

CRITÉRIOS PARA ANÁLISE DE SUPERACÃO DE EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES DE ALTA TENSÃO

Novembro / 2014

Nota Técnica ONS nº 0048/2014

Revisão 1 – Fevereiro/2015



Prefácio

Este documento é uma compilação de diversos relatórios técnicos elaborados pelo Grupo de Análise de Superação de Equipamentos (GT-AS) e emitidos pelo ONS. Vide referências abaixo.

Tais trabalhos foram fruto do esforço conjunto dos Agentes de Transmissão e diversos Agentes de Distribuição e Geração, que fazem parte do SIN – Sistema Interligado Nacional. Neles encontram-se descritos os processos de análise de superação de equipamentos de alta tensão acordados pelos membros do GT-AS e que são utilizados nos ciclos anuais de análise de superação, coordenados pelo ONS. Tais critérios são sujeitos a revisões periódicas e o presente documento congrega as revisões até sua data de emissão.

Das análises empreendidas pelo GT-AS, são identificados os equipamentos superados dentro do horizonte do PAR (Plano de Ampliações e Reforços). De acordo com a legislação vigente, cabe ao ONS a homologação técnica e encaminhamento à ANEEL para as devidas autorizações aos Agentes proprietários dos ativos das substituições de equipamentos superados.

Documentos de Referência:

- I. Diretrizes para Análise de Superação de Disjuntores, Seccionadores e Bobinas de Bloqueio – ONS RE 2.1 206/2004 – Revisão 2 de 28/02/2013.
- II. Diretrizes para análise de superação de transformadores de corrente – ONS RE 2.1 207/2004 – Revisão 3 de 14/01/2013.
- III. Critérios para especificação de disjuntores de alta tensão quando submetido a correntes de curto-circuito com constante de tempo elevada – ONS RE 2.1 090/2003 – Revisão 1 de 04/03/2013.
- IV. Metodologia de cálculo de TRT para estudos de superação de disjuntores – ONS RE 2.1 079/2005 – Revisão 2 de 23/02/2013.
- V. Diretrizes para Análise de Superação de Barramento – ONS RE 2.1 032/2014 de 24/04/2014.
- VI. Superação de Malha de Terra: Critérios de Análise – NT 136/2007 de 30/08/2007.
- VII. Diretrizes para a aplicação de medidas mitigadoras nos casos de superação de equipamentos de alta tensão – ONS RE 2.1 001/2006.
- VIII. Requisitos mínimos a serem observados na aplicação de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito na rede básica.
- IX. Critérios para superação de para-raios e transformadores de aterramento.

Sumário:

I	DIRETRIZES PARA ANÁLISE DE SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES, CHAVES SECCIONADORAS E BOBINAS DE BLOQUEIO	12
1	INTRODUÇÃO E OBJETIVO	13
2	CARACTERIZAÇÃO DA SUPERAÇÃO DE EQUIPAMENTOS	13
2.1	Parâmetros para a avaliação	14
2.2	Base de Dados	14
2.3	Reprodutibilidade e Validação dos Resultados	14
2.4	Forma de Apresentação dos Resultados	14
2.5	Resumo dos Critérios para Análise de Superação	15
2.6	Disjuntores	17
2.6.1	Superação por Corrente de Carga	17
2.6.2	Superação por Corrente de Curto-Circuito	19
2.7	Chaves Seccionadoras e Bobinas de Bloqueio	24
2.7.1	Superação por Corrente de Carga	24
2.7.2	Superação por Corrente de Curto-Circuito	25
3	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
II	DIRETRIZES PARA ANÁLISE DE SUPERAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE	31
1	INTRODUÇÃO E OBJETIVO	32
2	DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS DE SUPERAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE	33
2.1	Avaliação Simplificada	34
2.1.1	Superação para Regime Normal	34
2.1.2	Superação para Condição de Curto-circuito Simétrico (Sem Componente de Corrente Contínua)	34
2.1.3	Superação para Condição de Curto-circuito Assimétrico (Com Componente de Corrente Contínua)	35
2.2	Avaliação Completa	36
2.2.1	Verificação de Saturação para Faltas Simétricas	36
2.2.2	Verificação de Saturação para Faltas Assimétricas	37
2.2.3	Considerações sobre a Aplicabilidade da Avaliação Completa e os Dados a serem Utilizados	40
2.3	Metodologia de Avaliação de Superação - Fluxograma Final	45

2.4	Procedimentos Prévios para Aplicação da Metodologia	48
3	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
4	CRÉDITOS	50
III	CRITÉRIO PARA ESPECIFICAÇÃO DE DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO QUANDO SUBMETIDO A CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO COM CONSTANTE DE TEMPO ELEVADA	52
1	INTRODUÇÃO	53
2	CONCLUSÕES	55
3	DEFINIÇÕES RELATIVAS A FORMA DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO	56
3.1	Forma da corrente de curto-circuito assimétrica	56
3.2	Definições da norma de disjuntores de AT [1]	57
3.2.1	Porcentagem da componente contínua no instante de separação dos contatos	57
3.2.2	Pico da corrente de curto-circuito e duração do último semiciclo desta	59
4	PRINCIPAIS SOLICITAÇÕES FÍSICAS QUE AFETAM O DESEMPENHO DE DISJUNTORES DE AT NA MANOBRA DE CORRENTE ASSIMÉTRICA	65
4.1	Interrupção após um “minor loop” de corrente	65
4.2	Interrupção após um “major loop” de corrente	66
4.3	Sumário dos principais parâmetros que caracterizam a severidade da interrupção de correntes de curto-circuito assimétricas	68
5	CRITÉRIO PROPOSTO PARA APLICAÇÃO DE DISJUNTORES SOB CONDIÇÕES DE REDE COM CONSTANTES DE TEMPO SUPERIORES AO VALOR PADRÃO	69
5.1	Questões básicas	70
5.2	Seleção dos parâmetros físicos	70
5.3	Definição do critério	72
5.3.1	Definição da primeira condição do critério	72
5.3.2	Definição da segunda condição do critério	76
5.3.3	Critério final proposto	77
5.4	Comparações com referências conhecidas	77
	Anexo 1 – Corrente de zeros atrasados	80

Anexo 2 – Terminologia adotada para identificação das diferentes tecnologias de disjuntores consideradas neste trabalho	83
REFERÊNCIAS	85

IV METODOLOGIA DE CÁLCULO DA TRT PARA ESTUDOS DE SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES

1	OBJETIVO	88
2	METODOLOGIA DE CÁLCULO DA SUPERAÇÃO DE DISJUNTOR POR TRT	89
2.1	Metodologias de análise da TRT	89
2.1.1	Metodologias simplificadas	89
2.1.2	Simulação transitória	89
2.2	Modelagem da rede	90
2.2.1	Modelagem completa	90
2.2.2	Forma de Apresentação dos Resultados	91
3	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
4	CRÉDITOS	94

ANEXO – CURVAS PARA INTERPOLAÇÃO DOS PARÂMETROS DA TRT EM FUNÇÃO DO VALOR PERCENTUAL DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO, TENDO COMO BASE A CAPACIDADE DE INTERRUPÇÃO NOMINAL DO DISJUNTOR [2 E 3]	95
--	----

V DIRETRIZES PARA ANÁLISE DE SUPERAÇÃO DE BARRAMENTO

1	INTRODUÇÃO E OBJETIVO	101
2	DESENVOLVIMENTO DOS ESTUDOS	102
2.1	Parâmetros para a avaliação	102
2.2	Base de Dados	102
2.3	Reprodutibilidade e Validação dos Resultados	102
2.4	Forma de Apresentação dos Resultados	102
2.5	Superação por Corrente de Carga	103
2.6	Superação por Corrente de Curto-Circuito	118
2.6.1	Verificação da Superação por Corrente de Curto-Circuito Simétrica	118
2.6.2	Verificação da Superação por Crista da Corrente de Curto-Circuito	119
3	REFERÊNCIAS	122

VI	SUPERAÇÃO DE MALHA DE TERRA: CRITÉRIOS DE ANÁLISE	124
1	APRESENTAÇÃO	125
2	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	126
3	Considerações sobre o efeito do aumento dos níveis de curto-circuito da Rede Básica na superação das malhas de terra	128
3.1	Introdução	128
3.2	Margens adicionais para malhas antigas resultantes da avaliação da resistência de contato pé-solo da nova norma IEEE, em relação às versões antigas.	131
3.3	Cálculo da corrente que entra na terra	135
3.3.1	Geral	135
3.3.2	Exemplos de cálculo simplificado de I_g	137
3.3.3	Cálculos mais exatos da corrente que entra no solo, I_g	141
3.3.4	Soluções para casos de superação de malhas de terra por motivos de segurança de pessoas	141
3.4	Superação de malhas de terra quanto a suportabilidade de cabos enterrados e conexões	144
3.5	Referências	146
VII	DIRETRIZES PARA A APLICAÇÃO DE MEDIDAS MITIGADORAS NOS CASOS DE SUPERAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO	149
1	INTRODUÇÃO E OBJETIVO	150
2	CRITÉRIOS PARA A APLICAÇÃO DE MEDIDAS MITIGADORAS	150
3	SUPERAÇÃO POR CORRENTE DE CARGA	151
3.1	MÉTODO PARA EVITAR SUPERAÇÃO POR CORRENTE DE CARGA	151
4	SUPERAÇÃO POR CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO	152
4.1	MÉTODOS PARA EVITAR SUPERAÇÃO POR CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO	152
4.1.1	MEDIDAS SISTÊMICAS	152
4.1.2	MEDIDAS MITIGADORAS NOS EQUIPAMENTOS SUPERADOS	155
5	CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS	156
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	158

7	CRÉDITOS	159
---	----------	-----

VIII REQUISITOS MÍNIMOS A SEREM OBSERVADOS NA APLICAÇÃO DE DISPOSITIVOS LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO NA REDE BÁSICA 161

1	INTRODUÇÃO E OBJETIVO	162
2	SUPERAÇÃO DE EQUIPAMENTOS	163
3	SOLUÇÕES PARA SUPERAÇÃO DE EQUIPAMENTOS POR CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO	164
4	REQUISITOS PARA APLICAÇÃO DE DLCC	166
4.1	Regime de Operação	166
4.1.1	Operação normal	167
4.1.2	Durante o curto-circuito	167
4.1.3	Recuperação do DLCC após o curto-circuito	168
4.2	Influência/interação no sistema de proteção	168
4.3	Influência no desempenho do sistema	170
4.3.1	Estabilidade transitória	170
4.3.2	Tensão de restabelecimento transitória (TRT)	171
4.3.3	Ferromressonância	171
4.3.4	Qualidade de Energia	171
5	CONFIABILIDADE E DISPONIBILIDADE	172
6	CONCLUSÃO	173
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	174

IX CRITÉRIOS PARA SUPERAÇÃO DE PARA-RAIOS E TRANSFORMADORES DE ATERRAMENTO 176

1	INTRODUÇÃO	177
2	SUPERAÇÃO DE PARA-RAIOS:	177
3	SUPERAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE ATERRAMENTO (TT):	177

INTRODUÇÃO

O processo de planejamento de expansão do sistema elétrico passa por diversas etapas. No Brasil, o planejamento da expansão é conduzido pelo Ministério de Minas e Energia – MME, subsidiado por estudos elaborados pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE, enquanto que a elaboração do Plano de Ampliações e Reforços na Rede Básica (PAR) é atribuição do ONS.

O PAR propõe as ampliações e reforços para a expansão das instalações de transmissão que forem identificadas como necessárias para garantir que a operação futura do sistema aconteça de maneira segura e de acordo com os padrões de desempenho estabelecidos nos Procedimentos de Rede. Um dos tipos de reforços que pode ser indicado no PAR é a substituição de equipamentos do módulo de manobra ou das instalações de infra-estrutura da subestação por superação das respectivas capacidades normatizadas.

A necessidade de soluções cada vez mais aprimoradas para evitar a superação de equipamentos surge como consequência do aumento da potência instalada e da rede de transmissão do sistema elétrico brasileiro, aliados aos desafios crescentes do sistema. Ainda, ressalta-se que o crescimento do sistema é naturalmente acompanhado pela elevação dos níveis de curto-circuito e da corrente de fluxo da rede. Por estes motivos, o processo de análise de superação de equipamentos deve estar em constante evolução.

1 OBJETIVO

O ONS conduz anualmente o processo de levantamento de potenciais condições futuras de superação por meio do Grupo de Trabalho de Análise da Superação de Equipamentos de Alta Tensão (GT-AS). Este grupo é formado pelo ONS e Agentes de Transmissão, Distribuição e Geração e além de levar a termo as análises e indicações de superação, tem como um de seus objetivos estabelecer e manter atualizados critérios, metodologias e processos para as análises de superação de equipamentos de alta tensão.

A indicação de substituição de equipamentos devido à superação das capacidades normatizadas é baseada em estudos e análises por parte dos Agentes e do ONS, tendo como referência os critérios acordados.

O objetivo do presente documento é elencar os critérios que são atualmente utilizados nos estudos de superação tanto pelo ONS quanto pelos Agentes de Transmissão, Distribuição e Geração.

2 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este documento está dividido em 9 capítulos. No primeiro capítulo são apresentadas as diretrizes para análise de superação de disjuntores, chaves seccionadoras e bobinas de bloqueio.

Em seguida, o Capítulo II descreve as diretrizes para análise de superação de transformadores de corrente.

Os critério para especificação de disjuntores de alta tensão quando submetido a correntes de curto-circuito com constante de tempo elevada, superiores ao valor padrão de 45 ms, são apresentadas no Capítulo III. Ainda focando na análise de disjuntores, o Capítulo IV descreve a metodologia de cálculo de TRT para estudos de superação destes equipamentos.

Posteriormente, no Capítulo V, são descritas as diretrizes para análise de superação de barramentos. Enquanto que o Capítulo VI relaciona os critérios de análise superação de malha de terra.

As diretrizes para a aplicação de medidas mitigadoras nos casos de superação de equipamentos de alta tensão são apresentadas no Capítulo VII e no Capítulo VIII são descritos os requisitos mínimos a serem observados na aplicação de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito na rede básica.

Por fim, no Capítulo IX são expostos os critérios para superação de para-raios e transformadores de aterramento.

I - DIRETRIZES PARA ANÁLISE DE SUPERACÃO DE DISJUNTORES, CHAVES SECCIONADORAS E BOBINAS DE BLOQUEIO



I - DIRETRIZES PARA ANÁLISE DE SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES, CHAVES SECCIONADORAS E BOBINAS DE BLOQUEIO

RE 2.1 206/2004 - Revisão 2

Revisões do relatório

Rev. 1 24/08/2005

seção	páginas	descrição
2.5.2	11	inclusão de texto
4	18	inclusão de anexo

Rev. 2 28/02/2013

seção	páginas	descrição
2.5.1		alteração de texto – Metodologia
Todas		revisão geral do texto

3 INTRODUÇÃO E OBJETIVO

No atual modelo do setor elétrico brasileiro, os agentes de geração são estimulados a instalar geradores próximos aos centros de carga com livre acesso à transmissão o que causa impactos significativos e superações precoces das características nominais de equipamentos pelas solicitações impostas pelo sistema elétrico, exigindo-se a execução de estudos de identificação da superação que utilizem metodologias e critérios bem definidos, assim como investigações cíclicas frequentes com a finalidade da definição de soluções de mitigação [1].

Uma forma expedita e simplificada de verificação da adequabilidade dos equipamentos ao sistema de transmissão é possível, por meio do monitoramento das solicitações impostas pelo sistema, cujas magnitudes aumentam com a sua expansão, ou seja, correntes de carga e de curto-circuito [2].

Com base nesta metodologia é possível verificar, de uma forma genérica, as superações de disjuntores, seccionadoras, transformadores de corrente e bobinas de bloqueio.

Com o objetivo de estabelecer um procedimento equânime na identificação de superação de equipamentos da Rede Básica, criaram-se dois grupos de trabalho visando o desenvolvimento de metodologias padronizadas para identificação destas superações. Os grupos foram divididos de acordo com os equipamentos envolvidos, sendo o Grupo 1 responsável pela metodologia para avaliação de superação de disjuntores, seccionadoras e bobinas de bloqueio e o Grupo 2 responsável pela análise dos transformadores de corrente.

O presente relatório tem como objetivo descrever a metodologia de verificação de superação de disjuntores, seccionadores e bobinas de bloqueio da Rede Básica, desenvolvida pelo Grupo 1, formado por Agentes de Transmissão e pelo ONS.

4 CARACTERIZAÇÃO DA SUPERAÇÃO DE EQUIPAMENTOS

A avaliação de como o grau de envelhecimento afeta as características nominais dos equipamentos depende de fatores tais como: manutenção, histórico do equipamento em análise, aspectos construtivos e tecnológicos, entre outros, e não faz parte do escopo deste trabalho.

De um modo geral, uma vez caracterizado o indicativo de superação de algum equipamento pelo ONS, por meio do relatório anual de estudos de curto-circuito, que considera um período de três anos à frente (horizonte do PAR), caberá aos Agentes de Transmissão o detalhamento da análise, com a indicação da real necessidade de substituição dos equipamentos (tipos e quantitativos), uma vez que estas particularidades fazem parte do conhecimento exclusivo dos mesmos. Da mesma forma, os Agentes deverão avaliar soluções mitigadoras, caso haja um número razoável

de disjuntores superados, com base nos aspectos técnicos, econômicos e operacionais, inerentes a cada caso [3] [4] [5] [6].

4.1 Parâmetros para a avaliação

Considerou-se que as evoluções das seguintes grandezas, ao longo da rede, devem ser monitoradas e comparadas à suportabilidade nominal dos equipamentos sob análise:

- Corrente de Carga;
- Corrente de Curto-Circuito (Simétrica e Assimétrica);
- Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT).

Estas grandezas serão assumidas como os indicadores de superação, sendo a TRT aplicada apenas para os disjuntores.

4.2 Base de Dados

A base de dados para as análises de curto-circuito e fluxo de potência a ser considerada será aquela disponibilizada pelo ONS no horizonte do PAR.

4.3 Reprodutibilidade e Validação dos Resultados

Tendo em vista que as avaliações citadas neste documento têm caráter cíclico, estando inseridas dentro do âmbito do PAR, os Agentes de Transmissão deverão utilizar casos base, nos formatos compatíveis com aqueles hoje utilizados no setor, a saber:

- Fluxo de Potência: ANAREDE;
- Curto-Circuito: ANAFAS;
- Transitórios Eletromagnéticos: ATP.

4.4 Forma de Apresentação dos Resultados

O resultado das análises terá como produto final um sumário executivo do qual constarão as premissas, critérios e metodologias adotados, bem como uma lista de equipamentos superados, com os motivos e as datas da superação.

Visando a uniformização das apresentações, pelos Agentes de Transmissão, os resultados deverão ser disponibilizados da seguinte forma:

- **Superação por Corrente Nominal**: Deverá ser apresentada por subestação, uma tabela contendo: a identificação do equipamento, a sua localização, a corrente nominal, o valor da corrente calculado, o ano da superação, a condição de

superação (rede íntegra, deteriorada, equipamento em manutenção etc.) e a justificativa da troca.

- **Superação por Corrente de Curto-Circuito:** Deverá ser apresentada por subestação, uma tabela contendo: a identificação do equipamento, a sua localização, a corrente nominal, a corrente de interrupção simétrica e assimétrica, a relação X/R nominal, os valores das correntes simétrica e assimétrica calculados, o ano da superação, a condição de superação (rede íntegra, deteriorada, equipamento em manutenção etc.) e a justificativa da troca.
- **Superação por TRT:** Deverá ser apresentada por subestação, uma tabela contendo: a identificação do equipamento, a sua localização, o valor máximo de tensão de restabelecimento suportável pelo equipamento e o valor resultante da simulação, o ano da superação, a condição de superação (rede íntegra, deteriorada, equipamento em manutenção etc.) e a justificativa da troca.

De uma forma geral, os Agentes de Transmissão deverão disponibilizar, no documento, os valores dos parâmetros elétricos da rede representada.

As justificativas de troca de equipamentos superados deverão ser baseadas em análise detalhada, em consonância com a metodologia estabelecida neste documento.

Em caso de superação generalizada, em uma determinada subestação, deverão ser analisadas alternativas técnico-econômicas que levem em conta, inclusive, alterações de topologia da rede e equipamentos de limitação de corrente de curto-circuito.

4.5 Resumo dos Critérios para Análise de Superação

A matriz de aplicabilidade dos critérios adotados para os tipos de equipamentos sob análise no presente documento encontra-se na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 - Resumo dos critérios utilizados para análise de superação

Critérios	Equipamentos		
	Disjuntores	Chaves Seccionadoras	Bobinas de Bloqueio
1 – Corrente nominal	X	X	X
2 – Corrente de curto-circuito nominal	X	X	X
3 – Crista da corrente de curto-circuito	X	X	X
4 – Constante de tempo (X/R)	X		
5 – TRT	X		

A análise de superação é feita basicamente por meio da comparação das características nominais dos equipamentos com as solicitações de rede a elas relacionadas, conforme abaixo discriminado:

- I. corrente nominal do equipamento X carregamento máximo que o equipamento é submetido na rede, obtido por programa de fluxo de potência;
- II. corrente de curto-circuito nominal X corrente de curto-circuito passante no equipamento, obtida por programa de cálculo de curto-circuito;
- III. valor de crista da corrente suportável X máxima crista da corrente de curto-circuito passante pelo equipamento;

Somente para disjuntores:

- IV. constante de tempo (X/R) especificada para o disjuntor X constante de tempo determinada para a barra da rede à qual o disjuntor está conectado;
- V. TRT especificada para o disjuntor X TRT determinada para a condição de falta terminal trifásica não aterrada para o disjuntor analisado.

Cada um dos critérios acima elencado é a seguir detalhado, por equipamento.

4.6 Disjuntores

4.6.1 Superação por Corrente de Carga

Definição:

A superação por corrente de carga é caracterizada pela ocorrência de valores de corrente superiores à corrente nominal do equipamento, conforme definido em sua placa, para as condições de rede íntegra (condição N) e de rede alterada (condição N-1).

Responsabilidade:

Caberá ao ONS e aos Agentes de Transmissão a identificação dos equipamentos superados por corrente nominal, utilizando os dados definidos no item 2.2.

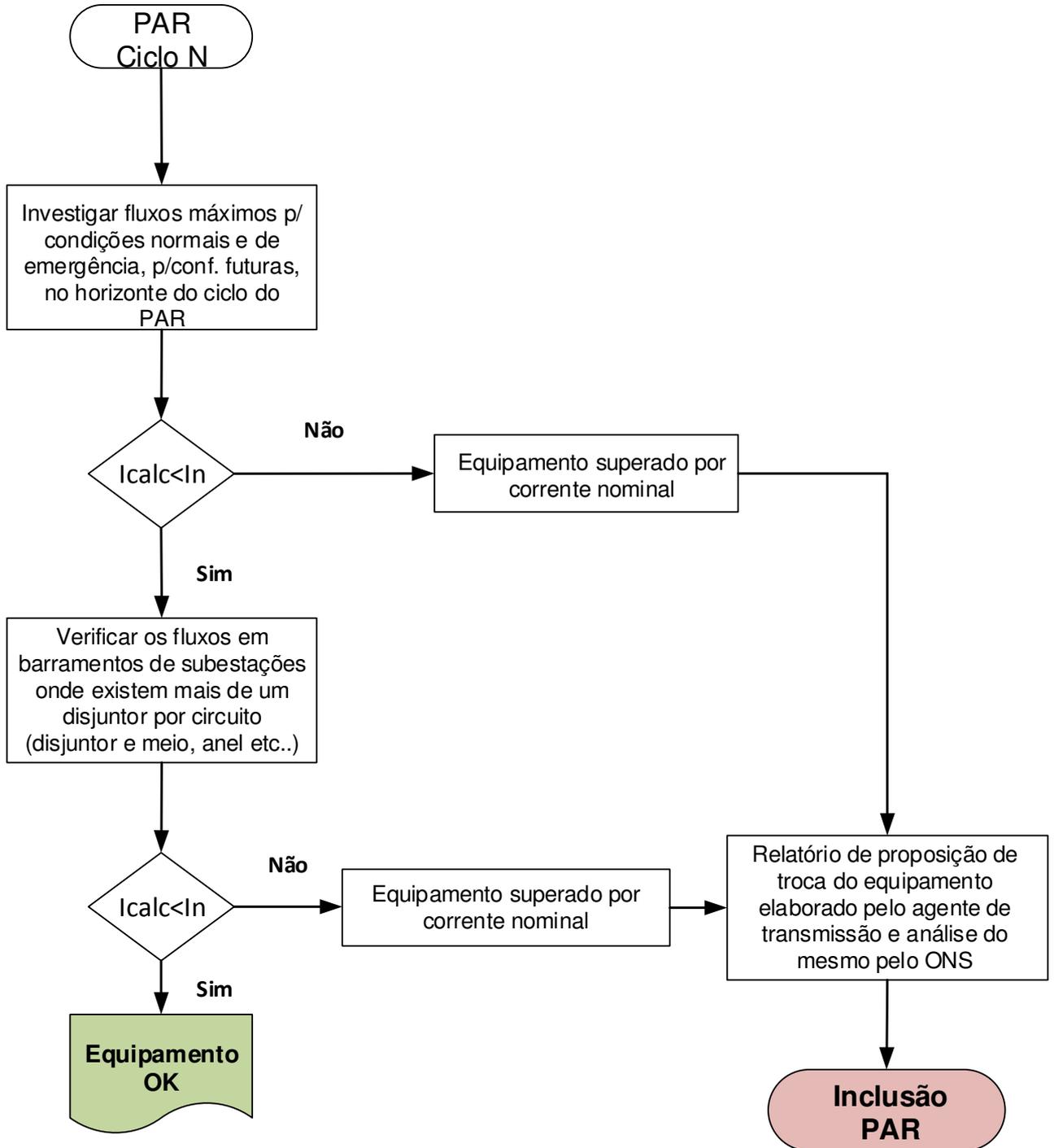
Metodologia:

Na caracterização da superação por corrente de carga, através de estudos de fluxo máximo de potência, deverão ser examinadas as condições mais severas durante emergências no SIN, para configurações futuras, no horizonte do ciclo do PAR, que determinem o maior carregamento para a subestação em análise. Sob essa condição, a investigação deverá verificar o maior carregamento em cada vão:

- a) Com todos os vãos em operação;
- b) Com um disjuntor em manutenção;
- c) Com uma barra em manutenção (arranjo DJM e BD duplo disjuntor);
- d) Para os disjuntores interligadores de barras nos arranjos BD 4 ou 5 chaves e BPT, deve ser analisado o maior carregamento quando o mesmo estiver sendo utilizado.

O fluxograma da Figura 1 ilustra o procedimento acima descrito. O mesmo fluxograma pode ser utilizado para a avaliação da superação por corrente de carga das chaves seccionadoras e bobinas de bloqueio.

Figura 1 - Procedimento para avaliação da superação por corrente de carga para disjuntores, chaves seccionadoras e bobinas de bloqueio



4.6.2 Superação por Corrente de Curto-Circuito

Definição:

A superação por curto-circuito é caracterizada pela ocorrência de correntes de curto-circuito simétricas ou assimétricas, com magnitudes superiores àquelas definidas como nominais para os equipamentos em análise, em condições normais de operação e de emergência, no horizonte do ciclo do PAR. Portanto, para os disjuntores, deve-se avaliar a superação por corrente de curto-circuito simétrica, pela crista da corrente de curto-circuito, por constante de tempo (X/R) e por tensão de restabelecimento transitória (TRT). Estes dois últimos temas estão descritos com mais detalhes nos **itens III** (“Critério para especificação de disjuntores de alta tensão quando submetido a correntes de curto-circuito com constante de tempo elevada”) e **IV** (“Metodologia de cálculo da TRT para estudos de superação de disjuntores”) do presente documento.

Responsabilidade:

Caberá ao ONS e aos Agentes de Transmissão a identificação dos equipamentos superados por corrente de curto-circuito, utilizando os dados definidos no item 2.2.

Metodologia de Superação por Corrente de Curto-Circuito Simétrica

Uma vez caracterizada a indicação de superação, através da comparação da corrente de curto-circuito simétrica total com a capacidade de corrente suportável nominal dos disjuntores, os Agentes deverão fazer análises mais detalhadas, verificando a corrente passante nos equipamentos e o correto quantitativo de disjuntor superado. Caso o número de disjuntores superados seja muito elevado ou a substituição dos mesmos seja de difícil implementação, os Agentes deverão analisar outras alternativas técnico-econômica, como por exemplo a utilização de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito.

Metodologia de Superação pela Crista da Corrente de Curto-Circuito

A superação por crista da corrente de curto-circuito é caracterizada pela ocorrência de magnitudes superiores àquelas definidas como nominais para os equipamentos em análise. A crista da corrente de curto-circuito pode ser determinada em função da corrente de curto-circuito simétrica e da constante de tempo da rede, determinadas nos estudos de curto-circuito através da seguinte fórmula:

$$I_p = I_{cc} \cdot \sqrt{2} \cdot (1 + e^{-t_p / \tau})$$

I_p : valor de crista da corrente de curto-circuito calculada

I_{cc} : valor eficaz da corrente de curto-circuito calculada nos estudos de cc

t_p : tempo de crista da corrente de curto-circuito (8,33 ms para 60 Hz ou 10 ms para 50 Hz)

τ : constante de tempo calculada para a barra onde o equipamento é instalado (L/R)

Metodologia de Superação por Constante de Tempo (X/R)

Devido à complexidade dos fenômenos envolvidos na análise de superação de disjuntores por X/R, assim como a falta de tradição neste tipo de análise, optou-se por desenvolver e adotar um critério próprio de superação por X/R, apresentado em detalhes na referência [7]. Em princípio, o fato de o X/R da rede ultrapassar o X/R especificado para o disjuntor não necessariamente leva à superação do equipamento. A superação por X/R é determinada pela análise deste parâmetro juntamente com a amplitude da corrente de curto-circuito simétrica, ambos determinados pelo cálculo de curto-circuito da rede.

Conforme proposto em [7], para cada faixa pré-definida de X/R da rede, existe um fator de redução da corrente nominal de curto-circuito do disjuntor que permite a operação segura do equipamento, mesmo em condições de rede com constante de tempo acima do valor normalizado (45 ms). Os valores originais desse fator de redução são apresentados na Tabela 2. O grupo de trabalho, ONS e Agentes, adotou, porém, fatores mais conservativos que os originalmente propostos, visando dar maior segurança à aplicação do critério proposto. O critério para superação por X/R adotado pelo ONS e Agentes é apresentado em forma de fluxograma na Figura 2. Os fatores de redução adotados foram: 0,7 para τ entre 75 e 120 ms (inclusive); 0,8 para τ entre 60 e 75 ms (inclusive); e 0,85 para τ entre 45 e 60 ms (inclusive).

Tabela 2 - Fatores de redução da corrente nominal de curto-circuito, obtidos pelo critério da manutenção da energia do arco

τ (ms)	$0 < t_{op} \leq 10$	$10 < t_{op} \leq 27,5$	$27,5 < t_{op} \leq 44,5$
45	1,000	1,000	1,000
60	0,896	0,881	0,883
75	0,847	0,820	0,818
120	0,767	0,722	0,708

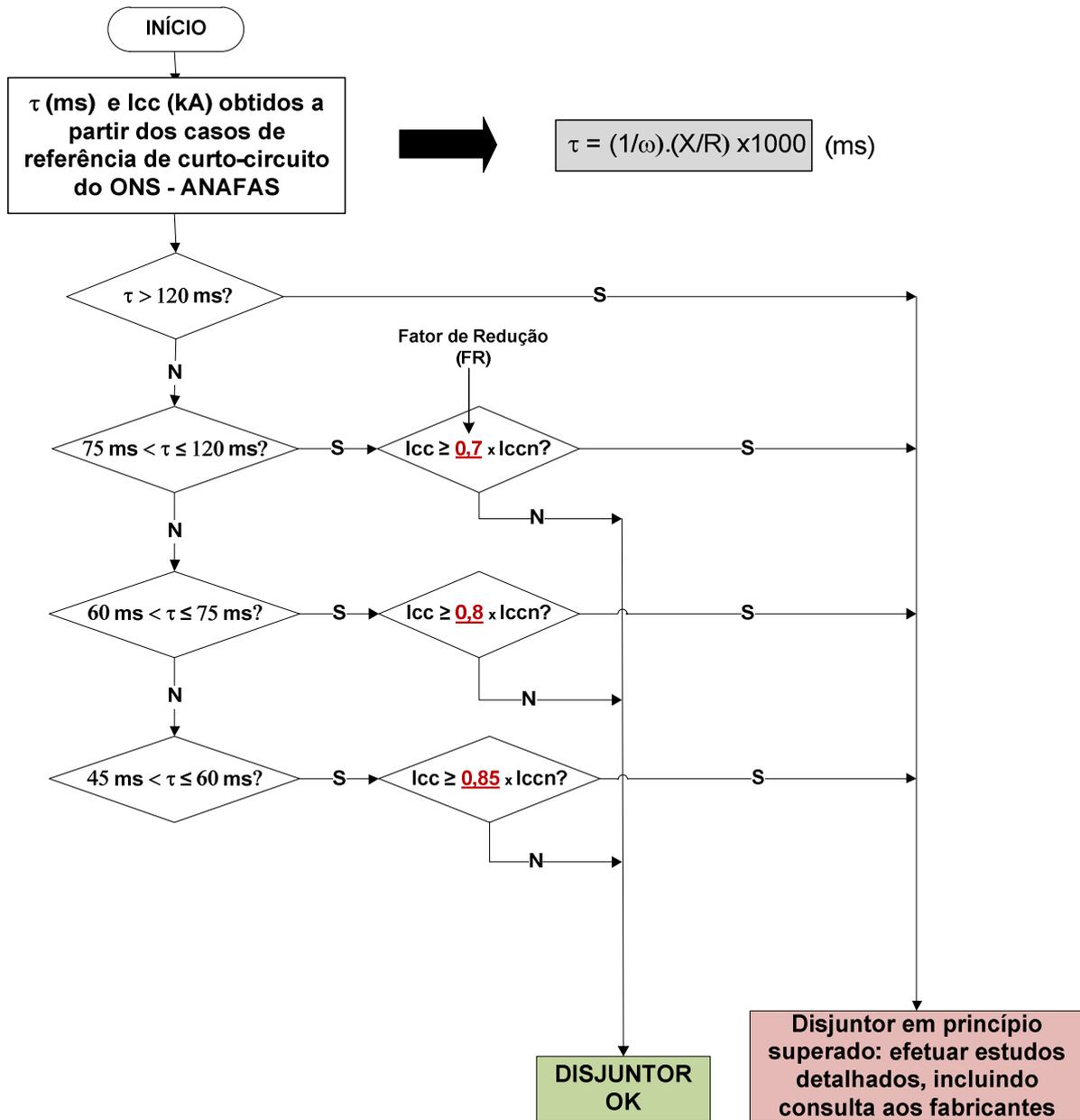
Nota: τ - constante de tempo derivada da relação entre a indutância e a resistência de curto-circuito equivalente da rede no ponto considerado.

t_{op} - tempo de abertura do disjuntor em ms.

