

Cláudia Costa Cruz Vieira Ramos

## **DETERMINAÇÃO DA VIDA ÚTIL DA CÂMARA DO DISJUNTOR**

Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores – Área de Especialização, Automação orientada pelo Professores Doutores Clever S. Pereira Filho e Humberto Manuel Matos Jorge, apresentada no Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Universidade de Coimbra

Fevereiro 2018



UNIVERSIDADE DE COIMBRA





**Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Universidade de Coimbra**

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

# **DETERMINAÇÃO DA VIDA ÚTIL DA CÂMARA DO DISJUNTOR**

Cláudia Costa Cruz Vieira Ramos

**Orientadores:**

Professor Doutor Clever S. Pereira Filho  
Professor Doutor Humberto Manuel Matos Jorge

**Presidente do júri:**

Professor Doutor André Manuel dos Santos Mendes

**Vogal:**

Professor Doutor Pedro Manuel Soares Moura

Fevereiro de 2018



## Agradecimentos

As pessoas que deram o seu contributo para a realização desta dissertação, quero exprimir os meus sinceros agradecimentos.

Começando pelos meus orientadores, o professor Clever Pereira da Universidade Federal de Minas Gerais e o professor Humberto Jorge da Universidade de Coimbra, agradeço a disponibilidade demonstrada para a minha orientação, pela atenção e confiança depositada em mim durante a realização deste trabalho que enfrentou vários obstáculos.

Agradeço também ao Laboratório de Proteção Digital de Sistemas Elétricos (*PROTLab*) e aos colegas Ana Cristina, Gabriel Tino e Bruno Bazzoni pela simpatia, disponibilidade e integração no grupo de trabalho.

Aos engenheiros da CEMIG, Weber Melo de Sousa e Jorge Carlos da Silva pela consideração e prestabilidade demonstrada.

A minha família, que direta ou indiretamente será sempre o meu porto seguro, ao meu namorado Helder Carvalho que esteve sempre do meu lado e aos amigos que torceram pela minha conquista.

A Coimbra, que pacientemente, foi amiga nos bons e maus momentos.



## Resumo

A recolocação imediata em operação de uma linha de transporte desligada da rede elétrica devido a uma falta é uma questão vital para as empresas de energia. Para que tal operação possa ser realizada com rapidez e segurança, é necessário dispor do máximo de informação sobre as ocorrências, as quais serão utilizadas também, na adoção de medidas preventivas para minimizar a frequência e a duração dos desligamentos.

Esta dissertação apresenta o desenvolvimento de uma metodologia para a determinação da vida útil da câmara do disjuntor fazendo uso do OSCILO, um sistema que gera oscilografias e que faz a análise automática dos registros oscilográficos provenientes dos Relés e dos Registradores Digitais de Perturbação (RDP) instalados nas subestações (SE) da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) do Brasil.

É feita a identificação automática do distúrbio que originou os registros, a verificação da presença ou não de perturbação e a eliminação de registros espúrios. A partir da rede de oscilografia do Sistema de Análise de Perturbações (SAPNET) da CEMIG, será possível uma análise detalhada e uma caracterização dos eventos, através da aplicação de técnicas matemáticas e computacionais nos arquivos em formato COMTRADE.

Em linguagem do Matlab, software realizado em parceria com a CEMIG, procede-se à identificação, caracterização e classificação dos arquivos com dados oscilográficos e os armazenamentos no sistema de busca (banco de dados utilizando o MySQL) para posterior utilização e consulta, de forma a localizar com maior efetividade registros oscilográficos relacionados a eventos porventura ocorridos no sistema elétrico.

No sistema OSCILO foi agregada a função de indicação de vida útil de contatos de disjuntor, procedendo ao cálculo da corrente interrompida, por disjuntores do sistema de transporte e a determinação da corrente acumulada de curto-circuito de disjuntores. Tendo em vista também a disponibilização das magnitudes das correntes de falta, medidas via RDP nas subestações, e a necessidade de padronização nas informações fornecidas pelos fabricantes de disjuntores nos seus manuais, este relatório propõe uma nova metodologia de manutenção.

Os resultados obtidos em casos simulados e reais provenientes do sistema elétrico brasileiro, permitem comprovar a eficiência do sistema.

Palavras-chave – Oscilografia, Disjuntor, Detecção, Registradores Digitais.





## **Abstract**

“Replacement of an unplugged utility line due to a fault is a vital issue for energy companies. In order for this operation to be carried out quickly and safely, it is necessary to have as much information about the occurrences, which will also be used, in the adoption of preventive measures to minimize the frequency and duration of the shutdowns.

This dissertation presents the development of a methodology for determining the useful life of the breaker chamber making use of OSCILO, one oscillographics management system that makes automatic analysis of oscillographic records from the relays and Digital Recorders Perturbation (RDP) installed in substations (SE) of the Energy Company of Minas Gerais (CEMIG), Brazil.

It made the automatic identification of the disorder that caused the records, verifying the presence or absence of perturbation and the elimination of spurious records.

From the network oscillographic Perturbation Analysis System (SAPNET CEMIG), will enable a detailed analysis and characterization of events, through the application of mathematical and computational techniques in files in COMTRADE format.

In language of Matlab, the software in partnership with CEMIG, proceeds to the identification, characterization and classification of files with oscillographic data and the stores in search system (database using MySQL) for later use and consultation in order locate more effectively oscillographic records related to events possibly occurred in the electrical system.

In the system OSCILO adds up the life function of indicating breaker contacts, proceeding with the calculation of the current interrupted by the transmission system circuit breakers and determination of the accumulated current short circuit breakers. Given the availability of magnitudes of fault currents, measured by RDP in substations, and the need for standardization of information provided by circuit breakers manufacturers in their manuals, this document proposes a new maintenance methodology.

The results obtained in simulated and real cases from the Brazilian electrical system, provided confirms the efficiency of the system.

Keywords - Oscillographic, Circuit breaker, Detection, Digital Recorders.



*“Sonhe com o que você quiser. Vá para onde você queira ir. Seja o que você quer ser, porque você possui apenas uma vida, e nela só temos uma chance de fazer aquilo que queremos. Tenha felicidade bastante para fazê-la doce. Dificuldade para fazê-la forte. Tristeza para fazê-la humana. E esperança suficiente para fazê-la feliz”.*

Clarice Lispector



# Conteúdo

Agradecimentos.....	ii
Resumo .....	ii
Abstract .....	iv
Conteúdo .....	viii
Lista de Figuras .....	x
Lista de Tabelas .....	xi
Lista de Siglas e Abreviaturas .....	xii
Listas dos símbolos .....	xiii
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Motivação.....	1
1.3 Objetivos .....	2
1.4 Estrutura da Dissertação.....	2
2. Enquadramento .....	4
2.1 Disjuntores .....	5
2.2 Visão geral sobre Oscilografia.....	8
2.3 Leitura do Registro Oscilográfico .....	11
2.4 Processamento dos Dados .....	12
Filtragem anti-aliasing.....	12
Estimativa dos fasores.....	13
2.5 Detecção dos Períodos.....	14
2.6 Classificação dos Períodos .....	21
2.7 Banco de Dados.....	23
2.8 Possíveis erros em Registros Oscilográficos .....	25
3. Modelos.....	27
3.1 Determinação de Topologia da Subestação .....	27
3.2 Desgaste de contatos de disjuntor .....	29
Critério de manutenção do disjuntor 3AP1 FG, fabricado pela Siemens, ano 2000.....	31
Critério de manutenção do disjuntor LTB 145D1/B, fabricado pela ABB, 2009 .....	33

Critério de manutenção disjuntor 140-SFM-40A, fabricado pela Mitsubishi, 1983 .....	33
Critério de manutenção utilizado pela CEMIG GT .....	34
3.3 Formas de contabilizar o desgaste.....	36
3.4 Procedimentos para avisar sobre o desgaste .....	39
4. Testes.....	41
4.1 Operação Automática do Sistema.....	41
4.2 Validação do Método.....	42
Modelo 3AP1 FG .....	42
Modelo 140-SFM-40 A.....	43
Modelo HPL 245-550B2.....	44
Modelo GL317D.....	45
5. Conclusão.....	47
Apendice.....	49
Referências bibliográficas.....	52

# Lista de Figuras

FIGURA 2.1 - ESTRUTURA BÁSICA DE UMA REDE DE OSCIOGRAFIA	7
FIGURA 2.2 - CORTE DA CÂMARA DE INTERRUPÇÃO DE UM DISJUNTOR A SF6 DE PRESSÃO ÚNICA	8
FIGURA 2.3 - EXEMPLO DE UMA OSCIOGRAFIA DO SISTEMA DE TRANSPORTE DE ENERGIA	4
FIGURA 2.4 - FLUXOGRAMA DA SEQUÊNCIA E FUNCIONAMENTO DO SISTEMA OSCILO	9
FIGURA 2.5 - ROTINAS DA FUNÇÃO ANÁLISE DO EVENTO	9
FIGURA 2.6 - ECRÃ DE ABERTURA DO SISTEMA SAPNET	10
FIGURA 2.7 - SISTEMA DE COMUNICAÇÃO	11
FIGURA 2.8 – ARQUIVO DE DADOS DE ENTRADA	12
FIGURA 2.9 - RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO FILTRO DOS ERROS MÍNIMOS QUADRADOS	14
FIGURA 2.10 - CURVA ORIGINAL E O PICO DO FASOR ESTIMADO	14
FIGURA 2.11 - APRESENTA OS DADOS OBTIDOS	15
FIGURA 2.12 - CORRENTE FILTRADA E FASOR CORRENTE DURANTE TRANSITÓRIO NO SISTEMA.	16
FIGURA 2.13 - POSICIONAMENTO DOS CURSORES INSERIDOS AUTOMATICAMENTE PELO - OSCILO.	16
FIGURA 2.14 - SUPOSTA POSIÇÃO INICIAL CURSOR INSERIDO AUTOMATICAMENTE.	17
FIGURA 2.15 - INSTANTE CORRENTE FASORIAL ATENDE AOS CRITÉRIOS PRÉ-ESTABELECIDOS.	18
FIGURA 2.16 - INSTANTE QUE MÓDULO DA CORRENTE FILTRADA ATENDE CRITÉRIOS DE COMPARAÇÃO.	18
FIGURA 2.17 - POSIÇÃO FINAL DO CURSOR DE FIM ABERTURA DE DISJUNTOR.	19
FIGURA 2.18 - MÉTODO MÍNIMOS QUADRADO APLICADOS A TENSÃO	19
FIGURA 2.19 - MÉTODO MÍNIMOS QUADRADO APLICADO A CORRENTE	19
FIGURA 2.20 - UNIÃO DOS MÉTODOS MÍNIMOS QUADRADO TENSÃO E CORRENTE	20
FIGURA 2.21 - ECRÃ DO OSCILO MOSTRA O POSICIONAMENTO DOS CURSORES	20
FIGURA 2.22 - OSCIOGRAMAS E RELATÓRIO DE OSCIOGRAFIA COM FALTA CT A EVOLUIR BCT	21
FIGURA 2.23- CIRCUITO UNIFILAR EM PERÍODO PRÉ-FALTA	22
FIGURA 2.24 - CIRCUITO UNIFILAR NO INSTANTE FALTA.	22
FIGURA 2.25 - CIRCUITO UNIFILAR EM PERÍODO PURO-FALTA	23
FIGURA 2.26 - ECRÃ DO BANCO DE DADOS	24
FIGURA 3.1 - MAPA DO SISTEMA DE TRANSPORTE DA REGIÃO	28
FIGURA 3.2 - CONFIGURAÇÃO DE REFERÊNCIA - DIAGRAMA UNIFILAR SIMPLIFICADO	29
FIGURA 3.3 - CURVA DE LIMITE DE DESGASTE DO DISJUNTOR	30
FIGURA 3.4 - NÚMERO MÁXIMO DE INTERRUPÇÕES (N) EM FUNÇÃO DA CORRENTE INTERROMPIDA (I).	32
FIGURA 4.1 - ALGORITMO SIMPLIFICADO.	41

## Lista de Tabelas

TABELA 3.1 - COMPARATIVO ENTRE AS FILOSOFIAS DE MONITORIZAÇÃO.....	30
TABELA 3.2 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO DISJUNTOR 3AP1 FG. ....	32
TABELA 3.3 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO DISJUNTOR LTB 145D1/B. ....	33
TABELA 3.4 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO DISJUNTOR 140-FSM-40 A. ....	33
TABELA 3.5 - NÚMERO MÁXIMO DE INTERRUPÇÕES EM FUNÇÃO DA CORRENTE. ....	34
TABELA 3.6 - QUATRO PONTOS DE AJUSTE .....	37
TABELA 4.1 - CONJUNTO DE 4 PONTOS (N, I) TOMADOS NO ÁBACO DA FIGURA 3.4. ....	42
TABELA 4.2 - PARÂMETROS A E C PARA O MODELO 3AP1 FG.....	42
TABELA 4.3 - COMPARAÇÃO DA METODOLOGIA DO FABRICANTE E DA METODOLOGIA PROPOSTA, PARA O MODELO 3AP1 FG.....	43
TABELA 4.4 – PARÂMETROS A E C PARA O MODELO 140-SFM-40 A. ....	43
TABELA 4.5 - COMPARAÇÃO DO NÚMERO MÁXIMO DE INTERRUPÇÕES PARA DADA CORRENTE APONTADOS PELO FABRICANTE E PELO CRITÉRIO PROPOSTO. ....	44
TABELA 4.6 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO MODELO HPL 550B2, FABRICADO PELA ABB, ANO 2002. ....	44
TABELA 4.7 – PARÂMETROS A E C PARA O MODELO HPL 550B2. ....	44
TABELA 4.8 – COMPARAÇÃO DA METODOLOGIA DO FABRICANTE E DA METODOLOGIA PROPOSTA, PARA O MODELO HPL 550B2. ....	45
TABELA 4.9 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO MODELO GL317D, FABRICADO PELA AREVA, ANO 2004. ....	45
TABELA 4.10 – PARÂMETROS A E C PARA O MODELO GL317D.....	45
TABELA 4.11 – COMPARAÇÃO DA METODOLOGIA DO FABRICANTE E DA METODOLOGIA PROPOSTA, PARA O MODELO GL317D.....	46



## Lista de Siglas e Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	American National Standards Institute
CC	Centro de Controle
CIGRÉ	Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CO	Centro de Operação
IEC	International Electrotechnical Commission
IED	Intelligent Electronic Devices
GTD	Geração Transporte e Distribuição
LRC	Lightning Research Centre
LT	Linhas de Transporte
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
NESC	National Electrical Safety Code
PROTLab	Laboratório de Proteção Digital
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
RDP	Registrador Digital de Perturbação
RMS	Real Valor Efícaz
RO	Registros Oscilográficos
SAPNET	Sistema de Análise de Perturbações
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SF6	Hexaflouretode Enxofre
SIN	Sistema Interligado Nacional
TC	Transformador de Corrente
TT	Transformador de Tensão
UAN	Unidade de Análise Numérica

## Listas dos símbolos

$c$	constante
$d$	estimativa do ponto de falta
$E_A$	tensão de fonte local
$E_R$	tensão de fonte remota
$I_A$	corrente de falta no terminal
$I_{cc}$	corrente eficaz interrompida
$I_F$	corrente no ponto de falta
$I_{FA}$	corrente pura de falta
$I_{RE}$	corrente do reator
$K$	fator de distribuição
$P_{RE}$	potência trifásica nominal do reator
$R_F$	resistência de falta
$V_A$	tensão pós-falta no terminal
$V_F$	tensão no ponto de falta
$V_{RE}$	tensão nominal do reator
$X_{LA}$	reatância sequência positiva
$X_{LT}$	reatância sequência positiva total
$Z_{RR}$	impedância da fonte remota
$Z_{RF}$	impedância da linha de transporte do terminal R ao ponto de falta
$Z_S$	impedância medida do terminal S ao ponto de falta
$Z_{SF}$	impedância da linha de transporte do terminal S ao ponto de falta
$Z_{SS}$	impedância da fonte local

# **1. Introdução**

## **1.1 Enquadramento**

O desenvolvimento desta dissertação é parte integrante de um projeto executado pelo Laboratório de Proteção Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais (PROTLab/UFMG), em parceria e sob supervisão direta da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG).

A recolocação imediata em operação de uma linha de transporte desligada da rede elétrica devido a uma falta é uma questão vital para as empresas de energia. Para que tal operação possa ser realizada com rapidez e segurança, é necessário dispor do máximo de informação sobre as ocorrências, as quais serão utilizadas também, na adoção de medidas preventivas para minimizar a frequência e a duração dos desligamentos.

Os disjuntores fazem parte dos principais equipamentos para segurança de uma Subestação (SE), sendo também, um dos dispositivos mais eficazes para realizar manobras nas redes elétricas.

Os critérios de manutenção dos disjuntores estabelecidos por diferentes fabricantes de disjuntores de alta tensão são baseados em diferentes metodologias, o que dificulta o estabelecimento de um procedimento padrão. No caso da CEMIG, cujo parque de disjuntores é composto por diferentes modelos, fabricantes, características e anos de fabrico, o problema tem criticidade elevada, uma vez que cada equipamento exige acompanhamento pontual de acordo com o procedimento e o conjunto de informações específicos disponibilizados no manual de cada disjuntor.

## **1.2 Motivação**

Com a Lei do Modelo do Setor Elétrico Brasileiro aprovada em Março de 2004, houve a necessidade de impulsionar a melhora no método a utilizar para conhecer o tempo de vida útil da câmara do disjuntor, o equipamento que suporta os ligamentos e desligamentos.

