultos, e entre estes a maior parte com consequências de segurança ou impacto ambiental. Isto confirma aspectos importantes da manutenção destes equipamentos nos sistemas elétricos. A distribuição percentual das consequências dos 1436 modos de falhas nos diversos sistemas do transformador encontra-se representada no gráfico a seguir:

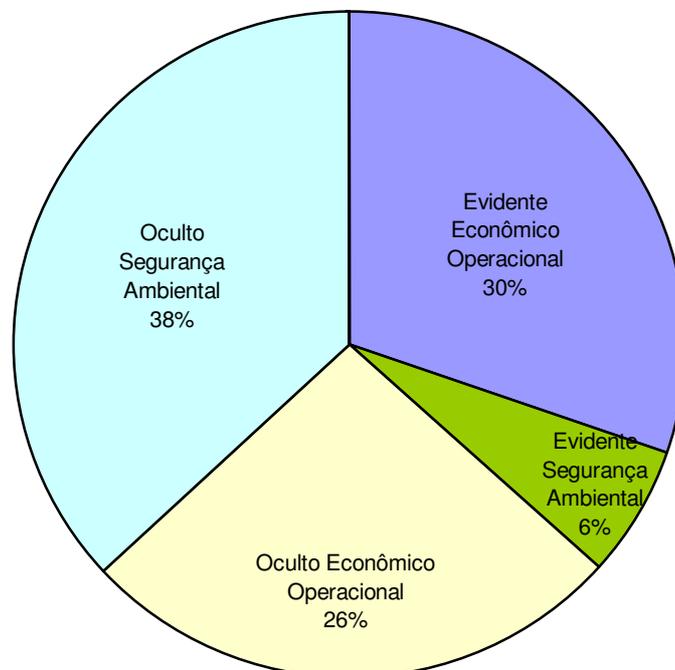


Figura 25 – Gráfico Percentual de Visibilidades e Consequências de Falhas

Aplicabilidade e Efetividade

Definidas as consequências de cada modo de falha, a metodologia MCC estabelece critérios de aplicabilidade e efetividade para cada tipo de atividade de manutenção. A tabela a seguir resume a classificação de atividades de manutenção propostas para os modos de falha identificados nos oito sistemas típicos de transformadores imersos em líquido isolante:

Tabela 8 – Classificação de Atividades de Manutenção

| ATIVIDADE | TIPO | MODOS |
|-------------------------|-------------|--------------|
| Serviço Operacional | SO | 5 |
| Inspeção Preditiva | IP | 788 |
| Restauração Preventiva | RP | 43 |
| Substituição Preventiva | SP | 13 |
| Inspeção Funcional | IF | 186 |
| Manutenção Combinada | MC | 2 |
| Modificações de Projeto | MP | 75 |
| Reparo Funcional | RF | 324 |
| TOTAL | | 1436 |

Note-se a absoluta preponderância das atividades de Inspeção Preditiva (788) em praticamente metade dos modos de falha dos transformadores. Isto revela o nível de evolução tecnológica dos meios disponíveis para detecção de falhas incipientes. É significativa também a quantidade de modos de falha para os quais são recomendados apenas Reparos Funcionais (324). Ou seja, recomenda-se operar o transformador até que ocorra este tipo de modo de falha, sem manutenção preventiva (*Run-To-Failure*). A distribuição percentual das atividades pelos 1436 modos de falhas nos diversos sistemas do transformador encontra-se representada no gráfico a seguir:

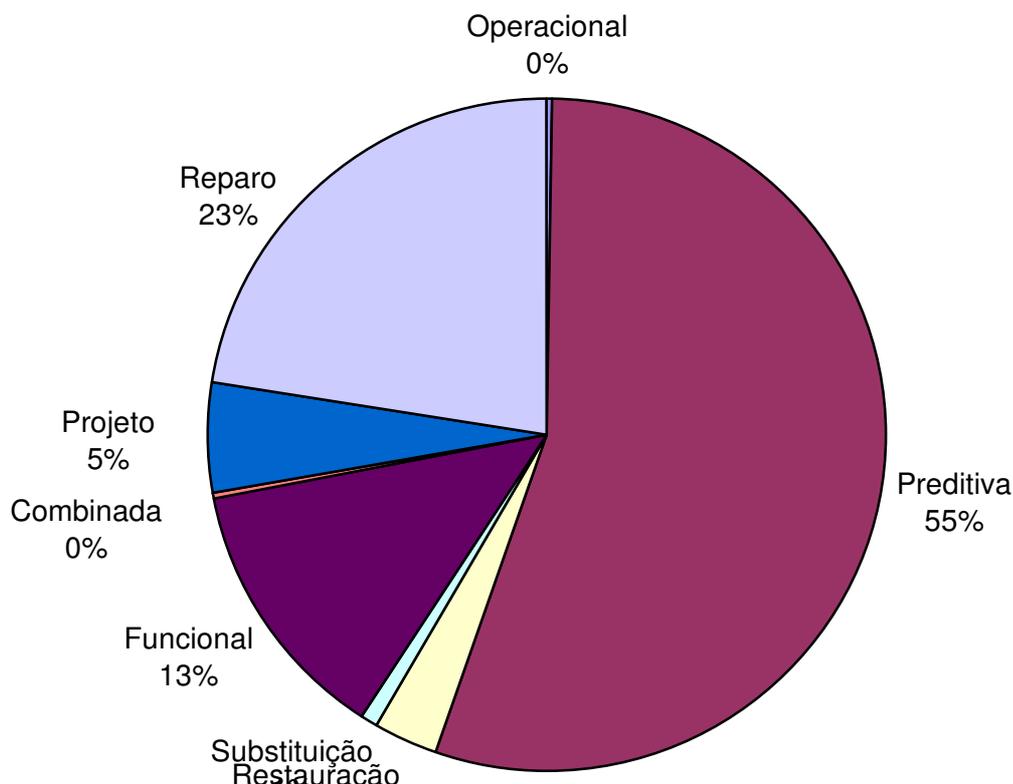


Figura 26 – Gráfico Percentual de Tipos de Atividades de Manutenção

Relatório

O restante deste capítulo contém um relatório, denominado de *Análise*, gerado da base de dados MCC, utilizada para armazenar os resultados, em forma de planilha, onde são identificados os seguintes aspectos:

1. **IN** Designação mnemônica associada à instalação do sistema;
2. **Instalação** Nome completo que caracteriza a instalação do sistema;
3. **SI** Designação mnemônica associada ao sistema;
4. **Sistema** Nome completo que caracteriza o sistema;
5. **Modo de Falha** Nome que caracteriza cada modo de falha do sistema;

Para cada modo de falha, são documentados os resultados da análise, quando aos seguintes aspectos:

6. **Visibilidade** Se o modo de falha é visível ao operador ou usuário;
7. **Segurança/Ambiente** Se afeta a segurança de pessoas, ou meio ambiente;
8. **Operação/Economia** Se afeta a economia e eficiência da operação;
9. **Serviço Operacional** Se uma Atividade Operacional é aplicável e efetiva;
10. **Inspeção Preditiva** Se uma Inspeção Preditiva é aplicável e efetiva;
11. **Restauração Preventiva** Se uma Restauração Preventiva é aplicável e efetiva;
12. **Substituição Preventiva** Se uma Substituição Preventiva é aplicável e efetiva;
13. **Inspeção Funcional** Se uma Inspeção Funcional é aplicável e efetiva;
14. **Manutenção Combinada** Se uma Manutenção Combinada é aplicável e efetiva;
15. **Mudança de Projeto** Se uma Mudança de Projeto é recomendada;
16. **Atividade** Descrição da atividade recomendada;
17. **Tipo** Tipo da atividade recomendada;
18. **Periodicidade** Intervalo sugerido para a atividade, em horas;
19. **Critério** Método utilizado para escolha da periodicidade.

Estes tópicos são identificados e repetidos no cabeçalho de cada página do relatório, quando houver mais de uma página. A figura a seguir ilustra sua localização no layout do relatório, conforme a numeração acima, incluída no CD-ROM que acompanha este Guia.

| Instalação | | Análise | | | | | | | | | | Sistema | | | | | | | | | |
|---|---|---------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------|---------------|----|----|-------|-------------|
| 1 Transformadores de Potência Imersos em Óleo | | | | | | | | | | | | Sistema de Comutação | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | Análise | APLICABILIDADE E EFETIVIDADE | | | | | | | | | | 4 | 16 | 17 | Tipo | Periodicidade | 3 | 18 | 19 | |
| | | | Modo de Falha | ANÁLISE | Operação/Correção | Segurança/Ambiente | Visibilidade | Serço Operacionais | Inspeção Preditiva | Resistência | Prevenção | Substituição | | | | | | | | | Prevenção |
| | | | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Inspeção Visual | 16 | 17 | 38 | 8760 | Experiência |
| | | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Ensio de Aferição e Calibração | 38 | 17 | 38 | 52560 | Fabricante |

Figura 27 – Relatório de Análise da MCC

O critério poderá ser definido apenas para a atividade, ou individualmente para cada modo de falha aplicável. O tipo de atividade identifica o código mnemônico associado a cada atividade padronizada, cuja descrição consta do Anexo A deste Guia.

Concluída a análise individual dos requisitos de manutenção de cada modo de falha, de cada componente em todos os sistemas, é possível agora compilar o plano de manutenção do transformador, descrito no próximo capítulo.

Capítulo 10 - Frequência de Atividades

Introdução

A etapa de decisão da metodologia MCC é encerrada com a escolha da frequência de execução de cada tipo de atividade. Diversos aspectos são considerados nesta escolha, em função do conhecimento a priori sobre os mecanismos subjacentes a cada modo de falha.

Este capítulo descreve os resultados da escolha da frequência de manutenção de transformadores imersos em líquido isolante. Junto com os Capítulos 9 e 11, contém o resultado da etapa de Análise e Decisão da metodologia MCC, com a avaliação das consequências de cada modo de falha de transformadores, a escolha da atividade e frequência de manutenção recomendadas, e sua agregação em planos de manutenção.

Periodicidade da Manutenção

Vários critérios são adotados na indústria elétrica para definição da periodicidade da manutenção, dependendo do nível de conhecimento disponível sobre os mecanismos e taxas de ocorrências de modos de falha. Para transformadores imersos em líquido isolante, o método adotado pelo grupo de análise será indicado entre as seguintes alternativas:

- **Nenhum** O critério adotado para escolha da periodicidade é desconhecido.
- **Experiência** A periodicidade é baseada na experiência de especialistas em manutenção.
- **Experimental** A periodicidade está em processo de experiência, para avaliar os resultados (Exploração de Idade).
- **Fabricante** A periodicidade foi definida pelo fabricante.
- **Similaridade** A periodicidade foi definida por similaridade com outro equipamento, ou de outra empresa, ou de uma norma ou documento, etc.
- **Oportunidade** A atividade só é executada quando há uma oportunidade, tal como a execução de outro tipo de manutenção.
- **Estatístico** A periodicidade foi estabelecida por um processo estatístico de otimização matemática.
- **Outro** A periodicidade foi estabelecida por outro processo diferente dos listados acima.