Na Figura 2, quando a corrente simétrica de curto-circuito da rede ultrapassa a corrente de curto-circuito nominal do disjuntor, multiplicada pelo respectivo fator de redução, o diagnóstico correspondente é “disjuntor em princípio superado”. A razão é que nestes casos o fabricante do disjuntor deve ser preferencialmente consultado, antes de definitivamente diagnosticar o equipamento como superado por constante de tempo. Nos casos em que o diagnóstico é “disjuntor OK” há segurança suficiente para considerar o disjuntor apto a operar na condição analisada, por conta das premissas assumidas no desenvolvimento desse critério.

Este tema encontra-se descrito com mais detalhes no **item III** (“Critério para especificação de disjuntores de alta tensão quando submetido a correntes de curto-circuito com constante de tempo elevada”) do presente documento.

Figura 2 - Critério adotado para a superação de disjuntores por X/R



(*) Fatores de redução da corrente nominal de curto-circuito provenientes da Tabela 2

Metodologia de Superação por TRT

A superação do disjuntor por TRT fica caracterizada pela ultrapassagem dos valores de suportabilidade dielétrica ou térmica do seu meio de extinção do arco, ou seja, quando, considerada a abertura do disjuntor, a tensão entre os contatos imposta pelo sistema for superior à especificada, seja por magnitude ou por taxa de crescimento. Caberá à transmissora identificar, com base nos resultados das simulações, a serem por ela executadas, os disjuntores superados por TRT.

Para efeito de julgamento, deverão ser considerados, na etapa inicial, os valores e envoltórias propostos pela ABNT, ou norma pertinente à especificação do disjuntor, considerando os diversos níveis de corrente pré-defeito lá estabelecidos.

Serão considerados para análise, nesta etapa, os disjuntores que apresentem níveis de curto-circuito superiores a 85% do valor nominal do equipamento. As simulações de TRT nesta etapa devem ser realizadas para uma representação simplificada da rede que, por acarretar menos amortecimentos, tende a produzir resultados mais conservadores.

O cálculo da TRT é uma tarefa complexa, tendo em vista os diversos fatores que podem influenciar sua determinação. As dificuldades para a realização de um estudo de TRT são a identificação da metodologia aplicável, a modelagem da rede elétrica e os critérios de estudo e simulação. Desta forma, é importante que os diversos Agentes que realizam estudos de TRT com vistas à análise de superação adotem um mesmo conjunto de critérios básicos. Os critérios e metodologia adotados pelo ONS e Agentes para análise de TRT são descritos detalhadamente em no item [8]. Os principais pontos da metodologia recomendada são:

- a) Utilizar um programa de cálculo de transitórios eletromagnéticos, por exemplo ATP/EMTP;
- b) Considerar falta terminal trifásica não aterrada;
- c) Adotar a representação trifásica da rede estudada;
- d) Validar a representação adotada mediante comparação dos valores de curto-circuito para faltas trifásicas e monofásicas obtidos com o uso programa ANAFAS e sistema completo com aqueles obtidos pelo ATP/EMTP com o sistema reduzido, utilizando-se equivalentes de rede;
- e) A modelagem transitória da rede simulada deve se estender até a segunda barra a montante da barra alimentadora do disjuntor investigado;
- f) As linhas de transmissão devem ser representadas pelo modelo de parâmetros distribuídos, sem correção com a frequência; os transformadores e reatores devem ser representados sem considerar a saturação, capacitâncias parasitas e perdas no ferro; não representar as cargas;
- g) Os disjuntores devem ser representados pelo modelo de chaves ideais tempo-controladas; não representar o arco-elétrico do disjuntor nem as capacitâncias de

equalização de tensão (em paralelo com as câmaras de interrupção); não considerar polo preso do disjuntor.

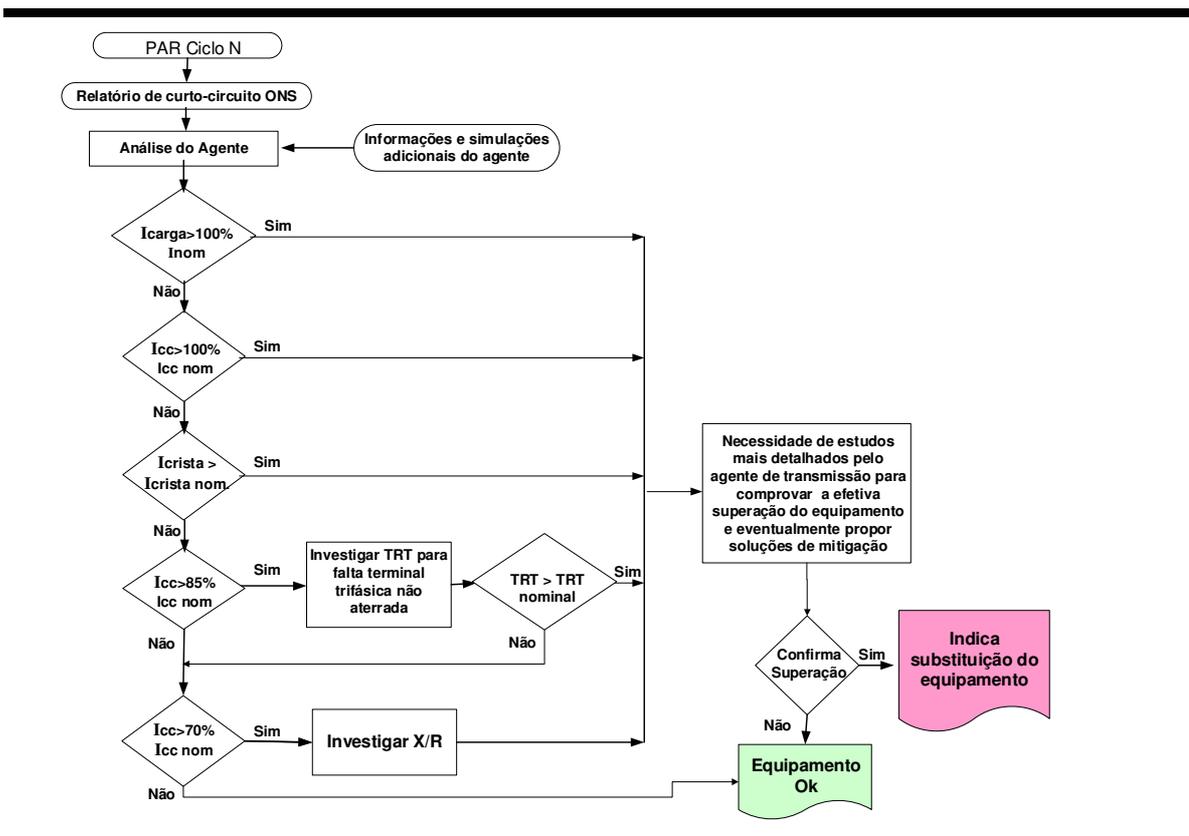
h) Representar as cargas com modelo RL paralelo na barra da subestação cujos disjuntores estão sendo analisados. Caso não tenha carga na própria barra, a representação das cargas nas barras adjacentes deve ser realizada. A representação das cargas nas barras adjacentes também deve ser adotada quando o disjuntor em análise se mantiver superado por TRT, após o estudo considerando apenas a representação da carga na barra da subestação do disjuntor avaliado.

Uma vez determinada a TRT por simulação, o critério de superação é a comparação da mesma com a envoltória normalizada interpolada para o nível da corrente do defeito analisado.

Este tema encontra-se descrito com mais detalhes no **item IV** (“Metodologia de cálculo da TRT para estudos de superação de disjuntores”) do presente documento.

O fluxograma da Figura 3 ilustra todos os procedimentos de superação de disjuntores acima descrito, incluindo os aspectos referentes à TRT.

Figura 3 - Procedimento para avaliação da superação de disjuntores



Nota: Para a efetivação da análise referente a corrente “passante”, deverá ter sido feita previamente, pela transmissora, por meio de simulações, a análise de “line out”. O Relatório Indicativo de Superação, fornecido pelo ONS, considera apenas a corrente total.

4.7 Chaves Seccionadoras e Bobinas de Bloqueio

4.7.1 Superação por Corrente de Carga

Definição:

A superação por corrente de carga é caracterizada pela ocorrência de valores de corrente de regime permanente superiores às correntes nominais destes equipamentos, constantes em suas placas, quer para as condições de rede íntegra (condição N), quer para a condição de rede deteriorada (condição N-1).

Responsabilidade:

Caberá ao ONS e aos Agentes de Transmissão a identificação dos equipamentos superados, por corrente nominal, utilizando os dados definidos no item 2.2.

Metodologia:

Na caracterização da superação por corrente de carga, através de estudos de fluxo máximo de potência, deverão ser examinadas as condições mais severas durante emergências no SIN, para configurações futuras, no horizonte do ciclo do PAR, que determinem o maior carregamento para a subestação em análise. Sob essa condição, a investigação deverá verificar o maior carregamento em cada vão:

- a) Com todos os vãos em operação;
- b) Com um disjuntor em manutenção;
- c) Com uma barra em manutenção (arranjo DJM e BD duplo disjuntor);
- d) Para os disjuntores interligadores de barras nos arranjos BD 4 ou 5 chaves e BPT, deve ser analisado o maior carregamento quando o mesmo estiver sendo utilizado.

O fluxograma da Figura 1 apresentado na superação de disjuntores, também ilustra o procedimento acima descrito.

4.7.2 Superação por Corrente de Curto-Circuito

Definição:

A superação por curto-circuito é caracterizada pela ocorrência de correntes de curto-circuito, simétricas ou assimétricas, com magnitudes superiores àquelas definidas como nominais para os equipamentos em análise, em condições normais e de emergência, no horizonte do ciclo do PAR.

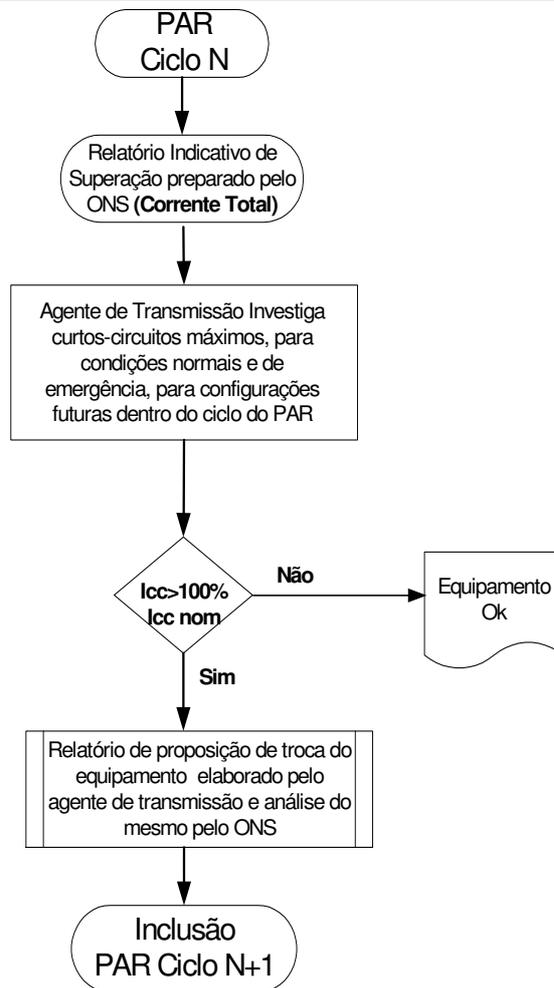
Responsabilidade

Caberá ao ONS e aos Agentes de Transmissão a identificação dos equipamentos superados por corrente de curto-circuito, utilizando os dados definidos no item 2.2.

Metodologia de Superação por Corrente de Curto-Circuito Simétrica

Uma vez caracterizada a indicação de superação, através da comparação das correntes de curto-circuito totais com as capacidades de corrente suportável nominal de curta duração dos equipamentos, os Agentes deverão fazer análises mais detalhadas, verificando a corrente passante nos equipamentos, considerando a configuração de barras e de emergência da rede para avaliar a superação dos mesmos e caso confirmada, devem ser estudadas possíveis soluções a serem aplicadas à rede existente. O fluxograma da Figura 4 ilustra o procedimento descrito.

Figura 4 - Procedimento para avaliação da superação por corrente de curto-circuito para chaves seccionadoras e bobinas de bloqueio



Metodologia de Superação pela Crista da Corrente de Curto-Circuito

A superação por crista da corrente de curto-circuito é caracterizada pela ocorrência de magnitudes superiores àquelas definidas como nominais para os equipamentos em análise. A crista da corrente de curto-circuito pode ser determinada em função da corrente de curto-circuito simétrica e da constante de tempo da rede, determinadas nos estudos de curto-circuito através da seguinte fórmula:

$$I_p = I_{cc} \cdot \sqrt{2} \cdot (1 + e^{-t_p / \tau})$$

I_p : valor de crista da corrente de curto-circuito calculada

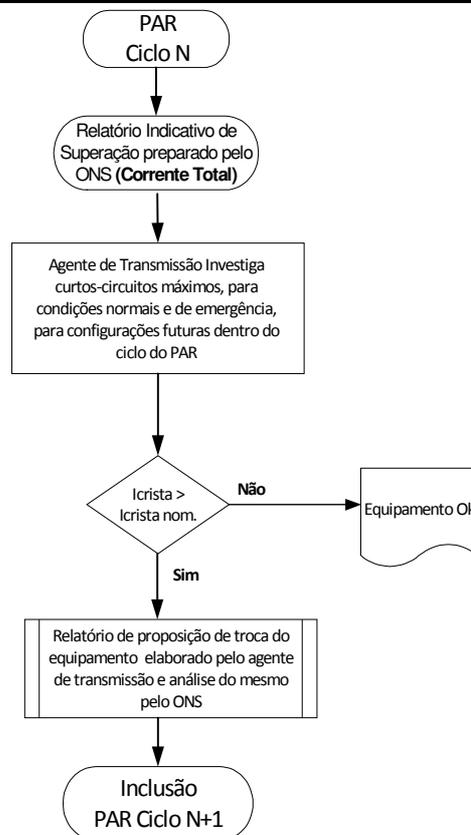
I_{cc} : valor eficaz da corrente de curto-circuito calculada nos estudos de cc

t_p : tempo de crista da corrente de curto-circuito (8,33 ms para 60 Hz ou 10 ms para 50 Hz)

τ : constante de tempo calculada para a barra onde o equipamento é instalado (L/R)

O fluxograma da Figura 5 ilustra o procedimento de avaliação da superação pela crista da corrente de curto-circuito.

Figura 5 - Procedimento para avaliação da superação pela crista da corrente de curto-circuito para chaves seccionadoras e bobinas de bloqueio



5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Equipamentos Elétricos - Especificação e Aplicação em Subestações de Corrente Alternada – Capítulo 14 – Superação de Equipamentos - Amon F.,J., Livro Publicado por FURNAS/UFF, 1985.
- [2] Tensão de Restabelecimento Transitória de Disjuntores - Metodologia de Estudo - Amon F.,J., Dissertação Submetida à Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro para a obtenção do Título de Mestre em Ciências de Engenharia Elétrica, 1986.
- [3] Aplicação de Novas Técnicas de Limitação de Curto-Circuito Face à Conexão de Produtores Independentes à Rede Básica Sob o Novo Ambiente Desregulamentado do Setor Elétrico Brasileiro - Amon Fo., J., Hartung K. H. - XVI SNPTEE, Campinas, outubro de 2001.
- [4] Limitação dos Níveis de Curto-Circuito no Setor de 345 kV da Subestação de Mogi das Cruzes Através do Emprego de Reatores Limitadores de Núcleo de Ar - Amon F.,J, Maldonado, P. M., Peres, L. A. P., Gomes, R., Orçai, J. e outros - VIII ERLAC – Ciudad del Este, 1999.
- [5] Fault Current Limiters in Electrical Medium and High Voltage Systems – Report on the activities of WG 13.10 - AMON F., J. e outros, Colóquio Técnico do SC A3 – Sarajevo, 15 e 16/09/2003.
- [6] Fault Current Limiters Application, principles and testing – by CIGRÉ WG A3.10”, AMON F., J. e outros, Revista ELECTRA #211, pg. 47 – 57 e CIGRÉ Technical Brochure #239, dezembro de 2003.
- [7] Relatório Técnico – ONS RE2.1/090-2003 - Critérios para a especificação de disjuntores de alta tensão quando submetido a correntes de curto-circuito com constante de tempo elevada.
- [8] GT de análise de superação de equipamentos de at, Metodologia de cálculo da TRT para estudos de superação de disjuntores, relatório ons 2.1/079/2005, 08/09/2005.

Participantes	Empresa
Paulo Ricardo C. Oliano	CEEE
Jeder Francisco de Oliveira	CEMIG
Angélica da C. O. Rocha	CEMIG
Rita Kátia Delgado Medeiros	CHESF
Fernando Rodrigues Alves	CHESF
Francisco José de Avelar Baltar	CHESF
Júlio César Xavier Chiradia	COELBA
Inácio Minoru Ota	CTEEP
José Antônio S. de Freitas	CTEEP
Durvaldo Gonçalves Filho	CTEEP
Nilson Kozlowski	ELETRONORTE
Ruy Luiz Machado	ELETROSUL
Marco Antônio de Paiva Fontes	FURNAS
Paulo César Alves Fernandes	FURNAS
Jorge Amon Filho	FURNAS
Antonio Carlos R. A. Oliveira	LIGHT
Antônio Sérgio Conrado	ONS
Helio Pessoa de Oliveira Jr	ONS
Rui Menezes de Moraes	ONS
Marcilio Valença	ONS
Andréia Maia Monteiro	ONS
Roberto Rocha	ONS
Humberto Arakaki	ONS
Benedito Adelino Souza da Silva	ONS
Fernando José de C. França	ONS
Dalton O. C. do Brasil	ONS
Marianna Nogueira Bacelar	ONS

II - DIRETRIZES PARA ANÁLISE DE SUPERÇÃO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE



II - DIRETRIZES PARA ANÁLISE DE SUPERAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE

RE - 2.1/207/2004 – Revisão 3

Revisões do relatório

R1 – 04/01/2005

seção	páginas	descrição
2.2.1		acrescentado referência [10]

R2 – 08/09/2005

seção	páginas	descrição
2.2.2.1		adaptação da equação (10)
2.2.2.2		adaptação da equação (13)
2.2.3		inclusão do item Aplicabilidade da Avaliação Completa.

R3 – 14/01/2013

seção	páginas	descrição
2.1.3		acerto da equação da constante de tempo primária -Tp (3)

INTRODUÇÃO E OBJETIVO

Com o objetivo de orientar os Agentes de Transmissão na identificação de superação de equipamentos da Rede Básica e das Demais Instalações de Transmissão (DITs), criaram-se dois grupos de trabalho visando o desenvolvimento de metodologias padronizadas para identificação destas superações. Os grupos foram divididos de acordo com os equipamentos envolvidos, sendo o Grupo 1 responsável pela metodologia para avaliação de superação de Disjuntores, Bobinas de Bloqueio e Seccionadoras; e o Grupo 2 responsável pela análise dos Transformadores de Corrente.

O presente relatório tem como objetivo descrever a metodologia de Verificação de Superação de Transformadores de Corrente da Rede de Operação, desenvolvida pelo Grupo 2 formado por Agentes do Setor Elétrico e pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), conforme apresentado no item 4. Entretanto, esta análise expedita considera o equipamento como sendo ideal durante toda sua vida útil e, por isso, o grau de envelhecimento do equipamento e a degradação de suas características elétricas que só podem ser avaliados através de aplicação de técnicas de engenharia de manutenção, não são contemplados neste trabalho, cabendo portanto aos Agentes, o detalhamento da análise e a indicação da real necessidade de substituição dos equipamentos, uma vez que estas particularidades fazem parte do conhecimento exclusivo dos mesmos.

Uma vez caracterizado a superação de algum equipamento, caberá aos Agentes, propor soluções mitigadoras, com base nos aspectos técnicos, econômicos e operacionais, inerentes a cada caso, realizando-se consultas aos fabricantes quando da ausência de informações necessárias à aplicação da metodologia.

Esta metodologia será aplicada de forma rotineira, sendo baseada nos dados fornecidos pelo Plano de Ampliações e Reforços (PAR), podendo a mesma ser empregada a qualquer tempo nos casos base de curtos-circuitos consolidados pelo ONS.

DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS DE SUPERAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE

Didaticamente, a avaliação de superação de transformadores de corrente pode ser dividida em dois aspectos. O primeiro aspecto se refere a suportabilidade quanto às correntes de regime permanente e curto-circuito. O segundo aspecto trata de análise de desempenho, onde se analisa a resposta do TC junto aos relés de proteção em situações de curto-circuito.

Nota: Com o objetivo de evitar possíveis conflitos com a nomenclatura usualmente atribuída a tipos de curto-circuito (monofásicos e trifásicos), destaca-se que serão empregadas as nomenclaturas de correntes de curto-circuito simétricas e assimétricas para designar a ausência ou não da componente de corrente contínua (também conhecida como exponencial).

O diagrama apresentado na Figura 6 resume os pontos básicos considerados na avaliação de superação.

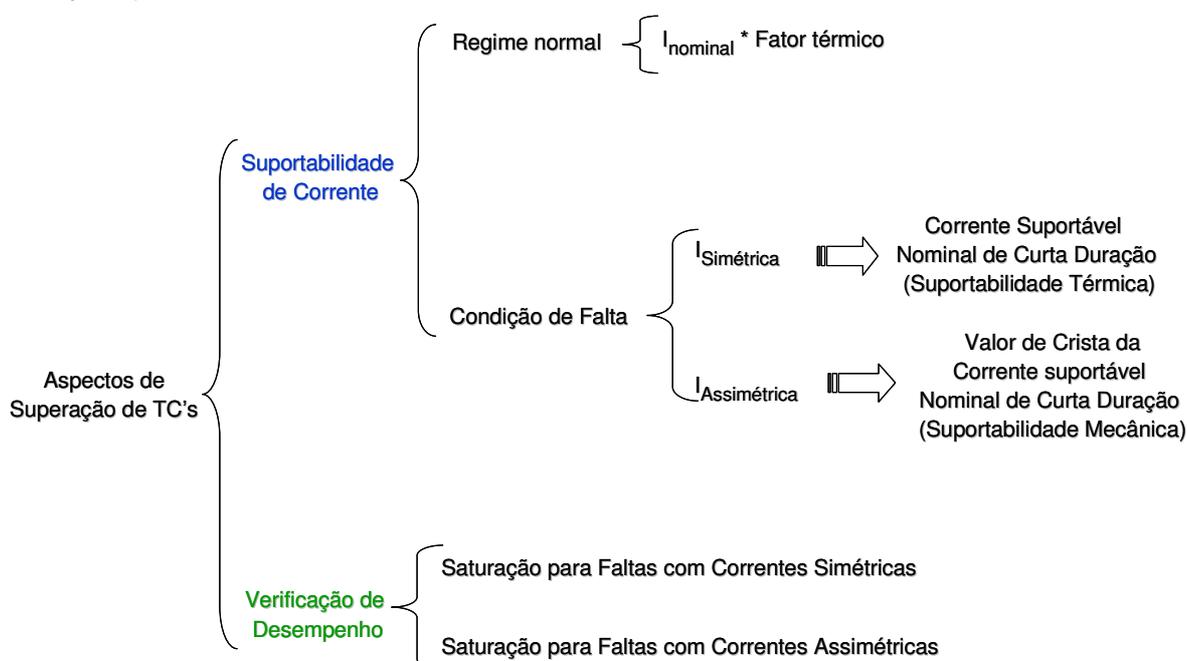


Figura 6 - Visão geral dos critérios de superação.

Para avaliação de superação, o Agente pode optar dentre dois métodos, dependendo do tipo de abordagem desejada. Os métodos foram classificados como **Avaliação Simplificada (ou Expedita)** e **Avaliação Completa**:

Avaliação Simplificada (ou Expedita): considera a avaliação de superação com base nas correntes de curto-circuito, onde são analisadas as suportabilidades térmica e mecânica, e na corrente de regime permanente.

Avaliação Completa: além dos critérios definidos na Avaliação Simplificada, inclui-se também a avaliação da resposta do TC, levando em consideração os tempos de atuação da proteção e/ou eliminação de falta.

2.1 Avaliação Simplificada

A Avaliação Simplificada trata da suportabilidade do enrolamento primário do TC, associada às correntes de regime normal e às correntes de curtos-circuitos simétricos e assimétricos. Basicamente, são comparadas as correntes obtidas da análise de fluxo de potência e de curto-circuito, com as especificações de corrente nominal, térmica e dinâmica do transformador de corrente.

2.1.1 Superação para Regime Normal

A corrente de regime permanente deve corresponder à máxima carga, fazendo-se a análise de fluxo de potência para a condição de perda de um elemento da rede (condição N-1).

A verificação de superação é realizada comparando-se a corrente de regime permanente ($I_{carga\ primária}$) com a corrente nominal do TC, multiplicada pelo fator térmico (FT) da relação empregada:

$$I_{carga\ primária} > I_{nominal} * FT \quad (1)$$

2.1.2 Superação para Condição de Curto-circuito Simétrico (Sem Componente de Corrente Contínua)

Neste tipo de avaliação, compara-se a corrente de curto-circuito simétrico com o valor de corrente suportável nominal de curta duração do TC ($I_{térmica}$).

A corrente de curto-circuito deve ser obtida visando a pior condição de contribuição de falta pelo TC (falta na barra, terminal e *line-out*). Devem ser avaliados os níveis das correntes de curtos-circuitos monofásicos e trifásicos. A Base de Dados utilizada pelos Agentes deve ser comum, correspondendo aos casos de curto-circuito consolidados pelo Operador Nacional do Sistema - ONS. Fica a critério de o Agente avaliar a necessidade de verificação de superação para outros tipos de faltas (curto-circuito bifásico e bifásico-terra).

Para identificação da pior condição de contribuição de falta pelo TC, deverão ser simuladas faltas nas barras, faltas terminais e faltas sob a condição *line-out* (condição de energização da LT com fechamento do disjuntor com curto-circuito terminal). Caso seja utilizado o programa ANAFAS, as simulações de faltas terminais podem ser obtidas aplicando-se o

curto-circuito na barra, subtraindo a contribuição do elemento (linhas de transmissão e transformadores de potência) ao qual o transformador de corrente está conectado.

Nota: Segundo informações de fabricantes de TCs, as normas de especificações técnicas não são claras e, portanto, o TC pode ser projetado, considerando a corrente térmica garantida somente na maior relação, se não houver especificação contrária. No entanto, para fins de uma análise expedita, a corrente térmica pode ser considerada como independente da relação utilizada. Isto porque a relação, tradicionalmente empregada em projetos de TCs, entre a densidade de corrente adotada para a suportabilidade térmica do TC (de 160 a 180A/mm² [1][2]) e a de regime permanente (de 2 a 2,4 A/mm² – valor este adotado pela Indústria), é da ordem de 75 vezes, razão está bem superior à normalmente encontrada entre a maior e menor relação de transformação disponível no TC. Atenção especial deve ser dada para as menores relações, já que nestes casos a relação entre corrente térmica e corrente nominal pode, eventualmente, ultrapassar a relação mencionada. Caso o Agente opte por uma análise mais apurada para conhecimento do valor da corrente térmica em todas as relações, pode-se recorrer à especificação técnica do equipamento ou à consulta ao fabricante.

2.1.3 Superação para Condição de Curto-circuito Assimétrico (Com Componente de Corrente Contínua)

De posse dos valores de X/R e da corrente simétrica (I_{sim}), obtidos das simulações de curtos-circuitos, é possível estimar o valor da corrente para um defeito plenamente assimétrico (I_{ass}) aplicando-se a equação (2):

$$I_{ass} = I_{sim} * \sqrt{2} \left(e^{-\frac{t}{T_p}} + 1 \right). \quad (2)$$

Onde T_p é a constante de tempo primária, dada por:

$$T_p = \frac{1}{2\pi f} \frac{X}{R} \quad (3)$$

O valor de pico da corrente de falta assimétrica ($I_{pico\ ass}$) ocorre meio ciclo após a incidência da falta. Para a frequência de 60 Hz, este valor é de 0,0083 segundos. Substituindo este tempo em (2), obtém-se:

$$I_{pico\ ass} = I_{sim} * \sqrt{2} \left(e^{-\frac{0.0083}{T_p}} + 1 \right). \quad (4)$$

A suportabilidade do TC contra correntes de faltas assimétricas é verificada comparando-se o resultado de (4) com o valor especificado de crista da corrente nominal de curta duração ($I_{mecânica}$).

2.2 Avaliação Completa

Além dos tópicos tratados na Avaliação Simplificada, a Avaliação Completa analisa a resposta de corrente secundária provida pelo TC, considerando sua carga secundária e suas características magnéticas. Com o objetivo de simplificar a análise, a avaliação de resposta do TC é dividida em duas etapas, quais sejam, verificação de saturação para faltas simétricas, onde não há componente de corrente contínua transitória da corrente de curto-circuito, e para faltas assimétricas, que considera a presença da componente de corrente contínua.

2.2.1 Verificação de Saturação para Faltas Simétricas

Nesta etapa, deseja-se identificar TCs em situações críticas quanto ao risco de saturação. Conforme será apresentado no Fluxograma, uma vez constatada a saturação para faltas simétricas, o TC é classificado como superado e dispensa-se a avaliação deste para faltas assimétricas, cuja análise é mais trabalhosa e necessita de uma quantidade maior de informação.

A saturação é verificada comparando-se a tensão imposta ao TC, durante a condição de falta, com a tensão de saturação deste (V_{sat}) [10]. A tensão imposta ao secundário de um TC quando da ocorrência de curto-circuito simétrico (V_{sim}), é calculada pela seguinte expressão:

$$V_{sim} = \frac{I_{sim}}{RTC} \cdot (Zb_{nominal} + R_{tc}) \quad (5)$$

Onde:

I_{sim} : corrente primária de curto-circuito simétrico.

RTC : relação de transformação do TC.

R_{tc} : resistência secundária do TC.

$Zb_{nominal}$: impedância nominal do TC (ou alternativamente o somatório das impedâncias nominais dos relés e impedância dos cabos (ver item 2.2.3)).

Portanto, ocorrerá saturação do TC caso a tensão imposta seja superior à tensão de saturação do mesmo, conforme equação (6).

$$\frac{I_{sim}}{RTC} \cdot (Z_{b\ nominal} + R_{tc}) > V_{sat} \quad (6)$$

O critério para determinação da tensão de saturação é definido através da intersecção das retas de subida e de saturação (Figura 7 (a)), conforme procedimento IEC. No caso de os dados disponíveis não fornecerem medidas suficientes para determinação da reta da região de saturação, pode-se utilizar, alternativamente, o procedimento ANSI para obtenção da tensão de saturação (Figura 7(b)).

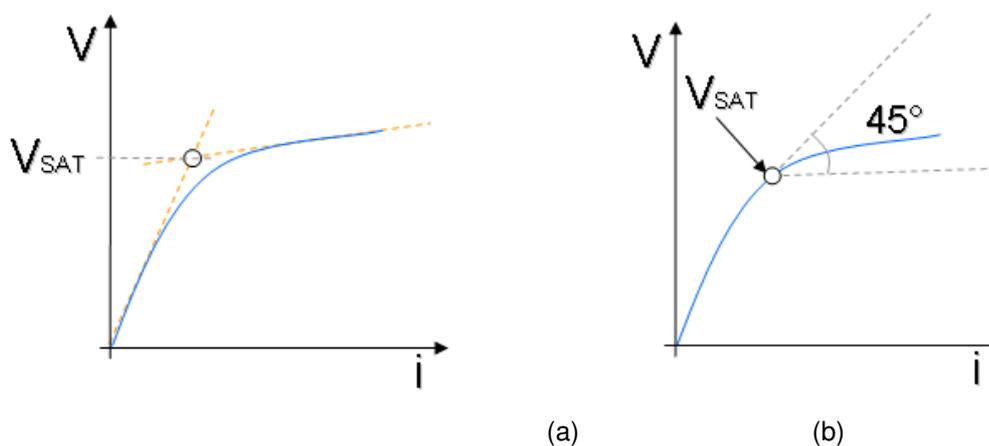


Figura 7 - Procedimento IEC (a) e Procedimento ANSI (b).

2.2.2 Verificação de Saturação para Falhas Assimétricas

O equacionamento é fundamentado na Norma IEC 60044-6 [3], que trata da especificação técnica de transformadores de corrente, destinados à proteção, quando sujeitos às faltas assimétricas. Embora esta norma seja voltada à especificação técnica, os conceitos e formulações nela apresentados são plenamente aplicáveis à finalidade de avaliação de desempenho transitório de TCs instalados no sistema. Analogamente ao exposto no item 2.2.1, esta verificação baseia-se na comparação da tensão de saturação do TC com o valor da tensão imposta ao secundário, com a particularidade desta última ser calculada considerando-se o tempo de atuação da proteção e o ciclo de operação do disjuntor.

Emprega-se, ainda, uma formulação simplificada nos casos sem religamento com o objetivo de facilitar o processo de avaliação.

Neste relatório, nos limitaremos unicamente a empregar a formulação, sem deduções detalhadas e extensas já que estas se encontram amplamente difundidas na literatura [4][5][6][7].

Para o cálculo da tensão assimétrica imposta ao secundário (E_{al}), a IEC fornece a seguinte equação:

$$E_{al} = (R_{tc} + R_b) I_{sn} \cdot K_{ssc} \cdot K_{td} \quad (7)$$

Devido ao enfoque de a metodologia apresentada neste relatório abordar a avaliação de TCs existentes, e não especificação de TCs, é conveniente reescrever a equação (7) conforme segue:

$$E_{al} = V_{sim} \cdot K_{td} \quad (8)$$

Onde V_{sim} é dada pela equação (5). O parâmetro K_{td} é definido como fator de dimensionamento transitório, onde são incorporadas informações como constantes de tempo e ciclo de operação do disjuntor. Para cada ciclo de operação, deve-se calcular o K_{td} correspondente a partir da formulação fornecida pela IEC.

2.2.2.1 Formulação para os casos sem religamento (Ciclo C - O)

Formulação simplificada:

Com a intenção de se reduzir o número de TCs avaliados pela formulação IEC, inicialmente usar-se-á a equação (9) para o cálculo simplificado da tensão imposta assimétrica (E_{ass}) para os casos sem religamento.

$$E_{ass} = V_{sim} \cdot \left(\frac{X}{R} + 1 \right) \quad (9)$$

Onde a tensão de curto-circuito simétrico V_{sim} é dada por (5).

Como pode ser verificado em [5], a equação acima fornece a máxima tensão que poderá ser imposta ao secundário do TC, para uma determinada localização de instalação do mesmo e independentemente do tempo de atuação de proteção. Utilizando-se somente as relações X/R e as tensões de curtos-circuitos simétricos, pode-se identificar TCs sobredimensionados em termos de tensão de saturação. Entretanto, não é possível aplicá-la para os casos com religamento automático, uma vez que a sua dedução é baseada somente na incidência da primeira falta (fluxo magnético partindo de zero) e, portanto, não considera o fluxo residual no núcleo do TC.