Tendo em conta a procura crescente de supervisão de equipamentos do Sistema Elétrico de Potência (SEP) da transporte através de RDP; a larga utilização de Registros Oscilográficos (RO) na análise de perturbações no SEP integrados no Sistema de Análise de Perturbações (SAPNET); a enorme quantidade de registros gerados pelas mais variadas causas; a necessidade de análise cada vez mais eficiente de perturbações e por consequência da classificação do distúrbio e a eliminação de registros.

E também a necessidade de uniformizar as informações disponibilizadas pelos diversos relés de proteção.

### **1.3 Objetivos**

O objetivo deste trabalho é apresentar uma nova metodologia e os resultados de suas aplicações em casos simulados via ATP (Alternative Transient Program), bem como em alguns casos reais do sistema elétrico brasileiro, de modo a comprovar que a metodologia proposta pode melhorar sensivelmente o desempenho dos métodos originalmente propostos pelos fabricantes.

Também desenvolver uma ferramenta computacional, tendo como dados de entrada um banco de dados de ensaios realizados em manutenções preventivas, valores de referências, dados específicos sobre o equipamento e históricos das manutenções corretivas, fornecendo ao analista dados relevantes de forma que seja possível a sugestão de uma data para a próxima intervenção e alertas para os equipamentos que estejam com os valores fora da faixa de aceitação.

### **1.4 Estrutura da Dissertação**

Capítulo 2. Nesta etapa são desenvolvidos métodos de análise das oscilografias que possam gerar resultados confiáveis para a equipe de engenharia. Apresenta o desenvolvimento de um sistema computacional para classificação automática dos registros oscilográficos provenientes dos RDP instalados nas SE da CEMIG GT, propiciando rapidez, economia e efetividade na análise, em razão do grande volume de registros gerados pelas mais diferentes causas.

Capítulo 3. Foi desenvolvido um modelo matemático que relaciona o número máximo permitido de operações em função da corrente interrompida, compatível com as diferentes metodologias propostas por diferentes fabricantes. A validação do modelo foi feita com base em um estudo comparativo do critério específico indicado pelo fabricante com o critério proposto neste trabalho, para modelos de disjuntores de diferentes meios de extinção, diferentes tensões nominais e de diferentes fabricantes e anos.

Capítulo 4. A operação automática e a validação do método proposto são testados e validados, como sendo possível determinar a vida útil residual dos disjuntores estudados. O processo de manutenção é acionado quando o valor estipulado cai abaixo de um determinado limite aceitável.

Conclusão5. A implementação da nova metodologia reduz o custo de manutenção dos disjuntores, tendo em vista que a vida útil das câmaras é otimizada e a revisão ocorre no momento adequado. Além da otimização do período de manutenção, a disponibilidade do equipamento é maximizada e o risco de falha decorrente de intervenção para manutenção é reduzido.

## 2. Enquadramento

O sistema de proteção é constituído por diversos equipamentos, onde cada qual tem sua função. De forma simplificada, pode-se dizer que o sistema de proteção é formado por disjuntores, relés de proteção e transdutores de corrente e tensão. Os transdutores são os responsáveis por reduzir os sinais de corrente e tensão a valores que possam ser lidos pelos relés, que por sua vez são os responsáveis por gerar um sinal que comanda a abertura do disjuntor em caso de alguma falha no sistema protegido, quando só então a corrente de defeito é eliminada.

Os equipamentos designados para esse fim são denominados de oscilógrafos, que quando interligados remotamente a computadores dedicados à aquisição de dados, configuram as chamadas redes de oscilografia, Figura 2.1.

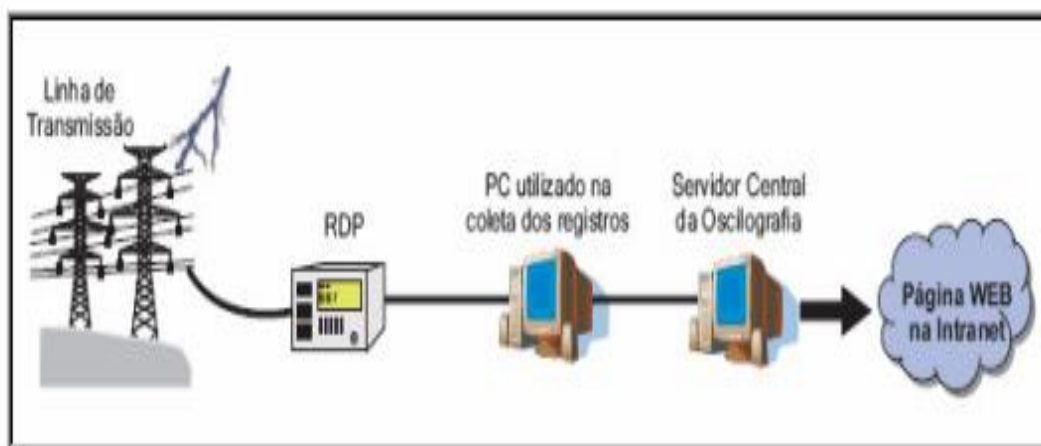


Figura 2.1 - Estrutura básica de uma rede de oscilografia

De um modo geral, o sistema faz a detecção e classificação de transitórios presentes no evento sob análise, provenientes de anormalidades no sistema de medição tais como circuitos secundários de Transformador de Corrente (TC) e Transformador de Tensão (TT), informação essa incorporada na Unidade de Análise Numérica (UAN) da CEMIG, que exibe um relatório para o operador a informar da classificação obtida pelo sistema. Armazena resultados obtidos num banco de dados e disponibiliza vários dados calculados durante a detecção e classificação do evento, ficando os registros para outras possíveis aplicações.

## 2.1 Disjuntores

Uma falha na operação de um disjuntor quando este deveria atuar para a remoção de uma falta em equipamento próximo, pode ter consequências catastróficas para o equipamento protegido, para o próprio disjuntor, e inevitavelmente amplia a área a ser desligada para interrupção do defeito, prejudicando a seletividade do sistema de proteção.

Os disjuntores possuem capacidade de fecho e abertura, para qual deve atender a todos os pré-requisitos de manobra sob condições normais e anormais de operação. Para além dos estados estacionários (fechado e aberto), definem-se os estados transitórios da manobra de fecho (ligar) e da manobra de abertura (desligar).

Quando o disjuntor é ligado ou fechado, o disjuntor deve suportar a corrente nominal da linha, sem ultrapassar os limites de temperatura permitidos. No estado desligado ou aberto, a distância de isolamento entre contatos deve suportar a tensão de operação, bem como as sobretensões internas, devidas a transitórios de manobra ou descargas atmosféricas.

Ao realizar a manobra de fecho, o disjuntor deve, no caso de curto-circuito, atingir corretamente a posição de fechado e conduzir a corrente de curto-circuito. No caso de abertura, o disjuntor deve dominar todos os casos de manobra possíveis na rede na qual está instalado.

Frequentemente os disjuntores estão instalados há algum tempo e permanecem meses a fio no estado estacionário ligado, conduzindo a corrente nominal sob condições climáticas de temperatura variáveis. Também estão expostos a agentes atmosféricos agressivos para vários dos seus componentes e outras condições adversas. Mesmo com todo esse tempo de inatividade operacional mecânica, o disjuntor deve estar pronto para interromper correntes de curto-circuito, sem o menor desvio das especificações.

Percebe-se então que uma fiabilidade total é exigida dos disjuntores de potência e deve ser consequência de um projeto e de um controlo de qualidade extremamente rigorosos. Este vai desde a relação de matérias primas, até passar pela revisão de entrada, ensaio de materiais, controlo dos processos de fabricação, ensaios de subconjuntos, até os ensaios finais.

Normalmente, a manutenção em disjuntores do sistema de energia elétrica é realizada tendo como base alguns dados do fabricante do equipamento, como por exemplo, o número de

atuações/interrupções, e alguns critérios estabelecidos empiricamente por normas especializadas pelos fabricantes e empresas concessionárias.

Muitas vezes essa manutenção é realizada precocemente, desperdiçando tempo e dinheiro pois as empresas, perante a ausência de dados mais precisos, adotam uma postura mais conservadora no que se refere ao período entre manutenções.

As primeiras pesquisas sobre falhas em disjuntores que foram realizadas pelo Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos (CIGRÉ) [8] entre 1974 e 1977 e os resultados apontaram para a predominância de defeitos originados por fatores mecânicos com 70 % do total. Entre 1988 e 1991 pesquisas fomentaram um novo relatório do CIGRÉ [9] sobre falhas em disjuntores com extinção por Hexafluoreto de Enxofre - (SF<sub>6</sub>), novamente destacando-se o mecanismo de operação como principal fonte de falhas, agora com cerca de 44 % do total. A redução elevada de 70 % para 44 % pode ser melhor compreendida levando em conta que na última pesquisa do CIGRÉ foram considerados apenas disjuntores a SF<sub>6</sub>.

### **Disjuntores a SF<sub>6</sub>**

No domínio de alta tensão, atualmente são utilizados majoritariamente disjuntores a SF<sub>6</sub>, apresentado na Figura 2.2, na medida em que essa tecnologia de extinção exige menos energia para extinguir o arco elétrico, reduzindo esforços nos componentes dos mecanismos e conseqüentemente suas falhas.

As características elétricas dos disjuntores a SF<sub>6</sub> dependem da densidade do SF<sub>6</sub>, isto é, da quantidade de moléculas de gás existente num determinado volume. Com temperatura e volume constantes, um acréscimo de densidade significa um aumento de pressão do gás. Num compartimento, desde que a densidade seja mantida constante, a pressão varia de acordo com a variação da temperatura ambiente. Essa variação de pressão, contudo, não implica em alteração nas características elétricas do gás, já que não houve acréscimo ou decréscimo da quantidade de gás.

Sendo difícil monitorar-se diretamente a densidade do gás, este controle é feito por chaves de pressão em que as variações de temperatura são automaticamente compensadas. Estas chaves de pressão são conhecidas por monitores de densidade de gás [7].



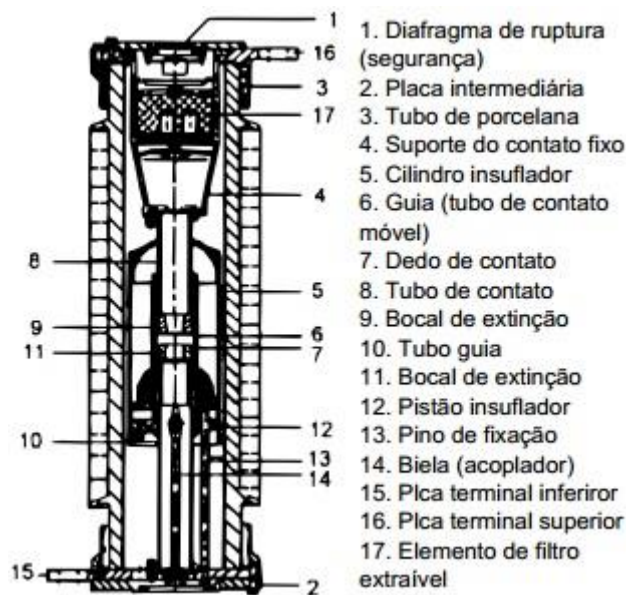


Figura 2.2 - Corte da câmara de interrupção de um disjuntor a SF<sub>6</sub> de pressão única

As principais razões que determinam a sua utilização em equipamentos de alta tensão são:

- Ser um excelente meio isolante;
- Possuir características favoráveis a interrupção da corrente elétrica.

A molécula do gás SF<sub>6</sub> tem uma estrutura simétrica, sendo, por isso, muito estável. A distribuição do potencial interno e as propriedades de absorção de energia resultam da natureza eletronegativa da molécula de SF<sub>6</sub> que capta os elétrons livres e retarda o fenómeno de avalanche que inicia a disrupção.

A rigidez dielétrica do SF<sub>6</sub> é cerca de 2,5 vezes a do ar a 1 atm de pressão e num campo elétrico homogêneo. Essa relação aumenta com o aumento da pressão. Comparados com o ar, possui uma eficiência para suprimir arcos cerca de 10 vezes maior. O tempo em que um arco é extinto no SF<sub>6</sub> é 100 vezes menor que no ar, sob condições similares. Apresenta ainda as características de ser auto-regenerável e de não formar depósitos de material condutor, após a extinção do arco.

A estabilidade do SF<sub>6</sub> pode ser perturbada quando a quantidade de humidade no gás estiver acima de determinado nível. O decréscimo da tensão suportável ao longo da superfície dos

materiais isolantes no gás, e a formação de produtos que atacam os materiais usados nos disjuntores, são fenômenos que devem ser considerados.

## 2.2 Visão geral sobre Oscilografia

As oscilografias, Figura 2.3, são arquivos que armazenam valores da corrente e tensão analógicas e digitais durante um período que engloba transitórios do sistema de transporte/distribuição de energia elétrica.

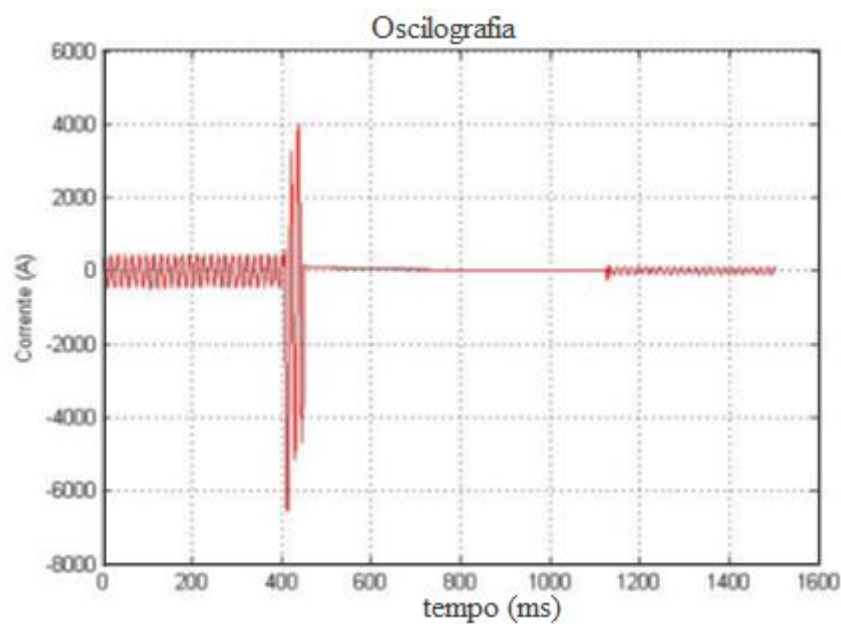


Figura 2.3 - Exemplo de uma oscilografia do sistema de transporte de energia

Estes arquivos são de fundamental importância para o sistema de transporte, pois permitem: Análise da qualidade da energia (queda de tensão, variação de potência); Classificação da perturbação sofrida pelo sistema; Localização do local de falta; Auxílio em processos que visem a isenção de responsabilidade da empresa pelas ocorrências.

No fluxograma a seguir, Figura 2.4 é apresentado a sequência e o funcionamento do sistema OSCILO.

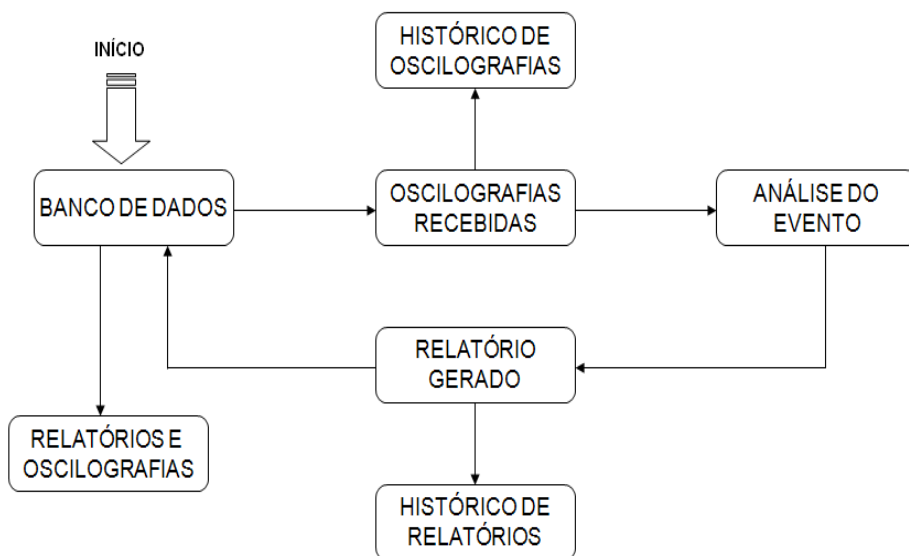


Figura 2.4 - Fluxograma da sequência e funcionamento do sistema OSCILO

O bloco “Análise do Evento”, que representa o processo realizado na análise das oscilografias pode ser subdividido, em:



Figura 2.5 - Rotinas da função análise do evento

A classificação do evento, de acordo com filtros pré-determinados, implementados na SAPNET, Figura 2.6, visa agilidade e fiabilidade no atendimento em tempo real de perturbações pelo Centro de Operação (CO) e na análise pelos especialistas de proteção pois na maioria das vezes os RDP sofrem disparos indevidos, ora pela complexidade do sistema, ora pelo mau ajuste do ponto de referência.