A tabela a seguir resume a distribuição da classificação de critérios adotados para escolha da periodicidade de cada atividade de manutenção para os modos de falha identificados nos transformadores imersos em líquido isolante:

Tabela 9 – Critérios para Escolha da Periodicidade da Manutenção

| CRITÉRIO | MODOS |
|-----------------|--------------|
| Estatístico | 82 |
| Experiência | 585 |
| Experimental | 7 |
| Fabricante | 127 |
| Nenhum | 192 |
| Oportunidade | 401 |
| Outro | 42 |
| Similaridade | 0 |
| TOTAL | 1436 |

Observa-se que o critério de Experiência (585) constitui a prática preponderante das empresas na definição da periodicidade das atividades de manutenção, para os modos de falha dos transformadores. É significativa também a quantidade de modos de falha cuja periodicidade de manutenção é definida pelo critério de Oportunidade (401). Uma pequena quantidade de manutenção definida por um critério Estatístico de otimização (82) já é utilizado principalmente nos sistemas de Supervisão e Proteção. Isto revela o estágio incipiente de aplicação destes modelos nestes equipamentos. A distribuição percentual dos critérios adotados nos 1436 modos de falhas nos diversos sistemas do transformador encontra-se representada no gráfico a seguir:

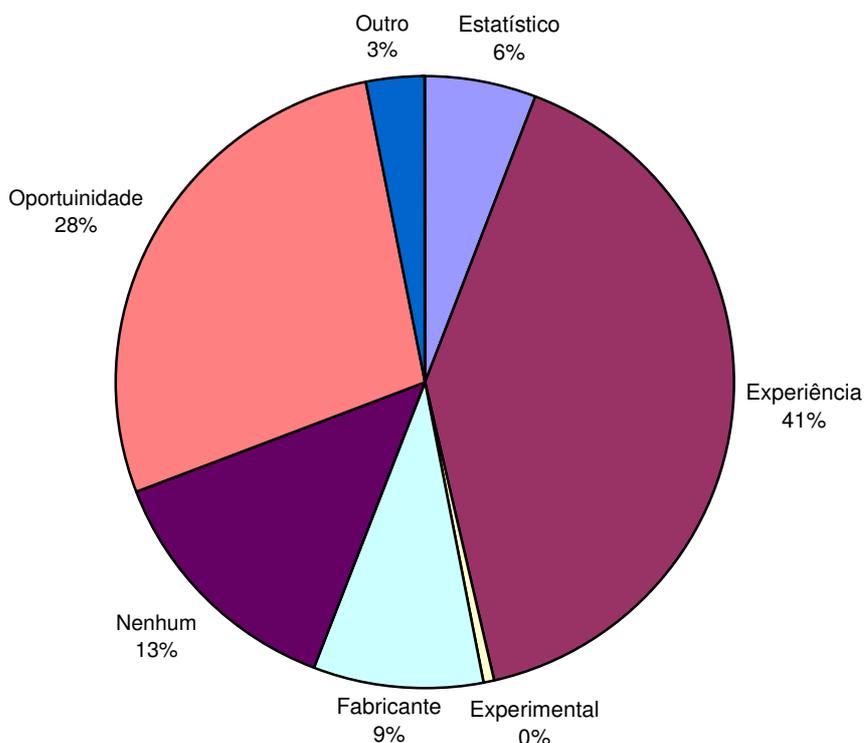


Figura 28 – Gráfico Percentual de Escolha de Periodicidades

Distribuição das Periodicidades

A tabela a seguir resume a distribuição das periodicidades de atividades de manutenção, de acordo com a quantidade de modos de falha identificados nos transformadores imersos em líquido isolante:

Tabela 10 – Distribuição das Periodicidades de Manutenção

| PERIODICIDADE | MODOS |
|----------------------|--------------|
| 0 horas | 492 |
| 1 horas | 69 |
| 168 horas | 8 |
| 720 horas | 13 |
| 2080 horas | 12 |
| 4320 horas | 154 |
| 8640 horas | 158 |
| 8760 horas | 45 |
| 17280 horas | 1 |
| 35040 horas | 252 |
| 43200 horas | 32 |
| 52560 horas | 127 |
| 60480 horas | 40 |
| 172800 horas | 7 |
| 345600 horas | 26 |
| TOTAL | 1436 |

Observa-se que aproximadamente um terço dos modos de falha (492) simplesmente não sofrem qualquer tipo de manutenção de caráter preventivo, mesmo que na etapa de Análise tenha sido definida uma atividade tecnicamente adequada. Ou seja, a política de manutenção adotada consiste em operar até falhar (*Run-To-Failure*). Outro terço é realizado a intervalos de um ou meio ano. O terço restante só é realizado no final de vida útil do transformador. Um número expressivo de modos de falha (69) são inspecionados através de atividades Operacionais, tipicamente a intervalos de uma hora. A distribuição temporal das periodicidades adotados nos 1436 modos de falhas nos diversos sistemas do transformador encontra-se representada no gráfico a seguir:

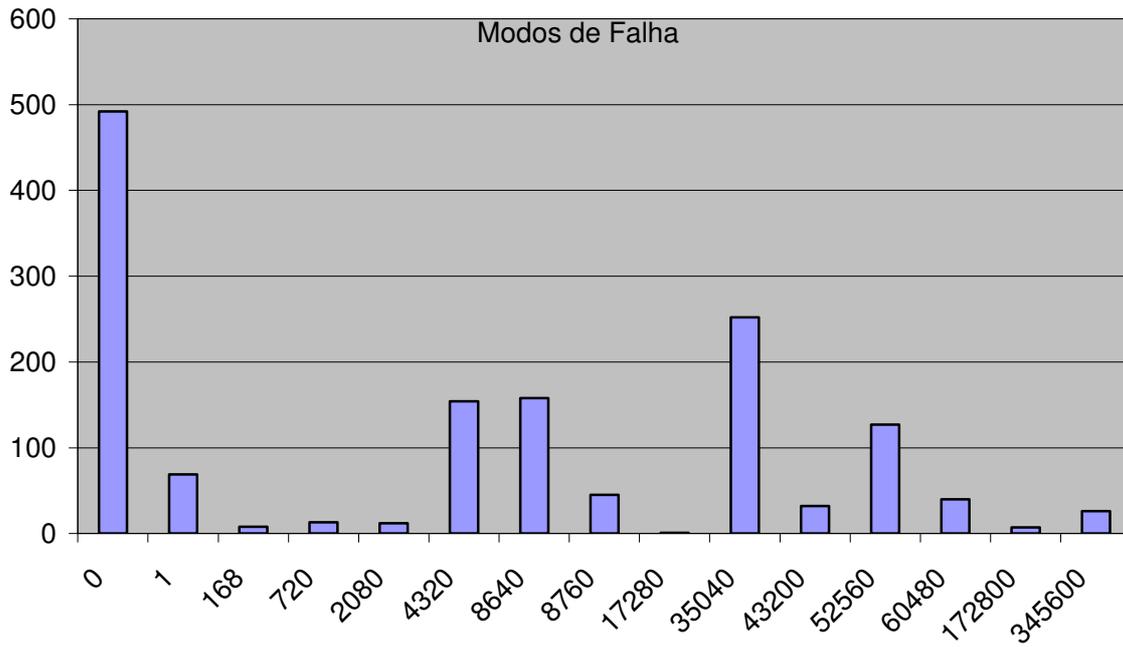


Figura 29 – Gráfico de Distribuição Temporal de Periodicidades

Concluída a análise individual das frequências de manutenção de cada modo de falha, de cada componente em todos os sistemas, é possível agora compilar o plano de manutenção do transformador, descrito no próximo capítulo.

Capítulo 11 - Plano de Manutenção

Introdução

Na última etapa da metodologia MCC, as atividades sugeridas para manutenção de cada modo de falha são agrupadas por sistema, ajustando-se a periodicidade em grupos ou pacotes para efeito de programação, resultando no plano de manutenção.

Este capítulo resume o plano de manutenção do transformador, organizado por sistema e atividade. Para cada sistema são identificadas as atividades sugeridas, com códigos de identificação e periodicidades recomendadas. A frequência de cada atividade em um sistema é calculada pela maior frequência (ou menor intervalo em horas) sugerida para cada um dos componentes do sistema, enquanto a frequência de cada atividade em cada componente é calculada pela maior frequência (ou menor intervalo em horas) de manutenção de cada modo de falha do componente para o qual foi sugerida a atividade.

Planos

Um resumo do plano de manutenção de cada sistema pode ser extraído do relatório *Plano de Manutenção por Atividade e Sistema*, que relaciona as atividades que deverão ser desenvolvidas em cada sistema da instalação, com a respectiva periodicidade. Este relatório contém os seguintes aspectos:

1. **IN** Designação mnemônica associada à instalação do sistema;
2. **Instalação** Nome completo que caracteriza a instalação do sistema;
3. **SI** Designação mnemônica associada ao sistema;
4. **Sistema** Nome completo que caracteriza o sistema;
5. **Código** Designação mnemônica de cada atividade de manutenção;
6. **Atividade** Nome completo que caracteriza cada atividade;
7. **Periodicidade** Intervalo mínimo sugerido para a atividade, em horas.

Estes tópicos são identificados e repetidos no cabeçalho de cada página do relatório, quando houver mais de uma página ou instalação analisada. A figura a seguir ilustra sua localização no layout do relatório, conforme a numeração acima, incluída na íntegra no CD-ROM que acompanha este Guia.

| Instalação | | Plano de Manutenção por Atividade e Sistema | | Sistema |
|------------|---|---|--|---------------|
| 1 | Transformadores de Potência Imersos em Óleo -> Sistema de Preservação do Óleo | | | 6 |
| Código | Atividade | | | Periodicidade |
| 10 | Análise de Gases Dissolvidos | | | 8640 |
| 13 | Ensaio do Número (Índice) de Neutralização do Óleo | | | 8640 |
| 14 | Ensaio de Umidade do Óleo | | | 8640 |

Figura 30 – Relatório do Plano de Manutenção por Atividade e Sistema

As tabelas a seguir resumem as atividades e periodicidades sugeridas para cada sistema do transformador, expressas em horas, extraídas dos relatórios contidos no CD-ROM que acompanha este Guia.

Tabela 11 – Plano de Manutenção do Sistema de Comutação

| Código | Atividade | Periodicidade (h) |
|--------|---|-------------------|
| 28 | Ensaio Funcional do Comutador de Taps | 52560 |
| 38 | Ensaio de Aferição e Calibração | 52560 |
| 41 | Inspeção Visual | 8760 |
| 59 | Ensaio de Torque e Reaperto | 52560 |
| 66 | Ensaio de Teor de Água no Óleo Isolante | 4380 |
| 85 | Lubrificação | 52560 |
| 92 | Substituição Preventiva | 52560 |
| 97 | Medição de Folga | 52560 |

Tabela 12 – Plano de Manutenção do Sistema de Proteção

| Código | Atividade | Periodicidade (h) |
|--------|-------------------------------------|-------------------|
| 1 | Ensaio de Resistência de Isolamento | 8760 |
| 38 | Ensaio de Aferição e Calibração | 35040 |
| 39 | Teste Funcional | 35040 |
| 41 | Inspeção Visual | 35040 |
| 59 | Ensaio de Torque e Reaperto | 35040 |

Tabela 13 – Plano de Manutenção do Sistema de Conexão

| Código | Atividade | Periodicidade(h) |
|---------------|---------------------------------------|-------------------------|
| 36 | Inspeção Termográfica a Infravermelho | 2080 |
| 41 | Inspeção Visual | 1 |
| 86 | Controle do Carregamento | 1 |

Tabela 14 – Plano de Manutenção do Sistema de Resfriamento

| Código | Atividade | Periodicidade(h) |
|---------------|---|-------------------------|
| 29 | Ensaio Dielétrico em Equipamento Auxiliar | 43200 |
| 39 | Teste Funcional | 8640 |
| 41 | Inspeção Visual | 4320 |
| 43 | Ensaio de Umidade Relativa e Absoluta do Ar | 8640 |
| 77 | Medição de Harmônicos de Tensão | 8640 |
| 80 | Medição de Temperatura | 1 |
| 83 | Medição de Tensão | 1 |
| 86 | Controle do Carregamento | 1 |
| 87 | Medição de Nível | 720 |
| 88 | Medição de Pressão | 168 |
| 89 | Modificação de Projeto | 345600 |
| 91 | Manutenção Corretiva | 8640 |
| 95 | Medição de Vibração | 43200 |

Tabela 15 – Plano de Manutenção do Sistema Estrutural

| Código | Atividade | Periodicidade(h) |
|---------------|--|-------------------------|
| 35 | Ensaio de Contagem de Partículas Dissolvidas no Óleo | 8640 |
| 41 | Inspeção Visual | 720 |
| 42 | Limpeza | 43200 |
| 85 | Lubrificação | 43200 |