O significado físico das variáveis E_{ass} e E_{al} é o mesmo, mas para diferenciação entre a equação simplificada e a fornecida pela IEC, as nomenclaturas foram particularizadas com o objetivo de facilitar a leitura do Fluxograma Final.

Formulação IEC 60044-6:

Por definição, a formulação contida na referida norma baseia-se em cargas resistivas conectadas aos TCs. Para permitir a avaliação com cargas indutivas (relés eletromecânicos), torna-se necessária a adaptação das equações conforme apresentado em [4]. No caso de ciclos C-O, o cálculo da tensão imposta requer o valor de K_{td} obtido a partir da equação (10), fornecida pela IEC e adaptada aos tipos de carga mencionados:

$$K_{td} = \left[\frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \left(e^{-\frac{t'_{al}}{T_p}} - e^{-\frac{t'_{al}}{T_s}} \right) + \frac{1}{\cos(\theta)} \right] \quad (10)$$

Onde T_p é a constante de tempo primária, T_s é a constante de tempo secundária e t'_{al} é o tempo de atuação da proteção no primeiro ciclo. O fator de potência da carga ($\cos(\theta)$) é dado pela seguinte expressão:

$$\cos(\theta) = \frac{R_b + R_{tc}}{\sqrt{X_b^2 + (R_b + R_{tc})^2}} \quad (11)$$

Onde X_b e R_b são, respectivamente, a reatância e a resistência da carga nominal do TC (ou alternativamente o somatório das impedâncias nominais dos relés e impedância dos cabos (ver item 2.2.3)).

É importante salientar que antes do cálculo efetivo de K_{td} , deve-se comparar o tempo de atuação da proteção com o tempo correspondente ao K_{td} máximo ($t_{m\acute{a}x}$), que por sua vez é dado pela relação:

$$t_{m\acute{a}x} = \left(\frac{T_p \cdot T_s}{T_p - T_s} \right) \ln \left(\frac{T_p}{T_s} \right) \quad (12)$$

Caso t'_{al} seja maior que $t_{m\acute{a}x}$, deve-se fazer $t'_{al} = t_{m\acute{a}x}$ na equação (10).

2.2.2.2 Formulação para os casos com religamento (Ciclo C - O - C - O)

Para os casos com religamento, é necessário utilizar a equação (13), fornecida pela IEC e adaptada à aplicação de cargas resistivas ou indutivas:

$$K_{td} = \left[\frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \left(e^{-\frac{t'}{T_p}} - e^{-\frac{t'}{T_s}} \right) + \frac{1}{\cos(\theta)} \right] e^{-\left(\frac{t_{fr} + t''_{al}}{T_s} \right)} + \left[\frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \left(e^{-\frac{t''_{al}}{T_p}} - e^{-\frac{t''_{al}}{T_s}} \right) + \frac{1}{\cos(\theta)} \right] \quad (13)$$

Onde t' é o tempo de eliminação de falta no primeiro ciclo, t_{fr} é o tempo morto e t''_{al} é o tempo de atuação de proteção no segundo ciclo.

Novamente, caso t''_{al} seja maior que $t_{máx}$, deve-se fazer $t''_{al} = t_{máx}$ na equação (13). Destaca-se que $t_{máx}$ deve ser calculado também pela expressão (12), já que seu valor independe do ciclo de operação.

2.2.3 Considerações sobre a Aplicabilidade da Avaliação Completa e os Dados a serem Utilizados

Aplicabilidade da Avaliação Completa com Relação aos Tipos de Falhas

As equações para o cálculo do K_{td} , apresentadas pela IEC, são deduzidas a partir da condição de faltas equilibradas, sem condutor de neutro [4]. Considera-se que as malhas secundárias dos TCs, de cada fase, sejam independentes. Neste caso, a Verificação de Saturação, tratada na Avaliação Completa, aplica-se apenas aos seguintes casos:

- Casos de curtos-circuitos trifásicos na barra, terminal e *line-out*. Nestes casos, as malhas dos secundários dos TCs das três fases podem ser representadas separadamente, já que não há retorno pelo circuito de neutro devido ao equilíbrio da corrente nas fases.
- Casos de curtos-circuitos monofásicos *line-out*. Nestas condições, não há circulação de corrente nos secundários dos TCs das fases sãs. Conseqüentemente, forma-se uma única malha no secundário da fase sob falta, na qual a corrente do circuito de fase é igual a corrente do circuito de neutro.

Identificação das Solicitações de Corrente e Relações X/R das Falhas

Para identificação das solicitações de corrente e relações X/R impostas aos TCs, deverão ser simuladas faltas nas barras, faltas terminais e faltas sob a condição *line-out* (condição de energização da LT com fechamento do disjuntor com curto-circuito terminal), conforme

apresentado no t3pico anterior. Caso seja utilizado o programa ANAFAS, como j3a mencionado, as simula33es de faltas terminais podem ser obtidas aplicando-se o curto-circuito na barra, subtraindo a contribui33o do elemento (linhas de transmiss33o ou transformadores de pot33ncia) ao qual o transformador de corrente est3 conectado.

Identifica33o das Cargas Secund33rias em Fun33o do Tipo de Falta

Conforme ser3 apresentado no Fluxograma de Avalia33o de Desempenho, h3 duas alternativas para o valor de imped33ncia de carga a ser adotado no c3lculo da tens3o imposta. A primeira, e mais simples, corresponde ao uso direto da carga nominal do TC. Caso ocorra satura33o do TC, 3 necess3rio utilizar uma segunda alternativa, onde se representa a imped33ncia secund33ria considerando o somat3rio das cargas dos rel3s.

Aten33o especial deve ser dada quando da necessidade de utiliza33o da segunda alternativa. Neste caso, o levantamento das cargas dos rel3s depende do tipo de falta (monof3sica e trif3sica), como exemplificado na Figura 8.

Para uma falta trif3sica, considerando o sistema equilibrado, a imped33ncia de carga do TC corresponde 3:

$$Z_{b_{nominal}} = R_{cabo} + \Sigma Z_{rel3s-fase} \quad (14)$$

Para uma falta monof3sica, a imped33ncia de carga do TC deve considerar as imped33ncias relacionadas ao neutro (rel3s e cabo de neutro), conforme segue:

$$Z_{b_{nominal}} = 2 \cdot R_{cabo} + \Sigma Z_{rel3s-fase} + \Sigma Z_{rel3s-neutro} \quad (15)$$

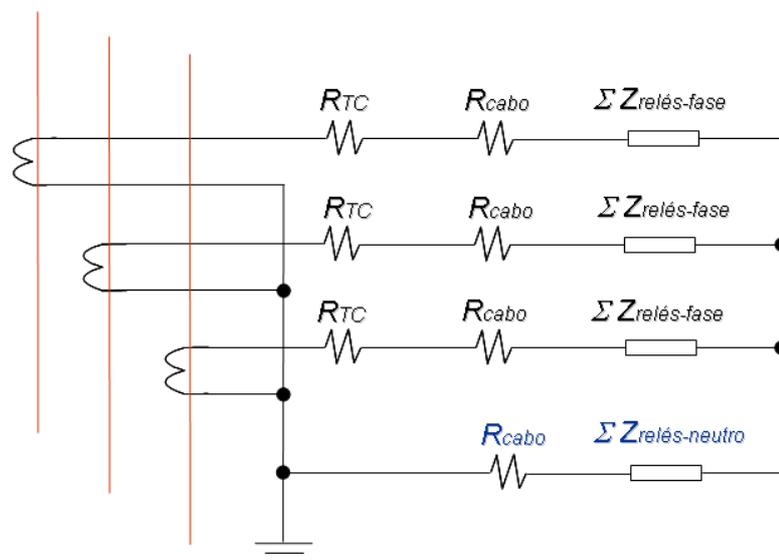


Figura 8 - Levantamento das cargas secund33rias

Constante de Tempo Secundária

De forma genérica, a constante de tempo secundária pode ser expressa pela expressão:

$$T_s = \frac{L_m + L_b}{Rb_{nominal} + R_{tc}} \quad (16)$$

Onde $Rb_{nominal}$: é a resistência de carga nominal do TC (ou alternativamente o somatório das resistências nominais dos relés somada à resistência dos cabos). A indutância da carga (L_b) pode ser desprezada frente à indutância de magnetização do TC (L_m). Portanto, reescrevendo-se a equação (16) obtém-se:

$$T_s = \frac{L_m}{Rb_{nominal} + R_{tc}} \quad (17)$$

Analogamente ao descrito no tópico anterior, inicialmente T_s é calculada com base na carga nominal do TC. Caso seja necessário o levantamento do somatório das resistências para determinação de $Rb_{nominal}$, deve considerar o tipo de falta. Para faltas trifásicas, tem-se:

$$Rb_{nominal} = R_{cabo} + \Sigma R_{relés-fase} \quad (18)$$

No caso de faltas monofásicas:

$$Rb_{nominal} = 2 \cdot R_{cabo} + \Sigma R_{relés-fase} + \Sigma R_{relés-neutro} \quad (19)$$

A indutância de magnetização L_m é calculada da seguinte forma:

$$L_m = \frac{V_e}{I_e \cdot \omega} \quad (20)$$

Os pontos de tensão e corrente V_e e I_e são retirados da região linear da curva de excitação do TC. Através do procedimento IEC para determinação do joelho da curva de excitação, utiliza-se diretamente o mesmo ponto da tensão de saturação para o cálculo de L_m . Caso seja empregado o procedimento ANSI, é necessário extrair um ponto que pertença à região linear da curva de excitação (Figura 9).

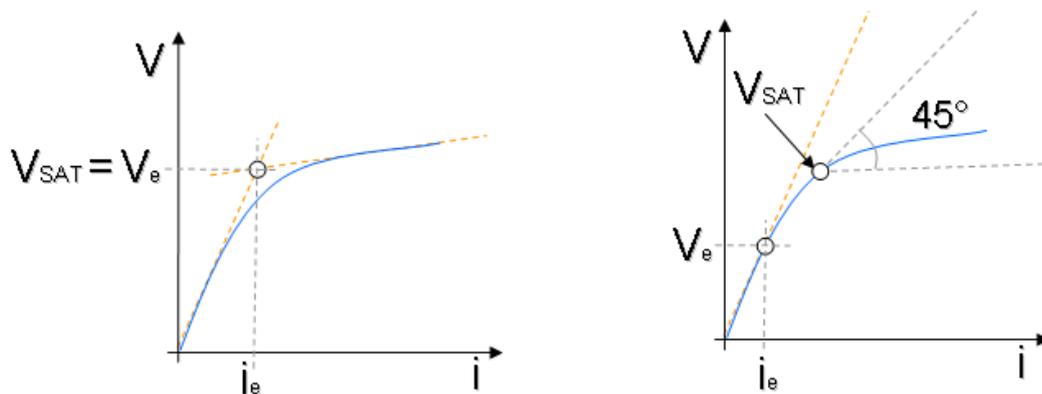


Figura 9 - Determinação do ponto V_e e I_e para o cálculo de L_m .

Substituindo-se (20) em (17), obtém-se a expressão final a ser empregada para o cálculo de T_s :

$$T_s = \frac{V_e}{(R_{b\text{ nominal}} + R_{tc}) \cdot \omega \cdot I_e} \quad (21)$$

Tempos de Referência empregados para o Ciclo de Operação

Conforme apresentado, a determinação da tensão assimétrica imposta ao secundário (E_{ai}) depende de vários fatores, dentre eles os tempos de atuação de proteção, de eliminação de falta e de tempo morto. Com a finalidade de automatizar o processo de avaliação de superação, busca-se inicialmente, calcular a tensão imposta com base na utilização de tempos de referência antes do refinamento da análise com emprego dos tempos reais aplicados. A ideia é realizar o cálculo com dados facilmente disponíveis e conservadores de tal forma que a análise com os tempos reais seja dispensável caso o TC não sature com a aplicação dos tempos de referência.

Os tempos de referência de eliminação de falta são obtidos a partir dos Procedimentos de Rede do ONS [8], conforme Tabela 1.

Elemento	Nível de Tensão	Tempo máximo de eliminação: (t' de referência)
Linhas de Transmissão	750, 500, 440, 345 kV	100 ms
	230 e 138 kV (Rede Básica)	150 ms
Barramentos	Tensão igual ou superior a 345 kV	100 ms
	Tensão inferior a 345 kV	150 ms
Transformadores	750, 500, 440, 345 kV (Lado de Alta)	120 ms
	230 ou 138 kV (Lado de Alta)	150 ms

Tabela 1: Tempos de Referência de eliminação de falta (t' de referência).

A partir dos tempos de referência de eliminação de falta, o Agente pode estimar os tempos de referência de atuação da proteção, assumindo os seus tempos típicos de abertura de Disjuntores:

$$t'_{al} \text{ (referência)} = t' \text{ (referência)} - \text{Tempo Abertura de DJ}$$

ou

$$t''_{al} \text{ (referência)} = t' \text{ (referência)} - \text{Tempo Abertura de DJ}.$$

Recordando que t'_{al} e t''_{al} são os tempos de atuação de proteção no primeiro e segundo ciclo, respectivamente.

O tempo morto de referência, t_{fr} , também é baseado nos Procedimentos de Rede do ONS [9], sendo adotado 500 ms para os religamentos tripolares e 800 ms para os monopolares.

2.3 Metodologia de Avaliação de Superação - Fluxograma Final

Como representação prática da metodologia de avaliação de superação de TCs, apresenta-se abaixo o Fluxograma Final a ser adotado:

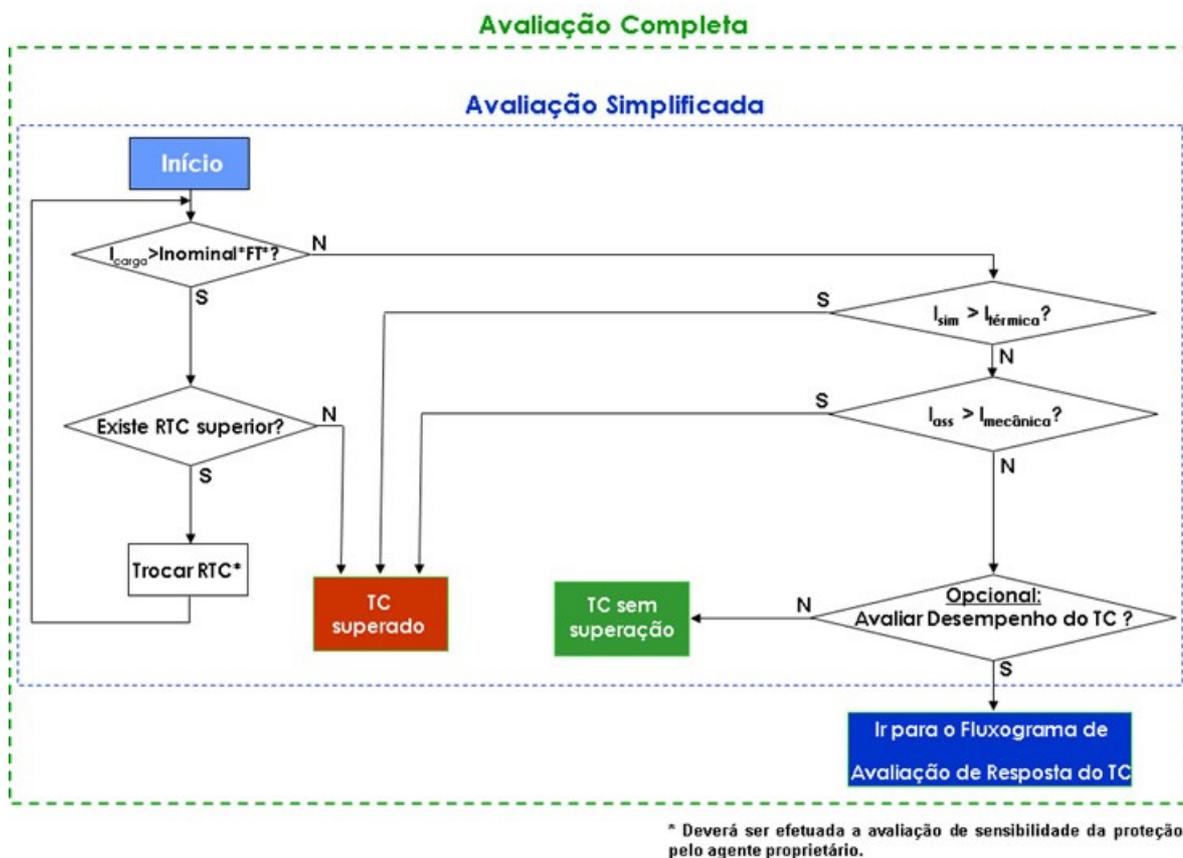
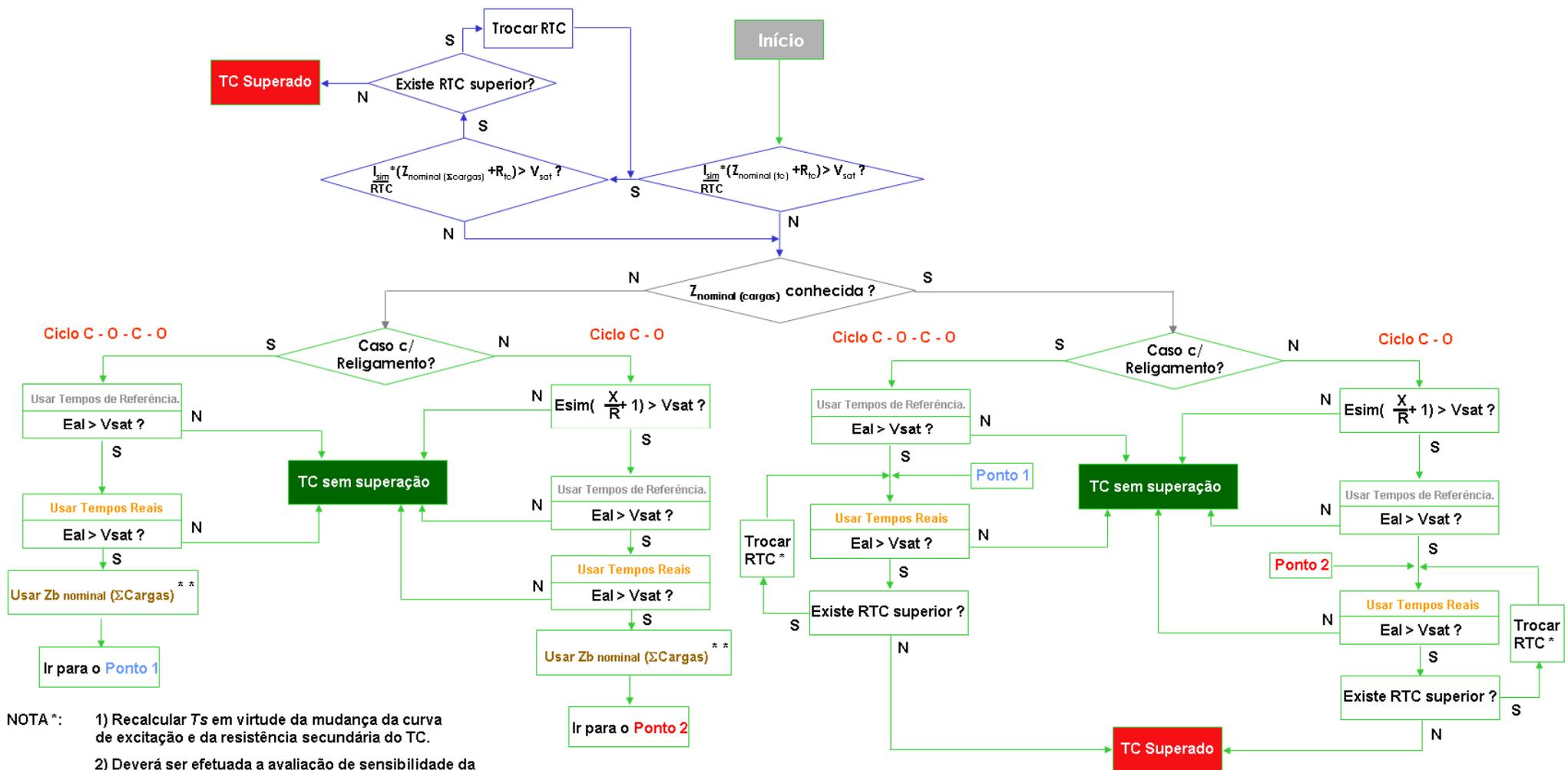


Figura 10 - Fluxograma para Avaliação de Superação de Transformadores de Corrente.

De acordo com a Figura 10, o Fluxograma Final diferencia a Avaliação Simplificada e a Avaliação Completa. Inicia-se o processo de avaliação verificando-se, em sequência, a corrente nominal, corrente térmica e corrente dinâmica. Caso o Agente opte pela avaliação completa, o processo é desviado para o Fluxograma de Avaliação de Resposta do TC (Figura 11)



NOTA *: 1) Recalcular T_s em virtude da mudança da curva de excitação e da resistência secundária do TC.
 2) Deverá ser efetuada a avaliação de sensibilidade da proteção pelo agente proprietário.

NOTA **: Recalcular T_s em virtude da mudança de $R_{b nominal}$

Figura 11 - Fluxograma de Avaliação de Resposta do TC

Descrição do Fluxograma de Avaliação de Resposta do TC

O Fluxograma de Avaliação de Resposta do TC verifica primeiramente se ocorre saturação para faltas simétricas (representação em azul). Nesta etapa, o cálculo da tensão imposta utiliza inicialmente, como impedância, a carga nominal do TC. Caso ocorra saturação do TC, refina-se o cálculo da tensão empregando-se o somatório das cargas nominais dos relés e impedância dos cabos. Após a análise para curto-circuito simétrico, verifica-se qual o dado de impedância disponível no momento (representação em cinza), para então se dar início à verificação de saturação para curto-circuito assimétrico.

De maneira geral, as primeiras verificações utilizam os tempos de referência, conforme definido em 2.2.3. Caso seja identificada saturação do TC, reavalia-se o cálculo inserindo-se os tempos reais de atuação da proteção e, nos casos com religamento, os tempos de eliminação de falta e tempo morto.

Percebe-se que o grau de detalhamento das informações aumenta na medida em que se avança no Fluxograma. O maior refinamento é alcançado quando há a necessidade de troca de relação de transformação. Neste caso, deve-se:

1. Efetuar análise de sensibilidade das proteções pelo Agente proprietário.
2. Obter os novos valores de V_{sat} , V_e e I_e .
3. Considerar o novo valor da resistência secundária do TC (R_{tc}).
4. Recalcular a constante de tempo secundária (T_s) devido à mudança da curva de excitação do TC e da resistência secundária.
5. Recalcular Kt_d e E_{al} para comparação com V_{sat} atualizado.

2.4 Procedimentos Prévios para Aplicação da Metodologia

Apresenta-se abaixo um resumo com a sequência de procedimentos necessários com o objetivo de auxiliar os Agentes na aplicação da Avaliação Simplificada ou Completa:

1. Utilização dos casos base de Fluxo de Potência no horizonte do PAR.
2. Determinação da pior condição de carga para o TC (condição N-1).
3. Utilização dos casos base de curtos-circuitos consolidados pelo ONS.
4. Aplicação de faltas monofásicas e trifásicas na barra, terminal e *line-out*. Demais faltas à critério do Agente proprietário.
5. Identificação das solicitações de corrente e relações X/R das faltas simuladas.
6. Aplicação da Avaliação Simplificada ou Completa.

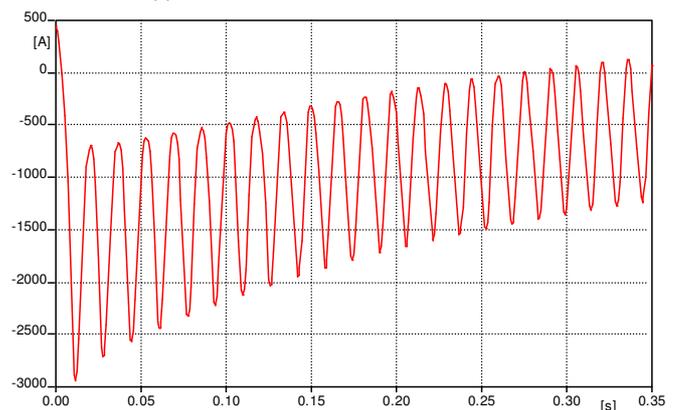
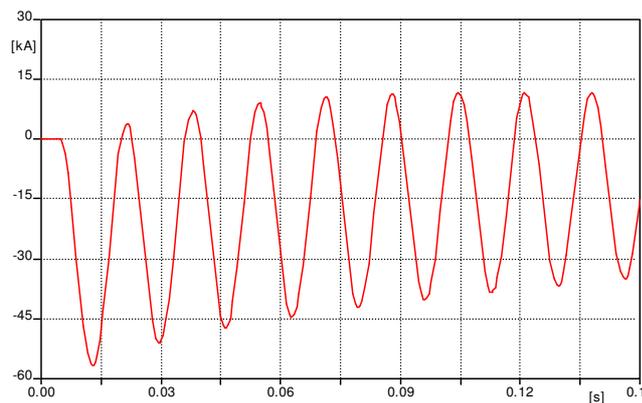
3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NBR6821 - Método de Ensaio, 1992.
- [2] International Standard IEC 60044-1 – Instrument Transformers: Current Transformers, 1996-12.
- [3] International Standard IEC 60044-6 – Requirements for Protective Current Transformers for Transient Performance, 1992-03
- [4] Transient Response of Current Transformers, IEEE, N. Y., 1976.
- [5] Efeito de Harmônicos e das Distorções Transitórias de TCs e TPs no Desempenho dos Relés de Proteção, Paulo Sérgio Pereira.
- [6] Computation of Current Transformer Transient Performance, IEEE Transactions on Power Delivery, October 1988.
- [7] Current Transformer Behavior during the Transient Regime, José Mário R. Osório, Areva.
- [8] Procedimentos de Rede – Submódulo 2.5: Requisitos Mínimos dos Sistemas de Proteção, Supervisão / Controle e de Telecomunicações, ONS, 09/05/2002.
- [9] Procedimentos de Rede – Submódulo 23.3: Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos, ONS, 25/03/2002.
- [10] Notas Técnicas S000-900-120 e S000-900-121 – Transformadores de Corrente – Análise de Desempenho, Ricardo Soares Salengue, ELETROSUL, 2003.

4 CRÉDITOS

Participantes	Empresa
Paulo Ricardo C. Oliano	CEEE
Angélica da C. O. Rocha	CEMIG
Jeder Francisco de Oliveira	CEMIG
Weber Melo de Souza	CEMIG
Agnus Aurélio N. do Amaral	CHESF
Fernando Rodrigues Alves	CHESF
Francisco José de A. Baltar	CHESF
Rita Kátia Delgado Medeiros	CHESF
Sérvulo de Oliveira Pinto	CHESF
Julio César Xavier Chiaradia	COELBA
João Maria Fontoura Junior	COPEL
Durvaldo Gonçalves Filho	CTEEP
Inácio Minoru Ota	CTEEP
José Antônio S. Freitas	CTEEP
Paulo César G. Campos	ELETRONORTE
Anilson Luiz Duarte	ELETROSUL
Ricardo Antunes (Coordenador do Grupo de TCs)	ELETROSUL
Ricardo Soares Salengue	ELETROSUL
Carlos Fonseca de Carvalho	FURNAS
Claudia M. F. de Oliveira	FURNAS
Denise Borges de Oliveira	FURNAS
Jorge Amon Filho	FURNAS
Marco Antonio de Paiva Fontes	FURNAS
Marcos André C. Melo	FURNAS
Paulo César Alves Fernandes	FURNAS
Eduardo Keraz El – Hage	LIGHT
Fernando Martins Ferreira	LIGHT
Marco Aurélio Pinto Rodrigues	LIGHT
Nelson Felipe da Costa	LIGHT
Helio Pessoa de Oliveira Jr.	ONS
Humberto Arakaki	ONS
Marcílio Valença	ONS
Roberto Rocha (Coordenador Geral)	ONS
Rui Menezes de Moraes	ONS

III - CRITÉRIO PARA ESPECIFICAÇÃO DE DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO QUANDO SUBMETIDO A CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO COM CONSTANTE DE TEMPO ELEVADA



III - CRITÉRIO PARA ESPECIFICAÇÃO DE DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO QUANDO SUBMETIDO A CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO COM CONSTANTE DE TEMPO ELEVADA

ONS RE 2.1/090/2003 - Revisão 1

Revisões do relatório

Rev. 1 04/03/2013

seção	páginas	descrição
5.3.3		inclusão da Tabela 7
diversas		alterações de texto

SUMÁRIO

Este relatório propõe critérios para especificação de disjuntores de alta tensão quando submetidos a requisitos de rede com constantes de tempo da corrente de curto-circuito superiores ao valor padrão de 45 ms. Os critérios foram propostos baseando-se na literatura especializada disponível, assim como na experiência do autor em desenvolvimento de câmaras de interrupção e ensaios de disjuntores de alta tensão. Uma rápida introdução sobre evolução das constantes de tempo das redes elétricas é apresentada no item 2. No item 3 peculiaridades sobre a forma da corrente de curto-circuito é analisada levando-se em conta os últimos documentos da CIGRE e da IEC sobre requisitos de rede e de ensaios de disjuntores quando submetidos a constantes de tempo elevadas. Aspectos físicos da interrupção de corrente e da interação disjuntor-rede relevantes para o tema estudado são discutidos no item 4. A consolidação dos critérios propostos é abordada no item 5 e no item 6 o resumo dos mesmos assim como recomendações para sua aplicação são apresentadas. A condição de manobra de corrente assimétrica com zeros atrasados, devido a sua especificidade, não é abordada de forma abrangente neste relatório. Entretanto, algumas recomendações cobrindo os casos mais simples deste tipo de manobra são discutidas em anexo.

1 INTRODUÇÃO

A contínua expansão dos sistemas elétricos tem como consequência a elevação dos níveis de curto-circuito da rede assim como uma tendência de redução da constante de tempo das impedâncias de curto-circuito a ela associadas. A constante de tempo, geralmente representada pela letra grega τ , é quem dita em maior grau a assimetria da corrente de curto-circuito para defeitos fora das imediações de usinas geradoras, cujas impedâncias dominantes são predominantemente passivas e lineares (linhas de transmissão). Desta forma, ela é um parâmetro de fundamental importância no dimensionamento de disjuntores de alta tensão e especial atenção deve ser dada à mesma na especificação deste equipamento. τ é definida por:

$$\tau = L_{cc} / R_{cc} \quad (1)$$

onde, L_{cc} e R_{cc} são respectivamente a indutância e a resistência de curto-circuito equivalentes da rede no ponto considerado

As normas técnicas para disjuntores de alta tensão (AT) definem como 45 ms o valor padrão para a constante de tempo da componente contínua da corrente de

curto-circuito [1,2,3]. Tradicionalmente este valor cobre a grande maioria das aplicações para disjuntores de AT¹. Nos anos 90 porém, foi identificada em diversos países uma intensificação na ocorrência de τ superior ao padrão [4]. Diversas são as razões para este fato, sendo as principais:

- expansão da malha de transmissão com conseqüente redução das perdas ($R_{cc} \downarrow$)
- aumento dos níveis de tensão da transmissão em países de grandes dimensões territoriais (BR, Rússia, China) com conseqüente redução das perdas e de L/R das linhas de transmissão
- disjuntores de AT localizados nas proximidades de grandes usinas, onde a assimetria da corrente de curto é dominada pelo regime transitório do gerador, que pode levar a valores de τ de ordem elevada
- crescimento da malha nas redes de média tensão levando ao incremento de τ
- crescimento do número termelétricas localizadas nas vizinhanças de grandes centros de carga, ocasionando não só um aumento substancial dos níveis de curto-circuito, como também uma elevação expressiva da constante de tempo. Esta é a situação identificada para a área Rio e São Paulo por estudo realizado recentemente pelo ONS [5].

O levantamento internacional realizado pela CIGRE [4] sobre este tema, levou a mudanças expressivas na norma internacional de disjuntores de alta tensão, IEC 62271-100, que em sua última revisão [1] incluiu diretrizes para ensaios de interrupção de corrente de curto-circuito assimétrica para τ acima do valor standard. Além do valor padrão de 45 ms, agora são também especificados os requisitos para ensaios com 60 ms, 75 ms e 120 ms.

¹ Disjuntores de gerador, localizados no lado de baixa dos transformadores elevadores de usinas geradoras, são desenvolvidos e testados para constante de tempo elevadas, tipicamente 130 ms [10].

- Um critério para especificação de disjuntores de alta tensão quando submetido a correntes de curto-circuito com constantes de tempo superiores a nominal é proposto neste trabalho. Este é de simples aplicação e não depende de informações difíceis de serem obtidas.
- O critério foi desenvolvido baseado em duas premissas:
 - que a energia de arco para τ superior ao valor padrão (45 ms) não deve exceder àquela referida aos ensaios de tipo, normalmente realizados para $\tau= 45$ ms e com corrente nominal de curto-circuito do disjuntor.
 - que o pico da corrente no “major loop” não pode exceder o valor especificado por norma para $\tau= 45$ ms e referido à corrente nominal de curto-circuito do disjuntor.
- A comparação da severidade entre as duas premissas levou a conclusão que a energia de arco é o critério mais severo para a faixa de constante de tempo considerada (até 120 ms).
- O critério consiste na aplicação de fatores de redução da corrente nominal de curto-circuito de disjuntores utilizados em situações de rede com $\tau > 45$ ms, de forma que o mesmo possa operar seguramente em condições de interrupção de corrente assimétrica.
- A tabela 5 deste relatório apresenta os fatores de redução, para os três valores de τ e as três faixas de tempo de operação do disjuntor considerados na norma IEC [1]. Caso um outro valor de τ seja utilizado, o fator de redução deve ser calculado diretamente da solução da inequação (6) deste relatório.
- Caso o tempo de arco máximo do disjuntor na interrupção do “major loop” para $\tau= 45$ ms e corrente nominal de curto-circuito seja conhecido, o fator de redução pode ser calculado com auxílio da Figura 18, o que redundará em maior otimização da utilização da capacidade de interrupção assimétrica do disjuntor.
- A comparação do critério proposto com fatores de redução aplicados em diversos países mostrou que o mesmo é coerente com os resultados publicados além de ser conservativo.

Entretanto, a maneira mais segura de se decidir pela aplicação de disjuntores de AT em situações de elevada constante de tempo é consultar o fabricante do disjuntor.