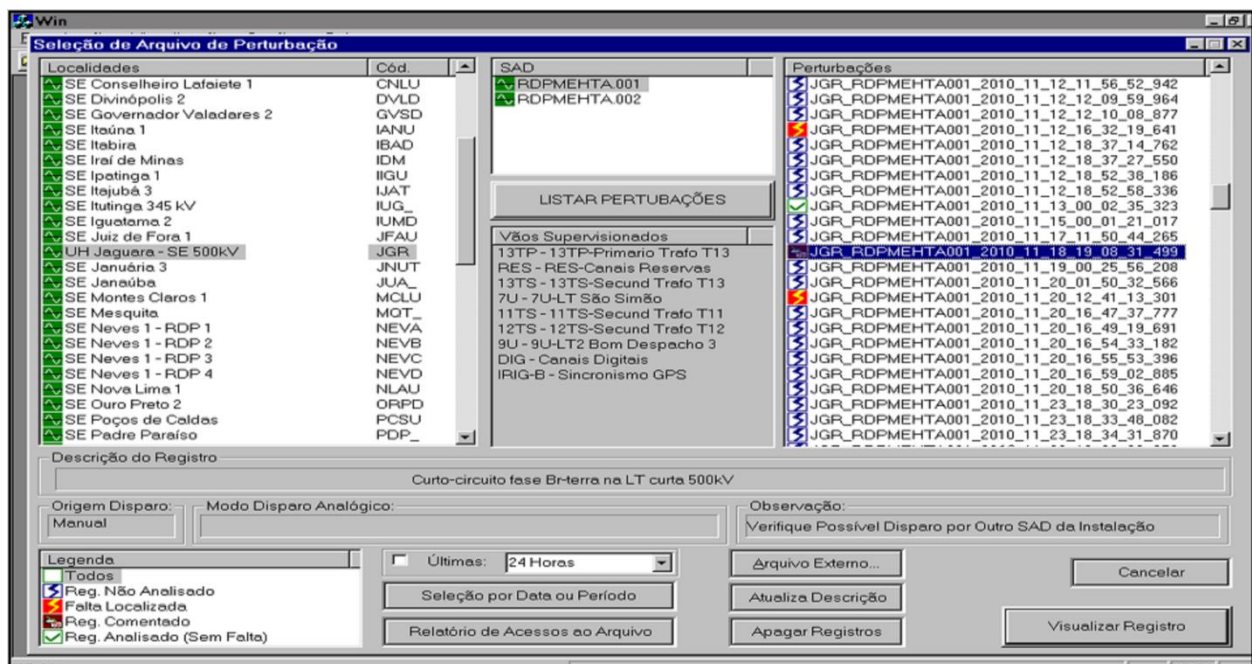


Figura 2.6 - Ecrã de abertura do Sistema SAPNET

Se durante a classificação do evento, se chegar à conclusão da existência de falta numa Linha de transporte, o módulo de localização de faltas é automaticamente acionado, utilizando dados de um ou dois terminais, de acordo com a disponibilidade.

O módulo de tratamento de dados disponibiliza ao utilizador diversos gráficos e informações tais como: formas de onda de tensão e corrente amostradas pelos registradores; gráficos dos canais digitais; módulos e ângulos dos fasores estimados; componentes sequenciais das correntes e tensões; gráficos de média, mediana e desvio padrão dos dados amostrados; cursores separando os intervalos de análise; detalhamento individual dos dados amostrados (zoom); dados obtidos do arquivo de configuração. Além disto, oferece opções para manipulação dos arquivos

COMTRADE, tais como seleção dos canais para análise, conversão de formato binário para ASCII, geração de arquivos a partir do arquivo original contendo somente os canais analógicos e digitais de interesse, normalização das escalas, representação das grandezas analógicas referidas ao primário ou secundário dos transformadores (TT e TC) e outras funções acessórias de menor importância.

Na versão atual, há o acionamento de outro módulo que calcula a corrente interrompida e acumulada por fase e também por disjuntor, segundo uma metodologia pré-estabelecida. Essas

informações armazenadas neste sistema de gestão de oscilografias, OSCILO, finalmente fazem parte de um banco de dados com diversas opções de pesquisa entre os quais houve a necessidade de criar uma metodologia para utilizar os registros na determinação do tempo de vida útil da câmara do disjuntor, fazendo uso dos dados das correntes filtradas e da corrente fasorial, ao calcular a corrente acumulada interrompida pelos disjuntores do sistema de transporte e que resulte em ganhos para as empresas de energia.

## 2.3 Leitura do Registro Oscilográfico

A utilização do OSCILO agiliza o processo de análise de cada um dos registros economizando tempo e trabalho dos especialistas. Além disso, alguns fenômenos que passavam despercebidos durante o processo de análise de ocorrências, podem ser verificados, analisados e inclusive melhorados, propiciando rapidez, economia e efetividade na análise, em razão do grande volume de registros gerados pelas mais diferentes causas.

Na Figura 2.7 tem-se um sistema simplificado de comunicação de dados entre uma SE e o Centro de Controle (CC). Na ocorrência de um evento, o arquivo é enviado para análise pelos especialistas, através de um canal de comunicação.

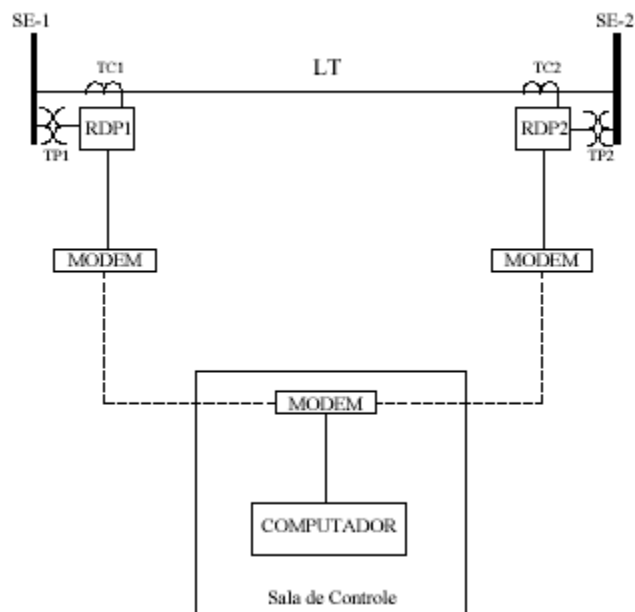


Figura 2.7 - Sistema de Comunicação

No caso de distúrbios simulados, o arquivo tem formato ASCII do tipo “.out” de saída do ATP. Em casos reais oscilografados é utilizado o padrão COMTRADE [14]. Destes arquivos, Figura 2.8, devem ser previamente removidas as linhas referentes aos dados de entrada e quaisquer comentários, mantendo um mesmo intervalo de amostragem, como exposto a seguir, ao ser apresentada parte de um arquivo de dados de entrada.

N	t	va	vb	vc	ia	ib	ic
00	0.0000E+00	-5.16644E+01	-4.72805E+02	5.24469E+02	5.96381E-01	-5.72637E-01	-2.37434E-02
02	1.0000E-04	-2.99184E+01	-4.84992E+02	5.14911E+02	6.07899E-01	-5.58739E-01	-4.91600E-02
04	2.0000E-04	-8.13793E+00	-4.96501E+02	5.04639E+02	6.18554E-01	-5.44048E-01	-7.45055E-02
06	3.0000E-04	1.36534E+01	-5.07306E+02	4.93652E+02	6.28329E-01	-5.28585E-01	-9.97441E-02
08	4.0000E-04	3.54243E+01	-5.17391E+02	4.81967E+02	6.37212E-01	-5.12370E-01	-1.24841E-01
10	5.0000E-04	5.71449E+01	-5.26742E+02	4.69597E+02	6.45189E-01	-4.95427E-01	-1.49762E-01

Figura 2.8 – Arquivo de dados de entrada

A primeira coluna refere-se aos instantes, a segunda, aos tempos (em segundos), da terceira à quinta, tensões de fase (em kV) e da sexta à oitava, correntes (em kA). Do arquivo de configuração (.cfg) no formato COMTRADE [14] do caso a ser analisado, são extraídas importantes informações que permitem a correta interpretação dos dados a serem analisados, como o número de canais analógicos e digitais, quantidade de amostras, relações de transformação, taxa de amostragem.

## 2.4 Processamento dos Dados

### Filtragem anti-aliasing

Sinais AC que variam rapidamente requerem muitas vezes filtros anti-aliasing. O filtro anti-aliasing é um filtro passa-baixo que apresenta uma frequência de corte bem definida, eliminando assim completamente todas as componentes de frequência que são maiores que a largura de banda do componente de aquisição de dados.

De modo a melhorar a exatidão da estimativa do ponto de falta, há que considerar o processo de filtragem para obtenção dos fasores.

Durante o registro realizado por RDP e relés, há a possibilidade da presença de altas frequências nos dados armazenados. Estas altas frequências não são de interesse para o processo de estimação dos fasores referentes à frequência fundamental de 60 Hz. A fim de evitar erros durante estimação fasorial é utilizado um filtro digital passa-baixo de 2ª ordem de Butterworth cuja frequência de corte é 100Hz.

### Estimativa dos fasores

Por se tratar de grandezas senoidais, a corrente e a tensão podem ser representadas por um fasor, ou seja, por um módulo e um ângulo. A transformação dos dados amostrados no tempo pelos RDP para fasores é importante para diversos estudos, como análise no domínio da frequência, componentes sequenciais, valores eficazes, dentre outros.

O processo de obtenção dos fasores para uma frequência específica a partir de uma onda no domínio do tempo é chamado de estimação de fasores.

Uma metodologia usada para estimação de fasores é a aplicação de uma janela de amostras que permita a obtenção do fasor em determinada frequência, e que é feita pela movimentação dessa janela ao longo da onda no domínio do tempo, de modo a obter um fasor para cada posição da janela na onda.

### Mínimos Quadrados

Para a estimação dos fasores fundamentais de 60 Hz era utilizada uma variação do método de erros mínimos quadrados, inicialmente proposto por SACHDEV e BARIBEAU [15], com uma janela de dados de 1 ciclo, utilizando 16 pontos por ciclo.

A Figura 2.9, mostra a resposta em frequência do filtro de mínimos quadrados, para a janela de dados de um ciclo, 16 pontos por ciclo, considerando os dois primeiros termos da componente contínua e os termos da resposta fundamental.

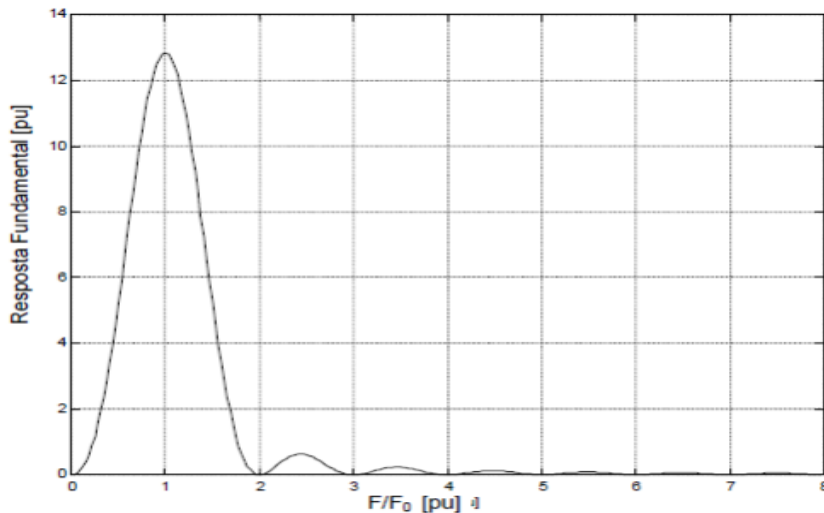


Figura 2.9 - Resposta em frequência do filtro dos erros mínimos quadrados

No gráfico da Figura 2.10 é mostrado o sinal de corrente e o valor de pico correspondente ao seu fasor estimado, após as circunstâncias propícias. Pode-se notar que os valores estimados pelo algoritmo são precisos em regime permanente, mas com diferenças no primeiro ciclo após o início de um curto-circuito.

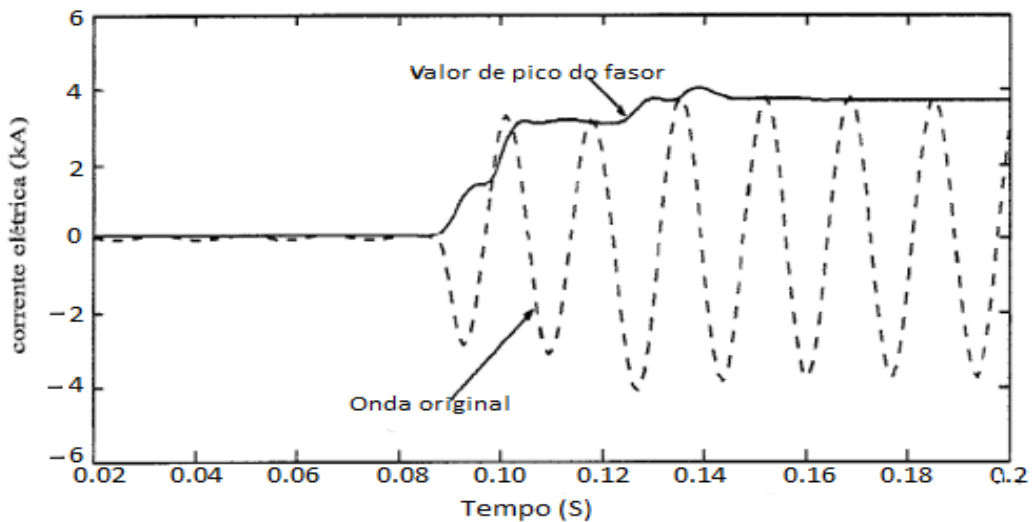


Figura 2.10 - Curva original e o pico do fasor estimado

## 2.5 Detecção dos Períodos

Uma das primeiras etapas realizadas pelo sistema consiste na determinação dos períodos existentes no registro oscilográfico, classificados como:

- Período pré-falta: sistema normal;



- Período falta: curto-circuito;
- Período pós-falta: após a eliminação do curto-circuito, tempo morto religação automática;
- Outros: religação automática da LT, etc.

A determinação dos períodos do registro oscilográfico baseia-se principalmente na análise das grandezas analógicas de tensão e corrente do registro. A análise do evento é feita separadamente por intervalos, ou seja, são identificados os instantes em que houve alterações, para que se chegue a uma conclusão sobre a situação do mesmo e a um diagnóstico completo do evento registrado.

Os cursores limitadores de intervalos são inseridos automaticamente, nos instantes de transição, o que torna possível a classificação da perturbação por intervalos.

A Figura 2.11 apresenta os resíduos obtidos sobre os dados de correntes para uma oscilografia em específico. Pode-se ainda verificar, devido a presença de picos, a presença das fases B, C e neutro durante a perturbação [16].

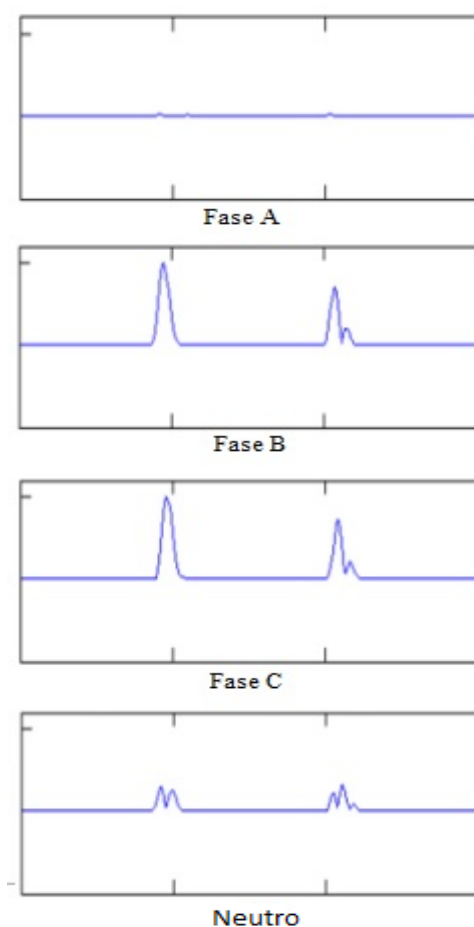


Figura 2.11 - Apresenta os dados de corrente obtidos

Na Figura 2.12 tem-se o fasor corrente, obtido através da utilização do método dos Mínimos Quadrados utilizando um ciclo, e a corrente filtrada [16].

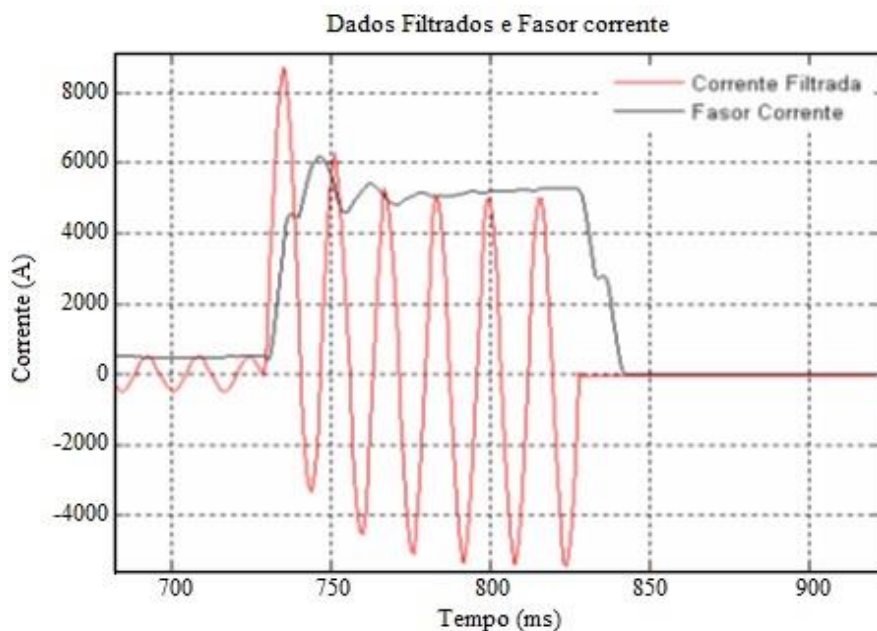


Figura 2.12 - Corrente filtrada e fasor corrente durante transitório no sistema.