Tabela 16 – Plano de Manutenção do Sistema de Preservação do Óleo

| Código | Atividade | Periodicidade(h) |
|---------------|--|-------------------------|
| 10 | Análise de Gases Dissolvidos | 8640 |
| 13 | Ensaio do Número (Índice) de Neutralização do Óleo | 8640 |
| 14 | Ensaio de Umidade do Óleo | 8640 |
| 29 | Ensaio Dielétrico em Equipamento Auxiliar | 43200 |
| 35 | Ensaio de Contagem de Partículas Dissolvidas no Óleo | 8640 |
| 38 | Ensaio de Aferição e Calibração | 8640 |
| 39 | Teste Funcional | 8640 |
| 41 | Inspeção Visual | 4320 |
| 43 | Ensaio de Umidade Relativa e Absoluta do Ar | 8640 |
| 46 | Ensaio de Conteúdo de Água Ativa no Papel (%) | 8640 |
| 5 | Ensaio de Fator de Potência do Óleo | 8640 |

| | | |
|----|---|--------|
| 55 | Ensaio de Condição Visual do Óleo | 8640 |
| 65 | Ensaio de Cor do Óleo Isolante | 8640 |
| 66 | Ensaio de Teor de Água no Óleo Isolante | 8640 |
| 73 | Ensaio de Estabilidade à Oxidação do Óleo | 17280 |
| 77 | Medição de Harmônicos de Tensão | 8640 |
| 80 | Medição de Temperatura | 1 |
| 83 | Medição de Tensão | 1 |
| 86 | Controle do Carregamento | 1 |
| 88 | Medição de Pressão | 168 |
| 89 | Modificação de Projeto | 345600 |
| 91 | Manutenção Corretiva | 8640 |
| 95 | Medição de Vibração | 43200 |

Tabela 17 – Plano de Manutenção do Sistema Ativo

| Código | Atividade | Periodicidade(h) |
|---------------|---|-------------------------|
| 1 | Ensaio de Resistência de Isolamento | 60480 |
| 10 | Análise de Gases Dissolvidos | 4320 |
| 16 | Ensaio de Deslocamento Angular | 60480 |
| 19 | Ensaio de Perda e Corrente em Vazio | 60480 |
| 22 | Medição de Descargas Parciais | 8640 |
| 29 | Ensaio Dielétrico em Equipamento Auxiliar | 60480 |
| 3 | Ensaio de Relação de Transformação | 60480 |
| 30 | Medição de Harmônico da Corrente sem Carga | 60480 |
| 36 | Inspeção Termográfica a Infravermelho | 4320 |
| 40 | Filtração de Óleo Isolante | 8640 |
| 41 | Inspeção Visual | 168 |
| 46 | Ensaio de Conteúdo de Água Ativa no Papel (%) | 8640 |
| 49 | Regeneração do Óleo Isolante | 8640 |
| 56 | Análise Furfural | 8640 |
| 59 | Ensaio de Torque e Reaperto | 60480 |
| 60 | Ensaio de Enxofre Corrosivo do Óleo Isolante | 8640 |
| 62 | Ensaio de Depósitos em Condutores Cobertos | 60480 |
| 8 | Ensaio de Índice de Polarização (Polarization Recovery) | 60480 |
| 86 | Controle do Carregamento | 1 |
| 89 | Modificação de Projeto | 172800 |
| 91 | Manutenção Corretiva | 8640 |

Tabela 18 – Plano de Manutenção do Sistema de Controle e Monitoramento

| Código | Atividade | Periodicidade (h) |
|--------|---|-------------------|
| 38 | Ensaio de Aferição e Calibração | 35040 |
| 39 | Teste Funcional | 35040 |
| 41 | Inspeção Visual | 35040 |
| 42 | Limpeza | 8760 |
| 43 | Ensaio de Umidade Relativa e Absoluta do Ar | 35040 |
| 59 | Ensaio de Torque e Reaperto | 35040 |
| 81 | Treinamento operacional | 35040 |
| 82 | Ensaio de Impedância de Carga | 35040 |
| 83 | Medição de Tensão | 35040 |

Relatórios

O restante deste capítulo contém dois relatórios, gerados da base de dados MCC utilizada para armazenar os resultados, em forma de planos de manutenção. O primeiro relatório, denominado de *Plano de Manutenção por Atividade*, relaciona os componentes de cada sistema onde deverão ser aplicadas as atividades de manutenção, com a respectiva periodicidade. Contém os seguintes aspectos:

1. **IN** Designação mnemônica associada à instalação do sistema;
2. **Instalação** Nome completo que caracteriza a instalação do sistema;
3. **SI** Designação mnemônica associada ao sistema;
4. **Sistema** Nome completo que caracteriza o sistema;
5. **Código** Designação mnemônica de cada atividade de manutenção;
6. **Atividade** Nome completo que caracteriza cada atividade;
7. **Código** Designação mnemônica associada a cada componente;
8. **Componente** Nome completo que caracteriza cada componente;
9. **Periodicidade** Intervalo mínimo sugerido para a atividade, em horas.

Estes tópicos são identificados e repetidos no cabeçalho de cada página do relatório, quando houver mais de uma página ou instalação analisada. A figura a seguir ilustra sua localização no layout do relatório, conforme a numeração acima, incluída na íntegra no CD-ROM que acompanha este Guia.

| Instalação | | Plano de Manutenção por Atividade | | Sistema |
|------------|--|-----------------------------------|--|---------------|
| 1 | Transformadores de Potência Imersos em Óleo -> Sistema de Resfriamento | | | 4 |
| Código | Atividade | | | Periodicidade |
| Código | Componente | | | Periodicidade |
| 29 | Ensaio Dielétrico em Equipamento Auxiliar | | | 43200 |
| 1.4.19 | Chave Seletora Comutadora dos Motores dos Ventiladores de Resfriamento | | | 43200 |
| 1.4.7 | Motores dos Ventiladores de Resfriamento | | | 43200 |
| 1.4.8 | Quadro de Controle de Resfriamento a Ar | | | 43200 |
| 1.4.25 | Quadro de Controle de Circulação de Água | | | 43200 |

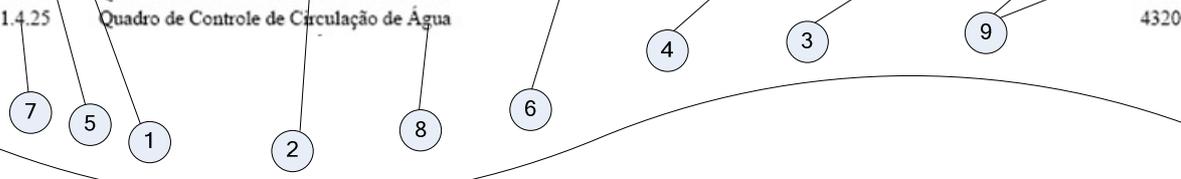


Figura 31 – Relatório de Plano de Manutenção por Atividade

O segundo relatório, denominado de *Plano de Manutenção por Atividade e Modo de Falha*, lista os modos de falha de cada sistema tratados por cada atividade de manutenção, com a respectiva periodicidade. Contém os seguintes aspectos:

1. **IN** Designação mnemônica associada à instalação do sistema;
2. **Instalação** Nome completo que caracteriza a instalação do sistema;
3. **SI** Designação mnemônica associada ao sistema;
4. **Sistema** Nome completo que caracteriza o sistema;
5. **Código** Designação mnemônica associada a cada atividade;
6. **Atividade** Nome completo que caracteriza cada atividade de manutenção;
7. **Código** Designação mnemônica associada a cada modo de falha;
8. **Modo de Falha** Nome completo de cada modo de falha combatido pela atividade;
9. **Periodicidade** Intervalo mínimo sugerido para a atividade, em horas.

Estes tópicos são identificados e repetidos no cabeçalho de cada página do relatório, quando houver mais de uma página ou instalação analisada. A figura a seguir ilustra sua localização no layout do relatório, conforme a numeração acima, incluída na íntegra no CD-ROM que acompanha este Guia.

| Instalação | Plano de Manutenção por Atividade e Modo | | Sistema |
|------------|---|--|---------------|
| 1 | Transformadores de Potência Imersos em Óleo -> Sistema de Proteção | | 2 |
| Código | Atividade | | Periodicidade |
| Código | Modo de Falha | | Periodicidade |
| 1 | Ensaio de Resistência de Isolamento | | 8760 |
| 1.2.4.4 | Degradação do isolamento do Relé de Carcaça do Transformador | | 8760 |
| 1.2.13.4 | Degradação do isolamento do Relé de Sobrecorrente do Motor do Comutador | | 8760 |
| 1.2.12.4 | Degradação do isolamento do Relé de Baixa Pressão de Gás do Tanque Principal | | 8760 |
| 1.2.10.4 | Degradação do isolamento do Relé de Temperatura do Enrolamento do Transformador | | 8760 |

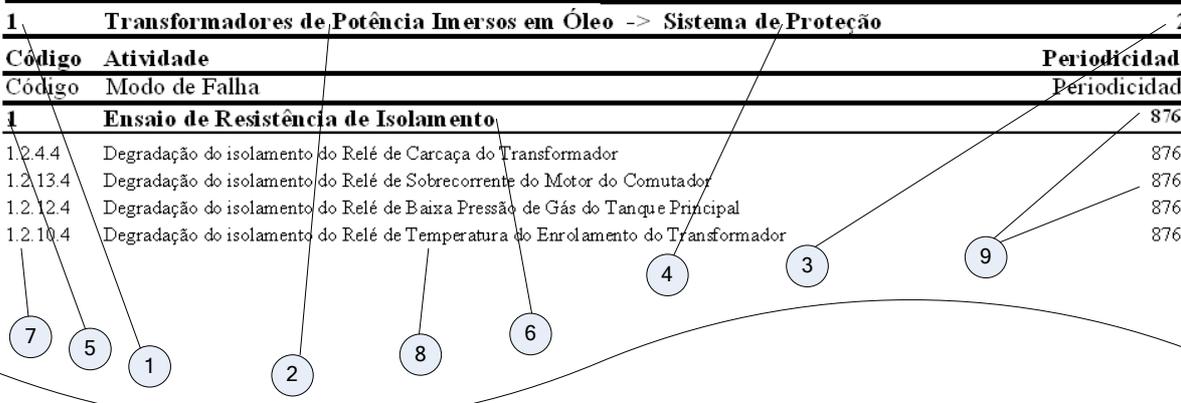


Figura 32 – Relatório de Plano de Manutenção por Atividade e Modo de Falha

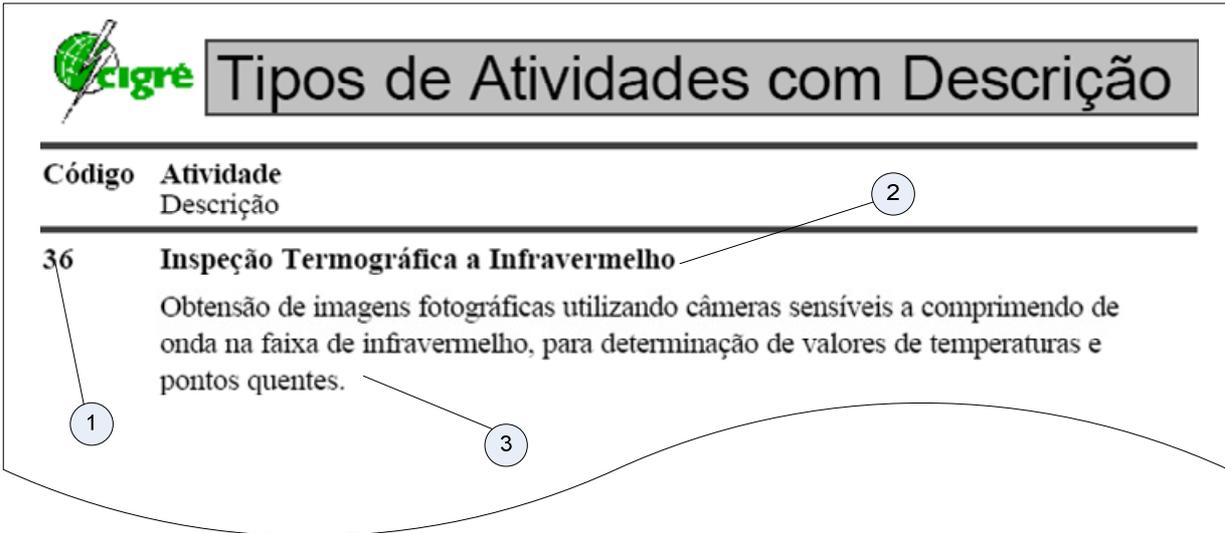
Anexo A – Tipos de Atividades

Este anexo contém uma relação de tipos de atividades comumente utilizadas na manutenção de transformadores. Cada atividade é definida de forma genérica, com ênfase no parâmetro medido, quando se tratar de ensaios e medições preditivas, ou na tarefa preventiva genérica, tais como lubrificação, inspeção visual, etc. Cada tipo de atividade deve ser particularizado para cada caso específico, quando usada em um transformador.