3 DEFINIÇÕES RELATIVAS A FORMA DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

3.1 Forma da corrente de curto-circuito assimétrica

A corrente de curto-circuito (I_{cc}) na rede de transmissão e eletricamente afastada de usinas geradoras são basicamente determinadas por equações lineares de rede. De forma simplificada, a mesma para o caso de um curto trifásico pode ser representada em um ponto da rede por:

$$I_{cc} = I_m \left[\sin(\omega.t + \theta - \varphi) - \sin(\theta - \varphi).e^{\frac{-t}{\tau}} \right] \quad (2)$$

onde, $I_m = U/Z_{cc}$ → valor de crista da corrente de curto-circuito simétrica

U → valor de pico da tensão fase-terra da rede

$Z_{cc} = R_{cc} + L_{cc}$ → impedância de curto-circuito da rede no ponto considerado

$\varphi = \arctan(\omega.L_{cc}/R_{cc})$ → ângulo da impedância de curto-circuito da rede

ω → frequência angular da rede

θ → ângulo de fase da tensão da rede

t → tempo

τ → constante de tempo da rede, como definido na equação (1)

A componente que varia senoidalmente com o tempo é denominada componente simétrica (I_{CA}) e a componente que varia no tempo com uma função exponencial amortecida é a componente contínua (I_{cc}). O grau de assimetria da corrente de curto é função direta do instante em que o curto-circuito foi aplicado. O parâmetro θ da equação (2) é utilizado para representar este instante em relação a onda de tensão da rede. Quando $\theta = \varphi$ a componente I_{cc} assume seu valor máximo e conseqüentemente obtém-se assimetria máxima da corrente. Como os valores de φ são na prática muito próximos de 90° , pois é o ângulo de uma impedância predominantemente indutiva, pode-se dizer que a assimetria máxima é atingida quando o curto se estabelece para um ângulo de fase da tensão igual a zero. Isto é, a assimetria máxima ocorre para curto estabelecido em uma passagem por zero da tensão da rede. Para fins de comparação entre o efeito dos diversos valores de τ na forma da corrente de curto-circuito assimétrica, observe a Figura 12.

Para curtos-circuitos próximo a unidades geradoras a equação (2) da corrente não é mais válida. Nestes casos o comportamento não linear da dinâmica do gerador tem uma contribuição substancial na forma da corrente. As baixas perdas dos geradores assim como seu comportamento dinâmico levam a constantes de tempo

mais elevadas que as dominadas pelas linhas de transmissão. Além disto, a assimetria da corrente de curto fornecida diretamente por gerador varia com o tempo, o que corresponde a uma constante de tempo que é variável em função do tempo. Nestes casos para fins de especificação de disjuntores de AT recomenda-se a determinação de uma constante de tempo única equivalente, tal que a envoltória da corrente assimétrica com ela obtida cubra a envoltória da corrente real de curto-circuito.

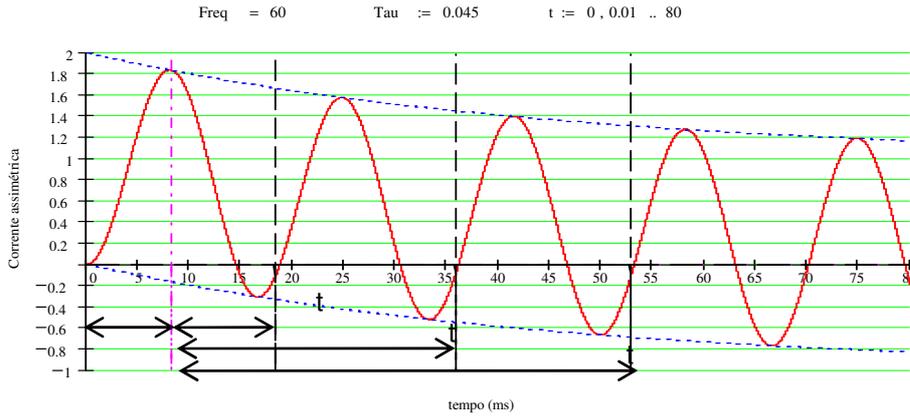
3.2 Definições da norma de disjuntores de AT [1]

3.2.1 Percentagem da componente contínua no instante de separação dos contatos

Na Figura 12 são introduzidos dois parâmetros que influenciam diretamente nas solicitações impostas ao disjuntor na abertura de corrente assimétrica de curto-circuito. São eles o tempo da proteção (t_r), que é considerado nas normas de disjuntores como $\frac{1}{2}$ ciclo da frequência fundamental, e o tempo de abertura do disjuntor (t_{op}), que é o intervalo de tempo entre o recebimento do comando de abertura e a separação dos contatos de arco. A soma destes dois tempos define qual o intervalo de tempo entre o início da corrente de curto-circuito e o estabelecimento do arco elétrico no interior da câmara de interrupção. Quanto maior a soma de t_{op} e t_r , menor será o grau de assimetria da corrente de arco e conseqüentemente menor a energia de arco, que representa uma das solicitações mais severas a que o disjuntor é submetido neste tipo de manobra. No item 4 é dada a interpretação qualitativa dos efeitos físicos dos principais parâmetros que solicitam o disjuntor na interrupção de corrente assimétrica.

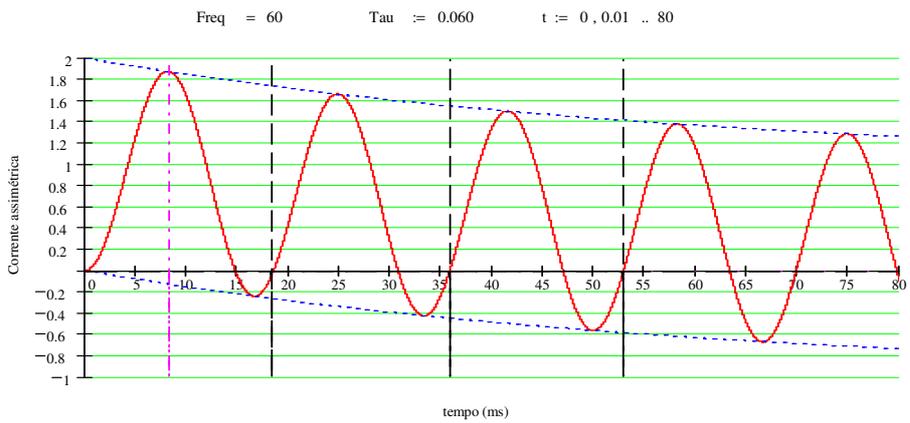
Uma consequência direta de t_r e t_{op} é o parâmetro utilizado pelas normas para definir a assimetria da corrente e que deverá ser reproduzido nos ensaios do disjuntor. É o fator de assimetria definido como a percentagem de corrente contínua da corrente de curto-circuito no instante de separação dos contatos:

$$\%CC = 100 \cdot e^{-\frac{(t_{op}+t_r)}{\tau}} \quad (3)$$

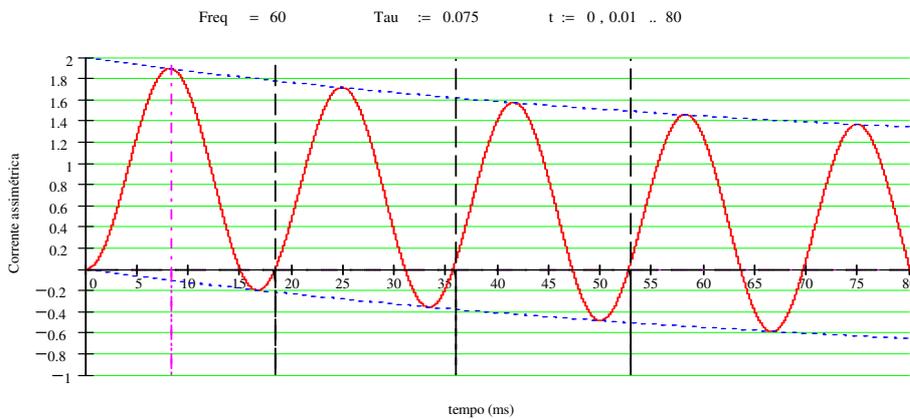


a) $\tau = 45$ ms

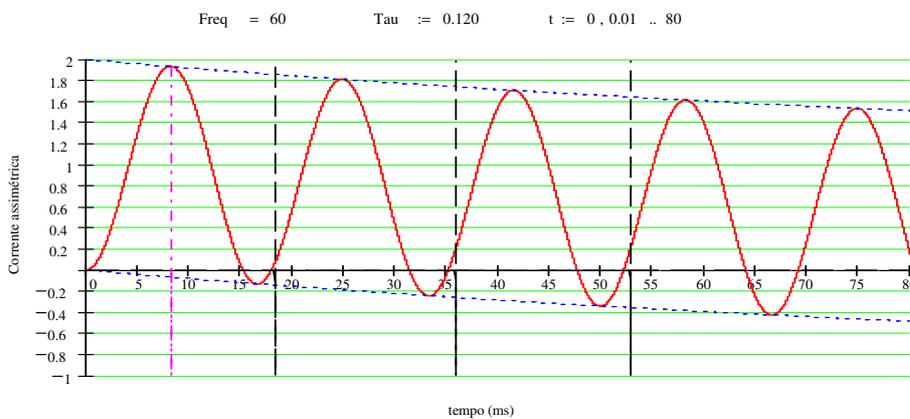
t_r = tempo da proteção
(1/2 ciclo)
 t_{op} = tempo de operação
do disjuntor



b) $\tau = 60$ ms



c) $\tau = 75$ ms



d) $\tau = 120$ ms

Figura 12 - Oscilogramas de corrente assimétrica para as constantes de tempo consideradas pela norma (IEC)

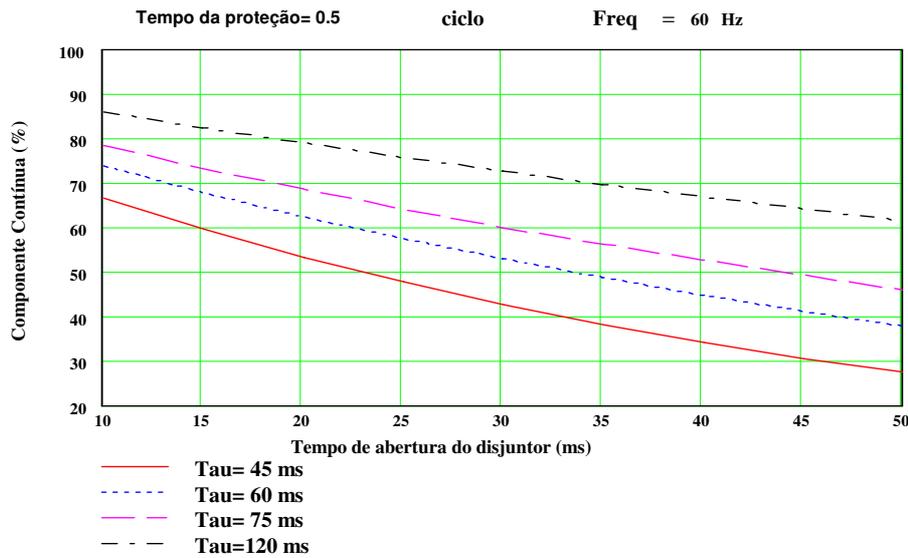


Figura 13 - Percentagem da componente contínua da corrente de curto-circuito no instante de separação dos contatos do disjuntor

3.2.2 Pico da corrente de curto-circuito e duração do último semiciclo desta

O valor de pico da corrente de curto-circuito (\hat{I}) durante o período de arco do disjuntor, assim como a duração do último semiciclo (Δt) da corrente anterior a interrupção, são parâmetros de fundamental importância para a definição das solicitações térmicas e dielétricas a que um disjuntor é submetido durante interrupção de corrente assimétrica. Desta forma eles são normalizados [1], pois são utilizados para definir os requisitos de ensaio de disjuntores. Claramente \hat{I} e Δt são função de τ , t_r , t_{op} e I_m , como pode ser depreendido da equação (2) e da Figura 12. Os valores especificados pela IEC para os mesmos (60 Hz) é apresentada na tabela 1. Para facilitar a normalização dos valores numéricos de Δt e \hat{I} a norma considera faixas de t_{op} , como mostradas na Figura 12. A Figura 14 apresenta graficamente a interpretação de Δt e \hat{I} para um “major loop” e um “minor loop” da tabela 1.

Table 11 – Current peak values and current loop durations during the arcing period for 60 Hz operation in relation with short-circuit test-duty T100a

	Opening time ms	$\tau = 45$ ms		$\tau = 60$ ms		$\tau = 75$ ms		$\tau = 120$ ms	
		\hat{I} p.u.	Δt_1 ms						
Major loop	$0 < t \leq 10,0$	1,57	11,0	1,66	12,0	1,72	12,5	1,81	13,5
	$10,0 < t \leq 27,5$	1,39	10,0	1,50	11,0	1,57	11,5	1,70	12,5
	$27,5 < t \leq 44,5$	1,27	9,5	1,38	10,5	1,46	11,0	1,61	12,0
	ms	\hat{I} p.u.	Δt_2 ms						
Minor loop	$0 < t \leq 10,0$	0,31	5,0	0,24	4,0	0,20	3,5	0,13	2,5
	$10,0 < t \leq 27,5$	0,52	6,0	0,42	5,0	0,36	4,5	0,24	3,5
	$27,5 < t \leq 44,5$	0,67	6,5	0,57	6,0	0,49	6,0	0,34	4,5

\hat{I} p.u. value of the peak current related to the peak value of the short-circuit current.
 Δt_1 duration of major loop (rounded to 0,5 ms).
 Δt_2 duration of minor loop (rounded to 0,5 ms).
 τ system circuit time constant.

Tabela 1 – Valores normalizados [1] de \hat{I} e de Δt durante ensaio de interrupção de corrente assimétrica

O critério adotado pela IEC é definir como “major loop” normalizado o primeiro dos semiciclos aumentados que ocorre após a faixa de tempo de separação dos contatos a que o disjuntor pertence. O “minor loop” normalizado é aquele que ocorrer imediatamente antes do “major loop” normalizado. Durante o ensaio de corrente assimétrica tanto a duração quanto o valor de pico da corrente no último semiciclo da corrente devem ser iguais ou superiores aos valores normalizados, tanto para interrupção após “minor loop” quanto “major loop”. Como os laboratórios de ensaios de potência trabalham com circuitos de corrente de curto-circuito com constantes de tempo superiores as normalizadas, existe certa flexibilidade para se satisfazer esta exigência de norma. Caso o circuito de ensaio possuísse o mesmo τ que o especificado, seria muito difícil na prática atingir os valores de norma para Δt e \hat{I} .

Da tabela 1 é possível estabelecer regras de correlação entre Δt referente a “major loop” para diferentes τ , válido para as três faixas de t_{op} consideradas:

$$\Delta t_{60 \text{ ms}} = \Delta t_{45 \text{ ms}} + 1 \text{ ms}$$

$$\Delta t_{75 \text{ ms}} = \Delta t_{45 \text{ ms}} + 1,5 \text{ ms}$$

$$\Delta t_{120 \text{ ms}} = \Delta t_{45 \text{ ms}} + 2,5 \text{ ms}$$

Estas correlações são de grande ajuda para a determinação dos limites de integração no cálculo da energia de arco, como será visto em 5.3.1.

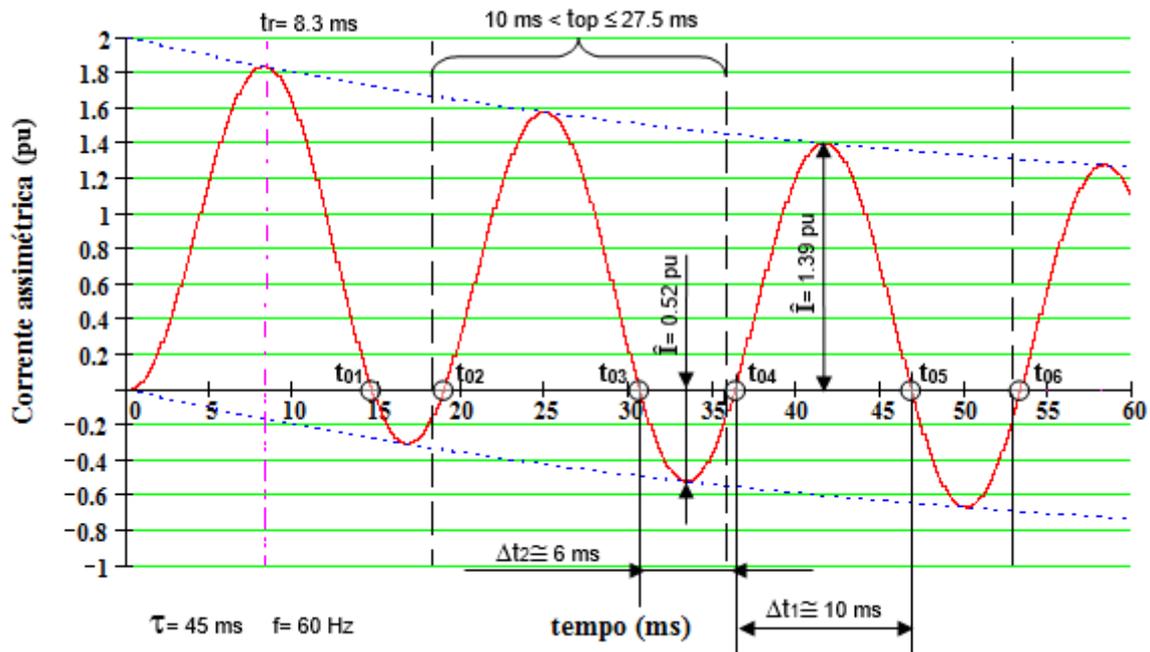


Figura 14 - Exemplo de valores normalizados para a duração do último semiciclo da corrente antes da interrupção e do respectivo valor de pico, definidos para “major loop” e “minor loop” da corrente, considerando-se $10 \text{ ms} < t_{op} \leq 27.5 \text{ ms}$ Tensão de restabelecimento transitória (TTR) em manobra de corrente assimétrica

A forma da TTR sofre deformações na interrupção corrente assimétrica em relação a TTR nominal definida para curto-circuito simétrico. A razão é o deslocamento no eixo dos tempos entre os zeros da corrente e a curva de tensão da rede a frequência industrial. Este efeito decorre da componente de corrente contínua da corrente de curto-circuito. Como se pode observar da Figura 15 a tendência da TTR, tanto após um “major loop” quanto após um “minor loop”, é de redução do seu valor de pico assim como da sua taxa de crescimento.

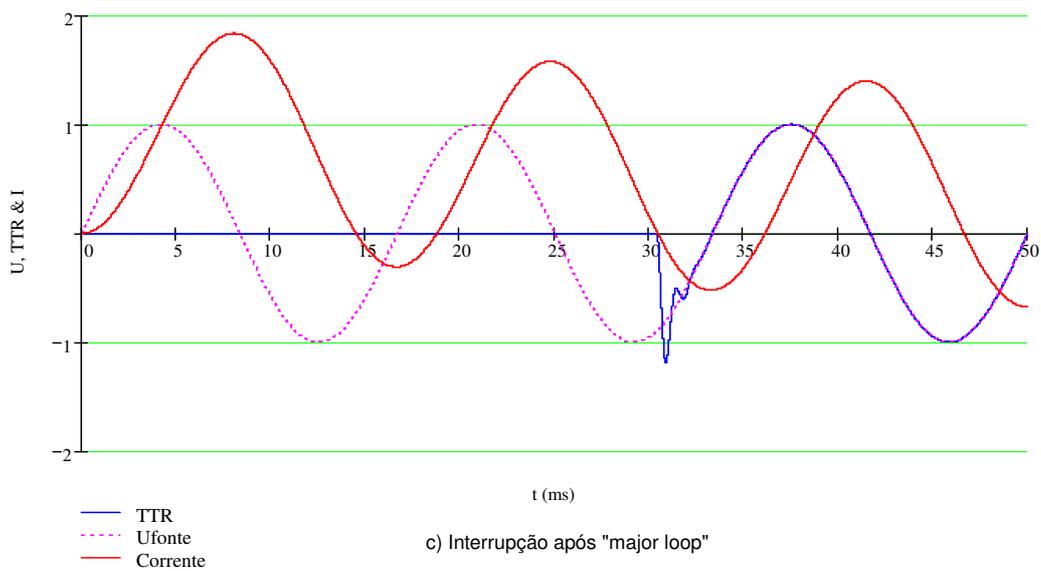
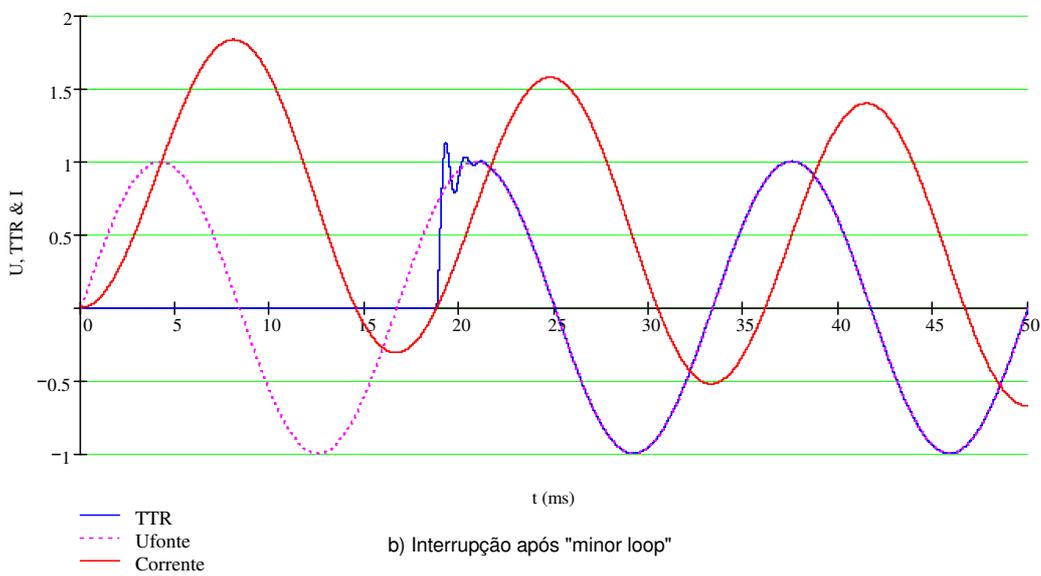
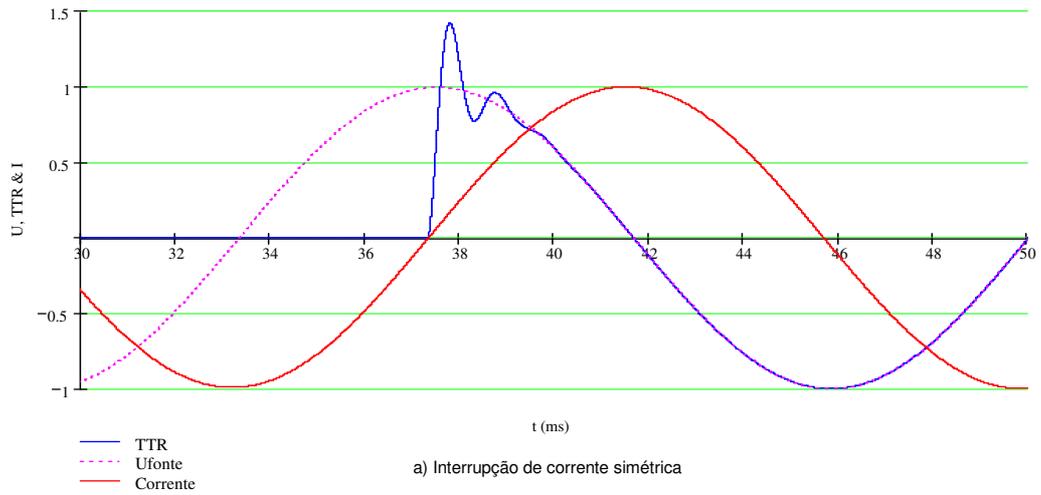


Figura 15 - TTR decorrente de interrupção de corrente simétrica e assimétrica

Este tópic foi detalhadamente estudado por grupo de trabalho da CIGRE [6] visando estabelecer os requisitos de ensaio para disjuntores de tensões mais elevadas, que tradicionalmente são ensaiados pelo método sintético. A Figura 16 apresenta graficamente a influência da assimetria na envoltória da TTR. Na tabela 2 são apresentados os valores modificados de TTR para interrupção da corrente após “major” e “minor loop” como especificados pela norma de ensaios sintéticos [7]. Note sempre existe uma tendência de abaixamento da crista e da taxa de crescimento da TTR.

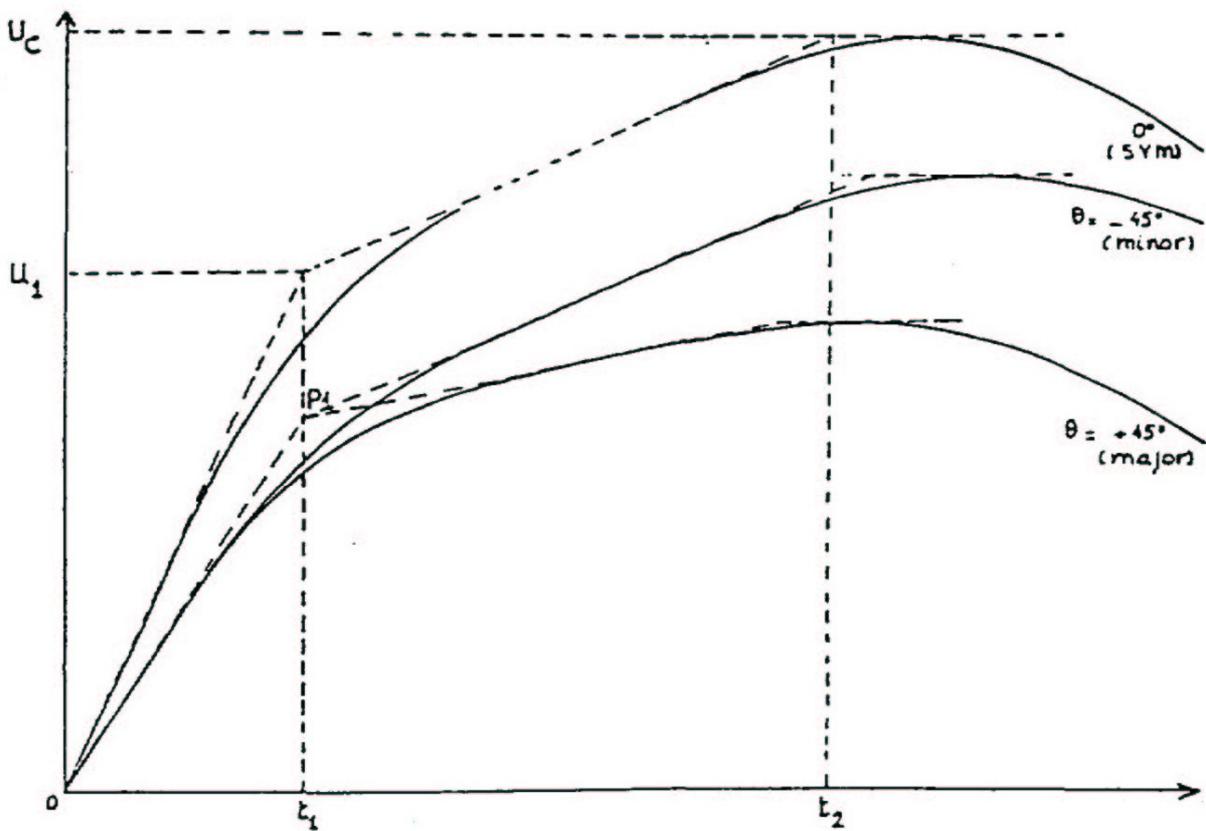


Figure 6. TTR à quatre paramètres obtenue par simulation.

Figure 6. 4 parameter TRV obtained by simulation.

Figura 16 - Influencia da assimetria da corrente na envoltória da TTR devido após “major” e “minor loop” [6]

Tableau II/Table II

TTR après la coupure de courant asymétrique/TRV after breaking asymmetrical current

Fréquence/Frequency (Hz)		50												60											
Tension/Voltage (kV)		245		300		362		420		525		765		245		300		362		420		525		765	
Instant/Time co-ordinate (µs)		<i>t</i> ₁	<i>t</i> ₂	<i>t</i> ₁	<i>t</i> ₂	<i>t</i> ₁	<i>t</i> ₂	<i>t</i> ₁	<i>t</i> ₂	<i>t</i> ₁	<i>t</i> ₂	<i>t</i> ₁	<i>t</i> ₂	<i>t</i> ₁	<i>t</i> ₂	<i>t</i> ₁	<i>t</i> ₂	<i>t</i> ₁	<i>t</i> ₂	<i>t</i> ₁	<i>t</i> ₂	<i>t</i> ₁	<i>t</i> ₂	<i>t</i> ₁	<i>t</i> ₂
		<i>u</i> ₁	<i>u</i> _c	<i>u</i> ₁	<i>u</i> _c	<i>u</i> ₁	<i>u</i> _c	<i>u</i> ₁	<i>u</i> _c	<i>u</i> ₁	<i>u</i> _c	<i>u</i> ₁	<i>u</i> _c	<i>u</i> ₁	<i>u</i> _c	<i>u</i> ₁	<i>u</i> _c	<i>u</i> ₁	<i>u</i> _c	<i>u</i> ₁	<i>u</i> _c	<i>u</i> ₁	<i>u</i> _c	<i>u</i> ₁	<i>u</i> _c
		Tension / Voltage (kV)																							
Après une grande alternance: asymétrie à l'instant du zéro de courant After major-loop: asymmetry at current zero	0	260	364	318	446	384	538	446	624	557	780	812	1137	260	364	318	446	384	538	446	624	557	780	812	1137
	5	260	363	319	445	385	536	446	621	557	775	811	1124	260	363	319	444	384	535	445	620	557	773	810	1121
	10	260	362	318	442	384	532	445	616	556	768	808	1109	260	361	318	441	383	530	444	614	555	764	806	1102
	15	259	359	317	439	382	527	443	610	553	758	804	1091	258	358	316	436	381	525	442	606	551	753	801	1080
	20	257	356	315	434	380	521	440	602	549	747	797	1070	257	354	314	431	378	517	438	597	547	740	793	1055
	25	255	351	312	428	376	514	436	593	543	734	788	1046	254	349	311	424	374	509	434	586	540	724	783	1027
	30	252	346	308	421	371	504	430	581	536	718	776	1019	251	343	307	417	369	498	428	574	533	707	770	996
	35	248	339	303	412	365	494	423	568	527	701	763	988	247	336	302	407	363	487	420	560	523	688	756	962
	40	244	332	298	403	358	481	415	553	517	681	746	954	242	327	296	397	356	473	412	543	512	666	738	925
	45	238	323	291	391	350	467	405	536	504	658	728	916	236	318	289	385	347	458	401	525	499	641	719	883
	50	232	313	283	379	341	451	394	517	490	633	706	875	230	308	280	371	337	441	390	505	484	614	696	838
55	224	301	274	364	329	433	381	496	474	604	681	829	222	296	271	356	326	422	376	482	467	584	670	788	
60	216	288	263	348	317	413	366	471	455	572	653	778	213	282	260	339	313	401	361	456	448	550	641	733	
65	206	273	251	329	302	390	349	444	433	537	621	721	203	267	248	320	298	377	344	428	426	512	608	673	
70	195	256	238	308	285	364	329	413	408	497	584	658	192	249	234	298	280	350	324	395	400	471	570	607	
75	182	237	222	284	266	334	307	378	380	451	541	587	179	229	218	273	261	319	300	359	371	423	526	532	
80	166	214	203	256	243	299	280	337	346	399	492	506	163	206	198	244	237	284	273	317	337	369	476	447	
Après une petite alternance: asymétrie à l'instant du zéro de courant After minor loop: asymmetry at current zero	0	260	364	318	446	384	538	446	624	557	780	812	1137	260	364	318	446	384	538	446	624	557	780	812	1137
	5	259	364	317	446	383	539	444	626	556	783	811	1146	259	364	318	447	383	540	445	627	556	785	812	1150
	10	257	363	315	445	381	538	442	626	553	785	807	1153	258	364	316	446	381	540	443	628	554	789	809	1160
	15	255	361	313	443	378	536	438	624	549	784	802	1157	256	362	313	445	379	539	440	628	550	790	805	1168
	20	252	358	309	440	373	533	434	621	543	782	795	1158	253	360	310	443	375	537	435	626	545	789	798	1172
	25	249	354	305	435	368	528	428	616	536	777	785	1156	250	356	306	439	370	533	430	622	539	786	790	1174
	30	244	349	299	430	362	522	421	609	527	770	773	1150	245	352	301	434	364	528	423	617	531	781	779	1172
	35	239	343	293	423	355	514	412	601	517	761	759	1142	240	346	295	428	357	521	415	610	521	774	766	1168
	40	233	336	286	414	346	505	402	591	505	750	742	1130	235	340	288	420	349	513	406	601	509	764	750	1159
	45	226	327	278	405	336	494	391	578	491	736	723	1114	228	332	280	411	339	502	395	590	496	752	732	1147
	50	219	318	269	393	325	481	378	564	475	719	700	1094	221	323	271	401	328	490	382	576	481	737	710	1131
55	210	307	258	380	312	465	364	547	457	699	675	1070	212	313	261	388	316	476	368	561	463	720	686	1111	
60	200	294	246	365	298	448	347	527	437	676	646	1041	203	301	249	374	302	460	352	542	444	698	658	1085	
65	189	280	233	348	282	428	328	504	414	649	613	1007	192	287	236	358	286	441	334	521	421	673	626	1055	
70	177	264	217	329	264	405	307	478	387	618	576	966	179	271	221	339	268	418	313	496	395	644	590	1017	
75	162	245	200	306	243	378	283	448	357	581	533	917	165	252	204	317	248	393	289	467	366	609	548	972	
80	146	223	179	279	218	346	255	412	322	537	483	858	149	231	184	291	224	362	261	432	332	567	499	917	

Facteur de premier pôle: 1,3

Constante de temps de la composante continue: 45 ms

First pole to clear factor 1,3

Time constant of d.c. decrement 45 ms

Tabela 2 – Valores normalizados [7] para TTR após interrupção de corrente assimétrica em ensaios de disjuntores pelo método sintético

4 PRINCIPAIS SOLICITAÇÕES FÍSICAS QUE AFETAM O DESEMPENHO DE DISJUNTORES DE AT NA MANOBRA DE CORRENTE ASSIMÉTRICA

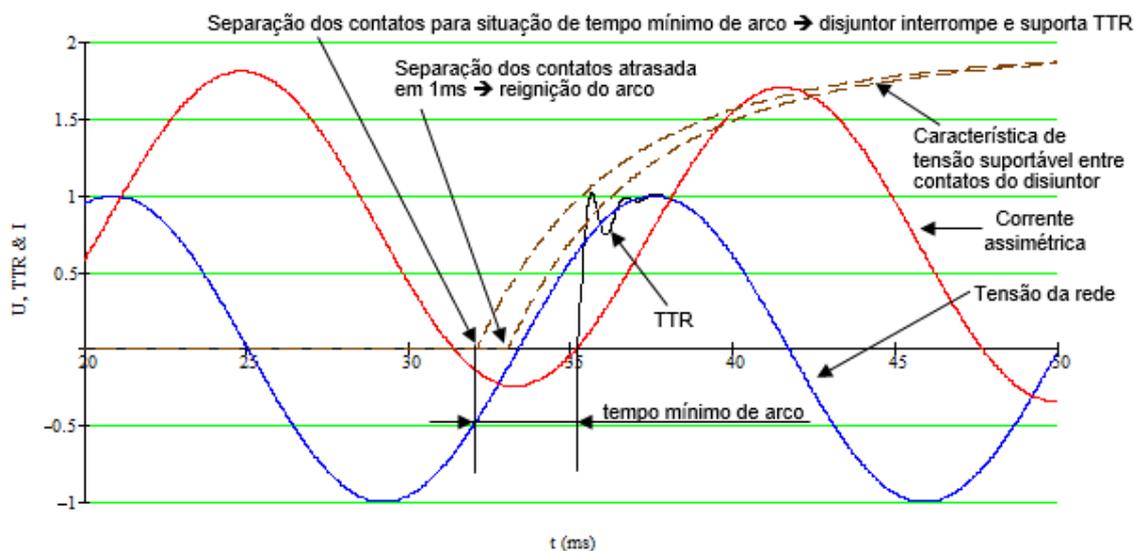
De forma sucinta são apresentados neste item as principais solicitações físicas que afetam o desempenho de disjuntores de AT em manobra de interrupção de correntes assimétricas. O impacto destas para as diferentes tecnologias de disjuntores são também mencionadas, com o objetivo de melhor sustentar a universalidade dos critérios de aplicação propostos no item 5.