A análise realizada pelo sistema gerenciador de oscilografias insere cursores para limitar o início e o fim de cada transitório presente no evento.

É feita a identificação do ponto de inserção dos cursores, Figura 2.13, pelo sistema gerenciador de oscilografias, baseada no resultado obtido da aplicação do método dos resíduos às correntes do evento.

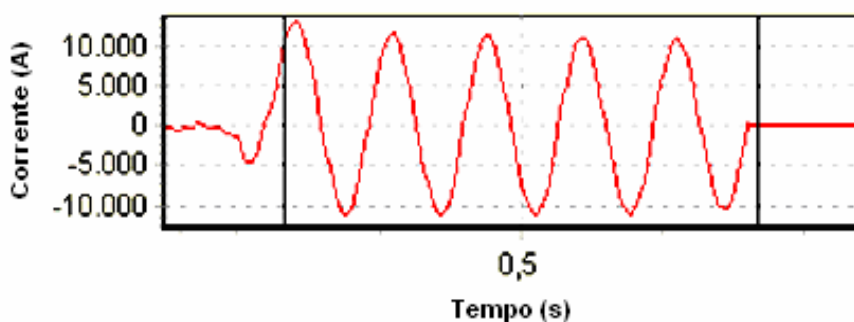


Figura 2.13 - Posicionamento dos cursores inseridos automaticamente pelo - OSCILO.

Existe um desvio em relação ao ponto ótimo (passagem por zero), no entanto esse desvio não tem efeito relevante sobre a classificação do evento, mas vai interferir significativamente

durante o cálculo da corrente interrompida pelo disjuntor, pois vai inserir valores nulos de corrente antes do ponto definido como instante da interrupção completa do arco elétrico pelo disjuntor.

Para minimizar este efeito e melhorar a detecção do instante de abertura do disjuntor, tem-se o método de ajuste de cursores para realizar o ajuste.

O método faz uso das correntes filtradas do fasor corrente e do ponto de inserção do cursor pelo sistema gerenciador de oscilografias (cursor automático).

Esta ilustrado nas Figuras 2.14, 2.15, 2.16 e 2.17 a seqüência de passos realizados pelo método de ajuste de cursores com o intuito de encontrar o ponto ótimo para localização do cursor.

1. Posição inicial do cursor de fim de abertura do disjuntor. É visível o atraso no posicionamento inicial do cursor.

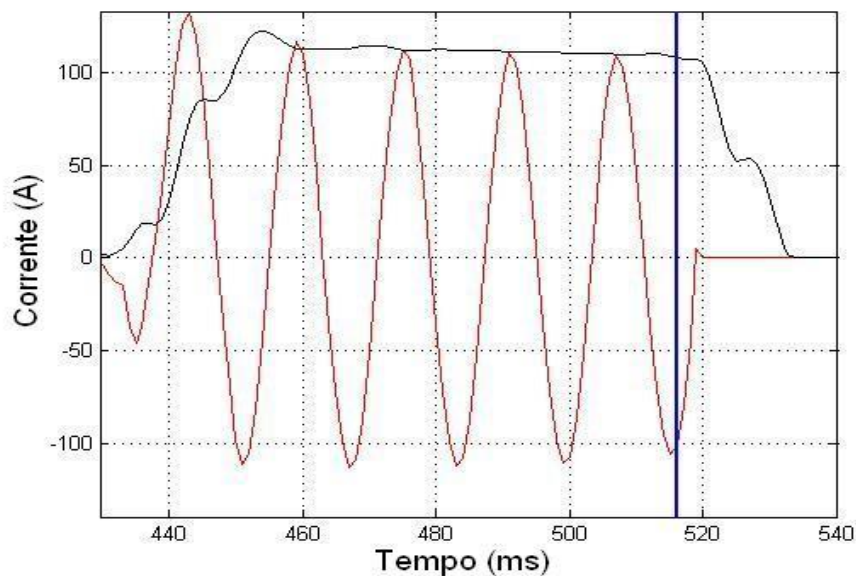


Figura 2.14 - Suposta posição inicial cursor inserido automaticamente.

2. Temos a posição do cursor após deslocamento em busca do “zero” da corrente fasorial.

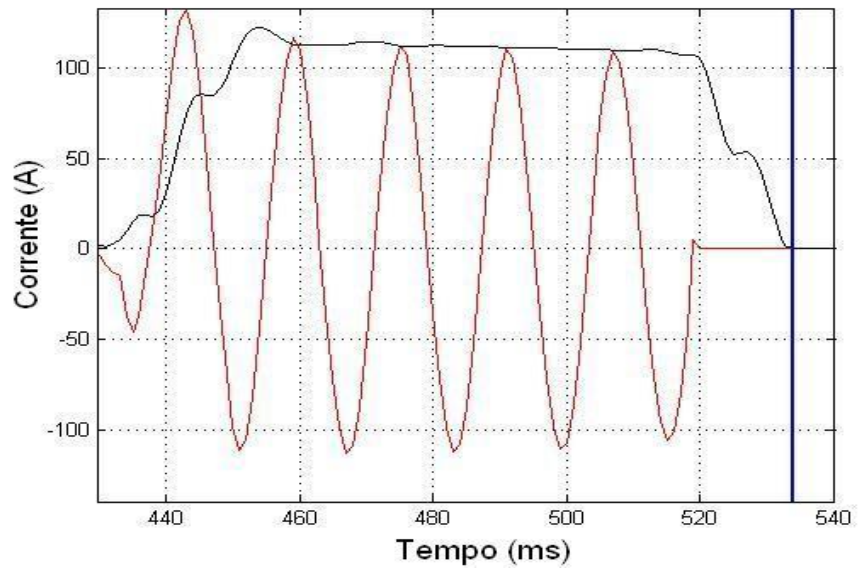


Figura 2.15 - Instante corrente fasorial atende aos critérios pré-estabelecidos.

3. Temos a posição do cursor após deslocamento para esquerda em busca do ponto em que o valor do módulo da corrente filtrada se equipara a um valor limite pré-estabelecido.

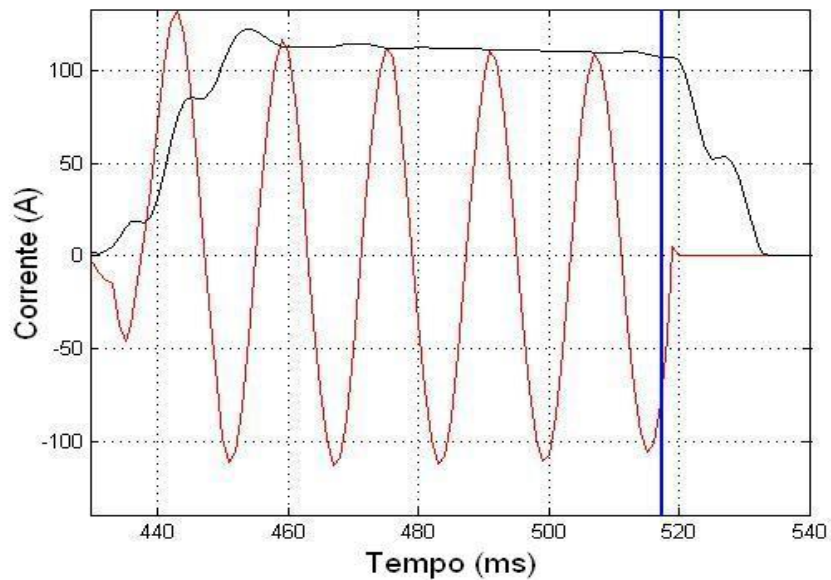


Figura 2.16 - Instante que módulo da corrente filtrada atende critérios de comparação.

4. Temos a posição final do cursor.

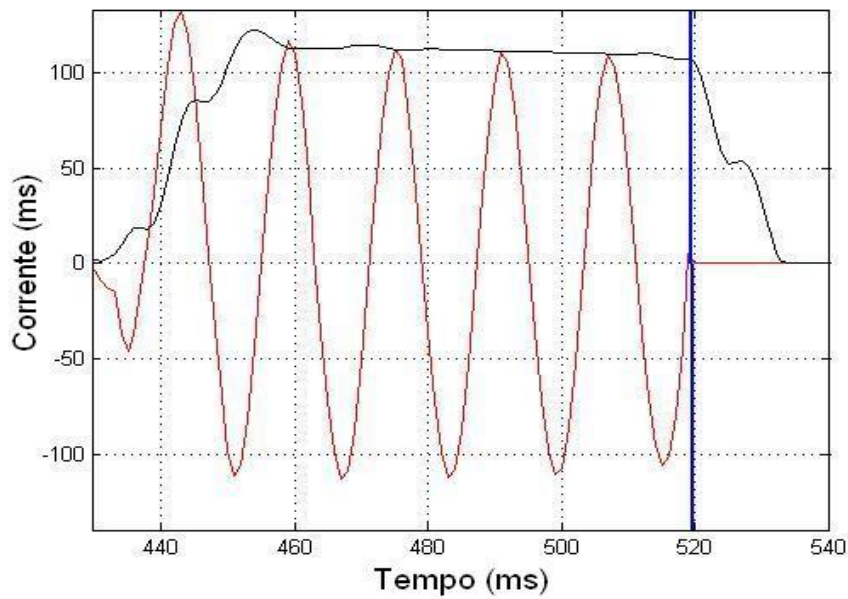


Figura 2.17 - Posição final do cursor de fim abertura de disjuntor.

O programa utiliza o método dos Mínimos Quadrados tanto nas correntes como nas tensões, mas com diferentes ajustes para cada um. Nas Figuras 2.18, 2.19 e 2.20 têm-se um exemplo da atuação de cada um dos métodos num caso real.

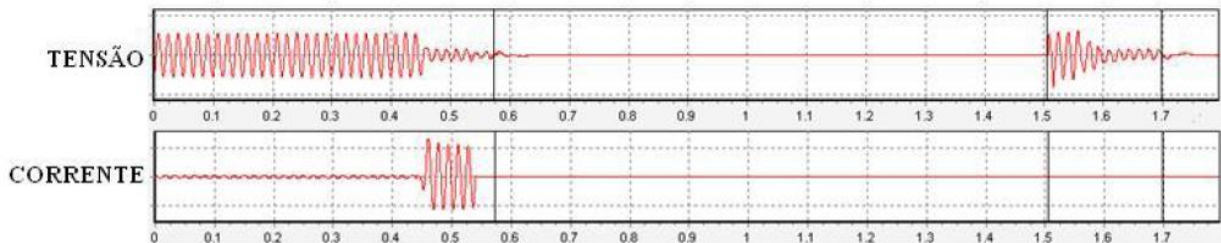


Figura 2.18 - Método Mínimos Quadrado aplicados a tensão

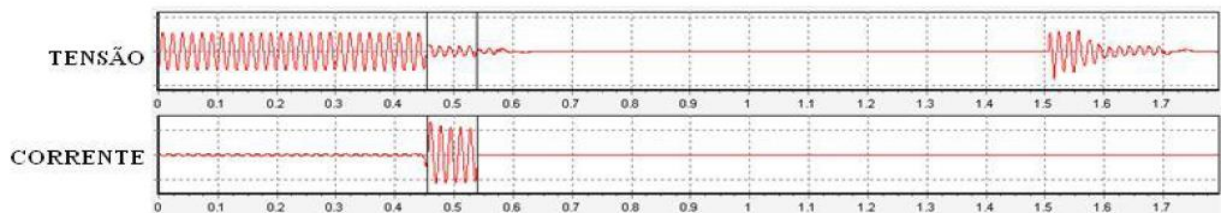


Figura 2.19 - Método Mínimos Quadrado aplicado a corrente

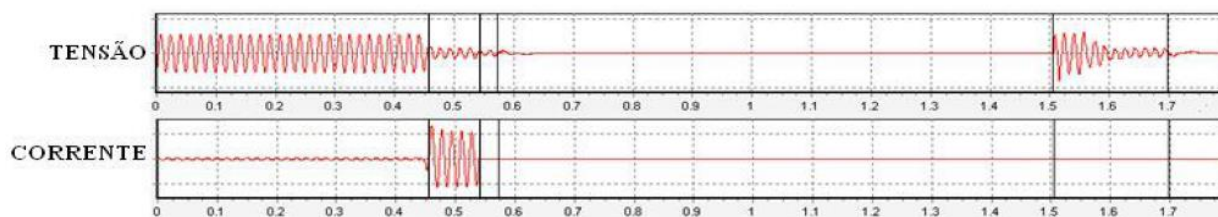


Figura 2.20 - União dos métodos Mínimos Quadrado tensão e corrente

Observando a Figura 2.20, é possível perceber que o programa indicou corretamente 6 intervalos na oscilografia:

- 1- Situação normal
- 2- Falta
- 3- Extinção da corrente (atuação da proteção do outro terminal da linha)
- 4- Abertura da tensão (atuação da proteção da subestação)
- 5- Tentativa de religação
- 6- Falha na religação

O relatório gerado contém as principais informações obtidas pela análise, sendo este alocado num banco de dados que permite o acesso a qualquer caso já registrado, fornecendo os resultados e possibilitando a visualização de gráficos e formas de onda.

O OSCILO faz uso do método do monitor de transitórios, Figura 2.21 [14], onde através dos registros provenientes da SAPNET, compara as ondas amostradas de tensão e corrente com ondas reconstituídas a partir dos fasores estimados para cada instante.

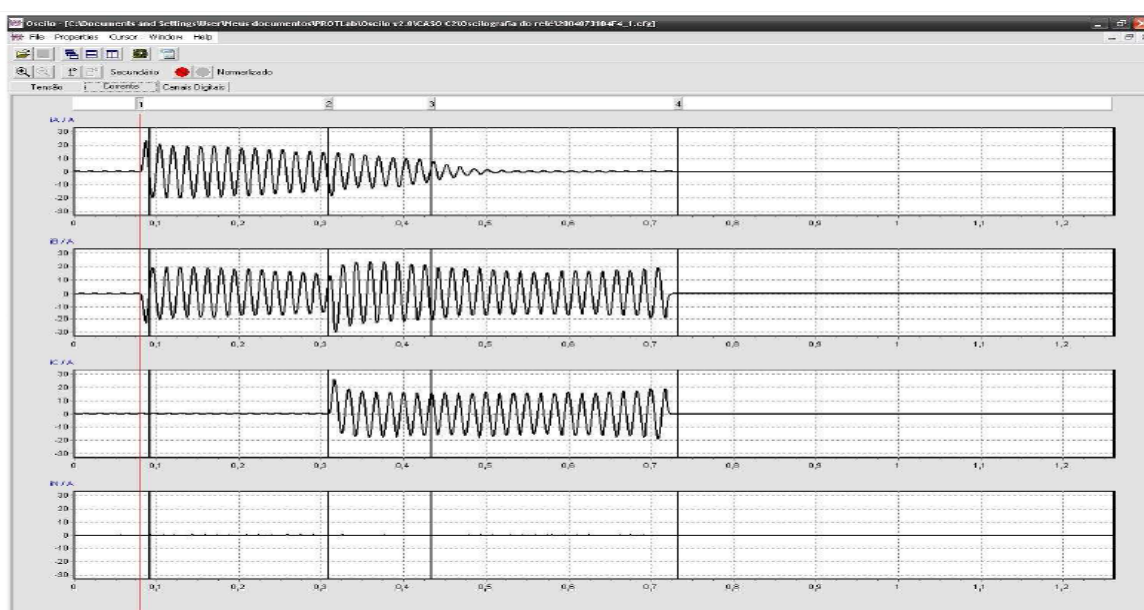


Figura 2.21 - Ecrã do OSCILO mostra o posicionamento dos cursores



## 2.6 Classificação dos Períodos

A classificação de eventos, prossegue-se de acordo com filtros pré-determinados implementados na SAPNET e experiência dos especialistas de proteção da CEMIG.

Após a análise de todos os intervalos, é realizada uma classificação final para o evento, com base nos resultados obtidos para cada trecho. Esta classificação define a situação observada pelo programa na oscilografia analisada.

Basicamente são utilizados critérios clássicos baseados em mudanças das correntes, tensões, impedâncias vistas da barra e alguns critérios específicos decorrentes da experiência do pessoal da CEMIG na análise de eventos. Alguns tipos de eventos já são reconhecidos pelo programa como: Fases envolvidas em falta; Abertura de disjuntor; Religação; Falta de fase; Sobrecorrente; Sub/Sobretensão; Falso disparo; Falta evolutiva [19].

A seguir, Figura 2.22, o exemplo de um evento registrado pelo SAPNET e analisado pelo programa OSCILO, com o posicionamento dos cursores e relatório anexo.