O restante deste Anexo contém um relatório, denominado de *Tipos de Atividades com Descrição*, gerado da base de dados MCC, utilizada para armazenar as descrições dos tipos de atividades, onde são identificados os seguintes aspectos:

1. **Código** Designação mnemônica associada ao tipo de atividade;
2. **Atividade** Nome completo que caracteriza o tipo de atividade;
3. **Descrição** Texto contendo uma descrição mais detalhada do tipo de atividade.

Estes tópicos são identificados e repetidos no cabeçalho de cada página do relatório, quando houver mais de uma página ou instalação analisada. A figura a seguir ilustra sua localização no layout do relatório, conforme a numeração acima, incluída na íntegra no CD-ROM que acompanha este Guia.



| Código | Atividade | Descrição |
|--------|---------------------------------------|---|
| 36 | Inspeção Termográfica a Infravermelho | Obtensão de imagens fotográficas utilizando câmeras sensíveis a comprimento de onda na faixa de infravermelho, para determinação de valores de temperaturas e pontos quentes. |

Figura 33 – Relatório de Tipos de Atividades com Descrição

Note-se que as descrições não são suficientes para instruir a execução da atividade. Servem apenas para caracterizá-las. A norma específica sobre cada atividade deverá ser utilizada na sua execução.



Tipos de Atividades com Descrição

Código Atividade
Descrição

1 Ensaio de Resistência de Isolamento

Mede a resistência de isolamento de um dielétrico ou isolante, em Mega Ohms, através da aplicação de tensão de corrente contínua padronizada. Detecta o acúmulo de materiais polarizáveis no sistema isolante ou na superfície de isolantes sólidos.

10 Análise de Gases Dissolvidos

Diagnostica vários eventos no transformador, tais como arcos de alta energia (presença de acetileno), envelhecimento e rompimento dielétrico de celulose, corona, eletrólise da água, oxidação, descargas, sobrecargas, identificação de pontos quentes, arcos elétricos ou descargas parciais. Vários métodos identificam as relações de concentrações de gases, como o método de Rogers, o método de Doernenburg e o projeto de revisão da NBR7274, baseada na IEC 599/78; os métodos que utilizam relações e concentrações individuais de gases, como o proposto pelo Laboratoire Central des Industries Électriques (LCIE) e o método proposto pelo Laboratoire Belge de L'Industrie Électrique (Laborelec); e os métodos envolvendo concentrações individuais de gases, como o trabalho de Duval e o método dos gases indicadores (chaves) recomendado pela IEEE C57.104/91.

11 Ensaio Cromatográfico de Cor do Óleo

A cor do óleo (ASTM D-1500) é um indicador da contaminação ou deterioração do óleo. Determina a concentração de gases dissolvidos no óleo mineral isolante. A relação e a concentração dos gases possibilitam a identificação de ocorrência de defeito interno no transformador. Valores elevados indicam a necessidade de inspeção interna para verificação e correção de defeitos.

12 Ensaio de Tensão Interfacial do Óleo

A tensão interfacial (ASTM D971 e D-2285, NBR - 6234) de um óleo é a força em dynes por centímetro necessária para romper o filme de óleo existente em uma interface óleo-água, sendo variável com a presença de contaminantes. Ensaio empregado para determinar a presença de contaminantes polares e/ou produtos de oxidação. É usado como referencial para indicar o momento em que se deve regenerar ou substituir o óleo isolante.

13 Ensaio do Número (Índice) de Neutralização do Óleo

O número de neutralização (ASTM D-974) mede a concentração de ácido no óleo, pela quantidade de hidróxido de potássio (KOH) necessário para neutralizar o ácido em 1g de óleo. Ensaio empregado para quantificar a presença de contaminantes polares ácidos, normalmente são produtos de oxidação do óleo isolante. É utilizado como referencial para indicar o momento em que se deve regenerar ou substituir o óleo isolante. (NBR - 14248).

14 Ensaio de Umidade do Óleo

Determina o conteúdo (%) de água dissolvida (não depositada) (ASTM D-1533) a qual reduz a rigidez dielétrica do óleo. Utiliza-se normalmente o método de Karl Fisher.

15 Ensaio de Resposta de Frequência

Mede a resposta de frequência de elementos passivos (RLC) de equipamentos. Em transformadores, o ensaio FRA (*Frequency Response Analysis*) mede a impedância dos enrolamentos em uma frequência específica e compara os resultados destas medidas com um conjunto de referência, obtido do próprio elemento sob teste, ou de outro similar em estado normal. A principal vantagem do método FRA é sua habilidade para detectar falhas, especialmente danos mecânicos nos enrolamentos que nem sempre podem ser detectados por outros meios. O SRA (*Sweeping Frequency Response Analysis*) mede a resposta de frequência através da variação da frequência de aplicação por uma gama larga de frequências, como alternativa à aplicação de um pulso, no qual a resposta a cada frequência é calculada pelo impulso de saída.

16 Ensaio de Deslocamento Angular

Mede o desvio angular entre as tensões primárias e secundárias do transformador, pela aplicação de tensão à frequência nominal, em um dos enrolamentos, e a medição da defasagem da tensão induzida no secundário.

17 Ensaio de Impedância de Curto-Circuito

Mede a impedância do transformador, expressa em forma de percentual, através da aplicação de tensão de valor reduzido no primário, com o secundário curto-circuitado.

18 Ensaio de Perda em Carga

Mede a potência ativa consumida no ensaio de curto-circuito, à corrente nominal.

19 Ensaio de Perda e Corrente em Vazio (Componentes de Histerese e Eddy)

Mede a corrente resultante da energização em vazio do transformador, à tensão nominal.

2 Ensaio de Potencial Alto

Mede a corrente resultante da aplicação de um tensão elevada padronizada ao elemento de prova.

20 Ensaio de Tensão Aplicada

Mede a suportabilidade e isolamento do componente para aplicação de valores elevados de tensão, medindo-se a corrente resultante.

21 Ensaio de Tensão Induzida

Teste destinado a confirmar a suportabilidade de isolamento entre espiras de um enrolamento, através da aplicação de tensão induzida.

22 Medição de Descargas Parciais

Teste para determinar o nível de incidência de descargas parciais no interior do transformador, normalmente em superfícies irregulares, e a deterioração do sistema isolante, sendo hábil para detectar alguns defeitos localizados.

23 Ensaio de Tensão de Impulso

Teste para determinar o nível de suportabilidade do transformador a tensões transitórias de curta duração.

24 Ensaio de Elevação de Temperatura

Teste para determinar o nível mais elevado de temperatura dos enrolamentos e óleo isolante mineral, sob condições nominais de operação do transformador, usada como base para caracterização de sua potência nominal.

25 Medição de Impedância de Sequência Zero

Ensaio para medir a impedância de sequência zero em transformadores trifásicos, similar ao ensaio de impedância de curto-circuito, aplicando uma tensão monofásica reduzida aos três enrolamentos primários.

26 Ensaio de Suportabilidade a Curto-Circuito

Teste para medir o nível de suportabilidade a estresses, principalmente mecânicos, durante a circulação de correntes de curto-circuito no transformador.

28 Ensaio Funcional do Comutador de Taps

Ensaio para confirmação da funcionalidade do comutador através do exercício ou simulação de suas funções.

29 Ensaio Dielétrico em Equipamento Auxiliar

Mede a resistência de isolamento de componentes auxiliares do transformador, através da aplicação de tensão no isolamento e medição da corrente de fuga.

3 Ensaio de Relação de Transformação

Mede a relação entre as tensões primárias e secundárias de um

transformador, através da aplicação de tensão reduzida em um dos enrolamentos, e medição da tensão induzida no outro enrolamento.

30 Medição de Harmônico da Corrente sem Carga

Determinação dos níveis de harmônicos presentes na tensão induzida nos enrolamentos, através da aplicação de tensão alternada em um dos enrolamentos.

31 Medição de Fator de Dissipação (tan) das Capacitâncias de Isolamento

Determinação do ângulo de defasagem entre a corrente de fuga do isolamento, em relação a uma tensão alternada aplicada. Mede as perdas dielétricas no sistema isolante. A tangente delta para algumas buchas de transformadores pode ser medida online. Ensaio empregado como indicativo de contaminantes solúveis no óleo isolante, deve ser avaliado como comparativo em relação aos resultados anteriores. (NBR - 12133).

32 Medição ou Cálculo do Ponto Mais Quente (Hot Spot)

Determinação da temperatura em um ponto mais quente do enrolamento, usando modelos matemáticos do comportamento térmico do transformador, e medições de temperatura em outros pontos.

33 Ensaio de Emissão Acústica

Determinação do nível de emissão acústica de ruídos resultantes da vibração de placas do núcleo, descargas parciais e outros eventos com o transformador energizado. Normalmente utilizam-se sensores acústicos colocados na carcaça do transformador, que alimentam sistemas de aquisição de dados calibrados para as frequências de emissão acústica.

34 Ensaio do Grau de Polimerização do Papel Isolante

Mede o envelhecimento do isolante sólido, através da relação entre o comprimento da cadeia de polímeros e a resistência mecânica do papel isolante dos enrolamentos. Ensaio empregado para determinar o grau de envelhecimento ou limite em que o papel isolante ainda pode ser utilizado. (NBR - 814).

35 Ensaio de Contagem de Partículas Dissolvidas no Óleo

Determinação da quantidade de partículas dissolvidas no óleo, expressas em partes por milhão (ppm).

36 Inspeção Termográfica a Infravermelho

Obtenção de imagens fotográficas utilizando câmeras sensíveis a comprimento de onda na faixa de infravermelho, para determinação de valores de temperaturas e pontos quentes.

37 Ensaio de Impulso Repetitivo

Teste para determinar o nível de suportabilidade a tensões de impulsos repetitivos padronizados.

- 38 Ensaio de Aferição e Calibração**
Determinação do valor ajustado em um parâmetro de um componente, através de ensaios e medições.
- 39 Teste Funcional**
Ensaio para confirmação da funcionalidade de um componente através do exercício ou simulação de suas funções.
- 4 Ensaio de Polaridade**
Determinação da indicação de polaridade entre enrolamentos do transformador, normalmente através da aplicação de uma tensão de impulso em um dos enrolamentos, e a medição da polaridade do pulso induzido em outro enrolamento.
- 40 Filtração de Óleo Isolante**
Processo de passagem sucessiva do óleo isolante por material filtrante, para retirada de impurezas.
- 41 Inspeção Visual**
Inspeção geral nas partes visíveis, podendo ser suportada por instrumentos de visualização eletrônica, a locais e subcomponentes de difícil acesso, seguindo procedimentos específicos aos componentes sob manutenção.
- 42 Limpeza**
Execução de procedimentos de limpeza específicos para os componentes e ambiente em manutenção.
- 43 Ensaio de Umidade Relativa e Absoluta do Ar**
Teste para determinar a umidade relativa e absoluta do ar, expressa em percentual, no local de instalação do transformador.
- 44 Ensaio do Limite de Solubilidade da Água (ppm)**
Indica o limite de solubilidade de um solvente na água ou da água no solvente. Os álcools são aqueles que apresentam a maior solubilidade, sendo o etanol e o metanol totalmente solúveis.
- 45 Ensaio de Umidade do Papel (%)**
Teste destinado a determinar o percentual de água presente no papel isolante.
- 46 Ensaio de Conteúdo de Água Ativa no Papel (%)**
Teste para determinar o percentual de água presente no papel isolante. Determina, através da medição do teor de água no óleo mineral isolante e da temperatura de funcionamento do transformador, a porcentagem de água na isolação celulósica (papel). Um dos parâmetros que deve ser considerado para a utilização da potência total do transformador é a porcentagem de água na isolação. Os valores são definidos na Norma NBR 5416. O conhecimento da porcentagem de água na isolação permite

determinar a quantidade de água em litros que está dissolvida no papel, parâmetro utilizado para definição do processo de tratamento mais eficaz.

47 Secagem de Isolante Sólido

Processo de retirada de umidade do papel impregnado através de filtragem e circulação do óleo.

48 Secagem de Isolante Líquido (Óleo)

Processo de retirada de umidade do óleo isolante através de filtragem.