4.1 Interrupção após um “minor loop” de corrente

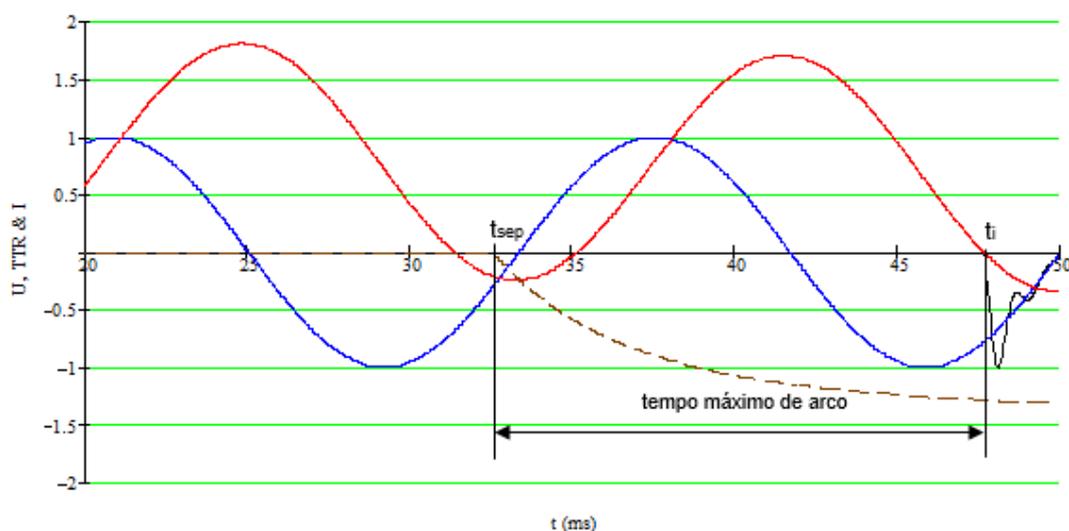
A interrupção de corrente assimétrica após um “minor loop” é caracterizada por um baixo valor de crista do último semiciclo da corrente através do arco. Como consequência, a solicitação térmica provocada pela dissipação de energia no arco não é o parâmetro dominante do processo de interrupção. O fator decisivo para interrupção é a capacidade do disjuntor em suportar a TTR entre contatos, após a interrupção da corrente. Ou seja, a fase dielétrica da interrupção é neste caso dominante.

Na Figura 17-a) um exemplo da interrupção após um “minor loop” e a definição de tempo mínimo de arco associada são apresentados. Para uma dada corrente assimétrica e um disjuntor específico, existe sempre um instante de separação dos contatos que leva ao mínimo tempo de arco possível de ser obtido naquela condição de manobra. Qualquer pequeno deslocamento da ordem de abertura do disjuntor em relação à onda de tensão (p. ex. 1ms) leva a um reacendimento do arco, uma vez que a suportabilidade de tensão entre contatos, que se encontram em movimento, não é mais alta o suficiente para suportar a TTR. Ver Figura 17-b). Esta situação leva então a ocorrência da interrupção após um “major loop”, o que configura o tempo máximo de arco.

É importante frisar que na interrupção de uma corrente assimétrica o tempo mínimo de arco do disjuntor está sempre associado a um “minor loop” devido às relativamente fracas solicitações térmicas e dielétricas impostas ao disjuntor nesta condição de manobra. Consequentemente, o tempo de arco máximo está associado a interrupção após um “major loop”.



a) tempo mínimo de arco (relacionado a interrupção após um "minor loop")



b) tempo máximo de arco (relacionado a interrupção após um "major loop")

Figura 17 - Interrupção da corrente após "minor loop" e "major loop" da corrente assimétrica

4.2 Interrupção após um "major loop" de corrente

A interrupção após um "major loop" de corrente é uma das condições de manobra mais críticas para o disjuntor². As solicitações térmicas impostas ao disjuntor pela

² As manobras de abertura após "major loop" de corrente assimétrica, de falta na linha (short-line-fault) e de carga capacitiva representam as mais severas solicitações para disjuntores modernos (várias tecnologias em SF6, vácuo e ar-comprimido). Desta forma, estas 3 condições de manobra são utilizadas como critérios básicos para dimensionamento de câmaras de interrupção.

energia dissipada no arco são das mais críticas dentre as condições de manobra normalizadas. Desta forma, um cuidado todo especial deve cercar a especificação de disjuntores submetidos a condições de manobra com constantes de tempo elevadas.

Na Figura 17-b) um exemplo de oscilograma de interrupção de corrente de curto-circuito assimétrico é apresentado. O quadrado da área abaixo da curva de corrente durante o período de arco dá a medida da energia de arco associada a interrupção após um “major loop”. Esta é matematicamente definida por:

$$E_{arco} = \int_{t_{sep}}^{t_i} I_{cc}^2 dt \quad (4)$$

onde,

I_{cc} é definido na equação (2)

t_{sep} é o instante de separação dos contatos (ver Figura 17-b)

t_i é o instante de interrupção³ (ver Figura 17-b)

O alto valor de energia de arco na interrupção de um “major loop” de corrente causa algumas solicitações críticas para o disjuntor, tais como:

- elevada pressão do meio extintor dentro da câmara de interrupção e consequentes esforços mecânicos dela decorrentes;
- o alto valor de crista da corrente no “major loop” provoca elevada solicitação eletrodinâmica do disjuntor com os contatos em movimento;
- elevada deterioração do meio isolante com relação a sua suportabilidade dielétrica; como consequência, a característica de tensão suportável entre contatos do disjuntor em função da distância entre os mesmos sofre deterioração acentuada – observe a representação simplificada deste efeito comparando as características de tensão entre contatos nas Figura 17-a) e b); como nesta condição de interrupção o tempo de arco é relativamente longo (tempo de arco máximo ou próximo deste valor), a distância entre contatos é relativamente grande no momento da interrupção compensando, assim, o achatamento sofrido pela característica de tensão;

³ A norma IEC [1] considera a influência do tipo de aterramento da rede na duração do tempo de arco máximo a que o disjuntor deverá ser submetido nos ensaios de corrente assimétrica. Os itens 6.102.10.2.1.2 e 6.10.2.2.2 tratam deste assunto para redes não solidamente aterrada e solidamente aterrada, respectivamente. O critério desenvolvido neste relatório não leva em consideração a consequente redução do tempo de arco máximo devido ao tipo de aterramento e utiliza como base para determinação da energia de arco em um “major loop” os valores integrais de Δt apresentados na tabela 1. Esta é uma premissa conservativa e cobre o pior caso (máxima energia de arco), que corresponde à rede solidamente aterrada.

- a elevada deterioração do meio isolante, que pode estar inclusive contaminada por partículas e gases metálicos, pode também levar a uma condição crítica da fase térmica da interrupção da corrente (\approx algumas dezenas de μ s antes e depois do zero da corrente, cujo fator de severidade é dado pelo produto $di/dt \times du/dt$ no instante da interrupção).

Em resumo, a energia de arco e o pico da corrente no “major loop” são as principais medidas da severidade das solicitações impostas ao disjuntor na interrupção de uma corrente assimétrica.

4.3 Sumário dos principais parâmetros que caracterizam a severidade da interrupção de correntes de curto-circuito assimétricas

Na tabela 3 são apresentados os parâmetros mais relevantes para definição da severidade das solicitações impostas ao disjuntor na interrupção de correntes de curto-circuito assimétricas. Estes critérios sugeridos na IEC (Anexo I de [1]), que são um sumário bastante representativo das solicitações abordadas nos itens 3 e 4 deste relatório.

Parâmetros relevantes para caracterização da severidade da corrente assimétrica, conforme norma IEC [1]
1. amplitude do último semi-ciclo da corrente
2. duração do último semi-ciclo da corrente
3. janela do tempo de arco
4. componente CC na separação dos contatos
5. energia de arco
6. di/dt na interrupção
7. pico (U_c) e primeira referência (U_1) da envoltória da TTR

Tabela 3 – Principais parâmetros que caracterizam a severidade da interrupção de correntes de curto-circuito assimétricas

Parâmetros relevantes a considerar na especificação de corrente assimétrica	Severidade relativa das solicitações impostas pelos diversos pânmetros para as tecnologias mais atuais de disjuntores de AT			
	SF6 "puffer" puro	SF6 "puffer" misto	SF6 tipo auto-sopro	ar comprimido
1. amplitude do último semi-ciclo da corrente	+++	++++	++++	+++
2. duração do último semi-ciclo da corrente	+++	++++	++++	+++
3. janela do tempo de arco	++	+++	++++	++
4. componente CC na separação dos contatos	++	+++	+++	++
5. energia de arco	+++	+++	++++	+++
6. di/dt na interrupção	+	+	++	+
7. pico (U_c) e primeira referência (U_1) da envoltória da TTR	+	+	++	+

Legenda: grau de importância crescente com o número de "+" atribuídas

Tabela 4 – Análise qualitativa da severidade dos parâmetros relevantes para a caracterização das solicitações decorrentes da interrupção de corrente assimétrica para diferentes tipos de tecnologia⁴

A tabela 4 apresenta de forma qualitativa o grau de severidade relativa de cada um destes parâmetros para as tecnologias mais recentes de disjuntores de AT⁵. Alguns desvios poderão ocorrer nesta classificação em função do projeto da câmara de interrupção. Em princípio, todas as tecnologias acima citadas têm condições de atender adequadamente as solicitações devido corrente assimétrica, mesmo para constantes de tempo acima do padrão, desde que o disjuntor seja devidamente especificado e dimensionado.

5 CRITÉRIO PROPOSTO PARA APLICAÇÃO DE DISJUNTORES SOB CONDIÇÕES DE REDE COM CONSTANTES DE TEMPO SUPERIORES AO VALOR PADRÃO

Indubitavelmente a melhor forma de se garantir que um disjuntor opere corretamente quando sujeito a uma constante de tempo da rede superior ao valor padrão (45 ms) é especificá-la adequadamente e consultar os fabricantes. Só estes é que possuem as informações de cunho teóricas e experimentais (sobretudo) que podem subsidiar uma decisão mais abalizada na escolha do equipamento que melhor se adapte à condição de manobra especificada. Ocorre, porém, que muitas vezes tais informações não se encontram disponíveis, mas a concessionária de energia elétrica precisa decidir sob a eventual superação de disjuntores em operação ou a aquisição de novo equipamento. Nestes casos, uma solução de compromisso pode ser adotar um critério de especificação seguro o bastante para garantir a utilização de disjuntor desenvolvido e testado para uma constante de tem Critério proposto para aplicação de disjuntores sob condições

⁴ Ver anexo 2 para definição adotada dos tipos de tecnologia de interrupção

⁵ Disjuntores a vácuo não foram considerados, pois não se aplicam à rede básica ($U \geq 230$ kV)

de rede com constantes de tempo superiores ao valor padrão. Indubitavelmente a melhor forma de se garantir que um disjuntor opere corretamente quando sujeito a uma constante de tempo da rede superior ao valor padrão (45 ms) é especificá-la adequadamente e consultar os fabricantes. Só estes é que possuem as informações de cunho teóricas e experimentais (sobretudo) que podem subsidiar uma decisão mais abalizada na escolha do equipamento que melhor se adapte à condição de manobra especificada. Ocorre, porém, que muitas vezes tais informações não se encontram disponíveis, mas a concessionária de energia elétrica precisa decidir sob a eventual superação de disjuntores em operação ou a aquisição de novo equipamento. Nestes casos, uma solução de compromisso pode ser adotar um critério de especificação seguro o bastante para garantir a utilização de disjuntor desenvolvido e testado para uma constante de tempo padrão (45 ms), quando a constante de tempo da rede é superior a esta. A seguir, o critério é proposto e justificado.

5.1 Questões básicas

O pressuposto básico é:

- *o disjuntor foi desenvolvido e testado para uma constante de tempo padrão, 45 ms, mas será utilizado em condição de rede com constante de tempo superior a esta; considerou-se 60 ms, 75 ms e 120 ms.*

A pergunta básica é:

- *qual a redução que deverá ser aplicada à corrente nominal do disjuntor (simétrica) para que o mesmo possa operar com segurança numa condição de constante de tempo superior a esta?*

5.2 Seleção dos parâmetros físicos

O critério foi desenvolvido com base nos aspectos sumarizados nos itens 3 e 4 deste relatório. Tomou-se como ponto de partida os parâmetros listados na tabela 3, que são fundamentais para a caracterização das solicitações impostas ao disjuntor na interrupção de corrente assimétrica. Algumas considerações de cunho prático sobre a necessidade ou não de se considerá-los explicitamente na definição dos critérios são a seguir abordadas.

- energia de arco: este é o parâmetro que congrega a maior parte das solicitações impostas ao disjuntor e é a base do critério proposto. Nela já estão embutidos os parâmetros numerados de 1 a 4 na tabela 3.
- amplitude do último semiciclo da corrente (\hat{i}): tem também uma importância fundamental neste contexto e por isto é considerada no critério proposto, embora já esteja embutida na determinação da energia de arco. A razão de considerá-la separadamente é a sua influência na severidade das solicitações eletrodinâmicas impostas ao disjuntor assim como, para alguns tipos de câmaras, na forma da

característica de pressão do meio isolante no interior da câmara de interrupção.

- duração do último semiciclo da corrente: como está se levando em conta apenas valores de τ considerados em norma [1] a duração do último semiciclo é conhecida e dada na tabela 1. Logo, este é um dado conhecido e não é tratado como variável independente
- di/dt no instante de interrupção: da tabela 4 depreende-se que esta não é uma solicitação crítica. Além disto, quanto maior a constante de tempo menor é di/dt na passagem por zero da corrente. Logo, a solicitação imposta ao disjuntor por di/dt para τ superior ao padrão é inferior àquela referida a $\tau= 45\text{ms}$. Ou seja, a fase térmica da interrupção tende ficar menos severa. Para fins da análise em questão di/dt é desconsiderado, o que é um critério conservativo.
- pico (U_c) e primeira referência (U_1) da envoltória da TTR: da tabela 4 depreende-se que está também não é uma solicitação crítica. Como mencionado em 3.2.3, tanto o pico como a taxa de crescimento da TRT diminuem em função do aumento de τ . Logo, o tempo de arco mínimo do disjuntor tende a diminuir no “minor loop” e, conseqüentemente, o tempo de arco máximo no “major loop” também. Precisar esta influência é possível somente com onerosos ensaios de laboratório de potência. Para facilidade de equacionamento do critério esta influência no sentido de redução do tempo de arco máximo será desprezada, o que é um critério conservativo.
- Janela do tempo de arco: tendencialmente varia pouco e sua eventual variação será desprezada, pois:
 - a energia de arco referente a $\tau= 45 \text{ ms}$ será mantida,
 - o arrefecimento de di/dt e da TTR faria com que o tempo de arco mínimo e conseqüentemente o máximo tenda a diminuir, porém o aumento da duração do último semiciclo de corrente o tornaria mais longo. Baseado em experiência laboratorial pode-se considerar que estas tendências em sentidos opostos se anulam,
 - Em alguns tipos de câmara de interrupção a autossopro o tempo de arco mínimo pode ter uma tendência de se estender com o aumento de τ . A influência deste aumento da janela do tempo de arco se passa porém no entorno do “minor loop”, o que relativamente pouco contribui para a energia de arco total na interrupção de um “major loop”, e, logo, pode ser desprezada.
- Componente contínua na separação dos contatos: como o valor de \hat{I} e da energia de arco no último “major loop” da corrente estão sendo considerados explicitamente, a influência deste parâmetro na energia de arco já está assegurada e o mesmo pode ser desprezado.

5.3 Definição do critério

O critério é definido por:

Um disjuntor desenvolvido e testado⁶ para uma constante de tempo padrão, 45 ms, poderá ser aplicado em situação de rede com τ superior a esta se duas condições forem satisfeitas:

- A energia de arco máxima for mantida igual ou inferior àquela correspondente a corrente nominal de curto-circuito e a constante de tempo padrão (45 ms) para as condições de manobra definidas em norma [1] para os ensaios de interrupção de corrente assimétrica (Test duty T100a)
- O pico da corrente assimétrica no último semiciclo é igual ou inferior ao especificado por norma (tabela 11 de [1]) para a constante de tempo padrão (45 ms) e a corrente nominal de curto-circuito do disjuntor

5.3.1 Definição da primeira condição do critério

Matematicamente a primeira condição é expressa por:

$$\int_{t_{0\tau} - t_{arco_max}}^{t_{0\tau}} I_{\tau}^2 \cdot dt \leq \int_{t_0 - t_{arco_max_ \tau}}^{t_0} I_{45ms}^2 \cdot dt \quad \text{eq.(5)}$$

onde, t_0 = instante de interrupção após um “major loop” considerando a constante de tempo padrão (45 ms)

$t_{arco-max}$ = tempo de arco máximo do disjuntor para “major loop” e τ = 45 ms

$t_{0\tau}$ = instante de interrupção após um “major loop” considerando uma constante de tempo τ (> 45 ms)

$t_{arco-max-\tau} = t_{arco-max} + (\Delta t_{60\text{ ms}} - \Delta t_{45\text{ ms}})$ = tempo de arco máximo⁷ para c^{te} de tempo τ

I_{τ} = corrente assimétrica referida a uma constante de tempo τ (variável que se deseja determinar na inequação)

$I_{45\text{ ms}}$ = corrente assimétrica referida a corrente nominal de curto-circuito do disjuntor e $\tau = 45\text{ ms}$

Os valores de t_0 são determinados igualando-se a expressão (2) a zero e achando-se as “n” raízes desta equação. A determinação de qual dos t_0 é o que deverá ser utilizado depende da magnitude do tempo de operação do disjuntor e do tempo da

⁶ Não raro pode ocorrer que o disjuntor é testado para uma frequência de 50 Hz. Do ponto de vista da duração do “major loop”, a solicitação imposta por corrente de 50 Hz é superior àquela de 60 Hz. Em termos de pico da corrente no “major loop”, para a frequência de 50 Hz o pico é ligeiramente inferior ao de 60 Hz ($\Delta I_p < 5\%$). Esta diferença, porém, é inferior à tolerância de norma para ensaio de corrente assimétrica (+/- 10%). Logo, em termos práticos da aplicação do disjuntor, pode-se considerar que o fato do mesmo ter sido testado para 50 Hz representa uma condição tendencialmente mais severa que para 60 Hz, para a condição de manobra considerada.

⁷ É assumido que não há variação do tempo de arco mínimo no “minor loop” para a condição de manobra com $\tau > 45\text{ ms}$ em relação a condição padrão ($\tau = 45\text{ ms}$). Logo, a respectiva variação na duração do “major loop” se deve apenas à variação da duração deste, que é dada por $\Delta t_{60\text{ ms}} - \Delta t_{45\text{ ms}}$, como definido em 3.2.2.

proteção (t_{op} e t_r). Para a situação do oscilograma da Figura 14, considerando-se que $10 \text{ ms} < t_{op} \leq 27.5 \text{ ms}$ e $t_r = 8,3 \text{ ms}$, o instante de zero da corrente após o “major loop” definido pela norma para estas condições é o t_{05} .

Substituindo-se a expressão (2) na equação (5), obtém-se:

$$\frac{I_{m_\tau}}{I_{m_{45ms}}} \leq \sqrt{\frac{\int_{t_0-t_{arco-max}}^{t_0} \left[\text{sen}(\omega t + \theta - \varphi) - \sin(\theta - \varphi) \cdot e^{\frac{-t}{45ms}} \right]^2 \cdot dt}{\int_{t_0\tau-t_{arco-max}-\tau}^{t_0\tau} \left[\text{sen}(\omega t + \theta - \varphi) - \sin(\theta - \varphi) \cdot e^{\frac{-t}{\tau}} \right]^2 \cdot dt}} \quad \text{eq. (6)}$$

Para facilidade de notação, denomina-se:

$$K_\tau = I_{m_\tau} / I_{m_{45ms}} \quad \text{eq (7)}$$

Logo, K_τ é o valor em pu⁸ da corrente eficaz referida a uma constante de tempo τ , que assegura uma energia de arco igual ou inferior àquela que se obteria nas mesmas condições de operação para a constante de tempo padrão (45 ms).

Para que se possa calcular as integrais da equação (6) é necessário, porém, que se conheça o valor de $t_{arco-max}$. Caso o usuário tenha acesso ao relatório de ensaio de tipo para interrupção de corrente assimétrica, este valor é conhecido e basta então executar as integrais levando-o em conta, o que configura a situação ideal do ponto de vista da otimização da utilização da capacidade de interrupção de corrente assimétrica do disjuntor. Na maioria das vezes, entretanto, o valor de $t_{arco-max}$ não está disponível. Nestes casos uma solução conservadora é proposta, como descrita a seguir.

Considere a Figura 18, onde a relação entre a energia de arco para constante de tempo τ dividida pela energia referente a $\tau=45 \text{ ms}$ é plotada em função de $t_{arco-max}$ para três diferentes valores de τ e as três faixas de tempo de operação do disjuntor definidas pela norma de disjuntores [1]. Esta relação é denominada “energia de arco normalizada⁹”. O intervalo adotado para vai além do encontrado na prática, tipicamente entre 18 ms e 26 ms para as tecnologias de disjuntores consideradas neste relatório (tabela 4). Logo, para o fim a que se destina esta análise pode-se afirmar que a relação entre as energias de arco do disjuntor está coberta no

⁸ 1 pu= valor eficaz da corrente nominal de curto-circuito do disjuntor para $\tau= 45 \text{ ms}$

⁹ Esta relação corresponde ao inverso da fração dentro raiz na equação (6), isto é:

$$\text{Energia_de_arco_normalizada} = \frac{\int_{t_0-t_{arco-max}}^{t_0} \left[\text{sen}(\omega t + \theta - \varphi) - \sin(\theta - \varphi) \cdot e^{\frac{-t}{\tau}} \right]^2 \cdot dt}{\int_{t_0\tau-t_{arco-max}}^{t_0\tau} \left[\text{sen}(\omega t + \theta - \varphi) - \sin(\theta - \varphi) \cdot e^{\frac{-t}{45ms}} \right]^2 \cdot dt}$$

domínio considerado. Como todas as 9 curvas apresentam claramente um ponto de máximo é um critério conservativo adotar este máximo como o ponto da curva utilizado para determinar K_τ , na falta de informações precisas sobre o tempo de arco máximo do disjuntor. Em outras palavras, este ponto da curva é o que minimizará o valor máximo admissível para a corrente nominal de curto-circuito referida a uma constante de tempo τ que o disjuntor poderá manobrar, sob a ótica do critério de energia de arco máxima admissível. A tabela 5 apresenta os valores de K_τ obtidos desta forma.

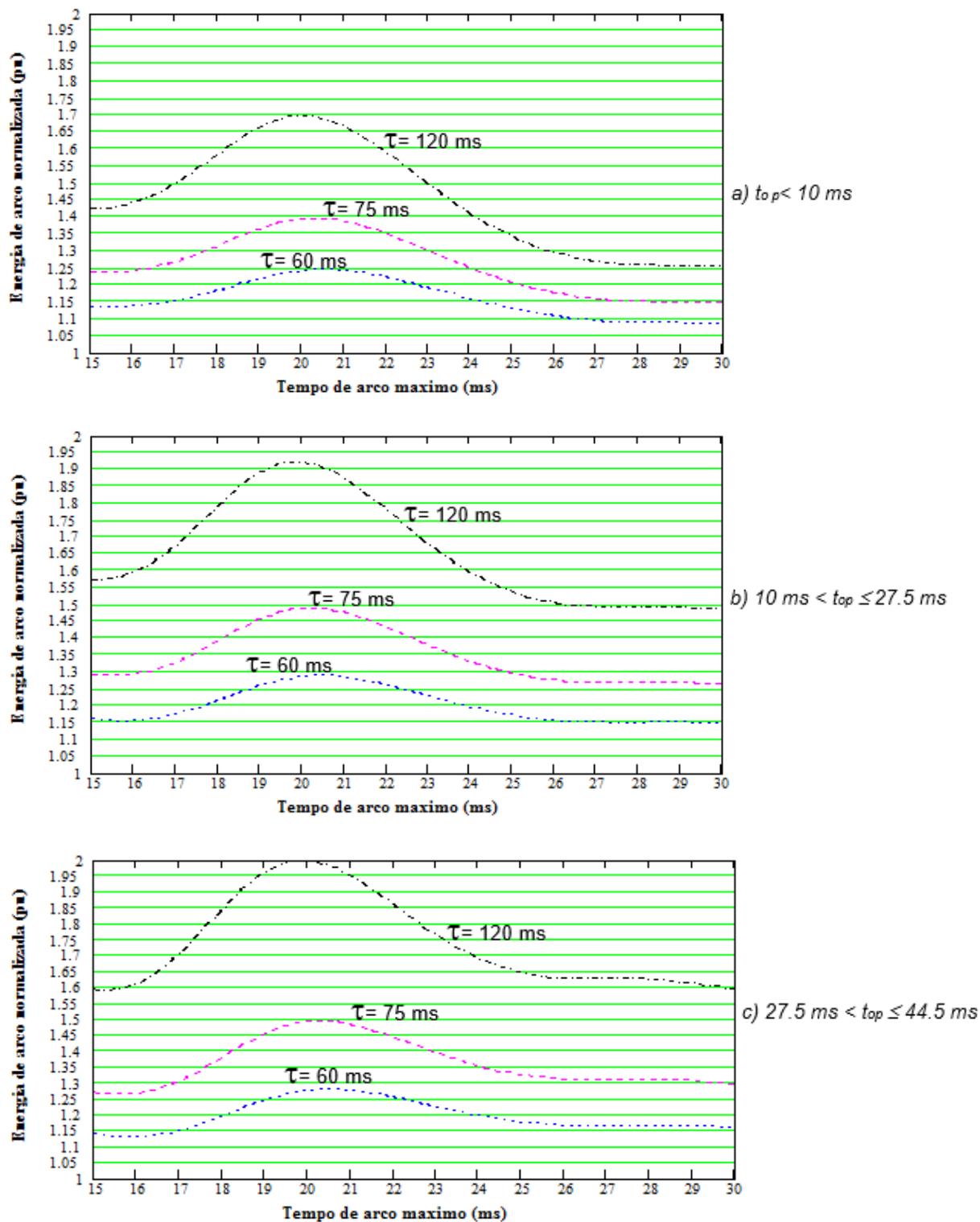


Figura 18 - Energia de arco referida a uma dada constante de tempo normalizada em relação a energia de arco para $\tau = 45 \text{ ms}$

τ (ms)	t_{op} - tempo de abertura (ms)		
	$0 < t_{op} \leq 10$	$10 < t_{op} \leq 27,5$	$27,5 < t_{op} \leq 44,5$
45	1,000	1,000	1,000
60	0,896	0,881	0,883
75	0,847	0,820	0,818
a) 1 20	b) 0,767	c) 0,722	d) 0,708

Tabela 5 - Fatores de redução¹⁰ da corrente nominal de curto-circuito obtidos pelo critério de manutenção da energia de arco obtida no ensaio de interrupção no "major loop" da corrente assimétrica para $\tau = 45$ ms.

5.3.2 Definição da segunda condição do critério

Para assegurar que o pico da corrente assimétrica na interrupção de um "major loop" para uma constante de tempo τ não seja superior àquela referente a $\tau = 45$ ms, a tabela 11 da norma IEC para disjuntores de AT [1] foi utilizada como base. Refira-se a tabela 1 deste relatório. Este critério é definido por:

$$\hat{I}_{\tau} \leq \hat{I}_{45ms} \quad \text{eq. (7)}$$

onde,

\hat{I}_{τ} = valor de pico máximo admissível para a corrente assimétrica com constante de tempo τ associada durante a interrupção de um "major loop"

\hat{I}_{45ms} = valor de pico especificado por norma para a corrente assimétrica com constante de tempo 45 ms durante a interrupção de um "major loop"

Da relação entre os valores em pu especificados na tabela 1 para constante de tempo τ e 45 ms obtém o critério de corrente de pico máxima apresentado na tabela 6.

τ (ms)	t_{op} - tempo de abertura (ms)		
	$0 < t_{op} \leq 10$	$10 < t_{op} \leq 27,5$	$27,5 < t_{op} \leq 44,5$
45	1,000	1,000	1,000
60	0,946	0,927	0,920
75	0,913	0,885	0,870
120	0,867	0,818	0,789

Tabela 6 - Fatores de redução da corrente nominal de curto-circuito obtidos pelo critério de não exceder a corrente de pico na interrupção de "major loop" especificada para $\tau = 45$ ms

¹⁰ Critério conservativo a ser utilizado quando o tempo de arco máximo obtido no ensaio de interrupção de corrente assimétrica no "major loop" não é conhecido (Test duty T100a da IEC 62271-100 [1]).

5.3.3 Critério final proposto

O critério proposto compõem-se das duas condições anteriormente descritas. Para a formulação de um critério geral que satisfaça a ambas é recomendável a comparação gráfica dos dois subcritérios para a identificação de dominâncias. Refira-se a Figura 19. Nela fica claro que o critério da energia de arco, Tabela 5, é o dominante para a situação de tempo de arco máximo desconhecido.

Desta forma, o critério sugerido é que se adote fatores de redução mais conservativos que os originalmente propostos na Tabela 5, visando dar maior segurança à aplicação do critério recomendado. O critério para superação por X/R adotado, portanto, é apresentado na Tabela 7.

τ (ms)	Fator de redução
$75 < \tau \leq 120$	0,70
$60 < \tau \leq 75$	0,80
$45 < \tau \leq 60$	0,85

Tabela 7 - Fatores de redução da corrente nominal de curto-circuito propostos

5.4 Comparações com referências conhecidas

A proposição de um novo critério deve ser cercada de algum cuidado antes de sua aplicação na prática. Infelizmente uma completa e abrangente validação deste critério para diversas tecnologias e tipo construtivos de disjuntores requereria um esforço experimental que seria absolutamente inviável do ponto de vista econômico. Resta então a comparação do mesmo com resultados previamente publicados. A tabela 6 apresenta os dados obtidos em publicações e sua comparação com o critério proposto.

Da tabela 8 constata-se que dos 6 exemplos encontrados nas referências em apenas um deles o critério proposto foi menos severo, que é o caso alemão. De acordo com a experiência laboratorial do autor neste tema, um disjuntor de 80 kA/45ms normalmente cobre o requisito de 63 kA/ 120 ms. Desta forma, julga-se que o caso em questão refere-se a um sobre dimensionamento do equipamento para fazer face ao requisito de 63 kA/50 ms. Nos demais 5 casos o critério proposto foi conservativo o que demonstra a sua aplicabilidade para casos em que informações específicas sobre o desempenho dos disjuntores considerados em situações de τ elevado não estão disponíveis.

Além destes exemplos específicos apresentados neste item, o WG 13.04 da CIGRE recomenda [4] que disjuntores com corrente nominal de curto-circuito de pelo menos uma classe superior na série R10 [1] à corrente especificada pode ser utilizado em situações de rede de $\tau > 45$ ms. Critérios ou limites não são porém sugeridos.