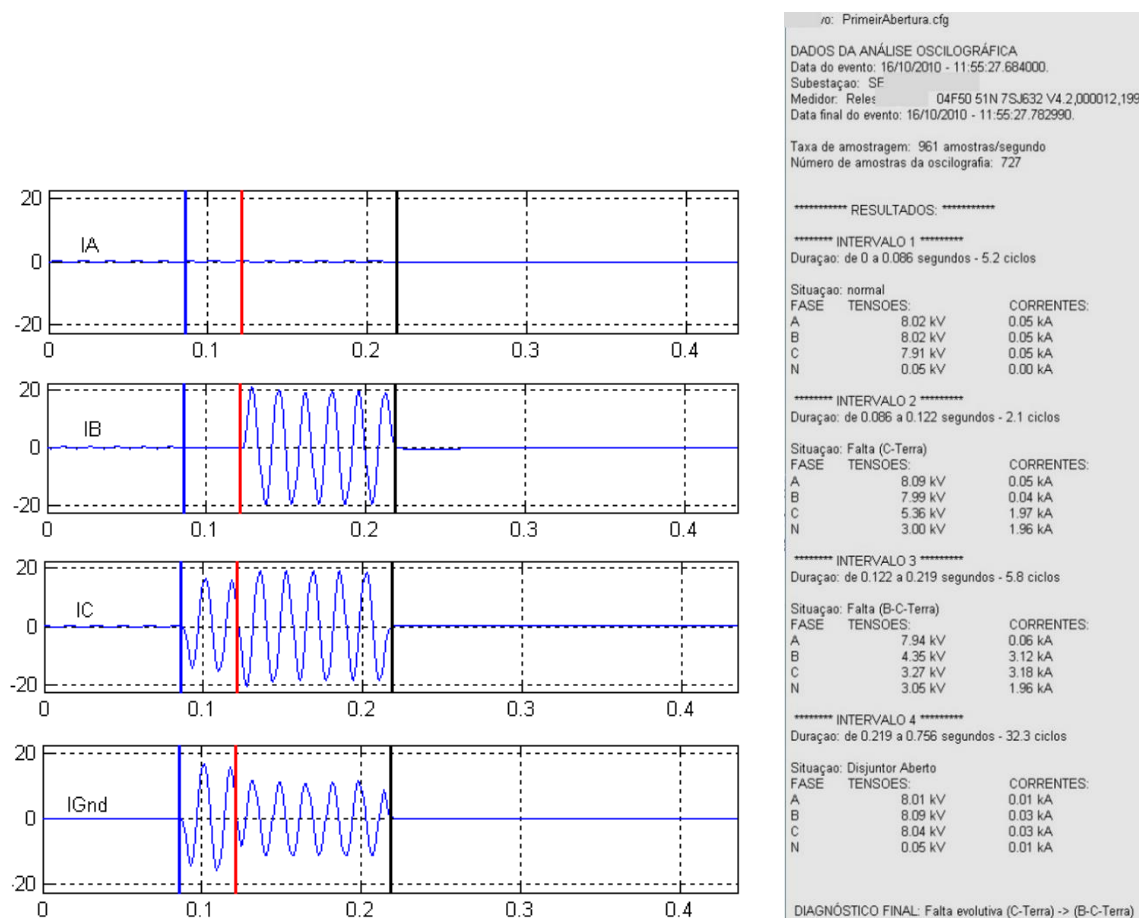


Figura 2.22 - Oscilogramas e relatório de oscilografia com falta CT a evoluir BCT

### Período Pré-falta

A classificação do período pré-evento é feita pela verificação da existência de corrente e tensão equilibradas nas 3 fases, Figura 2.23.

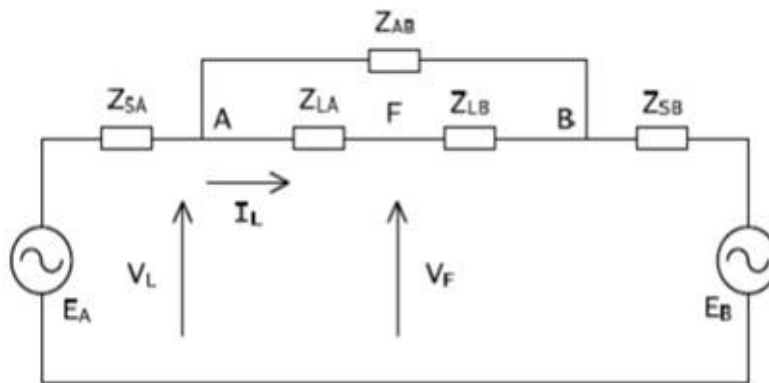


Figura 2.23- Circuito Unifilar em período pré-falta

A Figura 2.23 mostra um circuito equivalente a um sistema monofásico, pré-falta, no qual as fontes  $E_A$  e  $E_B$  constituem-se de partes do sistema representadas pelos seus equivalentes de Thevenin. A linha de transporte entre as barras A e B é representada pelas impedâncias  $Z_{LA}$  e  $Z_{LB}$ .

### Período de Falta

A classificação do tipo de falta, caso exista, baseia-se na existência de sobrecorrentes, subtensões, correntes e tensões de desequilíbrio quando detetadas.

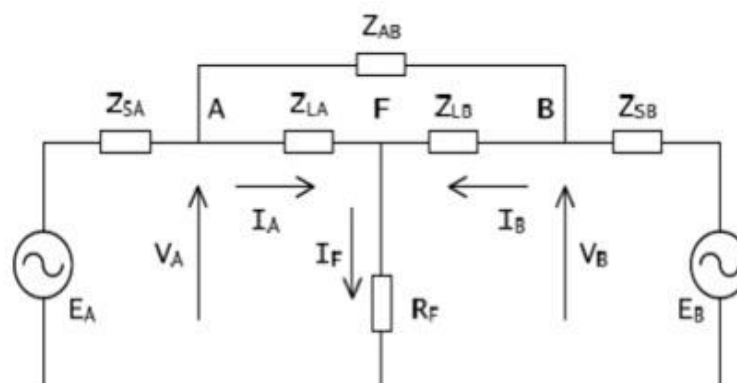


Figura 2.24 - Circuito Unifilar no instante falta.



## Período Puro-falta

O período de pós-evento (período após término do evento ou após a eliminação do curto-circuito, também chamado de tempo morto de religação) é caracterizado pela ausência de tensão e correntes acima de determinados valores;

### Religação automática satisfatório e não satisfatório

Já o período de religação automática da LT pode ser detetado através do surgimento das grandezas tensão e corrente dependendo se o terminal é "Líder" ou "Seguidor".

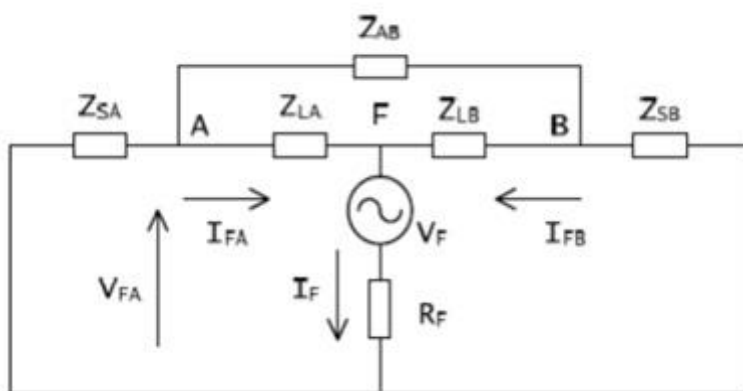


Figura 2.25 - Circuito Unifilar em período puro-falta

Um circuito puro de falta é apresentado na Figura 2.25, no qual se representam apenas as grandezas relacionadas com a falta. Utilizando-se do teorema da superposição, é possível provar que esse circuito pode ser representado pela diferença entre os outros dois circuitos apresentados nas Figuras 2.23 e 2.24 [24].

## 2.7 Banco de Dados

Após todas as etapas anteriores, é então gerado um relatório que caracterize o evento analisado.

Devido ao grande número de casos que serão analisados pelo software, é necessário a utilização de um sistema para armazenamento dos arquivos de resultados gerados pelo software. Optou-se pela criação de um banco de dados utilizando o MySQL. A introdução deste sistema permite um fácil acesso aos resultados, quando houver necessidade [20].

## Entrada de dados

A entrada de dados dá-se através de um arquivo interno. Neste arquivo são salvos os dados gerados pelo programa de análise de oscilografias. A maneira como estes dados são inseridos pode ocorrer de duas formas diferentes:

I. Análise de casos realizado em momentos que o banco de dados não está a ser utilizado: os dados de todos os casos analisados serão armazenados até a hora em que o utilizador acede o banco de dados. Neste instante todos os casos armazenados no arquivo são inseridos no banco de dados e o arquivo é devidamente apagado para armazenamentos posteriores.

II. Análise de casos realizado em momentos que o banco de dados está a ser utilizado: os dados serão armazenados no arquivo interno até a hora em que o utilizador solicita a atualização. Para que o utilizador não tenha obrigação de saber se foi feita ou não atualização enquanto o banco estava a ser utilizado, será indicado ao utilizador que deve ser feita uma atualização. Se o utilizador se esquecer de pedir atualização enquanto está a usar o banco de dados e fechá-lo, as atualizações serão feitas quando for novamente aberto.

Na Fig. 2.26 tem-se uma tela do programa de banco de dados em desenvolvimento.

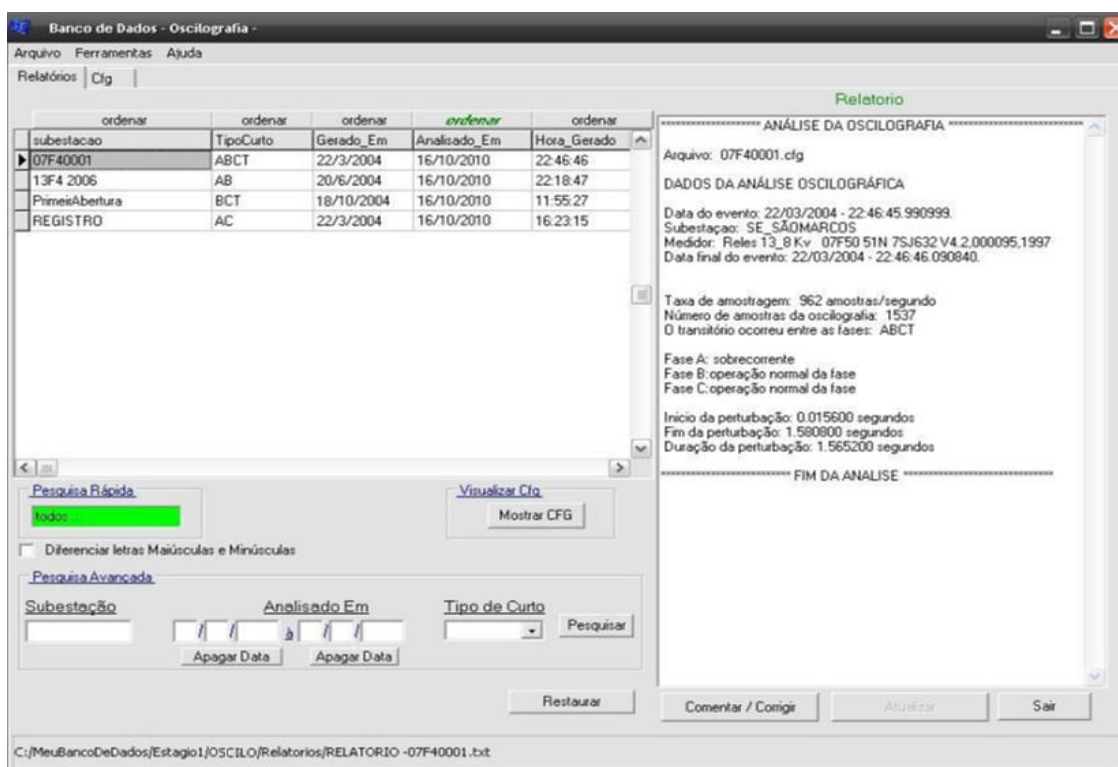


Figura 2.26 - Ecrã do banco de dados

## Pesquisas no Banco de Dados

### **Pesquisa rápida**

A pesquisa rápida é para situações onde não se tenha detalhes do evento procurado. Quando o critério para pesquisa é inserido, é feita automaticamente a busca por alguma palavra coincidente no banco de dados.

### **Preenchendo-se todos os campos da pesquisa avançada**

Caso o analista disponha de todos os critérios de pesquisa a respeito do caso a pesquisar, ele poderá então efetuar a pesquisa avançada completa. Esta permitirá a inserção dos três critérios de pesquisa: subestação, intervalo e tipo de curto. Quando o intervalo entra como critério de pesquisa seleciona-se apenas os eventos ocorridos entre a data inicial e a data final inseridas no campo Intervalo.

### **Campos em destaque**

Este foi outro detalhe observado durante o desenvolvimento das funções de pesquisa. Campos em destaque auxiliarão ao analista identificar qual pesquisa foi efetuada para a exibição da tela de resultados atual. Isso permite que um analista, que não esteja presente no momento da pesquisa, saiba quais critérios de seleção foram usados para exibição da atual tela de resultados, evitando repetição de trabalho.

## **2.8 Possíveis erros em Registros Oscilográficos**

### **Dupla ligação a terra e condutor partido**

A ligação à terra da subestação é projetada, em primeiro lugar, para satisfazer as condições de segurança e depois, para fornecer uma referência estável de tensão para a proteção dos sistemas.

O sistema de ligação à terra de uma subestação consiste de uma matriz de ligação à terra feita com condutores nus de grande secção, ligado num padrão de grade, e enterrados abaixo da subestação.

O solo deve ser testado em cada local e suas características utilizadas no projeto da malha de ligação a terra.

Todos estes condicionantes podem fazer com que a linha capte estes ruídos e os conduza para o transporte, tendo como consequência uma sensível redução na performance e fiabilidade dos sistemas de transporte.

Há que ter especial atenção aos ruídos de modo comum. Quando dois pontos de terra diferentes são ligados a um mesmo sistema, ocorre a circulação de correntes de terra, fazendo com que o ruído retorne ao sistema e vá ao instrumento receptor. Portanto, para evitar o dupla ligação a terra, deve-se somente aterrar a blindagem num único ponto de terra.

Muitas faltas nas linhas de transporte são temporárias. Nestes casos, a autoreligação da linha implica numa rápida restauração do sistema elétrico de potência. Tipicamente, o tempo morto referente a primeira religação é da ordem de 0,5 a 1,5s (30 a 90 ciclos em 60 Hz), mas pode ser frequentemente ajustado pelos engenheiros de planeamento [22]. Dados relacionados às faltas e as religações numa LT podem ser armazenados num único registro oscilográfico (múltiplos distúrbios).

## **3. Modelos**

### **3.1 Determinação de Topologia da Subestação**

O crescimento significativo da economia na região de Minas Gerais, Brasil, tem provocado um aumento substancial do mercado, resultando em desafios operativas para manter o sistema elétrico dentro dos padrões mínimos de qualidade, segurança e fiabilidade.

O desenvolvimento de novas topologias de subestações, linhas e redes aéreas, a quando da implantação, operação e manutenção; a redução do tempo de implantação de novos empreendimentos no sistema elétrico; o melhorar da performance e flexibilidade operacional do sistema elétrico; o saber usar com mais eficiência os recursos financeiros na expansão do sistema elétrico, podem melhorar a rentabilidade no negócio da Geração Transporte e Distribuição (GTD) das empresas do grupo CEMIG.

O projeto e a construção dos trechos de linhas de transporte e de subestações terminais devem estar em conformidade com as últimas revisões das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), no que for aplicável e, na falta destas, com as últimas revisões das normas da International Electrotechnical Commission (IEC), American National Standards Institute (ANSI) ou National Electrical Safety Code (NESC), nesta ordem de preferência, salvo onde expressamente é dito o contrário [30].

A nova subestação, Figura 3.1, a de Santos Dumont 2, 345 kV, é uma nova fonte de alimentação para a distribuidora local (CEMIG D), reduzindo a carga nas transformações 345/138 kV existentes, ao apresentar uma melhor solução técnica e económica para atender o crescimento de carga na região. A inserção da Subestação Santos Dumont 2 no sistema é apresentada a seguir.

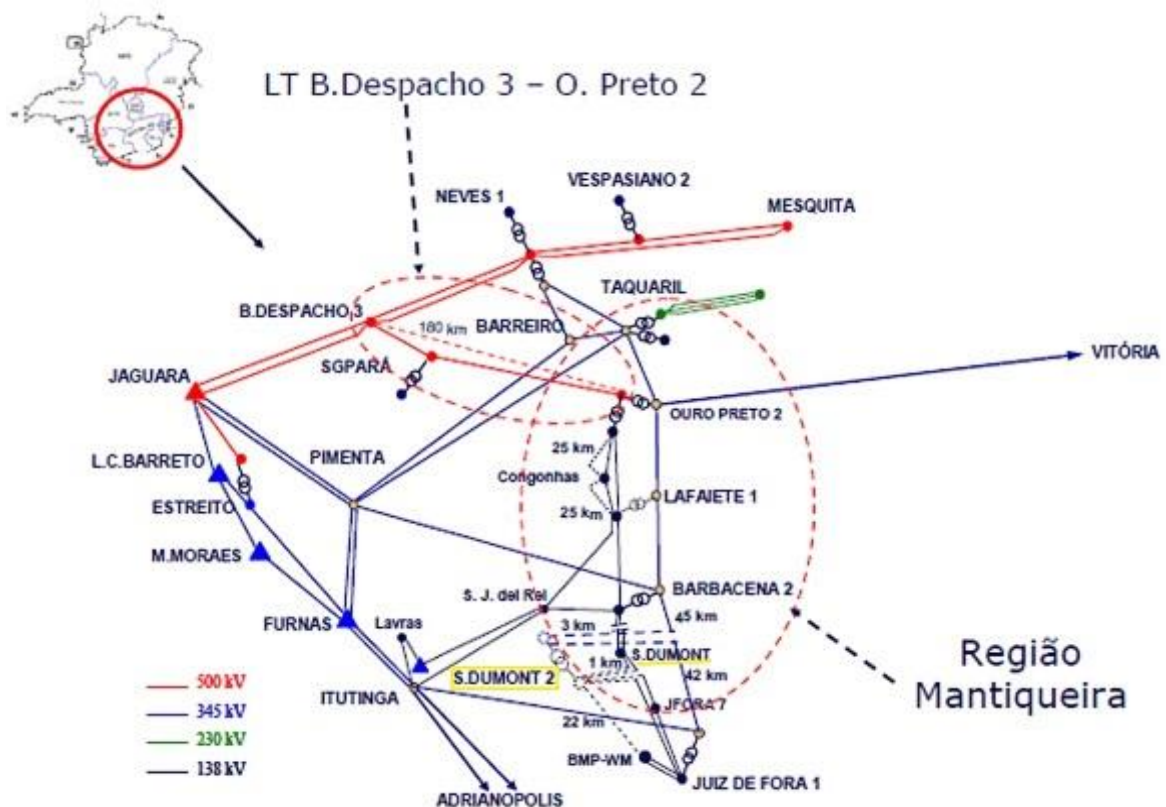


Figura 3.1 - Mapa do sistema de transporte da região

A Subestação Santos Dumont 2 tem acesso a Rede Básica do Sistema Interligado Nacional (SIN), mediante seccionamento da Linha de Transporte 345 kV Barbacena 2 – Juiz de Fora 1, com implementação de 1 banco de autotransformadores 345/138 kV de 375 MVA, na Subestação Santos Dumont, Figura 3.2.