49 Regeneração do Óleo Isolante

Recondicionamento e tratamento para remoção de compostos polarizados de degradação do óleo e do isolante sólido. Reduz a quantidade de ácido e produtos de oxidação do óleo e do isolante sólido. Este tipo de ação corretiva se aplica quando o óleo mineral isolante apresenta baixa tensão interfacial e/ou elevado índice de neutralização (acidez). Estes ensaios servem para determinar se o óleo mineral isolante está oxidado (envelhecido) ou contaminado por compostos polares. Este tipo de tratamento, como ação corretiva, resulta na elevação da tensão interfacial, e conseqüentemente na diminuição do índice de neutralização (acidez), recompondo as características de óleo novo para o óleo em tratamento.

5 Ensaio de Fator de Potência do Óleo

O Fator de Potência (ASTM D-924 e D-925) é uma indicação da quantidade de energia perdida na forma de calor no óleo, sendo variável com a quantidade de contaminantes no óleo. Determina-se pelo ângulo entre a tensão aplicada e a corrente resultante entre dois eletrodos padronizados imersos no óleo.

51 Ensaio de Viscosidade Cinemática do Óleo

Mede o atrito interno das moléculas de um líquido e determina o seu grau de fluidez do líquido. Quanto menor o valor, mais fluído é o líquido. O Metanol apresenta uma viscosidade de 0,58 cP (centipoise a 20 ° C, ele é 51% menos viscoso que o etanol). O Índice de Viscosidade é um número empírico, não dimensional, que indica o efeito da variação da temperatura sobre a viscosidade do óleo. É determinado baseado sempre na medição da viscosidade cinemática a duas temperaturas diferentes. Um elevado índice de viscosidade significa que o óleo terá uma variação relativamente pequena de viscosidade em função de variações de temperatura. Ensaio empregado para avaliar se um óleo isolante apresenta fluidez adequada para emprego em aplicações elétricas bem como na sua capacidade de refrigeração. (NBR - 1044).

52 Ensaio de Gravidade Específica

Mede a relação entre a massa da substância e a massa de igual volume de água, a uma temperatura padrão. A gravidade específica pode ser medida através da balança de Westphal, ou através de hidrômetros.

53 Ensaio de Ponto de Fulgor do Óleo

Mede a temperatura mais baixa do óleo, na qual se produz suficiente vapor para formar mistura inflamável com o ar e produzir chama ao aproximar-se de uma fonte de ignição. A determinação do ponto de fulgor de um óleo sem uso tem importância sob o ponto de vista de segurança uma vez que temperaturas acima do ponto de fulgor podem conduzir a condições favoráveis à ocorrência de incêndios ou explosões. Ensaio empregado para determinar a temperatura mínima no qual os vapores do óleo isolante se tornam inflamáveis. Serve de indicativo da presença de contaminantes, usualmente outros tipos de hidrocarbonetos, no óleo mineral isolante. (NBR - 1134).

54 Ensaio de Sequência de Fases

Mede a ordem sequencial das fases do transformador, em cada enrolamento trifásico.

55 Ensaio de Condição Visual do Óleo

Registra aspectos visuais do óleo, segundo a norma ASTM D-1524.

56 Análise Furfural

Mede o envelhecimento do papel isolante. Diagnóstica o estado de envelhecimento da isolação celulósica. Determina o estágio de envelhecimento do papel isolante, através da análise de derivados de furanos dissolvidos no óleo mineral isolante. Possibilita o planejamento da substituição do transformador(es) com base em informações técnicas de envelhecimento e não de idade cronológica do equipamento. O furfuraldeído é considerado como o principal composto formado na decomposição do papel isolante. Desta forma, monitorar sua concentração no óleo isolante pode oferecer informações importantes a respeito das condições do papel da isolação sólida do transformador. Este ensaio é empregado para determinar a concentração de Furfuraldeído (2-FAL) em óleo mineral isolante pelo método espectrofotométrico. O teor de Furfuraldeído serve de base para a estimativa do grau de Polimerização do papel isolante do transformador, isto é, pode-se a princípio prever quando seria o fim de vida útil do papel isolante do transformador sem que haja necessidade de amostrar uma porção deste papel isolante, o que só seria possível fazer com o transformador desenergizado. Neste aspecto, este método apresenta uma vantagem em relação ao da determinação do Grau de Polimerização (G.P.) diretamente no papel.

57 Ensaio de Tensão de Restabelecimento (RVM)

Determina a quantidade de água e envelhecimento do papel isolante.

58 Ensaio de Densidade do Óleo Isolante

É a relação entre massa de um determinado volume de produto, à temperatura "t" pela massa de igual volume de água destilada, a uma dada temperatura. Com base no princípio de que todo corpo mergulhado em um líquido desloca um volume igual ao do líquido deslocado, mede-se a

densidade em um aparelho chamado densímetro, que tem uma haste graduada, dando leitura direta. Ensaio empregado para classificar o óleo isolante como naftênico ou parafínico, ou para determinação de mudanças marcantes no óleo isolante. (NBR - 7148).

59 Ensaio de Torque e Reaperto

Medição e reajuste do torque de aperto de parafusos, porcas, conectores, presilhas, braçadeiras, etc.

6 Ensaio de Corrente de Excitação

Mede a corrente alternada necessária para excitar o núcleo do transformador à tensão nominal, em vazio.

60 Ensaio de Enxofre Corrosivo do Óleo Isolante

Ensaio qualitativo, empregado para acusar a presença ou não de enxofre como contaminante no óleo mineral isolante. (NBR - 1050)

61 Ensaio de Conteúdo de Clorados (pcb) no Óleo Isolante

Determinação do nível de produtos resultantes da cloração de compostos do óleo isolante, agressivos ao meio ambiente

62 Ensaio de Depósitos em Condutores Cobertos

Teste CCD (*Covered Conductor Deposition*) da ABB que mede a quantidade de sulfeto de cobre depositado na superfície de condutores cobertos, devido à ação do enxofre corrosivo do óleo isolante.

63 Ensaio de Chapas de Metal

Teste (*Metal strip test*) que mede a quantidade de sulfeto de cobre depositado na superfície de chapas de metal, devido à ação do enxofre corrosivo do óleo isolante.

64 Ensaio de Ponto de Combustão do Óleo

Mede a mínima temperatura em que os vapores de combustível aquecido com aproximação de uma fonte externa de calor, entram em combustão, e retirada a fonte de calor externa de calor a combustão continua (se auto alimenta). Ensaio empregado para determinar a temperatura mínima no qual o óleo isolante se inflama. Serve de indicativo da presença de contaminantes, usualmente outros tipos de hidrocarbonetos, no óleo mineral isolante.(NBR - 1134). (Ver ensaio de ponto de fugor, código 53).

65 Ensaio de Cor do Óleo Isolante

Ensaio comparativo com padrões de cores, não crítico mas útil na avaliação do estado de oxidação do óleo isolante. (Método MB 35)

66 Ensaio de Teor de Água no Óleo Isolante

Ensaio empregado para determinar a concentração de água dissolvida em óleo isolante. É utilizado como referencial para se indicar o momento em que se deve recondicionar o óleo isolante .(NBR - 10710).

- 67 Ensaio de Teor de Inibidor de Oxidação (DBPC)**
Ensaio empregado para determinar a concentração de dibutil-paracresol (DBPC) em óleo mineral isolante pelo método espectrofotométrico. (MB - 347).
- 68 Ensaio de Teor de Ascarel (PCB)**
Teste para determinar o teor de Ascarel no óleo isolante.
- 69 Ensaio de Índice de Refração do Óleo**
Ensaio empregado para avaliar se um óleo isolante não está contaminado o suficiente, principalmente por outros tipos de hidrocarbonetos, impedindo seu uso em aplicações elétricas. (NBR - 577).
- 7 Ensaio de Resistência DC do Enrolamento**
Mede o valor da resistência de isolamento do elemento sob prova, através da aplicação de tensão DC padronizada, e medição da corrente resultante.
- 70 Ensaio de Ponto de Fluides do Óleo**
Ensaio empregado para determinar a temperatura mínima (ponto de congelamento) em que um óleo isolante se apresenta como um líquido. (NBR - 1134).
- 71 Ensaio de Ponto de Anelina do Óleo**
Ensaio empregado para avaliar se composição do óleo mineral isolante está contaminada por produtos, usualmente outros tipos de hidrocarbonetos, no óleo isolante. Também pode ser indicativo de concentração inadequada de compostos aromáticos. (MB - 29).
- 72 Ensaio de Cloretos e Sulfatos do Óleo**
Ensaio, qualitativo, empregado para acusar a presença ou não de cloretos e/ou sulfatos como contaminantes no óleo mineral isolante. (NBR - 577).
- 73 Ensaio de Estabilidade à Oxidação do Óleo**
Determina a estabilidade contra oxidação do óleo, segundo a norma IEC - 112.
- 74 Tratamento Termo-Vácuo do Óleo**
Este tipo de ação corretiva se aplica quando o óleo mineral isolante apresenta elevado teor de água e/ou de partículas acarretando na diminuição de sua rigidez dielétrica. No entanto, este tipo de tratamento além da sua ação corretiva, resulta na elevação da rigidez dielétrica do óleo mineral isolante, uma vez que os contaminantes (água e partículas) que diminuem a rigidez dielétrica, são reduzidos a níveis adequados, ele também resulta na redução de gases dissolvidos no óleo mineral isolante.
- 75 Substituição de Óleo Isolante**
Este tipo de ação corretiva se aplica quando o óleo mineral isolante apresenta baixa tensão interfacial e/ou elevado índice de neutralização

(acidez). Estes ensaios servem para determinar se o óleo mineral isolante está oxidado (envelhecido) ou contaminado por compostos polares. Neste caso o óleo mineral isolante oxidado (envelhecido) ou contaminados por compostos polares é substituído por óleo mineral isolante novo ou regenerado de maneira que rerepresente as características físico-químicas de óleo mineral isolante novo.

76 Medição de Deslocamento de Espiras

Ensaio para determinar o grau de deslocamento das espiras do enrolamento, resultante da ação de curtos-circuitos externos.

77 Medição de Harmônicos de Tensão

Determinação dos níveis de harmônicos presentes na forma de onda fundamental de tensão.

8 Ensaio de Índice de Polarização (Polarization Recovery)

Teste que mede a taxa de decaimento da tensão de polarização de um isolante, após aplicação e retirada de tensão. Determina o acúmulo de materiais polarizáveis no sistema isolante.

80 Medição de Temperatura

Determinação da temperatura ambiente ou no interior de um dispositivo.

81 Treinamento operacional

Realização de treinamento ou reciclagem de conhecimentos dos operadores visando evitar erros operacionais

82 Ensaio de Impedância de Carga

Determinação do valor da impedância equivalente conectada ao secundário de um transformador.

83 Medição de Tensão

Determinação da tensão de alimentação, ou tensão existente, em um dispositivo.

84 Medição de Corrente

Determinação da corrente consumida ou suprida por um dispositivo.

85 Lubrificação

Substituição ou complementação de fluido lubrificante entre peças móveis em contato.

86 Controle do Carregamento

Acompanhamento e controle do nível de carregamento, para verificação do crescimento normal da carga, ou ocorrências de cargas transitórias (ex: curtos-circuitos, etc.), acima dos limites estabelecidos.

87 Medição de Nível

Determinação do nível de um líquido em um recipiente ou invólucro.

88 Medição de Pressão

Determinação do valor da pressão de um gás, líquido, ou sistema de bombeamento e pressurização.

89 Modificação de Projeto

Realização de adequações e correções no projeto original da instalação.

9 Ensaio de Rigidez Dielétrica do Óleo Isolante

Consiste na aplicação de uma tensão crescente entre dois eletrodos, em formato padronizado, imersos no óleo, até que haja rompimento do isolamento entre eles, definindo o valor da rigidez. A rigidez dielétrica do óleo é uma indicação da habilidade do óleo para suportar estresse elétrico. A rigidez dielétrica de um óleo isolante expressa a sua resistência à passagem da corrente elétrica. É definida como a voltagem na qual ocorre a passagem de corrente elétrica entre dois eletrodos, sob as condições prescritas pelo teste. No estado puro, livre de qualquer contaminante, o óleo é um condutor de eletricidade extremamente pobre (ou seja um bom isolante). Por isso, a rigidez dielétrica indica principalmente a presença, ou ausência, no óleo, de agentes contaminantes, como água, impurezas ou partículas condutoras, que podem estar presentes quando são encontrados valores relativamente baixos de rigidez dielétrica. Algumas vezes, uma alta rigidez não indica a ausência de todos esses contaminantes; de singular importância no efeito sobre esta propriedade é a quantidade de água presente. Ensaio empregado para avaliar a capacidade do óleo isolante suportar tensões elétricas sem falhar. É utilizado como referencial para se indicar o momento em que se deve recondicionar o óleo isolante (tratar com máquina termo-vácuo).(NBR - 686).