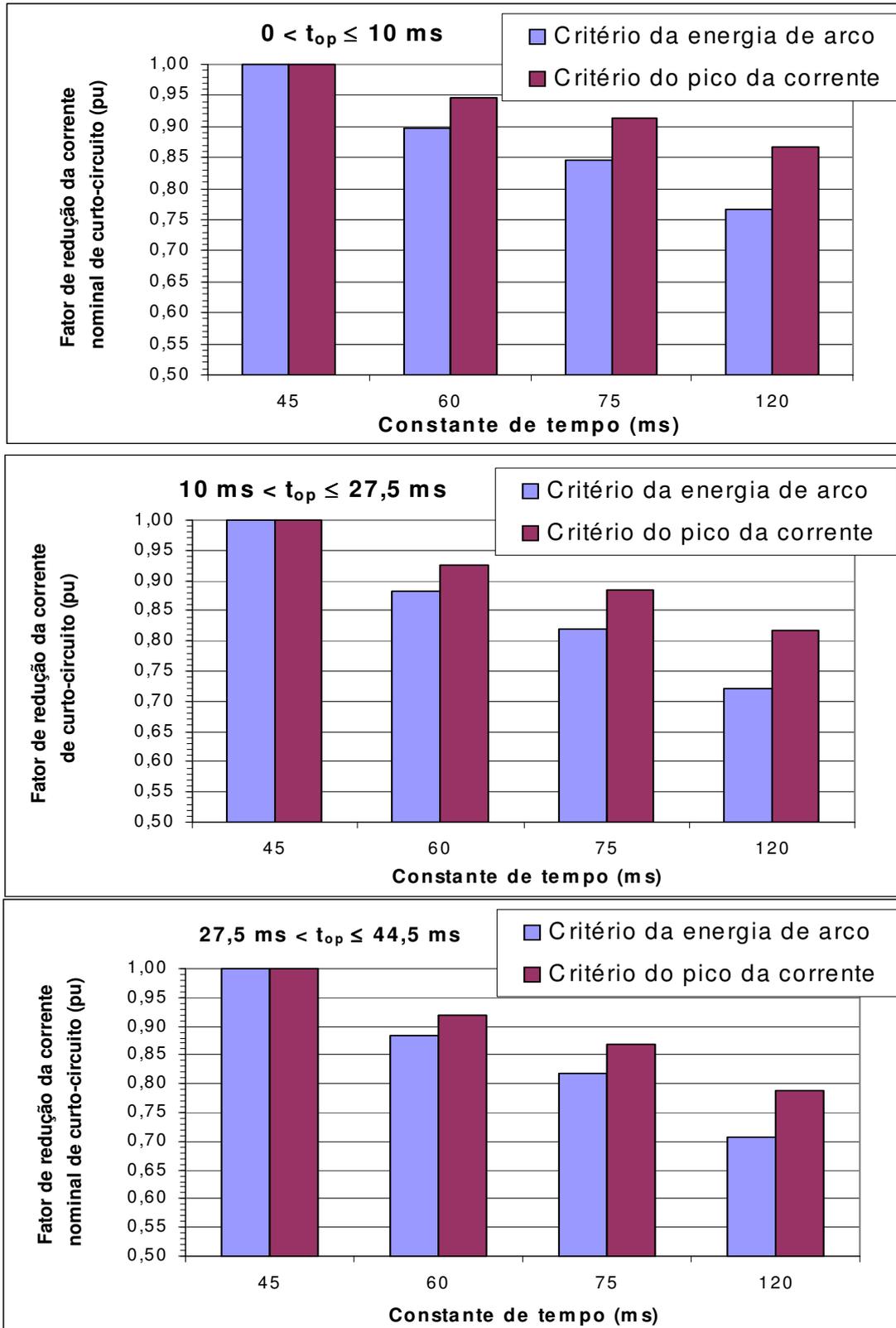


Figura 19 - Comparação dos subcritérios para redução da corrente nominal de curto-circuito de disjuntores de AT quando submetidos a constantes de tempo superiores ao valor padrão (45 ms)

Descrição sumária da aplicação	Ref.	redução da corrente nominal proposta		Diferença (%)
		na ref.	critério proposto	
Na Inglaterra especifica-se disjuntor de 63 kA/45ms para cobrir condição de rede de 57,5 kA/60 ms	[4]	0,913	0,881	-3,5
Na Alemanha especifica-se disjuntor de 80 kA/45ms para cobrir condição de rede de 63 kA/50 ms	[4]	0,788	0,892	13,2
Na China especifica-se disjuntor de 80 kA/45ms para cobrir condição de rede de 63 kA/120 ms	(*)	0,788	0,722	-8,4
Curva extrapolada a partir de ensaios realizados em tres tipos de câmaras de dijuntor a sopro de gas considerando-se $\tau= 60$ ms	[9]	0,965	0,924	-4,2
Mesmo que acima para $\tau= 75$ ms		0,956	0,878	-8,2
Mesmo que acima para $\tau= 120$ ms		0,917	0,807	-12,0

(*) experiência do autor

Tabela 8 – Comparação entre resultados obtidos com o critério proposto e valores publicados

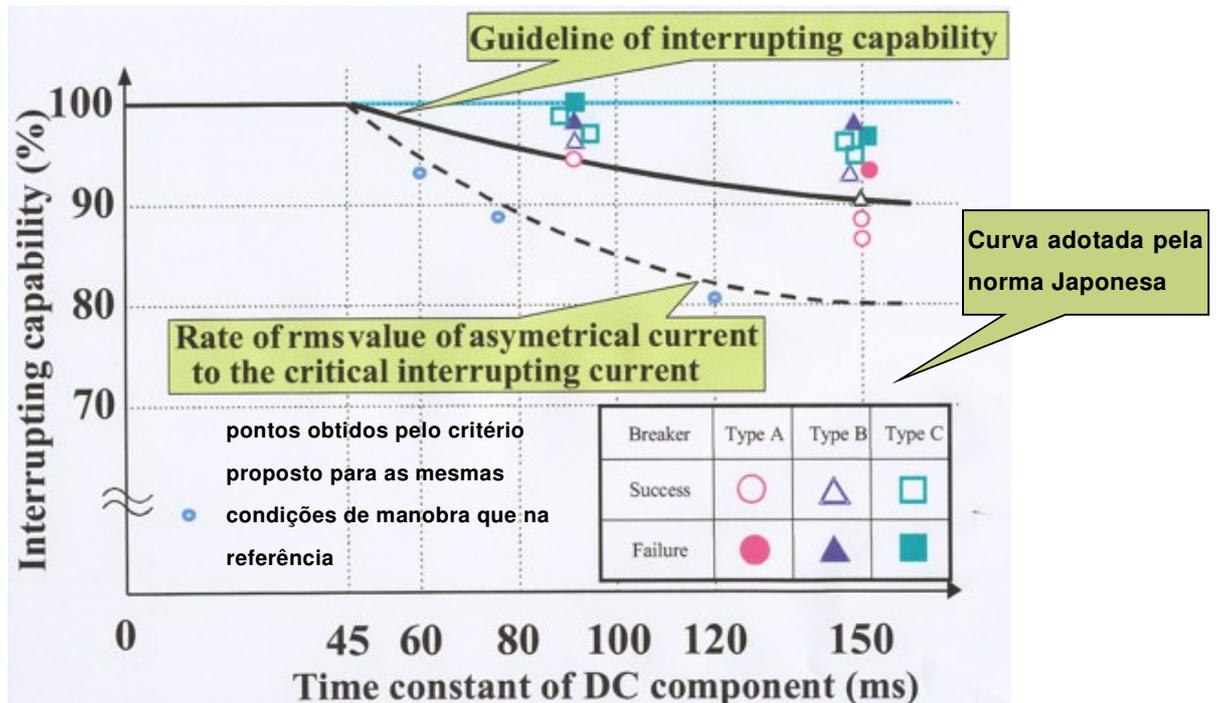


Figura 20 - Comparação entre resultados de ensaio para três diferentes câmaras de interrupção a sopro de gás [9] e o critério proposto

Anexo 1 – Corrente de zeros atrasados

Esta é uma situação especial de manobra e não é objeto de análise detalhada neste relatório. Geralmente ocorre nas proximidades de grandes geradores devido a conjunção de condições operativas e de defeito desfavoráveis. Nesta situação, a alta assimetria não só contribui para originar valores elevados de energia de arco, como também o retardo na ocorrência de um zero de corrente. Este efeito muitas vezes leva à superação da janela de tempo em que o disjuntor possui capacidade de interrupção podendo levar o disjuntor de alta tensão a não conseguir interromper a corrente. Disjuntores de gerador, por sua vez, são dimensionados para atender este requisito [10] e são a solução mais recomendada nestes casos.

Para fins de exemplo a Figura 21 apresenta um oscilograma de corrente com zeros atrasados.

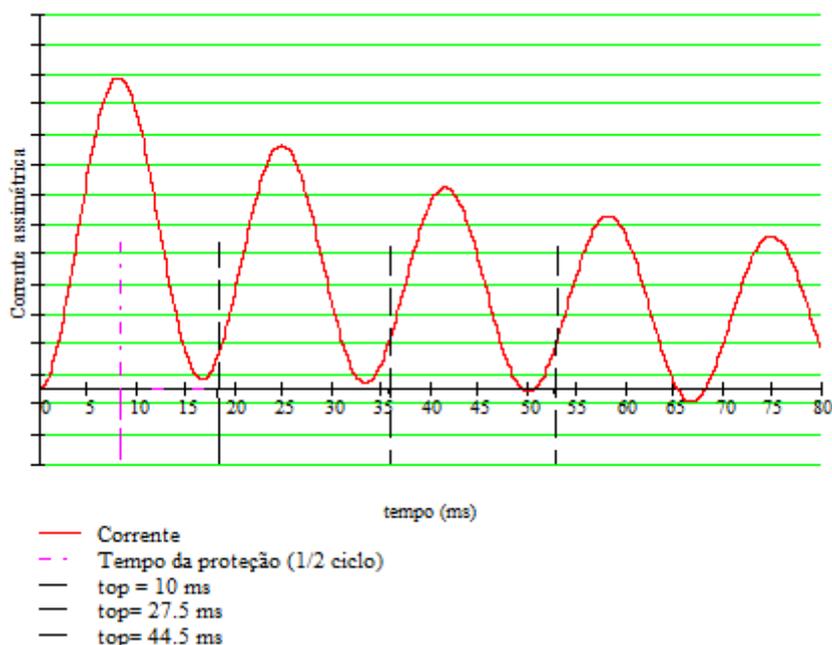


Figura 21 - Exemplo de corrente com zeros atrasados

Em um caso relativamente simples como este, uma solução possível para que o disjuntor possa interromper com sucesso a corrente de curto é que o mesmo tenha um tempo de abertura suficientemente longo, tal como $t_{op} = 44.5$ ms, desde que sejam assegurados os critérios de corrente de pico e de energia de arco, conforme explicado no item 5.

Casos extremos de corrente de zeros atrasados, quando o primeiro zero ocorre muitas dezenas de ms após o instante de abertura dos contatos, é necessária uma investigação mais detalhada do comportamento da assimetria da corrente na presença do arco elétrico. É recomendável a realização de simulação transitória (EMTP) modelando-se a dinâmica da máquina assim como o comportamento da

resistência do arco, que neste caso pode ser representada por sua curva estática $U_{\text{arco}} \times I_{\text{arco}}$. Caso fique constatado que o disjuntor não consegue pressionar a corrente para zero dentro de um intervalo de tempo no qual ele ainda possua capacidade de interrupção (janela de interrupção) será necessária a utilização de solução especial. Normalmente tal solução é extremamente onerosa, pois e requer desenvolvimento de câmara de interrupção especial e a realização de ensaios especiais de interrupção de corrente assimétrica.

O critério proposto neste trabalho não pode ser aplicado diretamente a disjuntores em situações de rede de zeros atrasados. Porém, análise similar poderia ser aplicada a estas situações se:

- existir uma passagem natural por zero no ponto do oscilograma da corrente onde o disjuntor deverá interromper (levando-se em conta tempo da proteção e tempo de operação do disjuntor)
- a janela de interrupção requerida puder ser atendida pelo disjuntor
- for possível a definição de uma corrente simétrica, um grau de assimetria associado e uma constante de tempo associada, que conjuntamente possam representar com fidelidade a energia de arco, o valor de pico e a duração dos semiciclos da corrente de zeros atrasados na janela de interrupção considerada; veja exemplo da figura A-2.

Uma vez satisfeitas as condições acima, o disjuntor seria apto a manobrar a corrente de zeros atrasados especificada se a corrente equivalente corresponder a uma energia de arco e um valor de crista igual ou inferiores aos obtidos nos ensaios de tipo com a constante de tempo padrão (45 ms) e corrente nominal de curto-circuito do disjuntor.

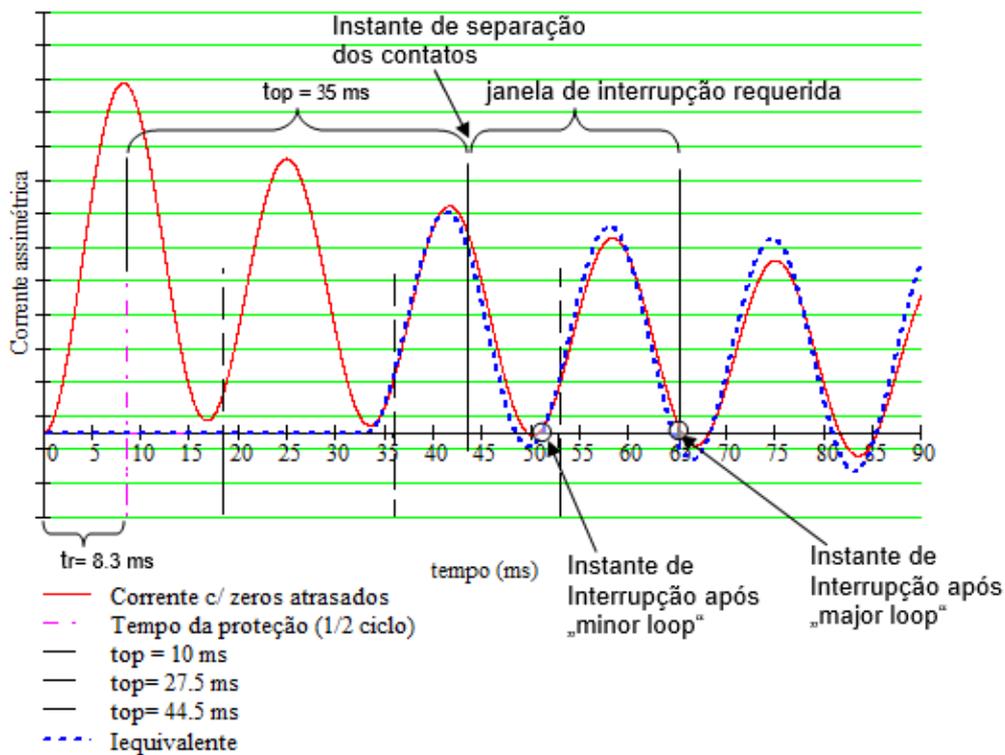


Figura 22 - Exemplo de corrente equivalente à corrente com zeros atrasados para fins de análise da capacidade de interrupção de disjuntores neste tipo de manobra, quando um zero natural da mesma ocorre dentro da janela de interrupção do disjuntor considerado

Anexo 2 – Terminologia adotada para identificação das diferentes tecnologias de disjuntores consideradas neste trabalho

Disjuntor a ar comprimido:

Os modernos disjuntores a ar comprimido são uma evolução do princípio da interrupção a sopro de ar desenvolvido originalmente na década de 1920 pela Westinghouse [11]. Muito utilizado na década de 70 e em grande parte dos anos 80 em aplicações para EAT e UAT, possui desenho muito robusto e existe ainda em grande número em operação na rede básica. Utiliza o princípio de arrefecimento do arco por sopro de ar através de um bocal isolante convergente-divergente (bocal de Laval). Ar-comprimido é armazenado em tanques de alta pressão localizados a montante do bocal, permitindo um fluxo de ar de alta intensidade através do mesmo, o leva ao arrefecimento e interrupção do arco. O armazenamento de ar-comprimido se dá através de compressores de alta pressão. Neste tipo de disjuntor, a corrente que flui através do arco previamente ao instante da interrupção não tem influência no fenômeno da interrupção de corrente.

Disjuntor SF6 tipo “puffer” puro:

Utiliza o mesmo princípio básico de arrefecimento do arco que disjuntores a ar-comprimido, que é o sopro do arco por um gás através de um bocal convergente-divergente (bocal de Laval). A grande inovação desta tecnologia desenvolvida¹¹ na década de 1960 [11] reside no fato que a energia para a compressão do gás a montante do bocal, que permite o fluxo deste para a “sopragem” do arco, advém do próprio movimento dos contatos do disjuntor. Logo, o mecanismo de operação necessita não só da energia mecânica para acelerar os contatos, mas também para comprimir o gás isolante. O emprego do gás SF₆, que possui excelentes propriedades de transmissão de calor e de isolamento elétrico, foi que viabilizou este salto tecnológico na interrupção de corrente elétrica por sopro de gás. Neste tipo de disjuntor, a corrente que flui através do arco previamente ao instante da interrupção não tem nenhuma influência no fenômeno da interrupção de corrente.

¹¹ N.a.: O desenvolvimento dos modernos disjuntores “puffer single pressure” deu-se graças ao espírito criativo latino; foi na Magrini, na bucólica Bérgamo, que Calvino [12] desenvolveu primeira câmara puffer para aplicações comerciais em EHV. O projeto de Calvino é até hoje a base da maioria dos projetos existentes de disjuntores a SF₆ de pressão única. Existe alguma polêmica com relação a paternidade desta tecnologia, pelo fato de as pesquisas básicas de interrupção em SF₆ terem sido desenvolvidas originalmente pela Westinghouse nos EUA. Autores de origem anglo-saxônica têm certa dificuldade em admitir que o grande “breakthrough” da interrupção em SF₆ foi obra de um Italiano. Esta dicotomia é claramente observada no clássico livro de Brwone [13], onde diferentes autores têm diferentes versões para este fato histórico.

Disjuntor SF6 tipo “puffer” misto:

O princípio básico do arrefecimento do arco é similar ao do “puffer” puro. A diferença é que para correntes elevadas, a pressurização do SF6 na câmara de compressão a montante do bocal se dá não somente pela ação mecânica do êmbolo compressor, mas também pelo aumento da pressão do gás que é decorrente do aquecimento do mesmo proveniente da energia do arco. Neste tipo de disjuntor, a corrente que flui através do arco previamente ao instante da interrupção tem alguma influência no fenômeno da interrupção para amplitudes elevadas (tipicamente correntes da ordem da corrente nominal de curto-circuito).

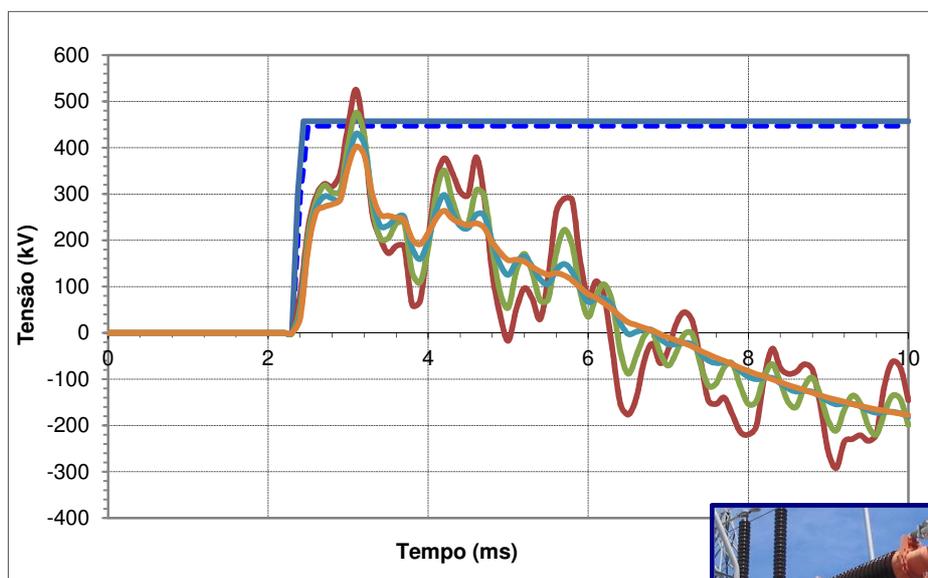
Disjuntor SF6 tipo autossopro:

O princípio básico do arrefecimento do arco é também similar ao do “puffer” Porém, a compressão do gás para formação do fluxo através do bocal se dá pela transferência de energia térmica do arco para o SF6. Neste tipo de disjuntor, a corrente que flui através do arco previamente ao instante da interrupção tem grande influência no fenômeno da interrupção para toda gama de correntes de curto-circuito.

REFERÊNCIAS

- [1] IEC 62271-100, High Voltage Switchgear and Controlgear – Part 100: High-voltage alternating current circuit-breakers, First Edition, May 2001.
- [2] NBR 7118, Disjuntores de alta tensão - Especificação, 1994
- [3] IEEE Standard Test Procedure for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis, ANSI/IEEE C37.09.1979, New York
- [4] CIGRE WG 13.04, Specified time constants for testing asymmetrical current capability of switchgear, ELECTRA no. 173, pp 18-31, August 1997.
- [5] Estudo da redução de correntes de curto-circuito em subestações da área rio através da aplicação de dispositivo limitadores, Relatório interno ONS-2.1/007/2002.
- [6] CIGRE WG 13.04, Asymmetrical current breaking tests, ELECTRA no. 132, pp. 109-125, October/1990b.
- [7] IEC 60427, Synthetic testing of high-voltage alternating current circuit-breakers, Third Edition, April 2000.
- [8] Disjuntores e Chaves: Aplicação em Sistemas de Potência, A. C. Carvalho et alii, livro publicado pelo Comitê de Estudos 13 da CIGRE Brasil, ISBN 85-228-0165-7, EDUFF Publisher, Niterói, Brasil, 1995.
- [9] Skimato, T., Nakanishi, K., Evaluation of interruptions capability of gas circuit-breakers on large time constants of DC component of fault currents, CIGRE 2002 Session, paper 13-104, August 2002, Paris.
- [10] IEEE Standard Test Procedure for AC Generator Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis, IEEE C37.013.1997, New York

IV - METODOLOGIA DE CÁLCULO DA TRT PARA ESTUDOS DE SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES



IV - METODOLOGIA DE CÁLCULO DA TRT PARA ESTUDOS DE SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES

ONS RE 2.1/079/2005 - Rev.2

Revisões do relatório

Rev.1 22/11/2007

seção	página(s)	descrição
ANEXO curvas	12 a 14	Correções nas curvas com parâmetros de envoltória de TRT

Rev.2 23/02/2014

seção	página(s)	descrição
1	5	Correção da resolução normativa vigente.
2.2.1 (letra I)	7	Inclusão da representação da carga na modelagem completa.

1 OBJETIVO

O presente guia foi elaborado pelo Grupo de Trabalho de Superação de Equipamentos (GT-AS), formado por transmissoras e ONS, com o intuito de padronizar o procedimento para análise de superação de disjuntores por tensão de restabelecimento transitória (TRT). As indicações de superação de equipamentos, com base legal na Resolução Normativa ANEEL nº 158, de 23 de maio de 2005, revogada em 26 de julho de 2011 pela Resolução nº 443, alterada pela Resolução Normativa Nº 643 de 16 de dezembro de 2014, são de responsabilidade do ONS e estão respaldadas em procedimentos e critérios padronizados de análise, previamente discutidos e divulgados aos Agentes envolvidos neste processo.

O cálculo da TRT é uma tarefa complexa, tendo em vista os diversos fatores que podem influenciar a determinação da mesma, inclusive a própria metodologia de cálculo. As dificuldades básicas para a realização de um estudo de TRT são a identificação da metodologia aplicável, a modelagem da rede elétrica e os critérios de estudo e simulação. Dentre eles pode-se destacar os abaixo indicados:

- Configurações da rede próxima ao disjuntor analisado,
- Tipos de falta,
- Pontos de aplicação da falta na rede,
- Condições dos disjuntores nos terminais remotos das linhas (abertos ou fechados).

A escolha dos casos a serem estudados deve ser feita criteriosamente, de forma que se considere as solicitações críticas para o disjuntor.

No caso de estudo de TRT por intermédio de simulação transitória, além dos pontos levantados, existem ainda outras dificuldades inerentes à própria simulação. Por exemplo, a extensão da rede simulada, a modelagem dos elementos da rede, o passo de integração, podem afetar a validade dos resultados obtidos.

As linhas mestras da seleção de metodologias e adoção de critérios de estudos de TRT, visando a uniformização de procedimentos, são a seguir apresentadas neste relatório.

2 METODOLOGIA DE CÁLCULO DA SUPERAÇÃO DE DISJUNTOR POR TRT

2.1 Metodologias de análise da TRT

No atual estágio do trabalho do GT de Superação basicamente existem dois tipos de metodologia aplicáveis: metodologias simplificadas e a simulação transitória.

2.1.1 Metodologias simplificadas

Nesta abordagem, as solicitações de TRT são geralmente obtidas por solução analítica da rede, ou através de simplificações desta para determinar as solicitações mediante fórmulas. A vantagem destas metodologias é a simplicidade de sua aplicação e a velocidade para análise de grande quantidade de disjuntores. A clara desvantagem reside na validade dos resultados obtidos, que são dependentes da topologia da rede e das simplificações adotadas na sua representação. A aplicação de metodologias simplificadas passa pela necessidade de investigação detalhada para validação das mesmas. O grupo de trabalho de superação está investigando diferentes metodologias simplificadas e brevemente emitirá uma nota técnica com recomendações a respeito da utilização deste método. Por ora, não será indicada pelo GT nenhuma metodologia simplificada para análise de superação de disjuntores por TRT.

2.1.2 Simulação transitória

A simulação transitória de redes elétricas é hoje comumente empregada, graças à grande difusão do programa Alternative Transients Program - ATP, utilizado pela maior parte das concessionárias do Brasil e do mundo. A grande vantagem da simulação com esta ferramenta é a possibilidade de modelagem da rede com o grau de sofisticação que o caso estudado exige. A desvantagem fica por parte do tempo necessário para a cuidadosa definição da modelagem e para a identificação dos parâmetros elétricos dos elementos da rede. Em casos onde a subestação ainda não se encontra modelada no programa de transitórios, o esforço para a realização de um estudo pode não ser desprezível, principalmente em casos de análise de superação de disjuntores, para os quais a modelagem de um grande número de subestações e linhas de transmissão pode ser necessária.

2.2 Modelagem da rede

Nesta etapa do trabalho do GT de Superação, apenas dois estágios de detalhamento da rede elétrica são definidos para simulação com o programa ATP/EMTP: a modelagem completa e a modelagem refinada.

Em princípio a modelagem completa, mais conservativa do que a refinada, deve ser utilizada. Caso seja detectada superação do disjuntor analisado por TRT, a adoção da modelagem refinada deve ser então utilizada, de forma a se obter um maior grau de precisão na análise.

2.2.1 Modelagem completa

- a) Utilizar o programa de cálculo de transitórios eletromagnéticos ATP/EMTP.
- b) Iniciar a solução em regime permanente com a falta já aplicada para a condição de “line-out” calculada pelo programa de cálculo de curto-circuito; simula-se então a abertura do disjuntor analisado.
- c) Validar a representação adotada mediante comparação dos valores de curto-circuito para faltas trifásicas e monofásicas obtidos com o uso programa ANAFAS e sistema completo com aqueles obtidos pelo ATP/EMTP com o sistema reduzido, utilizando-se equivalentes de rede.
- d) Adotar a representação trifásica da rede estudada.
- e) Para a definição do caso base, os cortes da rede devem ser adotados na segunda barra adjacente ao barramento do disjuntor em análise, se possível, e representando-se nessas barras os equivalentes de curto-circuito da rede.
- f) Adotar inicialmente um passo de integração, igual a um décimo do menor tempo de propagação das linhas próximas ao disjuntor sob estudo e, em seguida, variar essa grandeza para permitir a análise paramétrica dos resultados. No que se refere ao tempo de simulação, recomenda-se adotar, em princípio, um valor entre 10ms e 20ms, que é suficiente para a observação da abertura dos três polos do disjuntor. Certificar que o passo de integração atende aos requisitos gerais relacionados ao tipo de falha em questão. Para faltas terminais não é recomendado valores superiores a 20 μ s, que é o desejável para cobrir frequências relacionadas a faltas terminais (≤ 5 kHz). Para falta na linha, o passo de integração não deverá ser superior a 0,1 μ s, para fazer face a frequências de oscilação da linha (≤ 200 kHz) e ao retardo, da ordem de 0,5 μ s, provocado por capacitâncias parasitas localizadas no terminal da mesma.
- g) Considerar inicialmente falta terminal trifásica não aterrada.
- h) Não considerar polo preso do disjuntor.
- i) Para disjuntores de linha, cuja corrente de falta aos terminais ultrapasse 90% da corrente nominal de curto-circuito do mesmo, simular também falta quilométrica e considerar faltas monofásicas para terra, nas quais o último polo a abrir seja aquele que interromperá a corrente de falta. Para disjuntores a SF₆, a falta deve ser aplicada a uma distância da subestação suficiente para que se obtenha uma

corrente de aproximadamente 90% da falta terminal correspondente. Caso o disjuntor analisado seja de tecnologia a ar-comprimido, o nível da corrente a ser reproduzido pela simulação deve ser de aproximadamente 75%. Para disjuntores a óleo esse valor deve ser da ordem de 60%.

- j) As linhas de transmissão devem ser representadas pelo modelo de parâmetros distribuídos, sem correção com a frequência.
- k) Os transformadores e reatores devem ser representados, primeiramente, pelos modelos do ATP/EMTP, sem a saturação, sem capacitâncias parasitas, sem perdas no ferro e sem correção de impedância de curto-circuito com a frequência.
- l) Representar as cargas com modelo RL paralelo na barra da subestação cujos disjuntores estão sendo analisados. Caso não tenha carga na própria barra, a representação das cargas nas barras adjacentes deve ser realizada. A representação das cargas nas barras adjacentes também deve ser adotada quando o disjuntor em análise se mantiver superado por TRT, após o estudo considerando apenas a representação da carga na barra da subestação do disjuntor avaliado.
- m) Os disjuntores devem ser representados pelo modelo de chaves ideais tempo-controladas.
- n) Não representar o arco-elétrico do disjuntor nem as capacitâncias de equalização¹² de tensão (em paralelo com as câmaras de interrupção).
- o) As fontes de tensão devem ser representadas pelo modelo de fonte senoidal (tipo 14).
- p) Os resultados (curvas, valores máximos e taxas de crescimento) devem ser comparados com os garantidos pelo fabricante do disjuntor ou, na falta destes, com os estabelecidos pelas Normas técnicas de disjuntores (NBR 7118 [2], IEC 62271-100 [3], IEEE C37.04 [4] ou normas técnicas vigentes na época de fabricação dos disjuntores).

2.2.2 Forma de Apresentação dos Resultados

O relatório deverá conter claramente em seus Anexos:

- a) O unifilar de operação da SE onde os disjuntores estão localizados. Esse diagrama deverá permitir identificar o arranjo de barramento utilizado e os disjuntores que estão sendo avaliados.

¹² As capacitâncias de equalização dos disjuntores não devem ser incluídas nos estudos, pois os requisitos de norma são definidos baseando-se no conceito de TRT presumida, ou seja, a TRT aplicada aos terminais do disjuntor sem a interferência deste. Quando o disjuntor analisado foi ensaiado, aplicou-se ao mesmo a TRT presumida de norma. Desta forma, a deformação desta pelas capacitâncias de equalização e pela influência do arco não devem ser incluídas nos estudos, pois o mesmo deve determinar as solicitações presumidas, como definido por norma.

- b) O diagrama unifilar da rede representada no ATP, incluídos os equivalentes de curto-circuito. Deverão ser indicados os casos base do PAR utilizados como fonte para a obtenção do equivalente.
- c) Os valores das impedâncias de linha, transformadores, capacitâncias parasitas (se aplicável) e os equivalentes do sistema adotados no ATP.
- d) Tabelas indicando os valores da TRT (primeiro pico e pico máximo), os instantes correspondentes e as taxas de crescimento da TRT para o primeiro ou último polo a abrir, dos disjuntores avaliados, conforme tabela exemplo abaixo:

CASO	I (kA- eficaz)	Primeiro Pólo a Abrir					Último Pólo a Abrir					SxI	
		E1 (kV- pico)	T1 (μ seg)	E2 (kV- pico)	T2 (μ seg)	S (kV μ seg)	E1 (kV- pico)	T1 (μ seg)	E2 (kV- pico)	T2 (μ seg)	S (kV μ s)		
12. Falta Terminal 3 ϕ	13,1	635,0	1700,0	635,0	1700,0	0,8	-	-	-	-	-	-	-
13. Falta Term. 3 ϕ Ater.	13,1	497,2	1750,0	497,2	1750,0	0,5	-	-	-	-	-	-	-
14. Falta Term. 3 ϕ Line in	2,5	335,8	423	335,8	423	0,9	-	-	-	-	-	-	-
15. Falta Terminal 2 ϕ	5,0	481,5	1750	483,1	1840	0,6	-	-	-	-	-	-	-
16. Falta Term. 2 ϕ Aterr.	8,7	-	-	-	-	-	452,3	1760	452,3	1760	0,4	-	-
17. Falta Terminal 1 ϕ	10,6	-	-	-	-	-	421,9	1820,0	421,9	1820,0	0,5	-	-
18. Falta Quilom. 1 ϕ	10,3	-	-	-	-	-	17,2	8,0	416,9	1822,0	3,4	35,0	-
19. Falta Quilom. 1 ϕ	9,9	-	-	-	-	-	33,6	14,0	412,3	1835,0	3,6	35,6	-
20. Falta Quilom. 1 ϕ	9,7	-	-	-	-	-	48,6	22,0	408,2	1714,0	3,3	32,0	-
21. Falta Quilom. 1 ϕ	9,4	-	-	-	-	-	63,8	38,0	404,7	1735,0	2,5	23,5	-
22. Falta Quilom. 1 ϕ	9,2	-	-	-	-	-	77,8	47,0	403,2	1886,0	3,3	30,4	-
23. Falta Quilom. 1 ϕ	8,9	-	-	-	-	-	90,2	44,0	405,1	1683,0	3,8	33,8	-

- e) Plotagem das curvas de TRT críticas obtidas nas simulações.
- f) Os valores dos parâmetros da TRT utilizados como limites (valores de norma ou da especificação do disjuntor). Caso as correntes de curto estejam entre os valores normalizados de 10%, 30%, 60% e 100% da capacidade nominal de curto-circuito do disjuntor, sugere-se a interpolação dos parâmetros da TRT, conforme as curvas apresentadas no anexo a este relatório.

3

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

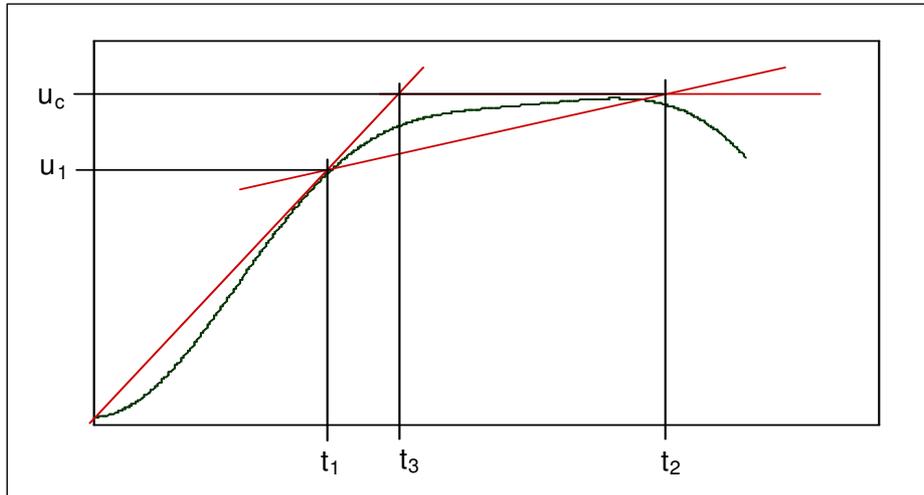
- [1] Tensão de Restabelecimento Transitória de Disjuntores - Metodologia de Estudo - Amon F.,J., Dissertação Submetida à Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro para a obtenção do Título de Mestre em Ciências de Engenharia Elétrica, 1986;
- [2] NBR 7118, Disjuntores de Alta Tensão: Especificação, ABNT, 1994.
- [3] IEC 62271-100, High Voltage Switchgear and Controlgear – Part 100: High-voltage alternating current circuit-breakers, First Edition, May 2001, www.iec.ch/JP.htm;
- [4] IEEE Std C37.04-1999, IEEE Standard Standard Rating Structure for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis, June 1999;
- [5] IEEE Std C37.011-1994, IEEE Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis, September 1994;
- [6] Critério para aplicação de disjuntores de alta tensão quando submetido a correntes de curto-circuito com constante de tempo elevada; Carvalho, AC; Relatório Técnico, ONS, GAT 056/2003.