A topologia básica a optar, neste caso, foi a Rede em Anel Aberto. Nesta configuração são usadas várias linhas de alimentação. Isto significa que dois possíveis caminhos elétricos podem suprir qualquer unidade consumidora, cada caminho é ativado a qualquer tempo, e a alimentação de retaguarda é dada pelo uso de outro anel. Esta configuração é em geral empregada em sistemas subterrânea e em áreas urbanas densamente populosas.

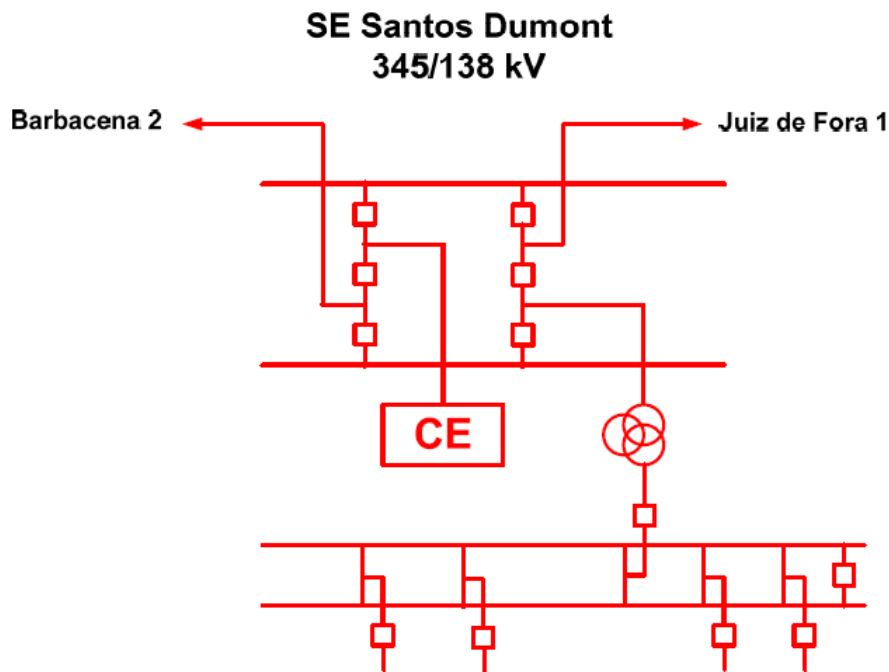


Figura 3.2 - Configuração de referência - Diagrama unifilar simplificado

O diagrama unifilar é a representação mais usual na análise de um sistema elétrico e o representa apenas por uma das suas fases. Destaca as formas de condução da energia no sistema, mas sem levar em consideração como são feitas as conexões, ajustes e comandos.

A frequência das inspeções depende fundamentalmente das condições locais, tipo de instalações, número de operações, posição estratégica na instalação, etc. Antes da manutenção há que ter em conta as normas de segurança.

### **3.2 Desgaste de contatos de disjuntor**

Até agora as práticas de manutenção adotadas são baseadas em intervalos de tempos fixos ou pela quantidade de manobras realizadas, indicadas através dos contadores de operação [26]. A manutenção, antes baseada no tempo, agora passa a considerar o estado do equipamento.

Manutenção por Tempo	Manutenção por Estado
Exige inspeção preliminar do equipamento, para levantar o estado do disjuntor.	Principais indicadores do estado do disjuntor obtidos online.
Possível realização de ensaios e testes desnecessários.	Intervenção precisa. A Manutenção atua somente onde realmente é necessário. Evita a inserção de novas falhas. Redução de custos e paralisações desnecessárias.
Possibilidade da manutenção ocorrer quando o equipamento já se encontra deteriorado.	O disjuntor não deixa de receber manutenção quando é necessário.
Fácil planeamento da manutenção.	Auxilia nos planeamentos e procedimentos de manutenção, ao agregar valor as análises de desempenho, fiabilidade e falhas.
Técnica consagrada.	Proporciona aumento da fiabilidade e segurança do sistema elétrico. Possibilita a antecipação ou prevenção da reconfiguração do sistema elétrico de potência
Não aproveita potencial do ativo de forma integral.	Com a manutenção adequada aumentam-se as chances de extensão da vida útil do equipamento.

Tabela 3.1 - Comparativo entre as filosofias de monitorização

Na falta de um valor mais preciso, o critério utilizado até então pela CEMIG GT para manutenção nas câmaras de extinção de disjuntores é baseado num método estatístico, estabelecido empiricamente com base na experiência da equipa técnica de manutenção, o que não reflete as reais condições no momento de abertura, ou seja, sendo o procedimento conservativo.

Nesse critério, o número limite de operações, Figura 3.3, de abertura de correntes de falta para execução da revisão do disjuntor é então determinado exclusivamente com base nos dados do equipamento e do local de instalação: tensão nominal de operação, meio de extinção e capacidade de interrupção simétrica do disjuntor e potência máxima de curto-circuito do barramento onde o equipamento está instalado. A partir desses dados, um número máximo de aberturas é pré-estabelecido e a revisão do disjuntor é realizada sempre que esse número é alcançado.

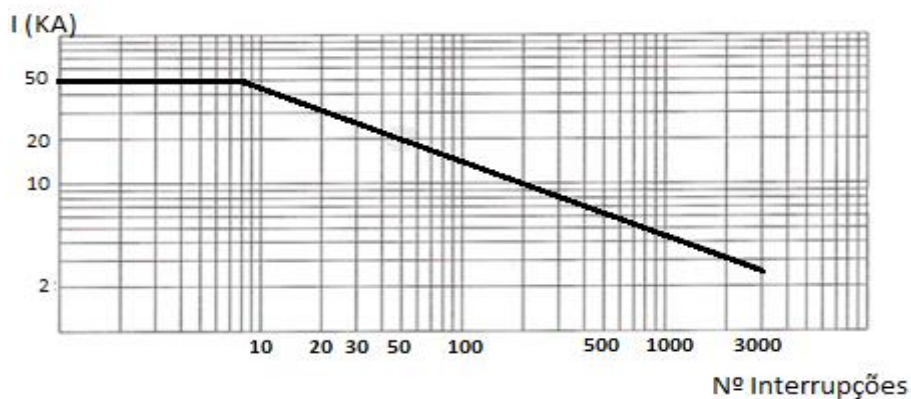


Figura 3.3 - Curva de limite de desgaste do disjuntor



Segundo estudos recentes realizados [29], ainda a falha na parte ativa dos disjuntores (contatos elétricos) representa uma percentagem entre 9,4 a 14% do total de falhas analisadas nestes equipamentos, assim, cresce a preocupação em medir o desgaste dos contatos elétricos dos disjuntores. A vida útil de um disjuntor não se limita apenas aos desgastes dos contatos elétricos, mas também a outros fatores como, por exemplo, o desgaste do conjunto mecânico.

Durante a interrupção das correntes de alta intensidade surge o arco elétrico entre os contatos do disjuntor. Para a extinção do mesmo, a abertura dos contatos deve ser projetada utilizando um método que promova a recuperação da rigidez dielétrica entre estes contatos, alongue o arco elétrico e arrefeça a região de arco.

No disjuntor, cada uma das três entradas de corrente dos enrolamentos no relé tem uma função separada da monitorização do disjuntor. Cada monitor do disjuntor calcula e acumula a corrente de cada polo. A monitorização do disjuntor deve comparar os dados publicados pelo fabricante do disjuntor com a corrente interrompida.

Cada vez que ocorre o disparo do disjuntor, a corrente interrompida deve ser integrada. Os disparos são segregados em disparos internos (iniciados pelos elementos de um enrolamento específico) ou disparos externos (iniciados por outra fonte). Um relatório de monitorização do desgaste do disjuntor deve relacionar todos os disjuntores, número de disparos internos e externos de cada disjuntor, corrente RMS total acumulada por fase e desgaste percentual por polo.

Tendo em vista a disponibilização das magnitudes das correntes de falta, medidas via RDP nas subestações, e a necessidade de padronização nas informações fornecidas pelos fabricantes de disjuntores nos seus manuais, é proposto uma nova metodologia de manutenção.

Critério de manutenção do disjuntor 3AP1 FG, fabricado pela Siemens, ano 2000

Para esse modelo, o critério de manutenção é baseado no gráfico da Figura 3.4, que relaciona o número máximo permitido de operações em função da corrente interrompida. O eixo das abcissas contém, em escala logarítmica, a faixa de correntes que o disjuntor é capaz de interromper ( $\log I$ ). Já o eixo das ordenadas contém, também em escala logarítmica, o número máximo de operações que o disjuntor pode realizar ( $\log N$ ) para cada valor de corrente, Tabela3.2.

Tensão Nominal (kV)	145
Corrente nominal em serviço contínuo (kA)	3.15
Corrente de interrupção simétrica nominal (kA)	40
Meio de extinção	SF6

Tabela 3.2 - Principais características do disjuntor 3API FG.

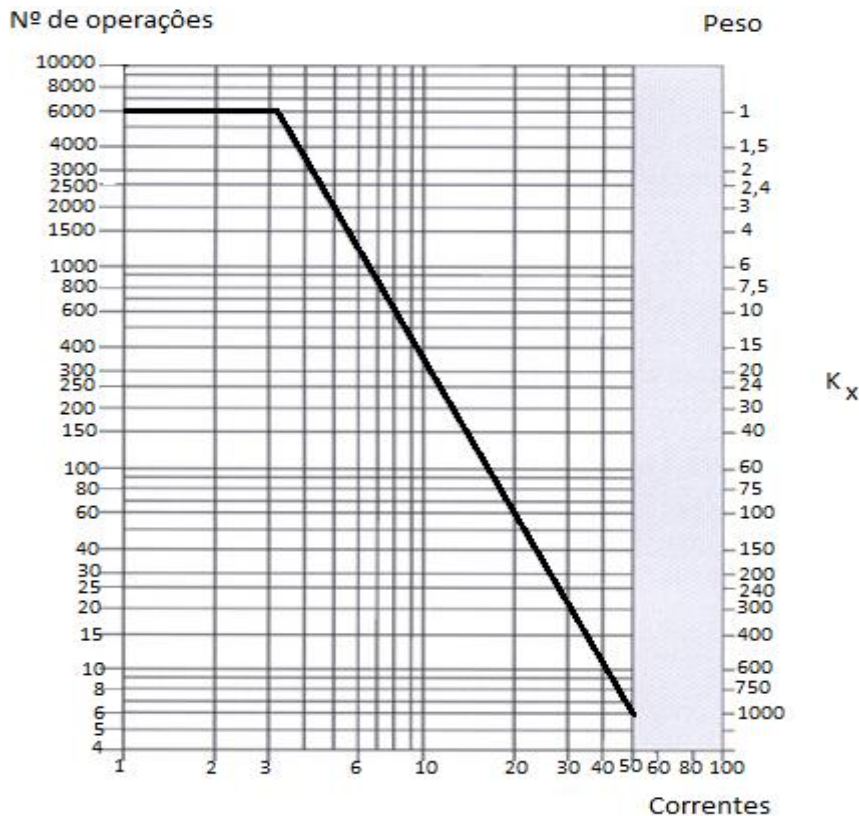


Figura 3.4 - Número máximo de interrupções (N) em função da corrente interrompida (I).

Para uma corrente de 5 kA, por exemplo, o disjuntor pode operar até 3000 vezes antes que a manutenção seja executada.

Os valores da abscissa adicional no lado direito do gráfico (K<sub>x</sub>) são fatores para utilização com a equação (1), fornecida pelo fabricante.

$$n_x = \frac{6000 - \sum_{i=1}^m (n_i \cdot k_i)}{k_x} \quad (1)$$

Onde:

n<sub>x</sub> é o número de interrupções permissíveis para uma corrente de interrupção I<sub>x</sub>;

$k_x$  é o fator para corrente de interrupção  $I_x$ ;

$n_i$  é o número de interrupções já realizadas com uma corrente de interrupção  $I$ ;

$k_i$  é o fator para a corrente de interrupção  $I$ .

Critério de manutenção do disjuntor LTB 145D1/B, fabricado pela ABB, 2009

Tensão Nominal (kV)	145
Corrente nominal em serviço contínuo (kA)	3
Corrente de interrupção simétrica nominal (kA)	40
Meio de extinção	SF6

Tabela 3.3 - Principais características do disjuntor LTB 145D1/B.

Para esse disjuntor, o critério de manutenção fornecido no manual é baseado no somatório do quadrado das correntes de falta, conforme a equação (2). A cada operação, deve-se tomar o quadrado da corrente eficaz interrompida, acumulando-se os valores até que a vida útil de pelo menos um polo seja esgotada. Quando isso ocorre, o processo de manutenção deve ser acionado. Além da equação (2), o fabricante disponibiliza uma curva semelhante à da Figura 3.4.

$$\sum N \cdot I_{cc}^2 = 20.000 \text{ kA}^2 \quad (2)$$

Onde:

$I_{cc}$  é a corrente eficaz interrompida pelo disjuntor, em kA;

$N$  é o número de vezes que o disjuntor interrompeu a corrente  $I_{cc}$ .

Critério de manutenção disjuntor 140-SFM-40A, fabricado pela Mitsubishi, 1983

Tensão Nominal (kV)	145
Corrente nominal em serviço contínuo (kA)	2
Corrente de interrupção simétrica nominal (kA)	40
Meio de extinção	SF6

Tabela 3.4 - Principais características do disjuntor 140-FSM-40 A.

Para disjuntores mais antigos, como o modelo 140-SFM-40 A, é comum que o manual forneça apenas uma tabela contendo alguns pontos (N, I), como mostra a Tabela 3.5.

<b>Corrente interrompida</b>	<b>Número máximo de operações</b>
Correntes inferiores à nominal	4000
Corrente nominal	1000
25% da corrente de curto-circuito nominal $I_{cc}$	80
50% de $I_{cc}$	40
75% de $I_{cc}$	30
$I_{cc}$	20

Tabela 3.5 - Número máximo de interrupções em função da corrente.

Uma observação interessante sobre a Tabela 3.5 é que, ao longo da vida útil do disjuntor, as correntes de falta interrompidas variam dependendo do tipo de defeito, indo desde a manobra com corrente inferior à nominal até a interrupção de curto-circuitos francos, onde o disjuntor é submetido à máxima corrente de falta possível no circuito onde está instalado. Nesse sentido, critérios de manutenção como o do modelo 140-FSM-40 A deixam a desejar pois são válidos apenas para valores pontuais de correntes.

### Critério de manutenção utilizado pela CEMIG GT

Frente a esse problema, um critério padrão foi estabelecido pela CEMIG GT para a manutenção preventiva de disjuntores e vem sendo utilizado nos últimos anos. O critério foi definido empiricamente com base na experiência da equipe de manutenção da CEMIG GT. Nesse critério, o número máximo de aberturas do disjuntor até a manutenção preventiva é estabelecido de acordo com a corrente de interrupção simétrica nominal e a corrente de curto-circuito calculada para o barramento onde o equipamento está instalado, conforme a equação (3).

$$N = k \left( \frac{I_N}{I_o} \right)^a \quad (3)$$

Onde:

$N$  é o número máximo de operações do disjuntor até a manutenção;

$I_N$  é a corrente de interrupção simétrica nominal do disjuntor;

$I_0$  é a corrente de curto-circuito calculada do barramento onde o disjuntor opera;

$K$ ,  $a$  são constantes definidas segundo o meio de extinção e a tensão de operação do equipamento.

O critério é baseado apenas nas características do disjuntor e do barramento, não levando em consideração a magnitude de correntes interrompidas pelo disjuntor durante a sua operação. Seja, por exemplo  $N_0$  o limite de operações calculado para um certo disjuntor. Independentemente desse disjuntor operar  $N_0$  vezes na abertura da corrente nominal ou  $N_0$  vezes na abertura da corrente de curto-circuito do barramento, o procedimento de manutenção será acionado. Entretanto, a situação na qual o disjuntor operou apenas na interrupção de sua corrente nominal é muito menos desgastante, e a vida útil do equipamento certamente não terá sido esgotada. Portanto, apesar de unificar a metodologia de manutenção dos disjuntores da CEMIG GT, até há pouco tempo era esse o procedimento e pouco eficiente [2].