91 Manutenção Corretiva

Restauração da funcionalidade de um item após a ocorrência de uma falha funcional ou modo de falha.

92 Substituição Preventiva

Substituição antecipada de peça ou equipamento antes da falha funcional ou modo de falha.

93 Restauração Preventiva

Restauração antecipada de peça ou equipamento antes da falha funcional.

95 Medição de Vibração

Determinação do nível de vibração de um componente, através da medição ou sensoriamento, da faixa audível ou de ultrassom, de ondas sonoras ou ruídos, audíveis ou não.

96 Ensaio de Vibração

Medição do nível de vibração em determinados pontos de um componente,

em resposta a sinais de vibração introduzidos em outros pontos do componente, e sua comparação com sinais registrados anteriormente.

97 Medição de Folga

Determinação do nível de separação entre duas ou mais superfícies próximas em um determinado estado operacional, e comparação com limites estabelecidos.

Anexo B – Níveis de Criticidade

Catastrófico

Um modo de falha produz um Efeito Catastrófico se pode causar a morte de seres humanos, ou perda do sistema principal, ou grande dano ao meio ambiente. A morte de seres humanos é evidentemente inaceitável em qualquer empreendimento controlado. A perda do sistema principal poderá decorrer de incêndio, explosões ou qualquer outro efeito que produza a indisponibilidade irreversível de toda uma instalação ou processo. Este caso depende, evidentemente, da importância do sistema em estudo. Se não existirem sistemas adequados de proteção, invariavelmente o projeto terá que ser modificado.

Crítico

Um modo de falha produz um Efeito Crítico se pode causar ferimento severo ou mesmo a morte, ou dano significativo ao sistema ou meio-ambiente, resultando na perda da missão da instalação. Embora menos grave que a morte, a possibilidade de ferimentos severos em seres humanos exige medidas também críticas. Já a dimensão dos danos significativos, e suas consequências, dependerão da aplicação e importância do sistema.

Marginal

Um modo de falha produz um Efeito Marginal quando pode causar ferimento leve ou dano de pequeno porte no sistema ou meio-ambiente, resultando em demora ou degradação de sua missão. A aceitabilidade de ferimentos de pequeno porte dependerá da frequência prevista, e da possibilidade ou não de adoção de medidas preventivas e corretivas. Os danos pequenos, que apenas degradem ou atrasem o cumprimento de uma missão/função, também deverão ser avaliados em relação à criticidade da própria missão/função.

Mínimo

Um modo de falha resulta em um Efeito Mínimo quando provoca consequências reduzidas na operação, meio ambiente e segurança, abaixo dos níveis máximos permitidos por normas legais, demandando recursos mínimos para restauração à condição original.

Insignificante

Um modo de falha produz um Efeito Insignificante quando for insuficiente para causar ferimentos em seres humanos, ou danos ao sistema, ou com impactos no meio ambiente insuficientes para infringir qualquer norma ambiental. Neste caso, apenas ensejará provavelmente na execução de manutenção não programada.



Anexo C – Termo de Referência

PROJETO DE PESQUISA

TÍTULO

Manutenção Centrada na Confiabilidade de Subestações

ENTIDADE

Cigré-Brasil

COMITÊ DE ESTUDOS

B3 - Subestações

COORDENAÇÃO

Eng. Iony Patriota de Siqueira (CHESF)

PARTICIPANTES

Força Tarefa composta, preferencialmente por especialistas em:

- Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC);
- Operação e Manutenção de Equipamentos de Subestações;
- Projeto e Especificação de Equipamentos de Subestações;
- Fabricação e Montagem de Equipamentos de Subestações;
- Reparo e Restauração de Equipamentos de Subestações;
- Pesquisa e Desenvolvimento de Equipamentos de Subestações;
- Ensaio e Testes de Equipamentos de Subestações;
- Proteção, Regulação e Monitoramento de Equipamentos de Subestações.

INTRODUÇÃO

Subestações desempenham funções indispensáveis na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Seja na elevação de tensão para transmissão a longas distâncias, seja no chaveamento ou redução para distribuição e uso urbano, residencial e industrial, as subestações concentram complexos equipamentos essenciais aos sistemas de potência atuais. Com o crescimento da capacidade

unitária, a operação destes equipamentos passou a exigir, além da função básica de transformação, regulação e chaveamento, um complexo conjunto de sistemas e funções de suporte, incluindo proteção, compensação de reativos, controle de carga e tensão, isolamento, supervisão, etc. Esta diversidade, embora necessária, multiplica os modos de falha possíveis das subestações, além daqueles associados às funções de transformação, regulação e chaveamento.

Entre os equipamentos de subestações, os transformadores representam talvez a principal concentração unitária de investimento imobilizado, e também a maior preocupação quanto à manutenção e conservação. Identificar e estudar todos os modos de falha de equipamentos tão complexos exige um esforço considerável dos agentes responsáveis pela manutenção, projeto e fabricação. Estudos anteriores citam a possibilidade de ocorrência de mais de 150 tipos de modos de falha possíveis em um transformador de grande porte.

Tradicionalmente, a Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA) tem sido recomendada como método ideal para catalogar e analisar as consequências das falhas em sistemas complexos. Além da identificação, é necessário também definir que tipo de atividade é recomendável para prevenir, ou corrigir, as falhas ou minimizar suas consequências. Os dois objetivos só são atingidos adotando-se uma metodologia estruturada, que correlacione cada modo de falha com a atividade preventiva de combate.

Entre as metodologias contemporâneas de manutenção, a Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) destaca-se por definir um conjunto integrado de ferramentas que permitem identificar e analisar todos os modos de falha de uma instalação, sugerindo atividades preventivas ou corretivas para minimizar os impactos das falhas. Além disso, a MCC caracteriza-se por priorizar o atendimento a estritos critérios de segurança e preservação do meio-ambiente, buscando simultaneamente assegurar sua atratividade econômica. Métodos qualitativos para escolha das atividades de manutenção são bastante sistematizados na MCC, e normalizados por organismos internacionais (IEC, SAE, ISO e ANSI).

OBJETIVO

Constitui objetivo deste projeto avaliar a aplicação da metodologia MCC na pesquisa dos modos de falha de equipamentos de subestações, estabelecendo seus mecanismos causais e consequências, visando definir as atividades de manutenção mais recomendáveis. Além das atividades de manutenção, o projeto deverá pesquisar os métodos de quantificação das frequências de execução, identificando os mais adequados a cada modo de falha. A pesquisa buscará respostas ao conjunto de questões propostas pela MCC, especializadas por tipo de equipamento, ou seja:

- Quais **funções** a manutenção deseja preservar?
- Quais **falhas** provocam interrupções destas funções?
- Quais **modos** de falha são causadores destas falhas?
- Quais **efeitos** são resultantes destes modos de falha?

- Quais **consequências** são derivadas destes efeitos?
- Quais **tarefas** são aplicáveis e efetivas para combater estas consequências?
- Quais **alternativas** restam se não for possível a prevenção das falhas?
- Quais **frequências** de manutenção são ideais para as tarefas?

Na busca de resposta a estas questões, muitas outras deverão ser respondidas:

- Que tipo de manutenção é mais adequada para cada modo de falha? Manutenção preventiva? Técnicas preditivas? Manutenção por inspeção? Ou apenas corretiva?
- A periodicidade deve ser diferente para cada ambiente industrial? Diferenciada por instalação? Por nível de produção? Por nível de tensão? Por tipo de equipamento? Sincronizada com outras manutenções?

O projeto será iniciado com a aplicação da MCC a transformadores de potência, devendo estender-se aos demais equipamentos típicos de uma subestação, nas etapas seguintes. No estudo destas questões, o projeto buscará conclusões gerais, de utilidade para fabricantes, pesquisadores, consultores, mantenedores e operadores destes equipamentos. Os parágrafos seguintes apresentam um resumo sequencial da metodologia proposta.

METODOLOGIA

O desenvolvimento do projeto piloto ocorrerá em oito etapas, típicas da metodologia MCC, assim denominadas:

- (0) Nivelamento conceitual sobre a metodologia MCC;
- (1) Seleção dos sistemas e coleta de informações;
- (2) Análise de Modos de Falha e Efeitos;
- (3) Seleção das Funções Significantes;
- (4) Seleção das Atividades Aplicáveis;
- (5) Avaliação da Efetividade das Atividades;
- (6) Seleção das Atividades Aplicáveis e Efetivas;
- (7) Definição da Periodicidade das Atividades.

A etapa inicial, **Nivelamento conceitual sobre a metodologia**, consistirá na discussão e troca de experiências entre os participantes sobre a metodologia, objetivando estabelecer um referencial comum para o projeto. Em especial, serão escolhidos os seguintes recursos para uso no restante do trabalho:

- Manual de referência sobre a metodologia;
- Formulários impressos para uso da MCC;
- Base de dados para uso no projeto;
- Software de MCC que será utilizado.

A primeira etapa, **Seleção dos sistemas e coleta de informações**, objetiva identificar e documentar os sistemas típicos de um transformador submetidos à

análise. Os seguintes produtos serão gerados ou analisados normalmente nesta etapa:

- Documentação dos sistemas;
- Definição dos contextos operacionais;
- Caracterização das fronteiras e interfaces entre os subsistemas;
- Diagrama organizacional da hierarquia dos subsistemas e componentes;
- Diagrama funcional dos sistemas;
- Diagrama lógico funcional do sistema.

Na segunda etapa, **Análise de Modos de Falha e Efeitos**, serão identificadas e documentadas as funções de cada sistema de um transformador e seus modos de falha, assim como os efeitos adversos produzidos por elas. Utilizando a metodologia FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*), serão documentados os seguintes aspectos do transformador:

- Funções desempenhadas por cada sistema;
- Falhas associadas a cada função;
- Modos como as falhas se originam;
- Efeitos provocados pelas falhas;
- Severidade de cada efeito.

Para isto, poderão ser utilizadas as ferramentas de Árvores de Falha e de Eventos, derivadas dos Diagramas Lógicos e Funcionais do sistema, eventualmente desenvolvidos na primeira etapa da MCC, gerando o resultado no formulário padronizado FMEA.

A terceira etapa, **Seleção de Funções Significantes**, utilizará um processo estruturado para analisar cada função identificada na etapa anterior, e determinar se uma falha tem efeito significativo, levando em conta os impactos nos aspectos pilares da MCC: segurança, meio-ambiente, operação e economia do processo. O estudo de severidade dos efeitos das falhas, resultante da etapa anterior, servirá de entrada para uma análise de riscos e consequências, dos quais se derivará uma priorização segundo o grau de significância. Como produto final, esta etapa documentará a relação de funções significantes, que serão submetidas às etapas subsequentes da metodologia. As demais funções (não significantes) serão documentadas apenas até esta etapa.

Na quarta etapa, **Seleção de Atividades Aplicáveis**, serão determinadas as tarefas de manutenção preventiva que sejam tecnicamente aplicáveis a transformadores, para prevenir ou corrigir cada modo de falha, ou amenizar suas consequências. Como resultado deste processo, uma das seguintes opções será determinada:

- Manutenção preventiva é aplicável;
- Manutenção preventiva não é aplicável; ou
- Outra ação alternativa (*default*) é sugerida.



A quinta etapa, **Avaliação da Efetividade das Atividades**, constitui-se em um processo estruturado para determinar se as tarefas de manutenção preventiva da etapa anterior são efetivas para reduzir, a um nível aceitável, as consequências previstas para uma falha. Como resultado deste processo, uma das seguintes opções será escolhida:

- Manutenção preventiva é recomendada;
- Manutenção preventiva é desnecessária; ou
- Outra ação alternativa (default) sugerida.

Na sexta etapa, **Seleção das Tarefas Aplicáveis e Efetivas**, será utilizado um processo estruturado para determinar a melhor tarefa, baseada em:

- Resultados do Processo;
- Impactos Operacionais;
- Segurança Física; e
- Impactos Ambientais.