4 CRÉDITOS

Participantes do GT de Superação	Empresa
Paulo Ricardo C. Oliano	CEEE
Angélica da C. O. Rocha	CEMIG
Fernando Rodrigues Alves	CHESF
Francisco José de Avelar Baltar	CHESF
Methodio V. Godoy	CHESF
Rita Kátia Delgado Medeiros	CHESF
Julio César Xavier Chiradia	COELBA
Auro Seiji Mishima - ASM	COPEL
Carlos Alberto Fiori Castelli - CAC	CTEEP
Durvaldo Gonçalves Filho	CTEEP
José Antonio S. de Freitas	CTEEP
Waldecy de Macedo - WM	CTEEP
Nilson Kozlowski - NK	ELETRONORTE
Ricardo Antunes	ELETROSUL
Ruy Luiz Machado	ELETROSUL
Roberto Rocha	ONSEPE
Jorge Amon Filho	FURNAS
Marco Antonio de Paiva Fontes	FURNAS
Rogério Silveira Machado - RSM	FURNAS
Antonio Carlos R. A. Oliveira	LIGHT
Andréia Maia Monteiro	ONS
Antonio Carlos Cavalcanti de Carvalho	ONS
Antonio Sergio Corrado	ONS
Ary DÁjuz	ONS
Benedito Adelino Souza da Silva	ONS
Daniel Sinder	ONS
Helio Pessoa de Oliveira Jr	ONS
Humberto Arakaki	ONS
Marcílio Valença	ONS
Ramon S. Sampaio Parente Vianna	ONS
Marianna Nogueira Bacelar	ONS

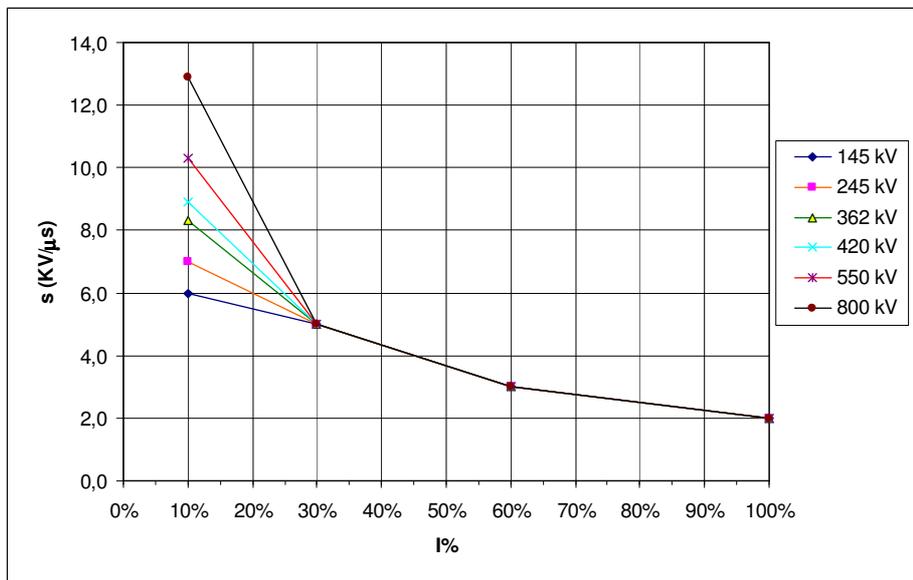
ANEXO – CURVAS PARA INTERPOLAÇÃO DOS PARÂMETROS DA TRT EM FUNÇÃO DO VALOR PERCENTUAL DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO, TENDO COMO BASE A CAPACIDADE DE INTERRUPÇÃO NOMINAL DO DISJUNTOR [2 E 3]¹³

Figura 23 - Exemplo de TRT da rede para falta aos terminais com envoltória a dois ou quatro



parâmetros

Figura 24 - Valores normalizados da taxa de crescimento da envoltória da TRT para falta aos terminais a 100%, 60%, 30% e 10% Icc



¹³ A última versão da IEC 62271-100 (2006) e da respectiva NBR (2007) apresentam pequenas alterações dos parâmetros da TRT, ainda não considerados nesse relatório. Para fins de análise de superação, entretanto, estas alterações não são relevantes.

Figura 25 - Valores normalizados do parâmetro u_1 da envoltória da TRT a 4 parâmetros para falta aos terminais a 100 % I_{cc}

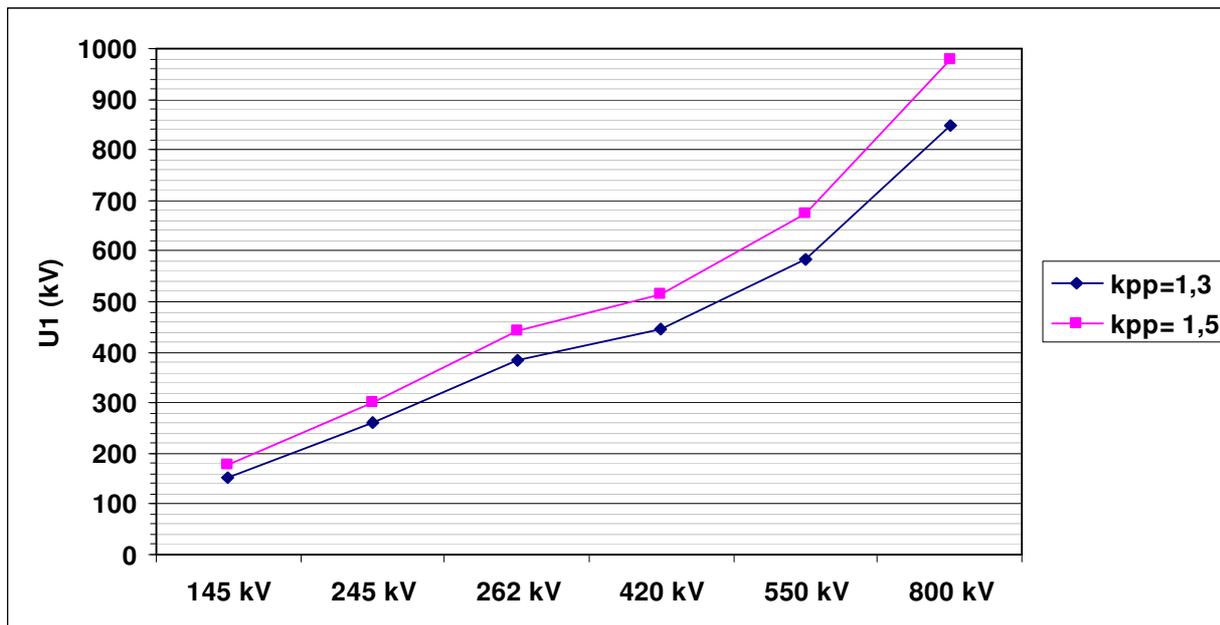


Figura 26 - Valores normalizados do parâmetro t_1 da envoltória da TRT a 4 parâmetros para falta aos terminais a 100 % I_{cc}

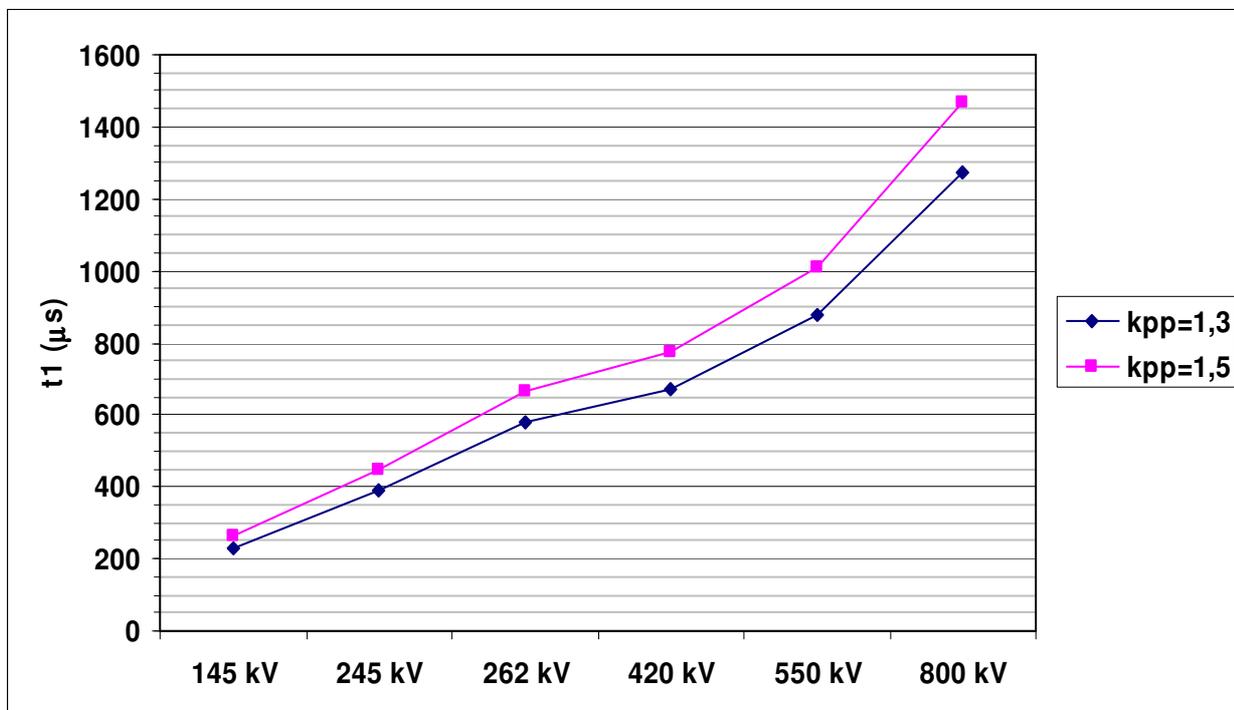


Figura 27 - Valores normalizados do parâmetro uc da envoltória da TRT para falta aos terminais a 100%, 60%, 30% e 10% Icc

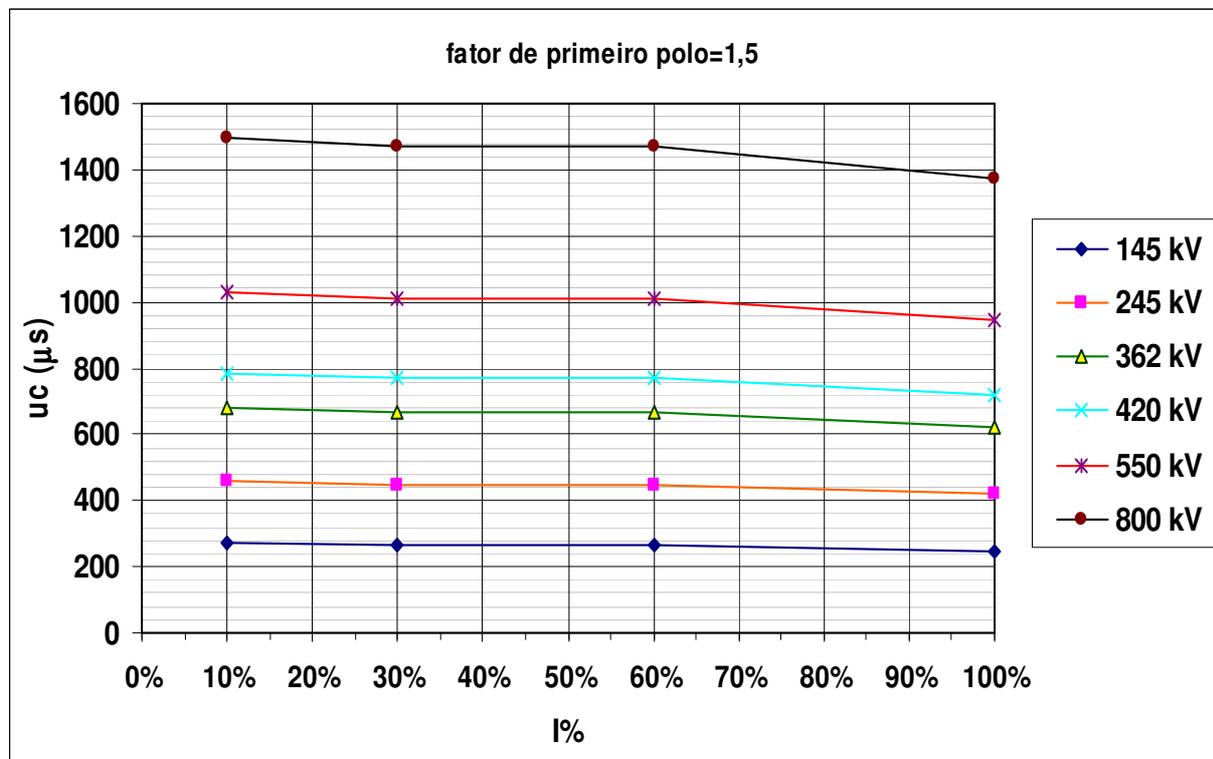
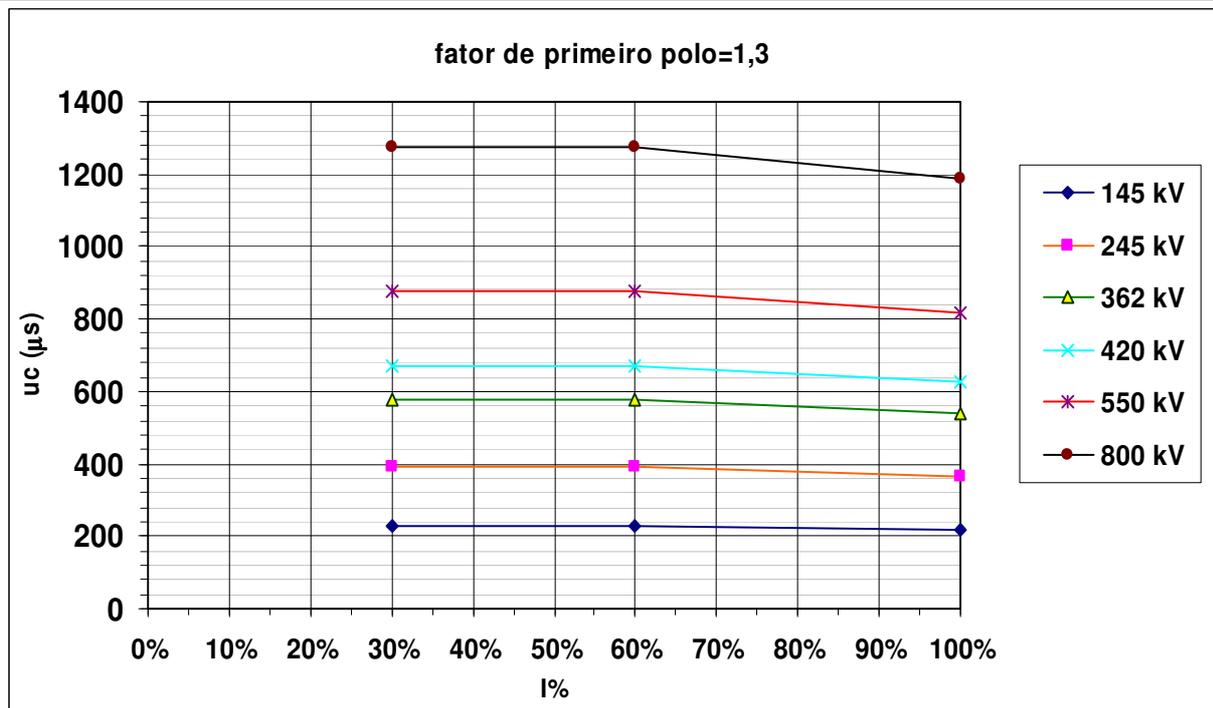


Figura 28 - Valores normalizados do parâmetro t_2 da envoltória da TRT a 4 parâmetros para falta aos terminais e 100 % Icc

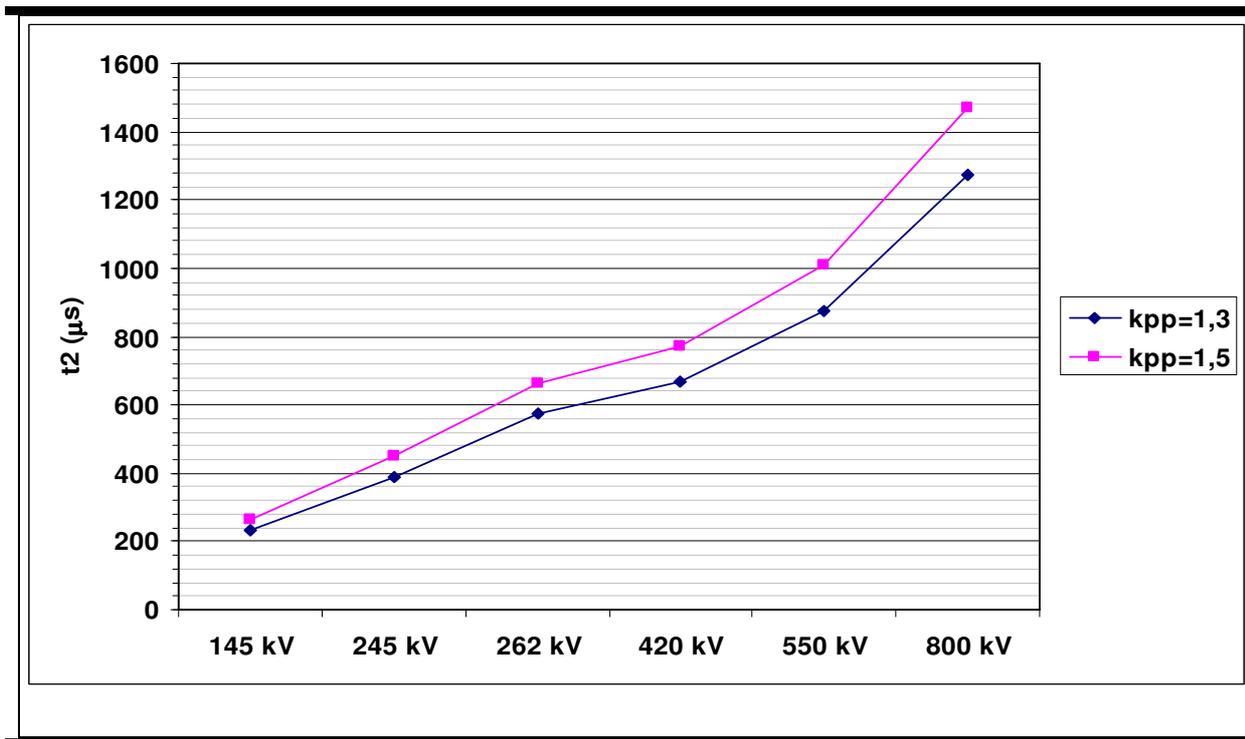
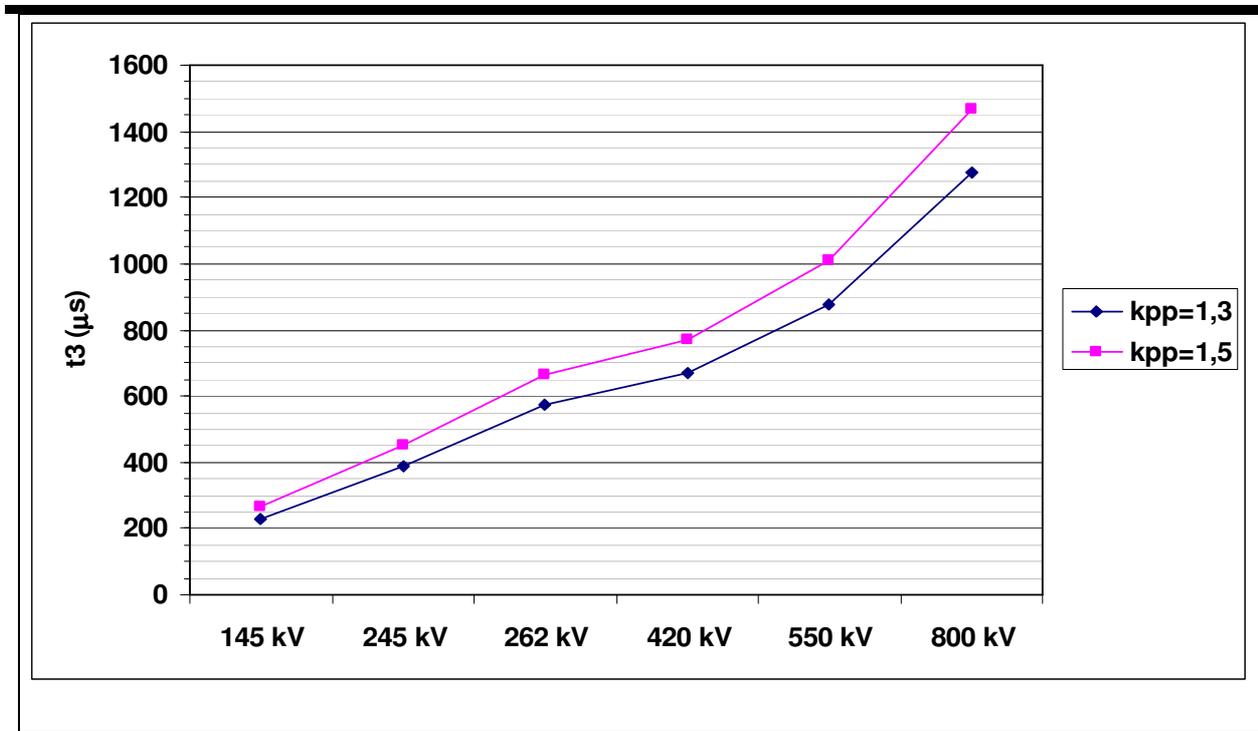


Figura 29 - Valores normalizados do parâmetro t_3 da envoltória a 2 parâmetros da TRT para falta aos terminais para 100 % Icc



V - DIRETRIZES PARA ANÁLISE DE SUPERAÇÃO DE BARRAMENTO



V - DIRETRIZES PARA ANÁLISE DE SUPERAÇÃO DE BARRAMENTO

ONS RE 2.1 032/2014

Revisões do relatório

Emissão Inicial 30/04/2014

seção	página(s)	descrição
-------	-----------	-----------

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVO

A rápida evolução do sistema interligado nacional (SIN), particularmente após a reforma do arcabouço institucional ao final da década de 1990, vem causando um substancial crescimento das solicitações elétricas sobre os equipamentos das instalações existentes. Este fato tem como consequência a acentuada incidência de superação de equipamentos de alta tensão, que então necessitam ser substituídos.

De forma a equacionar a solução do ponto de vista regulatório para autorização de reforços na Rede Básica (RB) e Demais Instalações da Transmissão (DIT) devido à superação de equipamentos e instalações, a ANEEL emitiu a Resolução Normativa nº 158, de 23 de maio de 2005, revogada em 26 de julho de 2011 pela Resolução nº 443, alterada pela Resolução Normativa Nº 643 de 16 de dezembro de 2014. De acordo com esta resolução, cabe ao ONS a indicação final da substituição de equipamentos superados dos módulos de manobra e instalações de subestações da RB e DIT. Aos Agentes cabe a implementação de tais reforços, uma vez incluídos pelo MME na Consolidação de Obras e autorizados pela ANEEL.

O equacionamento dado pelo ONS e Agentes para a realização das análises requeridas para as indicações de substituição de equipamentos superados foi a criação, em 2004, do Grupo de Trabalho para Análise da Superação de Equipamentos de Alta Tensão (GT-AS). Este grupo, integrado aos processos do Plano de Ampliações e Reforços (PAR) do ONS, é formado pelo ONS e Agentes de Transmissão, Distribuição e Geração. Seu objetivo é levar a termo, de forma cooperativa, as análises e indicações de superação de equipamentos das subestações da RB e DIT. Num primeiro momento, o GT-AS se ocupou do estabelecimento de critérios, metodologias e processos para as análises de superação, estabelecidos de forma participativa entre Agentes e ONS e aprovados pela ANEEL. Os mesmos encontram-se devidamente documentados pelo ONS e disponibilizados a todos os Agentes. Os referidos critérios encontram-se nos diversos itens do presente documento.

A nota técnica [1], de 2007, abordou com detalhes os principais aspectos da superação de barramentos e possíveis medidas para mitigá-la. O presente documento tem como objetivo consolidar os critérios da referida nota técnica a fim de orientar de forma mais prática os critérios para estudos de superação de barramento realizados pelos Agentes.

2 DESENVOLVIMENTO DOS ESTUDOS

2.1 Parâmetros para a avaliação

Considerou-se que as seguintes situações de superação de barramento devem ser avaliadas:

- Corrente de Carga;
- Corrente de Curto-Circuito (Simétrica e Assimétrica).

A avaliação de superação é feita basicamente por meio da comparação das características nominais dos barramentos com as solicitações de rede a eles relacionadas, conforme abaixo discriminado:

- I. corrente nominal do barramento X máximo requisito de carregamento imposto pela rede ao barramento, obtido por programa de fluxo de potência;
- II. corrente de curto-circuito nominal do barramento X corrente de curto-circuito simétrica no barramento, obtida por programa de cálculo de curto-circuito;
- III. valor de crista da corrente suportável no barramento X máximo valor de crista da corrente de curto-circuito no barramento, obtido por programa de cálculo de curto-circuito;

2.2 Base de Dados

A base de dados para as análises de curto-circuito e fluxo de potência a ser considerada será aquela disponibilizada pelo ONS no horizonte do PAR.

2.3 Reprodutibilidade e Validação dos Resultados

Tendo em vista que as avaliações citadas neste documento têm caráter cíclico, estando inseridas dentro do âmbito do PAR, os Agentes deverão utilizar casos base, nos formatos compatíveis com aqueles hoje utilizados no setor, a saber:

- Fluxo de Potência: ANAREDE; e
- Curto-Circuito: ANAFAS.

2.4 Forma de Apresentação dos Resultados

O resultado das análises terá como produto final um sumário executivo do qual constarão as premissas, critérios e metodologias adotados, bem com os motivos e as datas da superação.

Deverá ser apresentada ainda, no caso de superação por corrente de carga, a corrente nominal, o valor da corrente calculado e a condição de superação (rede íntegra, deteriorada, equipamento em manutenção etc.). Da mesma forma, na ocorrência de superação por corrente de curto-circuito, solicita-se a corrente nominal de interrupção simétrica e assimétrica, os valores das correntes simétrica

e assimétrica calculados e a condição de superação (rede íntegra, deteriorada, equipamento em manutenção etc.).

As justificativas de substituição de barramentos superados deverão ser baseadas em análise detalhada, em consonância com a metodologia estabelecida neste documento.

2.5 Superação por Corrente de Carga

A superação de barramento por corrente de carga é caracterizada pela ocorrência de carregamentos com magnitudes superiores àquelas definidas como nominais para o barramento em análise, no horizonte do ciclo do PAR, ou seja:

$$I_{\text{carga_calculada}} \geq I_{\text{nominal}} \Rightarrow \text{Barramento superado}$$

O cálculo dos carregamentos aplicados às linhas e transformadores da subestação é realizado por meio de estudos de fluxo de potência. Na caracterização da superação de barramento por corrente de carga os fluxos de potência nos diversos trechos dos barramentos deverão ser examinados nas condições mais severas, tanto para condição normal de operação quanto para condição de emergências no SIN (N-1), no horizonte do ciclo do PAR. Sob essa ótica, a investigação deverá verificar o maior carregamento em cada trecho de barramento, nas seguintes condições:

- e) Com todos os vãos de manobra em operação.
- f) Com um disjuntor em manutenção.
- g) Com uma barra em manutenção para os arranjos Barra Dupla Disjuntor e Meio (DJM) e Barra Dupla Duplo Disjuntor.
- h) Com o disjuntor interligador operando em substituição a qualquer outro disjuntor da subestação nos arranjos Barra Dupla a Quatro ou Cinco Chaves (BD4 ou BD5) e Barra Principal e Transferência (BPT).

Também devem ser exploradas as condições de carregamentos máximos admissíveis em cada conexão, ou seja, limite de emergência para linhas de transmissão e sobrecargas para as transformações (20% por um período de 4 horas).

DETALHAMENTO DAS ANÁLISES

O estudo do fluxo de potência em barramento sob condição de emergência deve ser desenvolvido a partir da condição de configuração íntegra da subestação, simulando-se a perda de elementos tanto internos quanto externos à mesma (condição N-1). Na situação de rede alterada, onde um elemento da subestação encontra-se em indisponibilidade por um período prolongado, pode-se simular adicionalmente a condição de perda de mais um componente.

A escolha das contingências deve ser feita objetivando o maior impacto em termos de circulação de correntes nos elementos internos à subestação.

O cálculo das correntes passantes normalmente é realizado através de programas computacionais de fluxo de potência, contudo para subestações pequenas também pode-se utilizar as equações de fluxo de potência.

A modelagem da subestação deve ser feita detalhadamente, contendo a representação das chaves e disjuntores de cada trecho do barramento. Estes trechos apresentam impedâncias bem pequenas quando comparados aos demais ramos da rede como transformadores e linhas de transmissão, desta forma, pode-se utilizar o valor de 0,001% para cada trecho, por exemplo.

A seguir serão apresentadas algumas particularidades a serem observadas na seleção das emergências, em função do tipo de arranjo de barramentos adotado.

I. Arranjo Barra Principal e Transferência (BPT)

Para o arranjo Barra Principal e Transferência considerar :

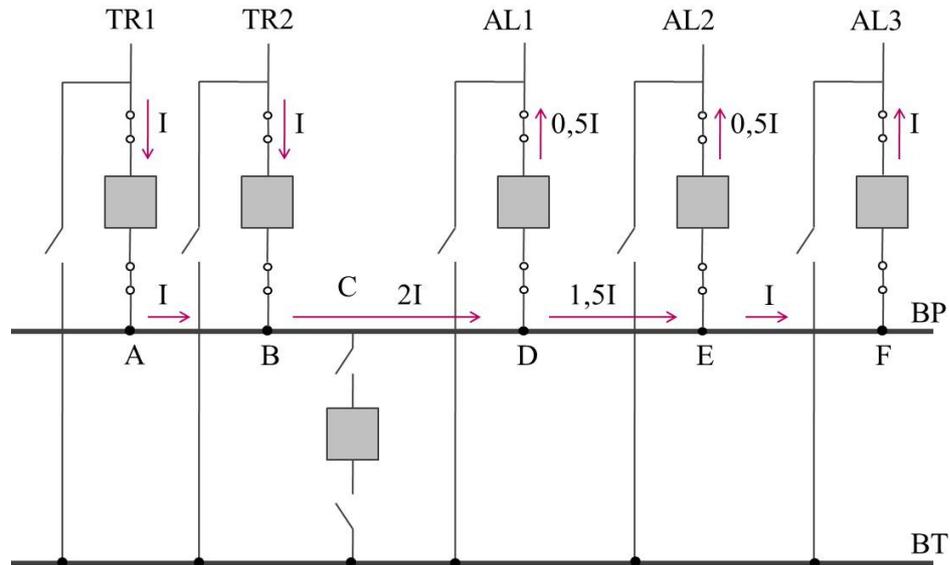
- Subestação completa;
- Subestação com um dos disjuntores em manutenção (N-1);
- Posição física das demais conexões (fontes ou cargas), na identificação da(s) seção(s) do barramento que poderão ser mais carregados (trata-se de uma análise individual, caso a caso).

Para exemplificar o que foi mencionado acima são apresentadas, nas Figura 30 a Figura 34, possíveis condições de operação da subestação e seus reflexos nos valores de carregamento em trechos de barramento. Foi explorada a condição normal de operação da subestação, bem como aquela em que um dos disjuntores encontra-se em manutenção. Foi também analisada a influência da posição física do disjuntor interligador de barras nas correntes de carga.

A Figura 30 abaixo mostra as correntes que circulam em trechos de barramento na condição normal de operação da subestação, considerando um arranjo BPT com cinco conexões (3 para alimentadores e 2 para transformadores). Observa-

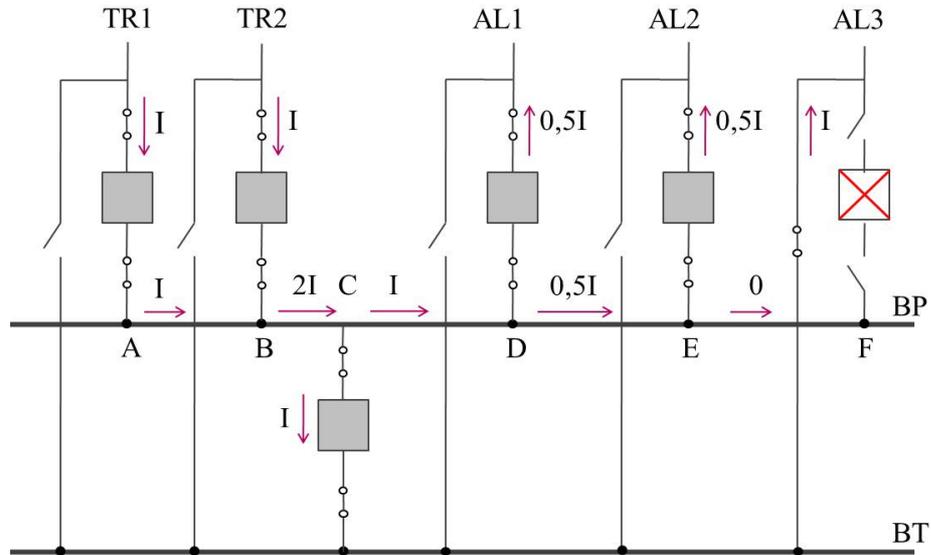
se que para as correntes indicadas, o trecho de barramento mais carregado é o trecho de B até D com $2I$ de corrente.

Figura 30 - Operação Normal da Subestação



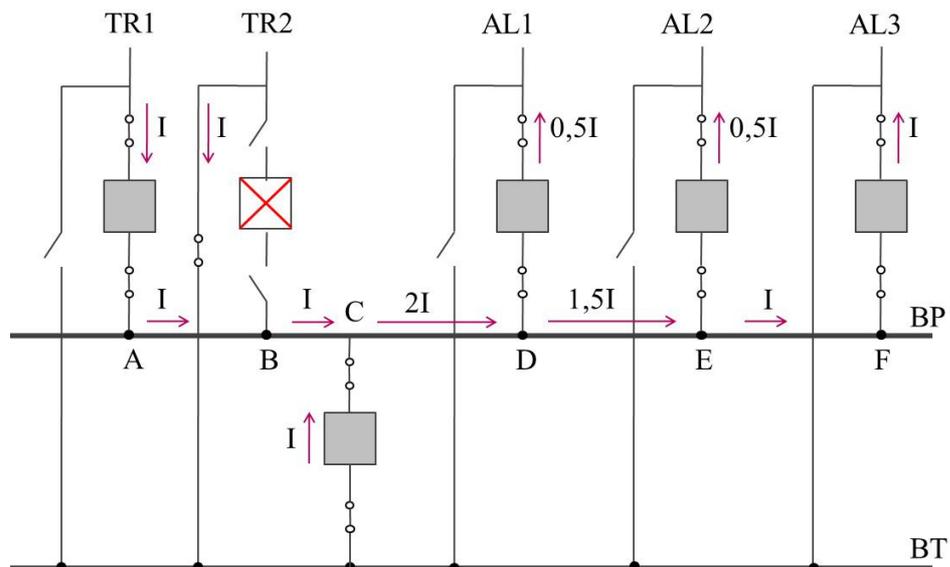
Na Figura 31 são mostradas as correntes que circulam em trechos de barramento na condição de operação no modo transferido, ou seja, o disjuntor de transferência operando em substituição ao disjuntor do alimentador AL3 em manutenção. Nesta situação, observa-se que o trecho de barramento mais carregado é o de B até C com $2I$ de corrente.