O ideal é que a data da manutenção não seja definida apenas por intervalo de tempo pré-estabelecido, mas a partir de informações específicas sobre o disjuntor e de variáveis fornecidas por ensaios que não necessitem de desligamento, assim como informações provenientes de sistemas de monitoramento [30].

As correntes de falta são, atualmente, disponibilizadas pelos RDP nas subestações. Com isso, é possível a elaboração de um novo procedimento padrão, que resolva o problema da diversidade de critérios, e, ao mesmo tempo, leve em conta o real desgaste dos polos do equipamento, possibilitando sua supervisão em tempo real e também que se extraia o máximo de sua vida útil.

Por serem equipamentos essenciais à operação segura dos sistemas de energia e com tempo de reparação e substituição longos, não é possível aceitar que disjuntores operem até falhar, portanto é necessário também que se preveja a aproximação do fim da vida útil do equipamento e que sejam distinguidas as situações onde pode ainda ser feita a manutenção do equipamento das situações onde é necessário planejar a sua substituição [10].

### 3.3 Formas de contabilizar o desgaste

#### Cálculo da corrente interrompida

Para o cálculo da corrente interrompida é usado a posição reposta pelo método de ajustes de cursores, descrito anteriormente, e do fador de corrente.

O valor obtido para a corrente será, a média do fador corrente para um ciclo anterior a localização do cursor, e será expresso como valor eficaz da corrente interrompida.

Crítérios como, o instante de disparo do relé e tempo de acionamento mecânico do disjuntor, foram considerados.

#### Modelização do Problema

Retomando o gráfico da Figura 3.4, pode-se notar que a curva é uma reta com inclinação negativa, na região entre a corrente nominal e a capacidade de interrupção simétrica e mostra que:

- (a) O disjuntor é capaz de operar até 6000 vezes para correntes abaixo de 3,15K A. Trata-se da restrição mecânica devido a desgaste natural do sistema mecânico de abertura/fecho dos contatos.
- (b) O disjuntor é capaz de abrir uma corrente máxima de 50K A, podendo para tal operar até 6 vezes. Trata-se de restrição elétrica em razão da grande quantidade de energia interrompida.
- (c) O alarme deve ser dado quando ele puder operar somente mais uma vez para a sua corrente máxima, no caso, 50K A.
- (d) Em geral, a curva é do tipo

$$\sum NI^{\alpha} = c$$

onde:

$c$  é uma constante;

$N$  é o valor eficaz da corrente interrompida.

Para a curva tem-se que:

$$\sum NI^a = c \quad (4)$$

a corrente esta entre,  $3,15\text{K A} \leq I \leq 50\text{K A}$

$$\log NI^a = \log c = b \quad (5)$$

em que,  $c = 10^b$

$$\log N + \log I^a = b$$

$$\log N + a \log I = b \quad (6)$$

Substitui-se  $\log N = y$  e  $\log I = x$ , rearranjando-se os termos e aplicando-se as propriedades convenientes, obtém-se a equação da reta apresentada na Figura 3.4, onde  $a$  e  $b$  são constantes reais positivas:

$$y + a x = b \Rightarrow y = - a x + b \quad (7)$$

A determinação das constantes  $a$  e  $c$  pode ser feita tomando-se dois pontos  $(N, I)$  na curva fornecida pelo fabricante (ou na tabela, quando for o caso) e aplicando-se o método dos mínimos quadrados. Tendo em vista que a leitura é feita visualmente no gráfico, recomenda-se a utilização de, no mínimo, quatro pontos, reduzindo o erro no cálculo das constantes procuradas.

$$-(\log I) \cdot a + b = \log N \quad (8)$$

$$(\log I) \cdot a - b = - \log N$$

Consegue-se os seguintes pontos:

I	N
3,15	6000
8	600
20	60
50	6

Tabela 3.6 - Quatro pontos de ajuste

Com os dois pontos intermédios da tabela acima e na expressão (8), vem que:

$$\begin{bmatrix} \log 8 & -1 \\ \log 20 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\log 600 \\ -\log 60 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} 0,90309 & -1 \\ 1,30103 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2,77815 \\ -1,77815 \end{bmatrix}$$

$$a = 2,51294 \quad (10)$$

$$b = 5,04756 \quad (11)$$

A equação é da forma

$$2,51294 \log I - 5,04756 = -\log N \quad (12)$$

$$N I^{2,51294} = 10^{5,04756} \quad (13)$$

Todos os pontos tomados devem satisfazer a equação (8). Com isso, obtém-se um sistema com duas incógnitas ( $a$  e  $b$ ) e  $n$  equações, sendo  $n$  o número de pontos tomados no ábaco (ou na tabela) fornecido pelo fabricante do disjuntor.

Colocando-se o sistema na forma matricial, tem-se

$$\begin{bmatrix} \log 3,15 & -1 \\ \log 8 & -1 \\ \log 20 & -1 \\ \log 50 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\log 600 \\ -\log 600 \\ -\log 60 \\ -\log 6 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0,49831 & -1 \\ 0,90309 & -1 \\ 1,30103 & -1 \\ 1,69897 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3,77815 \\ -2,77815 \\ -1,77815 \\ -0,77815 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Chamando de  $\tilde{A}$  a matriz de regressores,  $B$  o vetor de amostras e  $\bar{x}$  o vetor das constantes procuradas, tem-se a equação (15)

$$\tilde{A} \bar{x} = B \quad (15)$$

Aplicando-se o método dos mínimos quadrados, calcula-se o vetor  $\bar{x}$ , conforme a equação (16)

$$\bar{x} = \tilde{A}^T B. (\tilde{A}^T \tilde{A})^{-1} \quad (16)$$



### 3.4 Procedimentos para avisar sobre o desgaste

#### Implementação

Retomando-se a equação (4), o valor de  $c = 10^b$  indica a vida útil inicial da câmara do disjuntor, chamado de  $v_u[0]$ . A cada operação do equipamento, esse valor é reduzido conforme a equação (17)

$$v_u[k] = v_u[k - 1] - 1 \cdot I^a \quad (17)$$

Onde:

$I$  é o valor da corrente eficaz interrompida na  $k$ -ésima operação do disjuntor;

$v_u[k]$  é a vida útil residual do disjuntor após a interrupção da corrente;

$v_u[k - 1]$  é a vida útil residual do disjuntor antes da interrupção da corrente ;

$a$  é a constante calculada através da metodologia proposta.

Portanto, a partir das constantes  $a$  e  $b$  e da corrente  $I$  interrompida pelo disjuntor na sua  $k$ -ésima operação, é possível determinar sua vida útil residual. Quando esse valor cai, o processo de manutenção é acionado.

No seguimento do exemplo em estudo, são obtidos os seguintes valores para  $a$  e  $b$ :

$$a = 2,50001 \text{ e } b = 5,02903 \quad (18)$$

A partir dos quais se obtém o valor de  $c$ :

$$\begin{aligned} \log c = b &\Rightarrow c = 10^b \\ c &= 10^{5,02903} \\ c &= 106913,30463 \end{aligned} \quad (19)$$

logo a equação do valor da curva para  $a = 2,5$  será

$$N I^{2,5} = 106913,30463 \quad (20)$$

Ao atribuir um limite aceitável,  $N = 1$ , ou seja, quando o disjuntor só puder operar mais uma vez, é possível saber quando é preciso fazer a manutenção.

$$I = 50\text{KA e } N = 1$$

$$1 * 50^{2,5} = 17677,67 \quad (21)$$

$$\sum I^{2,5} \leq 106913,30466 - 17677,67 \quad (22)$$

$$\sum I^{2,5} \leq 89235,63510 \quad (23)$$

## 4. Testes

### 4.1 Operação Automática do Sistema

O algoritmo simplificado da Figura 4.1 ilustra a operacionalização do método.

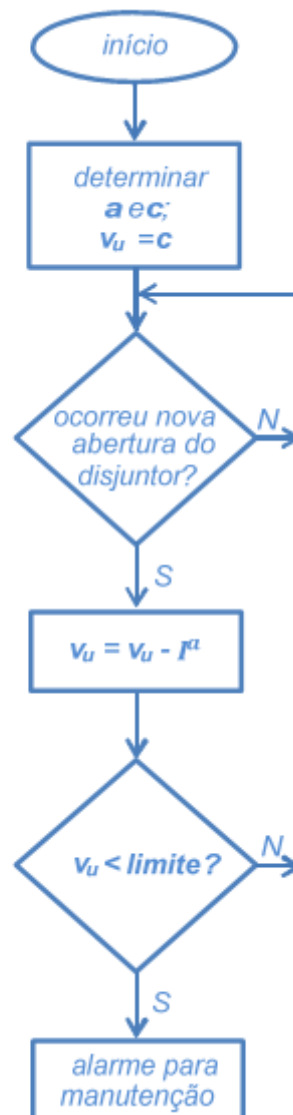


Figura 4.1 - Algoritmo simplificado.

## 4.2 Validação do Método

### Modelo 3AP1 FG

Seja o modelo 3AP1 FG, cujas informações e o ábaco de referência para manutenção foram apresentados anteriormente. Tomando-se quatro pontos na Figura 3.4 – vide Tabela 4.1 - e aplicando-se o método dos Mínimos Quadrados, obtém-se, pela equação (16), as constantes procuradas, apresentadas na Tabela 4.2.

N	I (kA)
3000	5
500	9
50	20
6	40

Tabela 4.1 - Conjunto de 4 pontos (N, I) tomados no ábaco da Figura 3.4.

Parâmetro	I (kA)
$a$	2,975263
$c$	356.740,77

Tabela 4.2 - Parâmetros  $a$  e  $c$  para o modelo 3AP1 FG.

Portanto, o modelo matemático para a vida útil desse disjuntor é dado pela equação (24)

$$N \cdot I^{2,975263} = 356.740,77 \quad (24)$$

Esse modelo pode ser comparado com a metodologia de manutenção proposta pelo fabricante supondo-se que o disjuntor atuou na abertura de uma sequência fictícia de correntes, conforme a Tabela 4.3.

N	I (kA)	K	N.K	NI <sup>a</sup>
120	4	1	120	7.421,1
50	6	3,5	175	10.331,8
3	20	120	360	22.285,8
2	27	300	600	36.283,9
<b>Σ</b>			1.255	76.322,6
<b>Capacidade residual p/ I=4kA (k=1)</b>			4745	4534
<b>Capacidade residual p/ I=10kA (k=15)</b>			316	296
<b>Capacidade residual p/ I=20kA (k=120)</b>			39	37

Tabela 4.3 - Comparação da metodologia do fabricante e da metodologia proposta, para o modelo 3API FG.

Observando-se as três últimas linhas da tabela, conclui-se que a metodologia proposta é compatível com a do fabricante. As discrepâncias nos resultados são, certamente, devidas a erros de leitura no gráfico ao se tomar o conjunto de pontos para o cálculo das constantes. Especificamente para este modelo, os resultados obtidos utilizando-se a nova metodologia proposta são ligeiramente mais conservativos do que o que propõe o fabricante. Caso contrário, seria necessário tomar um conjunto maior de pontos para o cálculo das constantes, o que conduziria a resultados cada vez melhores.

#### Modelo 140-SFM-40 A

Os parâmetros a e c calculados para o modelo são apresentados na Tabela 4.4.

Parâmetro	I (kA)
a	1,313524
c	2.411,48

Tabela 4.4 – Parâmetros a e c para o modelo 140-SFM-40 A.

Para esse modelo, a validação da metodologia proposta pode ser feita comparando-se os números máximos de interrupções, para dada corrente de falta, apontados pelo critério do fabricante e pelo critério proposto, como mostra a Tabela 4.5.

I (kA)	N fabricante	N critério
2	1000	970
20	40	47
30	30	28
40	20	19

Tabela 4.5 - Comparação do número máximo de interrupções para dada corrente apontados pelo fabricante e pelo critério proposto.

Nesse caso, o método proposto ofereceu valores próximos aos recomendados pelo fabricante. Exceto para a corrente de 20 kA, todos os demais foram ligeiramente mais conservativos do que o que determina o manual.

### Modelo HPL 245-550B2

A Tabela 4.6 apresenta as principais características do modelo.

Tensão Nominal (kV)	550
Corrente nominal em serviço contínuo (kA)	4
Corrente de interrupção simétrica nominal (kA)	63
Meio de extinção	SF6

Tabela 4.6 – Principais características do modelo HPL 550B2, fabricado pela ABB, ano 2002.

O procedimento de manutenção recomendado pelo fabricante é baseado na equação (25)

$$\sum (N \cdot I^{1,8}) = 20.000 \quad (25)$$

Tomando-se quatro pontos no ábaco fornecido no catálogo e aplicando-se a metodologia proposta, obtém-se as constantes *a* e *c* da Tabela 4.7.

Parâmetro	I (kA)
<i>a</i>	1,758924
<i>c</i>	19.559,21

TABELA 4.7 – PARÂMETROS A E C PARA O MODELO HPL 550B2.

Supondo uma sequência fictícia de correntes interrompidas pelo disjuntor é possível comparar o método do fabricante e o método proposto, como mostra a Tabela 4.8.

N	I (kA)	$N.I^{1,8}$	$N.I^a$
120	4	1.455	1.374
50	15	6.545	5.856
3	35	1.805	1.560
2	60	3.175	2.683
<b>Total</b>		12.980	11.476
<b>Vida útil residual</b>		35,1%	41,3%

TABELA 4.8 – COMPARAÇÃO DA METODOLOGIA DO FABRICANTE E DA METODOLOGIA PROPOSTA, PARA O MODELO HPL 550B2.

Novamente, o modelo obtido aponta resultados muito próximos daqueles recomendados pelo fabricante. Especificamente nesse caso, a metodologia proposta é ligeiramente menos conservativa.

### Modelo GL317D

A Tabela 4.9 apresenta as principais características do modelo.

Tensão Nominal (kV)	550
Corrente nominal em serviço contínuo (kA)	2-4
Corrente de interrupção simétrica nominal (kA)	40-50
Meio de extinção	SF6

TABELA 4.9 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO MODELO GL317D, FABRICADO PELA AREVA, ANO 2004.

O procedimento de manutenção recomendado pelo fabricante é baseado na equação (2). Aplicando-se a metodologia proposta, tem-se as constantes da Tabela 4.10.

Parâmetro	I (kA)
$a$	2,045893
$c$	23.254,59

TABELA 4.10 – PARÂMETROS A E C PARA O MODELO GL317D.

Comparando-se a vida útil do disjuntor pelos dois métodos, tem-se os resultados da Tabela 4.11.

N	I (kA)	N.I <sup>1,8</sup>	N.I <sup>a</sup>
120	4	1.920	2.046
50	6	1.800	1.954
3	20	1.200	1.377
2	35	2.450	2.884
<b>Total</b>		7.370	8.261
<b>Vida útil residual</b>		36,9%	35,5%

TABELA 4.11 – COMPARAÇÃO DA METODOLOGIA DO FABRICANTE E DA METODOLOGIA PROPOSTA, PARA O MODELO GL317D.

Os resultados observados são, novamente, muito próximos àqueles propostos quando utiliza-se a metodologia do fabricante. Diferentemente do caso anterior (modelo HPL 550B2), os resultados obtidos via metodologia proposta foram ligeiramente mais conservativos para o modeloGL317D.



## 5. Conclusão

A aplicação do sistema de gerenciamento automático de registros oscilográficos cada vez mais completo e funcional, sem dúvida proporciona às companhias concessionárias de energia elétrica ganhos em diversos setores. Na área de engenharia de manutenção, uma vez que possibilita otimização e melhorias nos respectivos processos de intervenção em disjuntores e redução de esforços e tempo no reparo da linha de transporte. Ganha também a área de planejamento, uma vez que os registros oscilográficos, quando devidamente analisados e armazenados, podem produzir dados estatísticos sobre o comportamento do parque elétrico da companhia. Ganha o pessoal da operação, uma vez que terão certeza sobre o estado atual de diversos equipamentos do sistema elétrico. Sistemas como este promovem a utilização adequada de toda uma estrutura de supervisão e monitoramento instalada nas redes, justificando os investimentos.

Todas essas informações passam então a compor o banco de dados, que pode promover futuros estudos nas Áreas de Proteção, Manutenção, Planejamento e do Centro de Operação. As funcionalidades desenvolvidas até o momento para o sistema de gerenciamento automático de registros oscilográficos agregam agilidade e fiabilidade no atendimento em tempo real de perturbações pelo Centro de Operação e na análise pelos especialistas de proteção.

Quanto a metodologia proposta, pode-se afirmar que as limitações introduzidas pela falta de exatidão na leitura dos pontos no ábaco e os casos em que os resultados obtidos pela metodologia proposta forem menos conservativos do que aqueles propostos no manual do fabricante podem ser contornadas através da definição de um limite mais estreito ao algoritmo apresentado, mitigando as imperfeições do método.

Além da aplicação em disjuntores de alta tensão, a metodologia proposta pode ser implementada em disjuntores de média tensão. Em instalações industriais, esses disjuntores são tipicamente instalados em quadros de distribuição de circuitos e protegidos por Intelligent Electronic Devices (IED), que podem ser programadas para efetuarem os cálculos necessários ao acompanhamento da vida útil dos disjuntores. Também nos manuais desses equipamentos o procedimento de manutenção é indicado sob a forma gráfica, de maneira idêntica às de alta tensão.