Finalmente, na sétima etapa, **Definição da Periodicidade das Atividades**, serão estabelecidos os métodos e critérios recomendados para definição da periodicidade ou frequência de execução das atividades selecionadas, através da análise dos aspectos de:

- **Confiabilidade** - análise de estatísticas descritivas de confiabilidade dos transformadores;
- **Mantenabilidade** - avaliação de estatísticas descritivas de manutenibilidade dos transformadores;
- **Produtividade** - determinação de estatísticas descritivas dos impactos da manutenção e falha dos transformadores nos resultados empresariais;

As estatísticas serão obtidas preferencialmente por amostragem no histórico de desempenho dos equipamentos ou bases de dados similares, ou por estimativas baseadas no conhecimento a priori de especialistas.

PRODUTOS

Os seguintes produtos serão gerados pelo projeto piloto:

- Guia de Manutenção Centrada na Confiabilidade em Transformadores;
- Banco de Dados de Manutenção Centrada na Confiabilidade de Transformadores.

O Guia de Aplicação da Manutenção Centrada na Confiabilidade em Transformadores será um manual contendo o resultado de todas as etapas do projeto. O Guia será estruturado como um documento de referência sobre aplicação da MCC a estes equipamentos. Será útil como referência na estruturação de programas de manutenção de transformadores.



Após a conclusão, o projeto piloto será avaliado para extensão aos demais equipamentos de subestações, dentro da programação da Força Tarefa.

CONCLUSÕES

A aplicação da RCM a transformadores pode servir de piloto para outros equipamentos e processos tecnológicos do setor elétrico, que adotem sistemas sofisticados. Muitas destas generalizações poderão ser propostas, como sugestões de pesquisas adicionais no programa de trabalho da Força Tarefa. Em especial, será descrito o resultado final do projeto em um artigo para divulgação nos congressos promovidos pelo Cigré.

CRONOGRAMA

O cronograma de atividades será definido pela força tarefa, devendo contemplar prazos para os seguintes tópicos:

- Nivelamento conceitual sobre a metodologia;
- Seleção dos sistemas e coleta de informações;
- Análise de Modos de Falha e Efeitos;
- Seleção das Funções Significantes;
- Seleção das Atividades Aplicáveis;
- Avaliação da Efetividade das Atividades;
- Seleção das Atividades Aplicáveis e Efetivas;
- Definição da Periodicidade das Atividades;
- Base de dados de MCC em Transformadores;
- Guia de MCC em transformadores;
- Avaliação e extensão a outros equipamentos.

BIBLIOGRAFIA

As seguintes referências principais são propostas para início do trabalho. Outras serão acrescentadas durante a realização do estudo.

1. PENA, M.C.M, "Falhas em Transformadores de Potência: uma Contribuição para Análise, Definições, Causas e Soluções", Dissertação de Mestrado, UNIFEI, 2003.
2. MILASCH, M, "Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante", Editora Edgard Blucher Ltda., 1998.
3. SIQUEIRA, I.P, "Manutenção Centrada na Confiabilidade - Manual de Implementação", Curso de Especialização em Gestão da Manutenção, UFPE, 2003.
4. MOUBRAY, J, "Reliability-Centered Maintenance", Butterworth-Heinemann, 1994.
5. SMITH,A.M, "Reliability-Centered Maintenance", McGraw Hill, New York, USA.
6. JONES, R.B, "Risk-Based Management – A Reliability-Centered Approach", Gulf publishing Company, 1995.



7. MENDES, J.C. "Sobretensões Ressonantes: Fundamentos , Falhas e Monitoramento Contínuo de Transformadores de Alta Tensão". Dissertação de Mestrado apresentado a USP, 1989.
8. MENDES, J.C. "Redução de Falhas em Grandes Transformadores de Alta Tensão". Tese de Doutorado apresentado à USP, 1995.
9. I.E.E.E., "Guide for Failure Investigation, Documentation, and Analysis for Power Transformers and Shunt Reactors", 1991.
10. I.E.E.E., "Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus – Part 1: Oil Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors", 1995.

Anexo D – Padronização de Descrições

1. OBJETIVO

Este documento tem como objetivo a proposição de um padrão para denominação e descrição dos diversos itens do Guia de Manutenção Centrada na Confiabilidade de Subestações, para uso pelo Grupo de Trabalho de MCC de Subestações, dos Comitê B3, A2 e B5 do Cigré-Brasil.

2. DENOMINAÇÃO DE INSTALAÇÕES

As instalações na MCC serão denominados por títulos curtos, com todas as palavras com a primeira letra maiúscula, opcionalmente seguidos por termos entre parênteses, que melhor identifiquem sua finalidade e composição. A padronização destas regras encontra-se descrita no Anexo D deste Guia.

Exemplo: *Transformador Imerso em Óleo Mineral Isolante.*

3. DESCRIÇÃO DE INSTALAÇÕES

Seguindo as regras de padronização, a descrição deverá limitar-se, preferencialmente, a um único parágrafo, suficiente para melhor descrever ou detalhar a sua denominação, apenas com a primeira palavra tendo a primeira letra em maiúsculo. Deverá, opcionalmente, vir acompanhada de fotos, diagramas, ou outros arquivos julgados necessários, ou úteis para seu entendimento. Atenção deverá ser dada à questão dos direitos autorais dos arquivos anexados.

Exemplo:

“Equipamentos elétricos de alta tensão, destinados a transformar a tensão trifásica de uma instalação elétrica, por elevação, abaixamento ou deslocamento angular, utilizado para mudar o nível ou ângulo de tensão em sistemas elétricos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.”

4. DENOMINAÇÃO DE SISTEMAS

Os sistemas serão denominados por títulos curtos, com todas as palavras com a primeira letra maiúscula, opcionalmente seguidos por termos entre parênteses, que melhor identifiquem sua finalidade e composição.

Exemplos:

(a) Sistema de Comutação;

- (b) Sistema de Conexão (Buchas);
- (c) Sistema de Supervisão e Monitoramento;
- (d) Sistema de Preservação do Óleo;
- (e) Sistema de Proteção;
- (f) Sistema de Resfriamento;
- (g) Sistema Ativo;
- (h) Sistema Estrutural.

5. DESCRIÇÃO DE SISTEMAS

A descrição dos sistemas deverá limitar-se, preferencialmente, a um único parágrafo, suficiente para melhor descrever ou detalhar a sua denominação, apenas com a primeira palavra tendo a primeira letra em maiúsculo. Deverá, opcionalmente, vir acompanhada de fotos, diagramas, ou outros arquivos julgados necessários, ou úteis para seu entendimento. Atenção deverá ser dada à questão dos direitos autorais dos arquivos anexados.

Exemplo:

Sistema de Proteção: “Conjunto composto pelos relés, sensores, atuadores e demais funções destinadas a proteger o transformador e seus acessórios, promovendo seu desligamento em caso de defeito ou anormalidade.”

6. DENOMINAÇÃO DE COMPONENTES

Os componentes serão denominados por títulos curtos, com todas as palavras com a primeira letra maiúscula, opcionalmente seguidos por termos entre parênteses, que melhor identifiquem sua finalidade e composição dentro do sistema. A denominação deverá, se necessário, ser complementada com a indicação do sistema de origem, sempre que houver possibilidade de interpretação errada sobre o sistema proprietário do componente.

Exemplos:

- (a) Relé Diferencial Monofásico;
- (b) Bucha de Alta Tensão;
- (c) Óleo Isolante do Comutador.

7. DESCRIÇÃO DE COMPONENTES

A descrição dos componentes deverá limitar-se, preferencialmente, a um único parágrafo, suficiente para melhor descrever ou detalhar a sua denominação, apenas com a primeira palavra tendo a primeira letra em maiúsculo. Deverá, opcionalmente, vir acompanhada de fotos, diagramas, ou outros arquivos julgados necessários, ou úteis para seu entendimento. Atenção deverá ser dada à questão dos direitos autorais dos arquivos anexados.

Exemplo:

Relé Diferencial Monofásico: *“Dispositivo alimentado por transformadores de corrente, destinado a detectar e desligar o transformador quando da ocorrência de curto circuitos internos à sua zona de proteção.”*

8. DENOMINAÇÃO DE FUNÇÕES

As funções serão denominadas por títulos curtos, com a primeira palavra composta por um verbo no infinitivo, a primeira letra maiúscula e as demais minúsculas. O verbo definirá a ação esperada da função, seguida por um objeto que define sua aplicação, complementado, se possível, por frases curtas que definem a faixa ou nível esperado de desempenho da função. A denominação deverá ser suficiente para qualificar totalmente a função, independente do sistema a que pertença.

Exemplos:

- (a) *Resfriar o óleo do transformador mantendo a temperatura entre os limites X e Y em graus Centígrados*
- (b) *Proteger o transformador contra sobrecargas acima de 120% de sua capacidade.*

9. DESCRIÇÃO DE FUNÇÕES

A descrição das funções deverá limitar-se, preferencialmente, a um único parágrafo, suficiente para melhor descrever ou detalhar a ação ou objetivo esperado, principalmente aquelas relacionadas aos limites de desempenho esperado, apenas com a primeira palavra tendo a primeira letra em maiúsculo.

Exemplo:

“Proteger o transformador contra excesso de carga, através da comparação da corrente eficaz, de caráter permanente, com o valor ajustado máximo de suportabilidade do transformador, para um determinado tempo.”

10. DENOMINAÇÃO DE MODOS DE FALHA

Os modos de falha serão denominadas por títulos curtos, com a primeira palavra maiúscula composta por um ou mais substantivos, derivados do verbo principal que descreva a falha, complementado por outros objetos que qualifiquem a falha, com a primeira letra maiúscula e as demais minúsculas. A denominação deverá ser suficiente para qualificar totalmente o modo de falha, independente do componente ou sistema a que pertença, devendo preferencialmente obedecer ao seguinte padrão:

<modo> do(a) <componente>.

Onde *<modo>* = denominação do Modo de Falha, e
<componente> = denominação do Componente correspondente.

Exemplos:

- (a) *Excesso de umidade do papel isolante do enrolamento.*
- (b) *Sobretensões ressonantes superiores à suportabilidade do isolamento do enrolamento.*

11. DESCRIÇÃO DE MODOS DE FALHA

A descrição dos modos de falha deverá limitar-se, preferencialmente, a um único parágrafo, suficiente para melhor descrever ou detalhar o modo de falha, citando, se possível, a causa principal da violação dos limites de desempenho esperado do componente, apenas com a primeira letra da primeira palavra em maiúsculo. Deverá iniciar-se com um substantivo, derivado do verbo principal que descreva o modo de falha, complementado por outros objetos que o qualifiquem, com a primeira letra maiúscula e as demais minúsculas.

Exemplo:

“Presença de umidade em excesso no papel, oriundo da migração de água ou ar dissolvido no óleo para o isolante sólido, quando da elevação da temperatura, reduzindo sua capacidade isolante e suportabilidade mecânica.”

12. DENOMINAÇÃO DE FALHAS FUNCIONAIS

As falhas funcionais serão denominadas por títulos curtos, com a primeira palavra formada por um ou mais substantivos, derivados do verbo principal que descreva a falha, complementado por outros objetos que qualifiquem a falha, tal como os limites de desempenho ultrapassados da função, com a primeira letra maiúscula e as demais minúsculas. A denominação deverá ser suficiente para qualificar totalmente a falha, independente da função ou sistema a que pertença.

Exemplos:

- (a) *Perda da suportabilidade mecânica das espiras dos enrolamentos.*
- (b) *Impossibilidade de comando remoto do comutador de taps.*

13. DESCRIÇÃO DE FALHAS FUNCIONAIS

A descrição das falhas funcionais deverá limitar-se, preferencialmente, a um único parágrafo, suficiente para melhor descrever ou detalhar a falha, citando, se possível, a causa principal da violação dos limites de desempenho esperado da função, apenas com a primeira letra da primeira palavra em maiúsculo. Deverá iniciar-se com um substantivo, derivado do verbo principal que descreva a falha, complementado por outros objetos que a qualifiquem, com a primeira letra maiúscula e as demais minúsculas.

Exemplo:



“Insuficiência da suportabilidade mecânica dos enrolamentos do transformador, provocando a deformação das espiras quando da ocorrência de correntes passantes além do limite de suportabilidade projetado.”