Especificamente em relação ao parque de disjuntores da CEMIG GT, um estudo de caso feito com base no histórico de aberturas de um disjuntor de 138 kV mostrou que com o sistema de

gerenciamento automático de registros oscilográficos, a identificação das fases interrompidas, bem como do tipo de falta e corrente efetivamente interrompida propiciaram uma redução considerável no total do intervalo de tempo cumprido para a execução da revisão de câmara em relação ao método empírico que vinha sendo utilizado, o que leva a prorrogação da manutenção em 6 anos, coisa que antes deveria ocorrer em no máximo um 1 ano. Já com a identificação das amplitudes das correntes interrompidas pelo disjuntor é prorrogada a manutenção a sumir de vista [11].

A implementação da nova metodologia reduz o custo de manutenção dos disjuntores, tendo em vista que a vida útil das câmaras é otimizada e a revisão ocorre no momento adequado. Além da otimização do período de manutenção, a disponibilidade do equipamento é maximizada e o risco de falha decorrente de intervenção para manutenção é reduzido.

## Apendice

### Simulações

O ATPbatch é um programa desenvolvido para simular faltas em modelos de redes de distribuição elétrica criados no software ATPDraw.

Através de parâmetros particulares da rede criada, ele gera arquivos .atp em batelada, simulando diferentes tipos de faltas.

Foi criada uma versão do programa que trabalha, especificamente, com um multi-alimentador desenvolvido para gerar sinais de testes para o programa OSCILO.

O ecrã inicial do programa é mostrada abaixo.

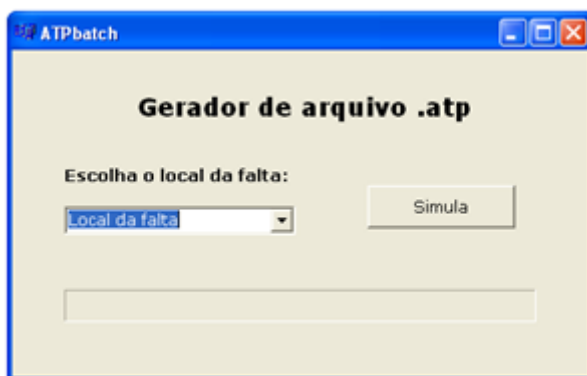


Figura 1 – Ecrã inicial do ATPbatch

No caso, são gerados arquivos para faltas do tipo AT, BC, BCT e ABCT, e para resistências de falta de 2, 5, 10, 20 e 40  $\Omega$ . No total, para cada local escolhido, 20 arquivos são gerados e salvos na pasta “C:\Bateladas\ArquivosATP”.

Estes servem para rodar o ATP em batelada, e gerar o arquivo .pl4, necessário para criação dos arquivos COMTRADE.

No final de cada execução uma mensagem de sucesso é mostrada.

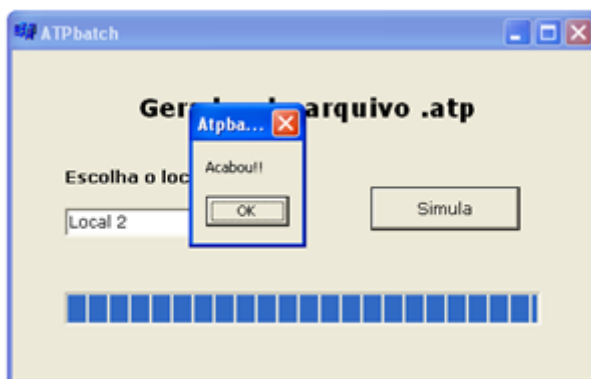
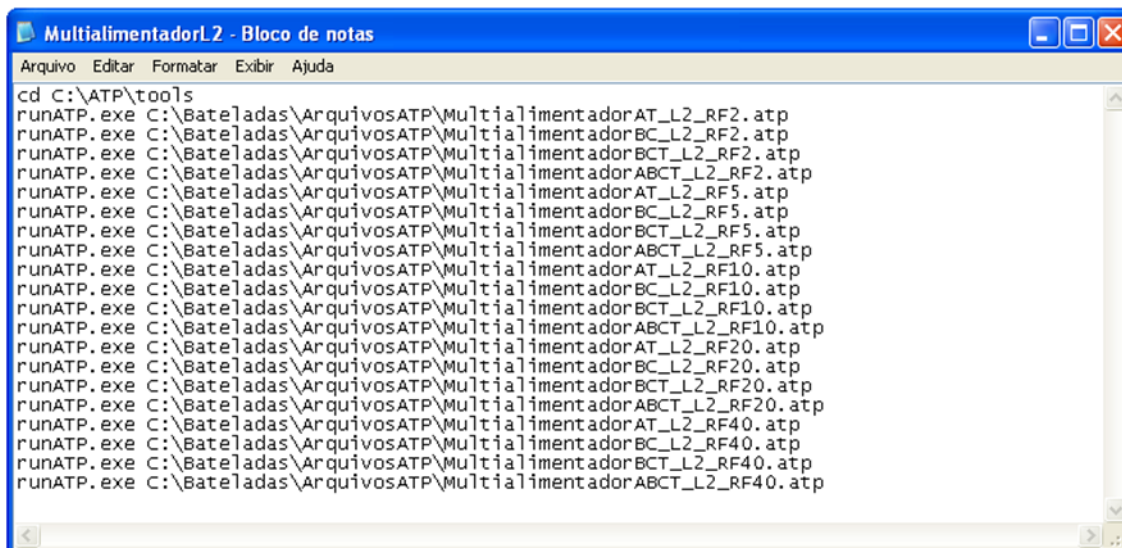


Figura 2 - Tela final do ATPbatch

## ATP em batelada

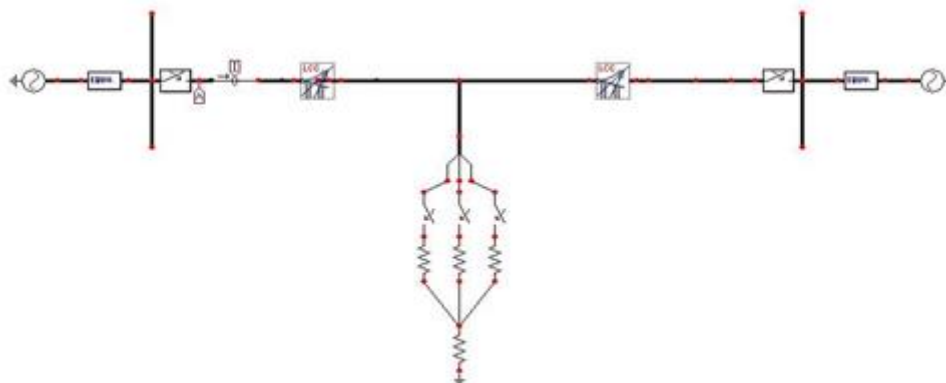
Para simular arquivos .atp em batelada, é necessário criar, para cada local de falta, arquivos com extensão .bat (*batch file*) que são salvos na pasta C:\Bateladas\ArquivosBAT”, como mostra a figura abaixo.



```
cd C:\ATP\tools
runATP.exe C:\Bateladas\ArquivosATP\MultialimentadorAT_L2_RF2.atp
runATP.exe C:\Bateladas\ArquivosATP\MultialimentadorBC_L2_RF2.atp
runATP.exe C:\Bateladas\ArquivosATP\MultialimentadorBCT_L2_RF2.atp
runATP.exe C:\Bateladas\ArquivosATP\MultialimentadorABCT_L2_RF2.atp
runATP.exe C:\Bateladas\ArquivosATP\MultialimentadorAT_L2_RF5.atp
runATP.exe C:\Bateladas\ArquivosATP\MultialimentadorBC_L2_RF5.atp
runATP.exe C:\Bateladas\ArquivosATP\MultialimentadorBCT_L2_RF5.atp
runATP.exe C:\Bateladas\ArquivosATP\MultialimentadorABCT_L2_RF5.atp
runATP.exe C:\Bateladas\ArquivosATP\MultialimentadorAT_L2_RF10.atp
runATP.exe C:\Bateladas\ArquivosATP\MultialimentadorBC_L2_RF10.atp
runATP.exe C:\Bateladas\ArquivosATP\MultialimentadorBCT_L2_RF10.atp
runATP.exe C:\Bateladas\ArquivosATP\MultialimentadorABCT_L2_RF10.atp
runATP.exe C:\Bateladas\ArquivosATP\MultialimentadorAT_L2_RF20.atp
runATP.exe C:\Bateladas\ArquivosATP\MultialimentadorBC_L2_RF20.atp
runATP.exe C:\Bateladas\ArquivosATP\MultialimentadorBCT_L2_RF20.atp
runATP.exe C:\Bateladas\ArquivosATP\MultialimentadorABCT_L2_RF20.atp
runATP.exe C:\Bateladas\ArquivosATP\MultialimentadorAT_L2_RF40.atp
runATP.exe C:\Bateladas\ArquivosATP\MultialimentadorBC_L2_RF40.atp
runATP.exe C:\Bateladas\ArquivosATP\MultialimentadorBCT_L2_RF40.atp
runATP.exe C:\Bateladas\ArquivosATP\MultialimentadorABCT_L2_RF40.atp
```

Este arquivo contém uma série de comandos que irão ser realizados automaticamente pelo sistema operacional. A primeira linha do .bat localiza o diretório em que se encontra o programa, e as subsequentes o chamam, passados por parâmetro, o local em que se encontra o arquivo .atp a ser simulado, e escolher novas resistência de falta, distância de falta, etc.

## Modelo básico utilizado para simular faltas em terra



O código utilizado

```
//Get simulation script and correspondingly generate output file name
CString InFile[999], OutFile1[999], OutFile2[999], int FileAll;
GetFilename(InFile, OutFile1, OutFile2, FileAll);
for (i=0; i<FileAll-1; i++)
{ // Get window handle
  hwnd=::FindWindow("ConsoleWindowClass","proprietary solutions");
  if (hwnd)
  { // set for foreground to guarantee it receive message reliably
    CWnd::FromHandle(hwnd)->SetForegroundWindow();

    //send command both to output to screen and disk file
    ::PostMessage(hwnd,WM_KEYDOWN, 'b'-'a'+65, 0L);
    ::PostMessage(hwnd,WM_KEYDOWN, 'o'-'a'+65, 0L);
    ::PostMessage(hwnd,WM_KEYDOWN, 't'-'a'+65, 0L);
    ::PostMessage(hwnd,WM_KEYDOWN, 'h'-'a'+65, 0L);
    ::PostMessage(hwnd,WM_KEYDOWN,UK_RETURN, 0L); //notify input

    //input filename of ith simulation script
    for (j=0;j<InFile[i].GetLength();j++)
    { ch=InFile[i].GetAt(j);
      ::PostMessage(hwnd,WM_KEYDOWN, ch-'a'+65, 0L); }
    //send return key to notify a input
    ::PostMessage(hwnd,WM_KEYDOWN,UK_RETURN, 0L);

    //input filename of ith output file1
    for (j=0;j<OutFile1[i].GetLength();j++)
    { ch=OutFile1[i].GetAt(j);
      ::PostMessage(hwnd,WM_KEYDOWN, ch-'a'+65, 0L); }
    //send return key to notify a input
    ::PostMessage(hwnd,WM_KEYDOWN,UK_RETURN, 0L);

    //input filename of ith output file2
    for (j=0;j<OutFile2[i].GetLength();j++)
    { ch=OutFile2[i].GetAt(j);
      ::PostMessage(hwnd,WM_KEYDOWN, ch-'a'+65, 0L); }
    //send return to notify a input
    ::PostMessage(hwnd,WM_KEYDOWN,UK_RETURN, 0L);
    ::Sleep(15000); //wait 15seconds for electromagnetic simulation
  }
}
```

## Referências bibliográficas

- [01] Notas das aulas do professor Clever Pereira, UFMG, 2010
- [02] Manual da CEMIG com curva de disjuntor.
- [03] 1v Areva, Manutenção, Limites de Desgaste Elétrico.
- [04] Manuais disponibilizados pelos fabricantes dos disjuntores.
- [05] Associação Brasileira de Normas Técnicas. Equipamentos de Alta Tensão. Parte 100: Disjuntores de alta tensão de corrente alternada - NBR IEC 62271-100:2006. Brasil.
- [06] Clever Pereira et alli – OSCILO – Sistema de Gerenciamento Automático de Registros Oscilográficos – XX SNPTEE, Recife, 2009
- [07] Carvalho, Antonio Carlos Cavalcanti de [et al]. Chaves e Disjuntores, EDUFF, RJ, 1995
- [08] MAZZA, G.; MICHACA, R. The first international enquiry on circuit-breaker failures and defects in service. Elektra no. 79, p.21–91, 1981.
- [09] JANSSEN, A. Final Report of the Second International Enquiry on High Voltage Circuit-Breaker Failures and Defects in Service. CIGRÉ, 1994.
- [010] DIAS, A. et al. Metodologia para análise de risco: mitigação de perda de SF6 em disjuntores. Florianópolis: Studio S, 2011. 304 p.
- [011] ILLSLEY, M.; WALDRON, M. Refurbishment and life extension of circuit breakers as an asset management tool. Cigr'e Session, v. 18, n. A3-102, p. 45–46, August 2008
- [012] CIGRÉ – Working Group 13.8 – Life Management of Circuit-Breaker – Part 1
- [013] Residual life, end life, life extension – Part3:Maintenance management,Paris,2000.
- [014] Clever Pereira, Felipe C. Cruz, Silvério Visacro F. – Transmission Line Digital Protection using a Didactic PC Compatible Program. In BIENNIAL SESSION - I WORKSHOP LINKS UNIVERSITY CIGRÉ, 1998, PARIS CIGRÉ BIENNIAL SESSION - I WORKSHOP LINKS UNIVERSITY CIGRÉ. 19907-1-07-6
- [015] ZANETTA, L. C. Jr. “Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência”, EdUSP, São Paulo, 2003.
- [016] Pereira, C., Cruz, F. C., Análise do Comportamento Estático e Dinâmico dos Filtros Digitais de Mínimos Quadrados na Proteção de Linhas de Transporte. XV SNPTEE.
- [017] IEEE, Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems”, IEEE c37.111-1991, com revisões em 1997 e 1999.
- [018] Sachdev M. S., Baribeau, M. A., A New Algorithm for Digital Impedance Relays. IEEE Trans. PAS-98, 1979, p. 2232-2240.
- [019] Dugan R. C., MCGranaghan M. F., Beaty, H. W., Electrical Power Systems

- Quality, New York, McGraw-Hill, 2002.
- [020] Valadão R. L., Desenvolvimento de Sistema Computacional Destinado à Localização de Falhas em Redes e Linhas de Distribuição, Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte, 2005.
- [021] BOLLEN, M. H. J.; GU, I. Signal Processing of Power Quality Disturbances.1. ed. [S.l.]: Wiley-IEEE Press, 2006. 861 p. (IEEE Press Series on Power Engineering).
- [022] KENNEDY, K.; LIGHTBODY, G.; YACAMINI, R. Power system harmonic analysis using the kalman filter. In: Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE.
- [023] ALVES, W. M.; ALVES, C. E.; OLIVEIRA, J. F.; SOUZA, W. M. “Análise das Principais Causas de Erros em Circuitos de Transformadores de Potencial e Suas Conseqüências para a Localização de Falhas e para o Desempenho de Proteções”, VIII Seminário Técnico de Proteção e Controle - STPC, Rio de Janeiro, 2005.
- [024] SILVEIRA, E. G. “Localização Digital de Falhas em Linhas de Transporte com a Utilização de Dados de Um Terminal”, Escola de Engenharia da UFMG, 2001.
- [025] PEREIRA, I. H. Jr.; PEREIRA, C. "Localização Automática de Falhas em Linhas de Transporte com Informações dos Dois Terminais", CPDEE-UFMG, 2004.
- [026] WISZNIEWSKI, A. “Accurate fault impedance locating algorithm”, IEE Proceedings, pt. C, vol. 130, no. 6, pp. 311–314, Nov. 1983.
- [027] MCLLOROY, C. et al. Circuit Breaker Condition Based Monitoring Developments. IEEE Transactions on Power Delivery. 1994
- [028] CEMIG GT/Gerência de Planejamento e Engenharia de Manutenção da Transporte (PO/MT) – Revisão de Metodologia para Manutenção Preventiva de Câmara de Extinção: Estudo de Aplicação Disjuntor 9K4 SE Taquaril. Janeiro de 2010.
- [029] IEEE Guide for Diagnostics and Failure Investigation of Power Circuit Breakers, IEEE Std C37.10 – 1995 (R2002), New York, May, 2008.
- [030] EDITAL DE LEILÃO Nº 001/2009-ANEEL ANEXO 6J– LOTE J – SE SANTOS DUMONT 345/138 KV
- [031] ABNT NBR IEC 62271-100:2006 - Equipamentos de alta tensão.
- [032] ABNT NBR NM 60898:2004 - Disjuntores para proteção de sobrecorrentes para instalações domésticas e similares.
- [033] ABNT NBR IEC 60947-2:1998 Errata 1:1999 - Dispositivos de manobra e comando de baixa tensão.
- [034] ABNT NBR IEC 60694:2002 - Especificações comuns para normas de equipamentos de manobra de alta-tensão e mecanismos de comando.

- [035] IEC 56-1 – Generalidades e definições.
- [036] IEC 56-2 – Características nominais.
- [037] IEC 56-5 – Regras para seleção de disjuntores.
- [038] IEC 694 – Cláusulas comuns para as normas de equipamentos de manobra de alta tensão.
- [039] ANSI Série C37