Glossário

Análise de Modos de Falha e Efeitos - Um método estruturado de determinação das funções, falhas funcionais e modos ou causas das falhas de um equipamento, e seus efeitos.

Análise de Modos de Falha, Efeitos e Criticidade - Um método estruturado de determinação das funções, falhas funcionais e modos ou causas das falhas de um equipamento, e seus efeitos probabilísticos no restante do processo, traduzido por um nível em uma escala de criticidade.

Ativo - Unidade básica de manutenção, composta de qualquer máquina, edifício ou sistema.

Busca de Falha - Ver Inspeção Funcional.

Causa da Falha - Ver Modo de Falha.

Confiabilidade – Capacidade ou probabilidade de um item continuar exercendo sua função original, por um período especificado.

Confiabilidade Inerente - Uma medida da confiabilidade de um item, no seu contexto operacional atual, admitindo aderência a sua estratégia ideal de manutenção.

Consequências Ambientais - Um modo de falha ou falha múltipla tem consequências ambientais se pode infringir qualquer norma ou regulamento ambiental ou corporativo, municipal, regional, nacional ou internacional aplicável ao bem físico ou sistema em consideração.

Consequências da Falha - A(s) maneira(s) nas quais o(s) efeito(s) de um modo de falha se materializa(m) (evidência da falha, impacto na segurança, no ambiente, na capacidade operacional, nos custos diretos e indiretos de reparo).

Consequências de Segurança - Um modo de falha ou falha múltipla tem consequências de segurança se ele puder ferir ou matar um ser humano.

Consequências Não-Operacionais - Uma categoria de consequências de falha que não afeta negativamente a segurança, o ambiente, e a operação, mas apenas requer reparo ou reposição de quaisquer item(s) que tenha sido afetado pela falha.

Consequências Operacionais - Uma categoria de consequências de falha que afeta adversamente a capacidade operacional de um bem físico ou sistema (saída,



qualidade do produto, serviço ao consumidor, capacidade militar, ou custos operacionais em acréscimo ao custo do reparo).

Contexto Operacional - A circunstância na qual se espera que um bem físico ou sistema opere.

Criticidade - O grau de prioridade de um modo de falha baseado em algum critério de avaliação. Classificação do nível de gravidade do modo de falha.

Defeito - Uma falha potencial ou outra condição que irá requerer a atenção da manutenção em algum instante no futuro, mas que não está impedindo atualmente o equipamento de desempenhar suas funções. Ver Falha Potencial.

Deterioração – Degradação na qualidade, confiabilidade ou desempenho funcional de um item devido à idade, uso ou ambiente.

Disponibilidade - Proporção de tempo total que um item de equipamento é capaz de executar sua função especificada, normalmente expressa como uma porcentagem.

Efeito - Texto contendo uma descrição detalhada do efeito do modo de falha.

Efeito da Falha - O que acontece quando um modo de falha ocorre.

FA - Código ou designação mnemônica associada a cada falha funcional.

Failure-Finding – Ver Inspeção Funcional.

Falha - Nome completo que caracteriza cada falha funcional.

Falha Evidente - Um modo de falha cujos efeitos se tornam aparentes para a equipe operacional sob circunstâncias normais, se o modo de falha ocorre por si só.

Falha Funcional - Um estado em que o bem físico ou sistema está incapaz de desempenhar uma função específica a um nível desejado de performance.

Falha Incipiente – Ver Falha Potencial.

Falha Múltipla - Um evento que ocorre se uma função protegida falha enquanto o dispositivo de proteção ou sistema de proteção estiver em um estado de falha.

Falha Oculta - Um modo de falha cujos efeitos não se tornam aparentes para a equipe operacional sob condições normais.

Falha Potencial - Uma condição identificável ou defeito que indica que uma falha funcional está prestes a acontecer ou em processo de evolução. Ver Defeito.

FMEA - Ver Análise de Modos de Falha e Efeitos.



FMECA - Ver Análise de Modos de Falha, Efeitos e Criticidade.

FU - Código ou designação mnemônica associada a cada função do sistema.

Função - O que o proprietário ou usuário de um bem físico ou sistema deseja que ele faça. Nome completo que caracteriza cada função. Objetivo de um sistema.

Função Evidente - Uma função cuja falha por si só se torna aparente para a equipe operacional sob condições normais.

Função Oculta - Uma função cuja falha por si só não se torna aparente para a equipe operacional sob condições normais.

Funções Primárias - As funções que constituem as razões principais porque um bem físico ou sistema existe ou foi adquirido pelo seu proprietário ou usuário.

Funções Secundárias - Funções que um bem físico ou sistema tem que desempenhar além de sua(s) função(ões) principal(is), tal como aquelas necessárias ao atendimento de requisitos regulatórios e aquelas relacionadas a assuntos tais como proteção, controle, contenção, conforto, aparência, eficiência energética e integridade estrutural, entre outras.

Hard-Time – Ver Substituição Preventiva e Restauração Preventiva.

Idade - Uma medida da exposição ao estresse calculada a partir do momento em que um item entra em serviço quando novo ou é reativado após uma tarefa destinada a restaurar sua capacidade inicial, podendo ser medida em termos do tempo de calendário, tempo de operação, distância percorrida, ciclos de trabalho ou unidades de saída ou produção.

IN – Código ou designação mnemônica associada à instalação do Sistema.

Indisponibilidade - Tempo ou fração do tempo que um item de equipamento está fora de serviço, como resultado de uma falha, ou durante a realização de manutenção.

Inspeção - Qualquer atividade destinada a determinar a condição de um equipamento.

Inspeção Funcional (Failure-Finding) - Uma atividade rotineira de manutenção, normalmente um teste, destinada a determinar se uma falha oculta ocorreu.

Inspeção Preditiva (On-Condition) – Uma tarefa programada destinada a detectar uma falha potencial, através da inspeção de um parâmetro.

Instalação - Nome completo que caracteriza a instalação do sistema.



Mantenabilidade – A facilidade e rapidez com que se pode realizar uma atividade de manutenção em um item.

Manutenção Baseada em Condição - Uma estratégia de manutenção baseada na medição da condição do equipamento para avaliar se ele irá falhar durante um período futuro, e tomar alguma ação apropriada para evitar as consequências desta falha.

Manutenção Corretiva – Restauração ou substituição da capacidade funcional de um item, quando da ocorrência de defeitos ou falhas potenciais, antes da evolução para falha funcional.

Manutenção Programada – Qualquer manutenção que foi programada para um determinado período.

MBC - Ver Manutenção Baseada em Condição.

MC - Ver Manutenção Corretiva.

MCC – Manutenção Centrada na Confiabilidade

Mecanismo de Falha - Relação entre a Probabilidade Condicional de Falha de um item e sua idade, ou tempo de funcionamento.

MO - Código ou designação mnemônica associada ao modo de falha.

Modo de Falha - Um evento único, ou condição, que causa uma falha funcional. Nome que caracteriza cada modo de falha associado à falha.

Monitoramento de Condição - Uso de equipamento especializado para medir a condição de um equipamento, durante sua operação.

Mortalidade Infantil - A probabilidade condicional de falha relativamente elevada durante o período imediatamente após a ativação ou retorno de um item à operação.

Mudança de Projeto (One-Time Change) - Qualquer ação tomada para mudar a configuração física de um bem ou sistema (reprojeto ou modificação), para mudar o método usado por um operador ou mantenedor para executar uma tarefa específica, para mudar o contexto operacional do sistema, ou para mudar a capacidade de um operador ou mantenedor (treinamento).

On-Condition – Ver Inspeção Preditiva.

One-Time-Change – Ver Mudança de Projeto.

Operational-Service – Ver Serviço Operacional.



Performance Desejada - O nível de performance desejada pelo proprietário ou usuário do bem físico ou sistema.

Política de Gerenciamento de Falha - Um termo genérico que abrange tarefas de inspeção preditiva, restauração preventiva, substituição preventiva, inspeção funcional, manutenção corretiva, reparo funcional e mudança de projeto.

Probabilidade Condicional de Falha - A probabilidade de que uma falha irá ocorrer em um período específico, condicionada a que o item tenha sobrevivido até o início do período.

Programado - Realizado a intervalos fixos, predeterminados, inclusive monitoramento contínuo (onde o intervalo é zero efetivamente).

RCM – Reliability-centered Maintenance. Ver MCC.

Reparo – Restauração da capacidade funcional de um item após uma falha funcional.

Reparo Funcional (Run-To-Failure) - Uma política de gerenciamento de falha que permite um modo de falha específico de ocorrer sem nenhuma tentativa de antecipar ou prevenir sua ocorrência.

Restauração Preventiva (Hard-Time) - Uma tarefa programada que restaura a capacidade de um item antes ou em um intervalo especificado (idade limite), independente de sua condição naquele instante, para um nível que forneça uma probabilidade tolerável de sobrevivência até o final de outro intervalo especificado.

Revisão - Uma tarefa de manutenção baseada na desmontagem, recondição e reconstrução do equipamento.

Risco – Potencial para a realização de um evento indesejável, com consequências negativas. Produto da probabilidade condicional de um evento, e seu resultado.

Run-To-Failure – Ver Reparo Funcional.

Serviço Operacional (Operational Service & Lubrication) – Atividade repetitiva, executada pelo operador, necessária à manutenção do processo, tal como lubrificação.

SI - Código ou designação mnemônica associada ao sistema.

Sintoma – Evidência observável de uma falha potencial.

Sistema - Nome completo que caracteriza o sistema.



Substituição Preventiva (Hard-Time) - Uma tarefa programada que consiste na substituição de um item antes ou em uma idade limite especificada, independente de sua condição naquele instante.

Tarefa Adequada - Uma tarefa que é simultaneamente viável tecnicamente e compensatória (aplicável e efetiva).

Usuário - Uma pessoa ou organização que opera um bem ou sistema e possa sofrer ou ser responsabilizado pelas consequências de um modo de falha daquele sistema.

Bibliografia

Apenas livros publicados sobre a Manutenção Centrada na Confiabilidade são relacionados a seguir, em ordem cronológica do ano de publicação

- 1975: Nolan, Heap - Reliability-centered Maintenance
1991: Moubray, J. - Reliability-centered Maintenance –1st edition
1992: Smith, A.M. - Reliability-centered Maintenance
1995: Jones, R.B. - Risk-Based Management: A Reliability-Centered Approach
1996: Zwingelstein, G. - La Maintenance basée sur la fiabilité – Guide pratique d'application de la RCM
1997: Moubray, J. - Reliability-centered Maintenance – 2nd edition
1999: Campbell, J.D. ed. - The Reliability Handbook
1999: August, J - Applied Reliability-centered Maintenance
2003: Smith, A.M., Hinchcliffe, G - Reliability-centered Maintenance: Gateway to World Class Maintenance
2005: Siqueira, I.P. - Manutenção Centrada na Confiabilidade - Manual de Implementação
2006: Bloom, N.B. - Reliability Centered Maintenance – Implementation made simple
2006: August, J. - RCM Guidebook: Building a Reliable Plant Maintenance Program

Conteúdo do CD-ROM

O CD-ROM que acompanha este documento contém integralmente o texto dos capítulos da brochura, além dos relatórios citados no texto. Um único arquivo, denominado Guia.pdf, no formato PDF (*Portable Document Format*) da Adobe Systems contém todo o conteúdo do CD-ROM. Para visualiza-lo é necessário utilizar o programa Adobe Reader, disponível gratuitamente no site

<http://www.adobe.com/br/products/acrobat/readstep2.html>,

ou programas similares, também disponíveis na internet.

O arquivo Guia.pdf, com 1143 páginas, é navegável através de uma estrutura de marcação (*bookmarks*), com os seguintes itens principais:

- Brochura;
- Instalações;
- Sistemas com Descrição;
- Componentes com Descrição;
- Funções com Descrição;
- Falhas com Descrições;
- Modos por Componentes com Descrição;
- FMEA – Failure Mode and Effects Analysis;
- Análise;
- Plano de Manutenção por Atividade.

Com exceção da Brochura, os demais itens correspondem a relatórios extraídos da base de dados MCC utilizada no projeto, utilizando o software Tecnix RCM, da Tecnix Engenharia e Sistemas Ltda.

Cada item pode ainda ser navegado em partes correspondentes aos sistemas do transformador ou capítulos da brochura, conforme o caso.