Figura 31 - Operação no modo transferido (disjuntor do AL3 em manutenção)



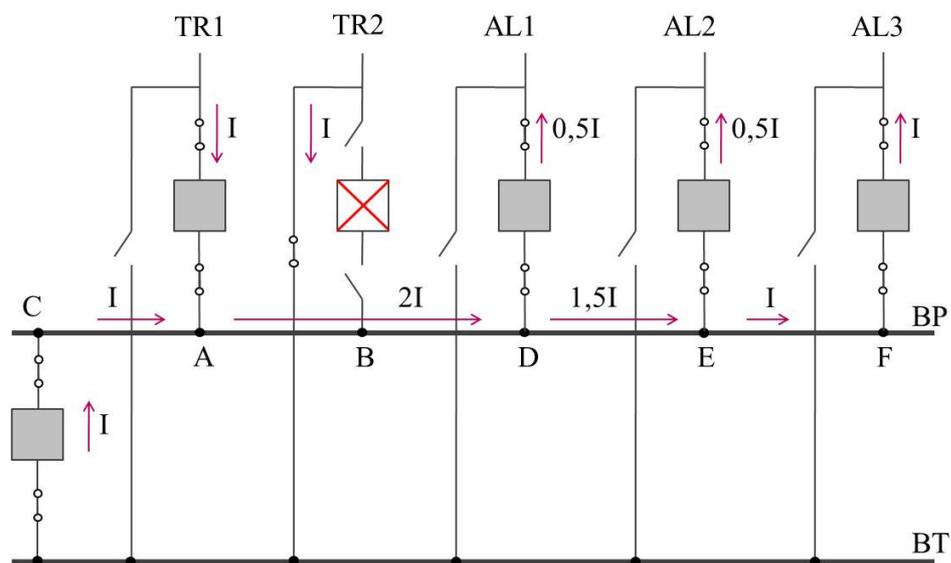
Neste outro exemplo (Figura 32) são apresentadas as correntes que circulam em trechos de barramento também na condição de operação no modo transferido, mas agora o disjuntor de transferência está operando em substituição ao disjuntor do TR2. Nesta situação, o trecho de barramento mais carregado é o C-D com $2I$ de corrente.

Figura 32 - Operação no modo transferido (disjuntor do TR2 em manutenção)



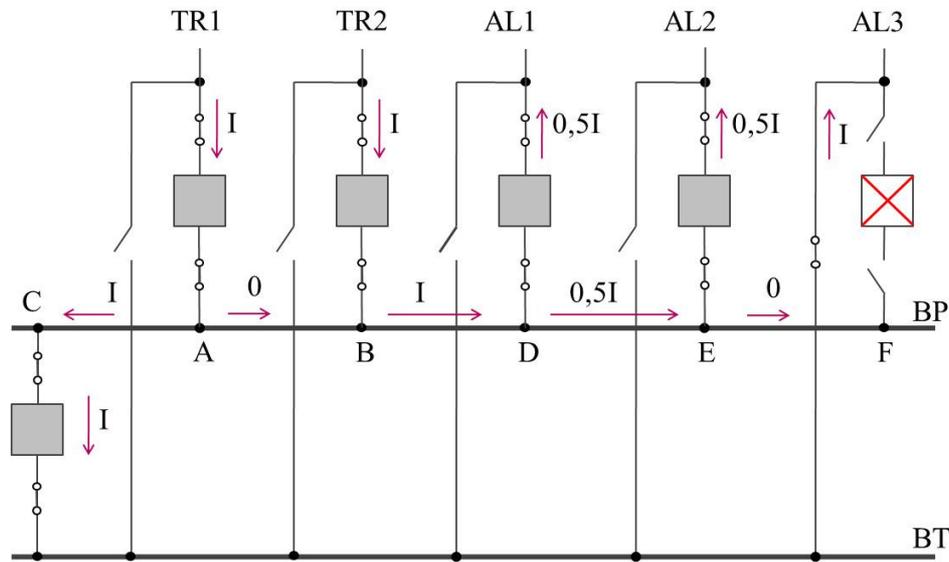
No exemplo da Figura 33 pode-se notar a influência do disjuntor interligador de barras locado no canto esquerdo do barramento, na mesma condição de operação do caso anterior, ou seja, disjuntor de transferência operando em substituição ao disjuntor do TR2. Nesta situação, o trecho de barramento mais carregado é o de A até D com $2I$ de corrente. Comparando com a distribuição de corrente do exemplo anterior (Figura 32), onde o disjuntor interligador de barras está locado no meio do barramento, a corrente no trecho A-B-C é de I .

Figura 33 - Operação no modo transferido (disjuntor do TR2 em manutenção e disjuntor interligador de barras locado no canto esquerdo do barramento)



Com o disjuntor do AL3 em manutenção e o disjuntor interligador de barras locado no canto esquerdo, o trecho de barramento mais carregado é o C-A e B-D, com I de corrente. A barra de transferência também fica com o carregamento do alimentador AL3, isto é, I de corrente, conforme mostra a Figura 34.

Figura 34 - Operação no modo transferido (disjuntor do AL3 em manutenção e disjuntor interligador de barras localizado no canto esquerdo do barramento)



II. Arranjo Barra Dupla a Quatro ou Cinco Chaves (BD4 ou BD5)

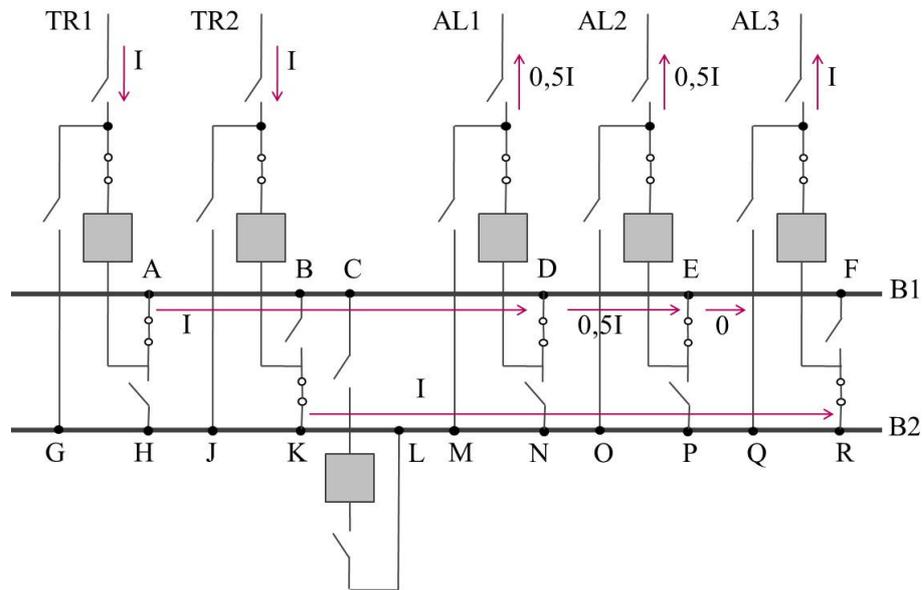
Para o arranjo Barra Dupla a Quatro ou Cinco Chaves considerar:

- Subestação completa;
- Subestação com um dos disjuntores em manutenção (N-1);
- Subestação com um dos barramentos em manutenção (N-1).

As Figura 35 a Figura 39 apresentam possíveis condições de operação da subestação e seus reflexos nos valores de carregamento em trechos de barramento, considerando o arranjo BD4 ou BD5. Aqui também foi explorada a condição normal de operação da subestação, bem como aquela em que um dos disjuntores encontra-se em manutenção. Foi também analisada a influência da posição física do disjuntor interligador de barras nas correntes de carga.

A Figura 35 abaixo mostra as correntes que circulam em trechos de barramento na condição normal de operação da subestação, considerando um arranjo BD5 com cinco conexões (3 para alimentadores e 2 para transformadores). Pode-se verificar que o trecho da barra mais carregado é o de A até D, com I de corrente. Na barra de transferência o trecho de barra mais carregado é o de K até R, também com I de corrente.

Figura 35 - Operação no modo normal



Na Figura 36 são mostradas as correntes que circulam em trechos de barramento na condição de operação no modo transferido, ou seja, o disjuntor de transferência operando em substituição ao disjuntor do alimentador AL3 em manutenção. Nesta situação, verifica-se que o trecho da barra de operação mais carregado é o de B-C com $2 I$ de corrente. Na barra de transferência o trecho da barra mais carregado é o de L até Q, com I de corrente

No exemplo da Figura 37 é mostrada a influência do disjuntor interligador de barras locado no canto esquerdo do barramento, na condição normal de operação. Nesta situação, observa-se que o trecho da barra de operação mais carregado é o B até D com I de corrente e na barra de transferência o trecho de barra mais carregado é o L até R, também com I de corrente.

Figura 36 - Operação no modo transferido (disjuntor do AL3 em manutenção)

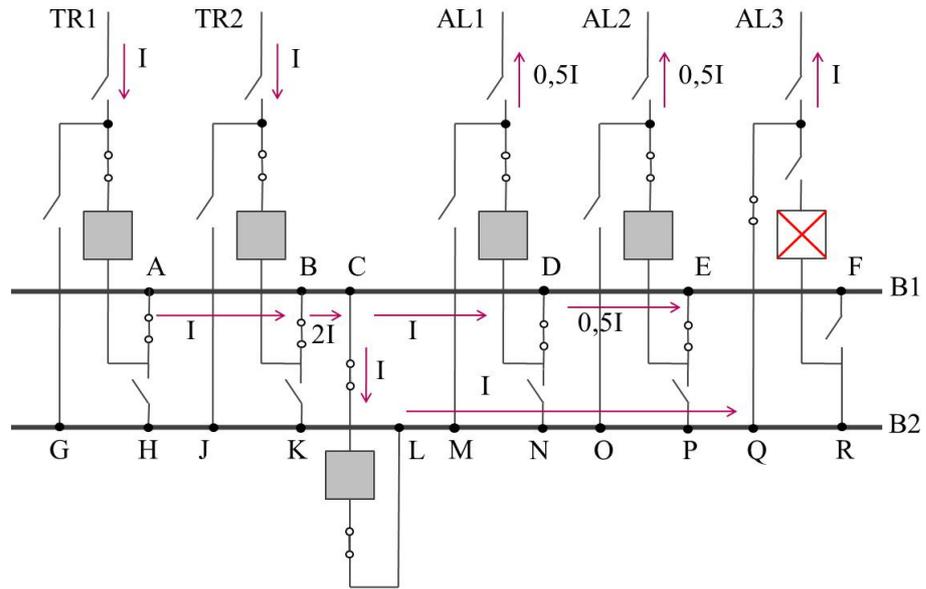
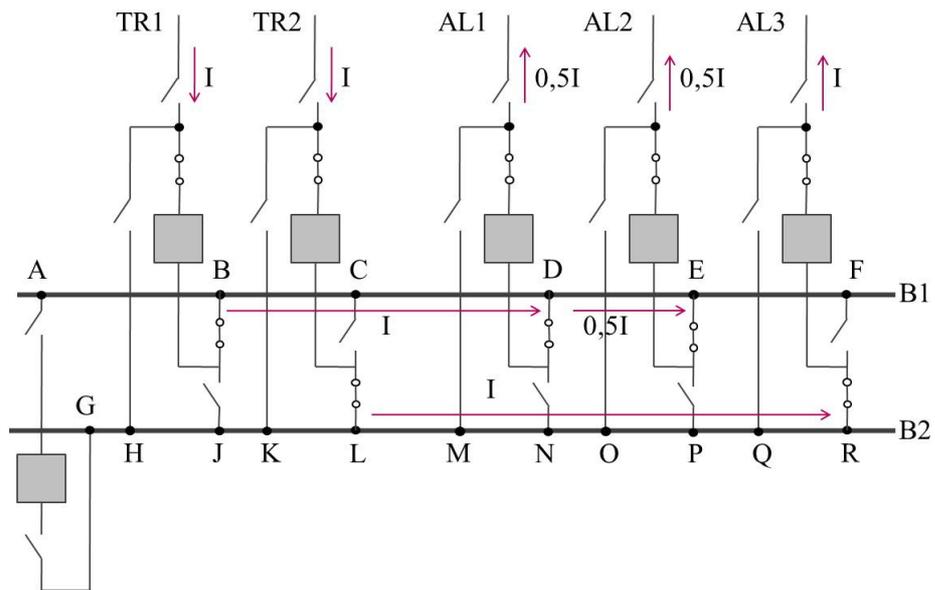
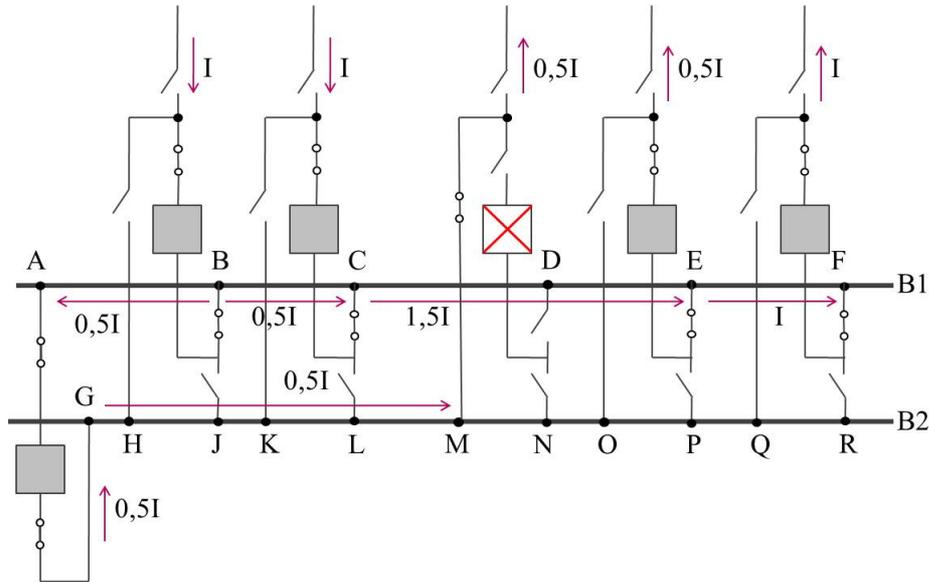


Figura 37 - Operação no modo normal (disjuntor interligador de barras localizado no canto esquerdo do barramento)



Com o disjuntor do AL1 em manutenção e o disjuntor interligador de barras locado no canto esquerdo, o trecho de barramento mais carregado é o de C até E com $1,5I$ de corrente, conforme mostra a Figura 38. Na barra de transferência o trecho de barra mais carregado é o de G até M com $0,5I$ de corrente.

Figura 38 - Operação no modo transferido (disjuntor do AL1 em manutenção e disjuntor interligador de barras locado no canto esquerdo do barramento)



No exemplo da Figura 39, com o disjuntor do TR2 em manutenção e o disjuntor interligador de barras também locado no canto esquerdo, o trecho de barramento mais carregado é o de B até D com $2I$ de corrente. Na barra de transferência o trecho da barra mais carregado é o de G até K com I de corrente.

No exemplo da Figura 40, com a barra B2 em manutenção o trecho de barramento mais carregado é o de B até D com $2I$ de corrente. No caso de manutenção da barra B1, o trecho de barramento mais carregado é o de K até N com $2I$ de corrente.

Figura 39 - Operação no modo transferido (disjuntor do TR2 em manutenção e disjuntor interligador de barras localizado no canto esquerdo do barramento)

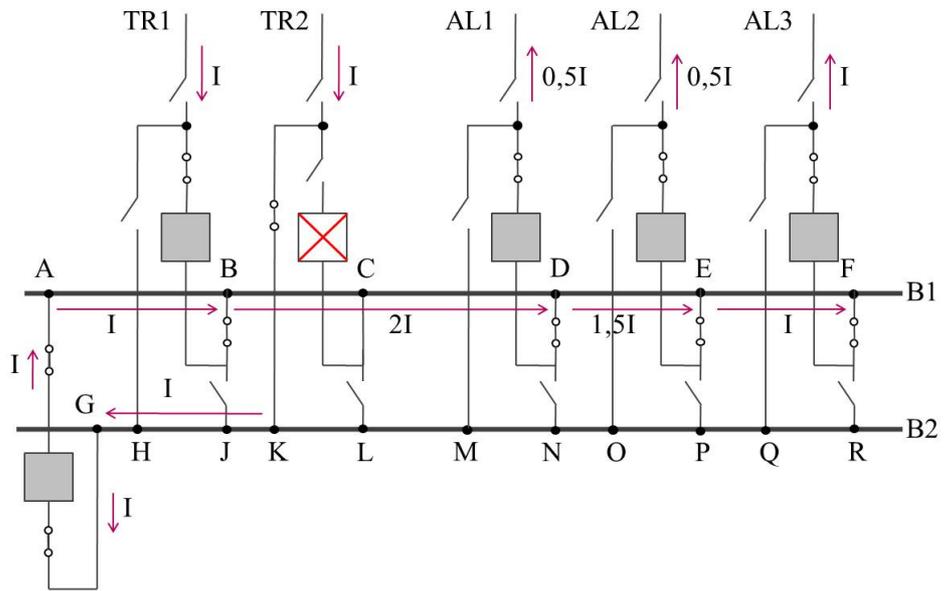
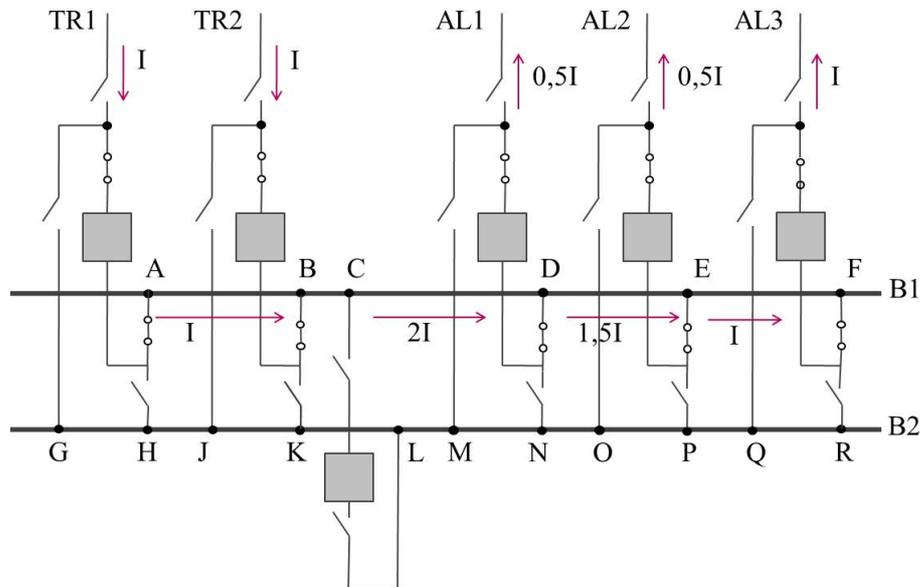


Figura 40 - Operação com uma barra em manutenção



III. Arranjo Barra Dupla Disjuntor e Meio (DJM) e Barra Dupla Disjuntor Duplo (BD2D)

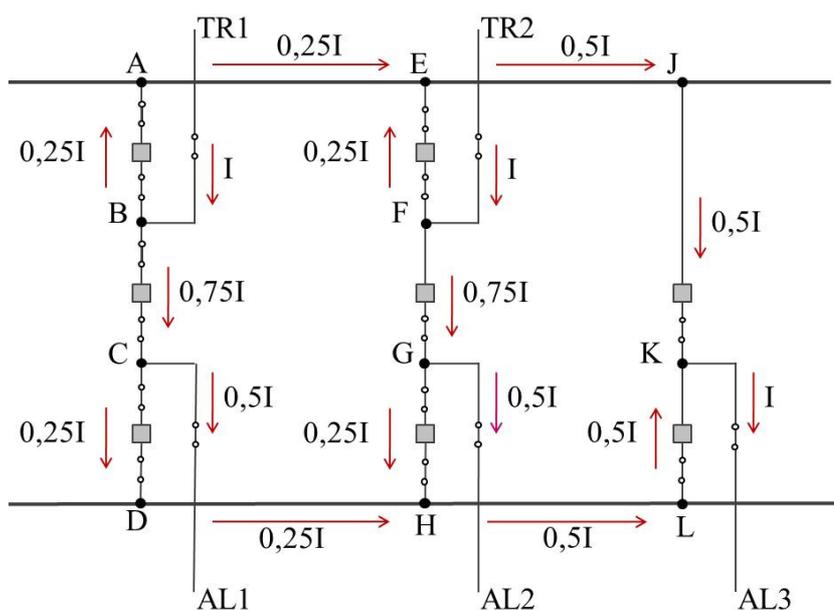
Para estes arranjos considerar:

- Subestação completa;
- Subestação com um dos disjuntores em manutenção;
- Subestação com um dos barramentos em manutenção.

As Figura 41 a Figura 46 apresentam os valores máximos de carregamento considerando uma subestação DJM e BD2D nas três condições acima destacadas.

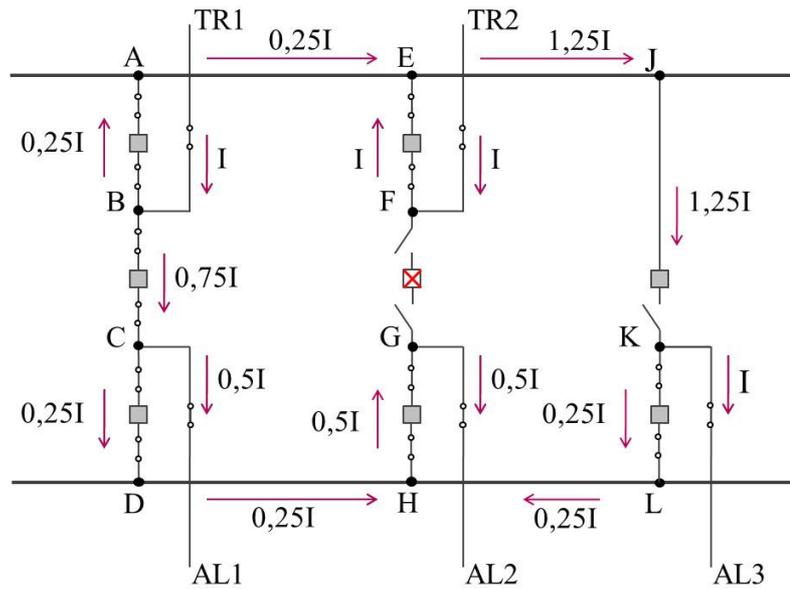
A Figura 41 abaixo mostra as correntes que circulam em trechos de barramento na condição normal de operação da subestação. Pode-se verificar que a máxima corrente nos barramentos é de $0,5 I$.

Figura 41 - Operação no modo normal - arranjo DJM



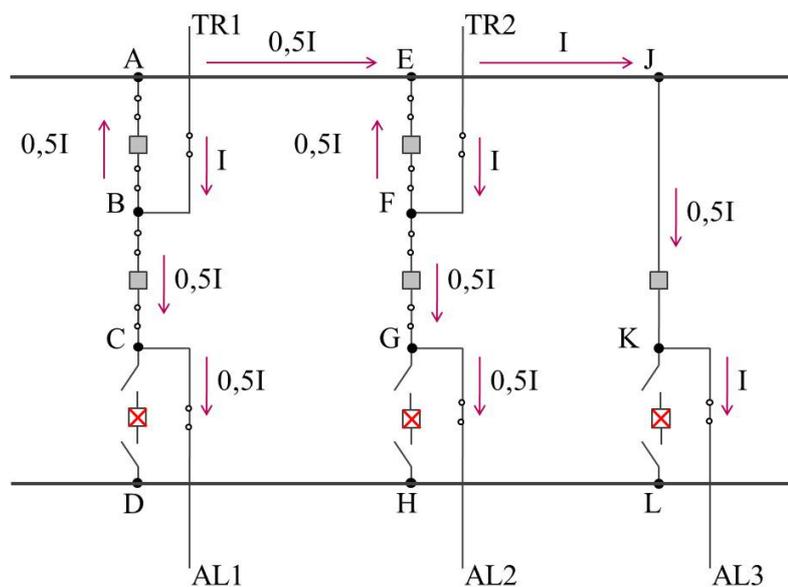
Na Figura 42 são mostradas as correntes que circulam em trechos de barramento na condição de operação com disjuntor central do TR2 em manutenção. Nesta situação, verifica-se que a maior corrente circulando na subestação é no barramento superior, no trecho E-J, com $1,25I$ de corrente. Vale destacar que outras situações de manutenção de disjuntor deverão ser analisadas.

Figura 42 - Operação com disjuntor central do TR2 em manutenção – arranjo DJM



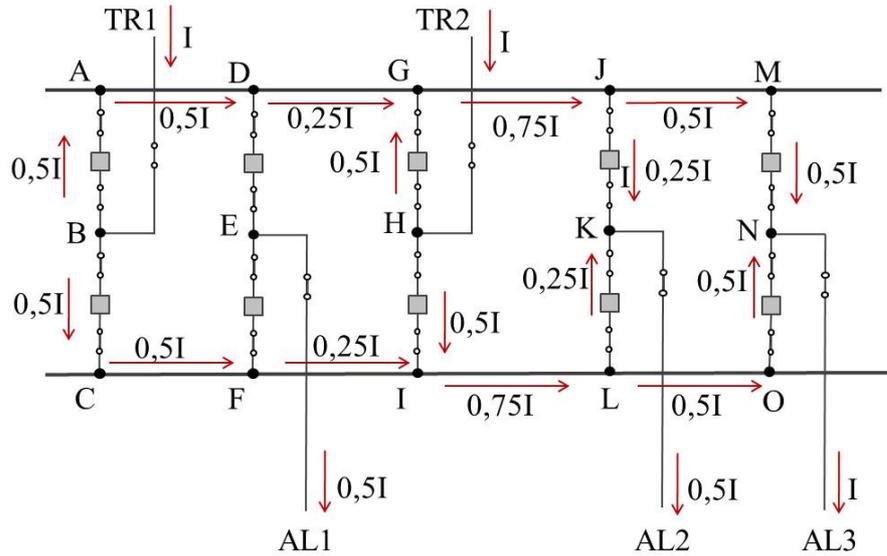
No exemplo da Figura 43 são apresentadas as correntes de carregamento na condição de operação com uma das barras em manutenção. Nesta situação, observa-se que com a barra inferior fora de operação, a maior corrente é aquela passando no barramento superior, no trecho E-J, com I de corrente. Portanto, inferior ao da Figura 42.

Figura 43 - Operação com a barra inferior em manutenção – arranjo DJM



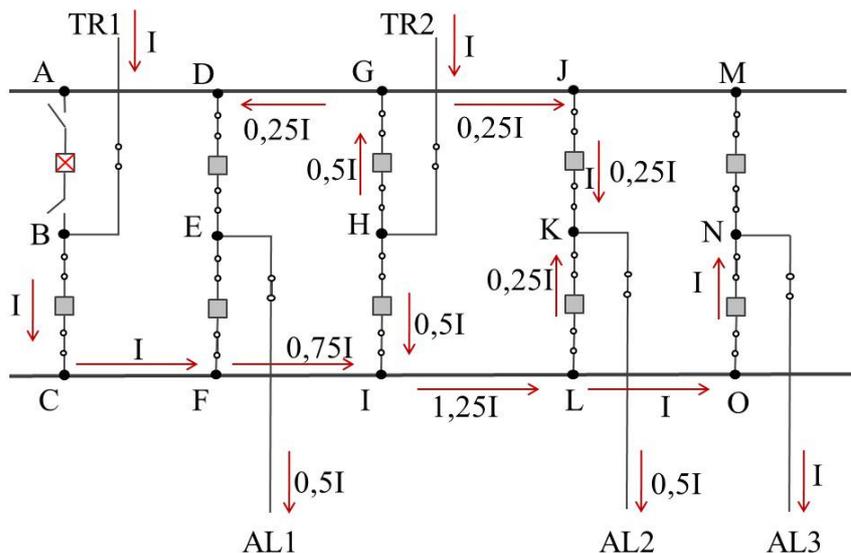
Na Figura 44 é mostrado o arranjo do tipo barra dupla duplo disjuntor em operação normal e nesse caso a maior corrente no barramento é de $0,75 I$ nos trechos G – J e I – L.

Figura 44 - Operação no modo normal - arranjo BD2D



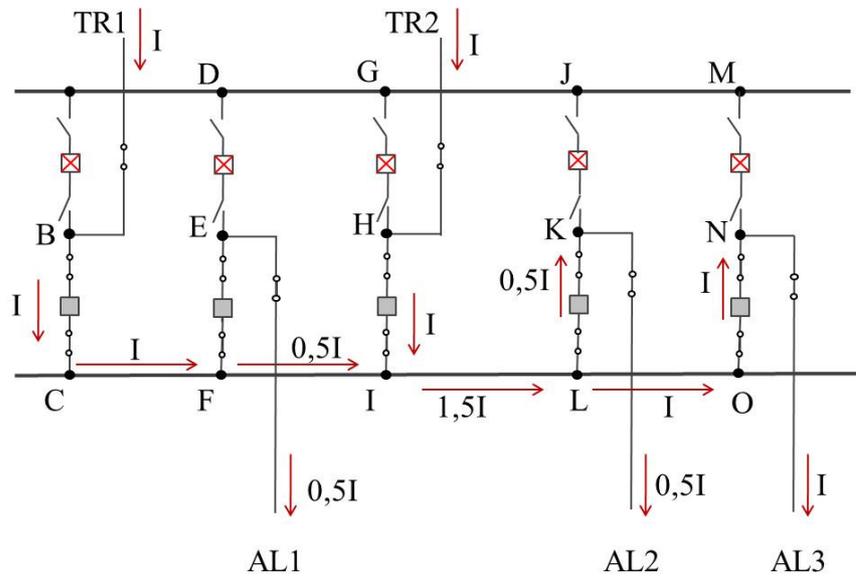
Na Figura 45 é mostrado o arranjo do tipo barra dupla duplo disjuntor em operação com o disjuntor do trecho AB em manutenção. Nesse caso a maior corrente no barramento é de $1,25 I$ no trecho I – L.

Figura 45 - Operação com disjuntor do trecho AB em manutenção - arranjo BD2D



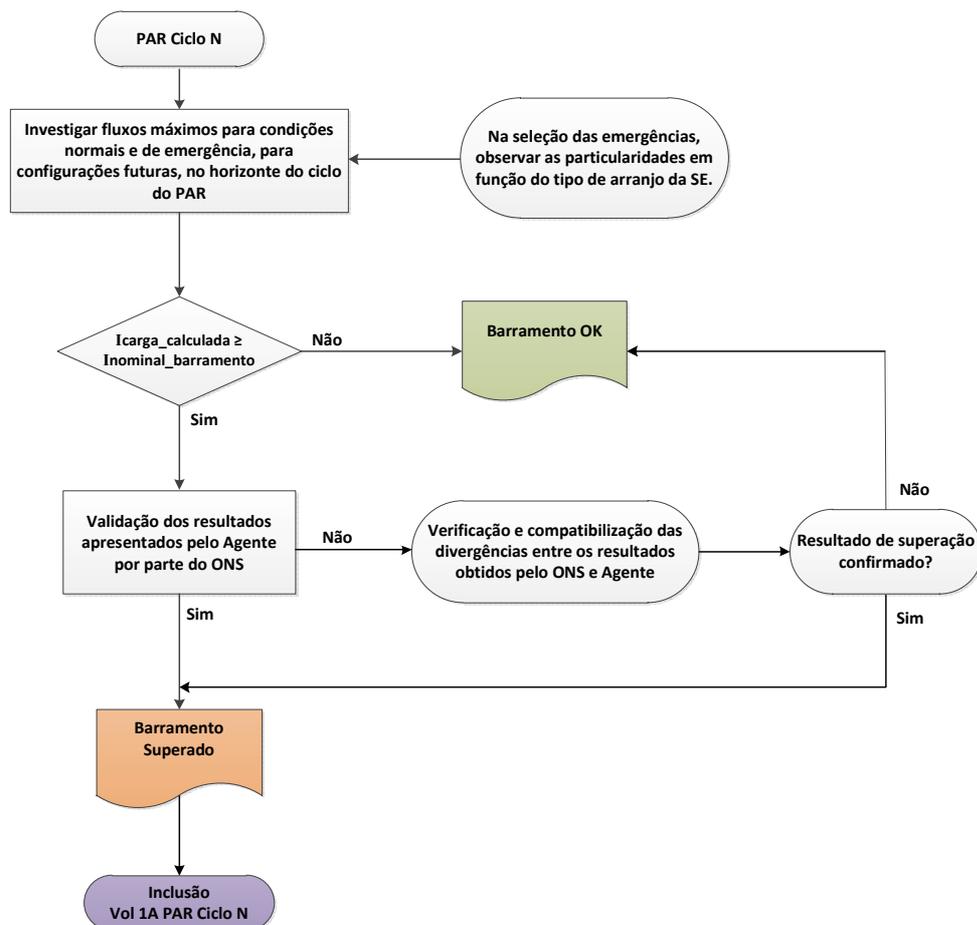
Na Figura 46 é mostrado o arranjo do tipo barra dupla duplo disjuntor em operação com a barra superior em manutenção. Nesse caso a maior corrente no barramento é de $1,5 I$ no trecho IL.

Figura 46 - Operação com a barra superior em manutenção - arranjo BD2D



O fluxograma da Figura 47 ilustra os procedimentos a serem seguidos na avaliação da superação de barramento por corrente de carga. Os exemplos apresentados nas Figura 30 a Figura 46 devem ser aplicados na investigação dos fluxos máximos nos barramentos para condições de operação no modo normal e de emergência (N-1).

Figura 47 - Procedimento para avaliação da superação de barramento por corrente de carga



2.6 Superação por Corrente de Curto-Circuito

Tanto a corrente de curto-circuito simétrica quanto a crista da corrente de curto-circuito são parâmetros que podem ocasionar a superação de barramentos e, portanto, devem ser verificadas. A solicitação causada pela corrente de curto-circuito simétrica no barramento de uma subestação é de origem térmica e está relacionada com a dissipação de energia na resistência do barramento. Já a solicitação causada pelos esforços eletrodinâmicos da corrente de curto-circuito, de origem mecânica, é determinada pela crista da corrente de curto-circuito. Tais esforços são proporcionais ao quadrado do valor instantâneo da corrente e proporcionais à distância entre fases e são, portanto, em geral, os mais críticos para o barramento em termos de superação por corrente de curto.

Para fins de determinação de superação de barramentos, a rede completa (toda geração e todas as linhas conectadas) deve ser considerada na determinação das correntes de curto-circuito.

Os critérios a serem adotados por tipo de solicitação de curto-circuito (simétrica e assimétrica) são a seguir discriminados.

2.6.1 Verificação da Superação por Corrente de Curto-Circuito Simétrica

A corrente de curto-circuito simétrica máxima que pode ocorrer no barramento deve ser determinada por meio dos casos de referência de curto-circuito ou pelo relatório “Estudos de Curto-Circuito”, ambos disponibilizados periodicamente pelo ONS, e comparada com o valor da corrente de curto-circuito simétrica de projeto do barramento. O maior valor entre as correntes de curto-circuito monofásico e trifásico na barra da subestação com topologia completa deve ser utilizado como base para a análise de superação.

A superação por curto-circuito é caracterizada pela ocorrência de correntes de curto-circuito simétrica com magnitudes superiores àquelas definidas como nominais para o barramento em análise, no horizonte do ciclo do PAR, ou seja:

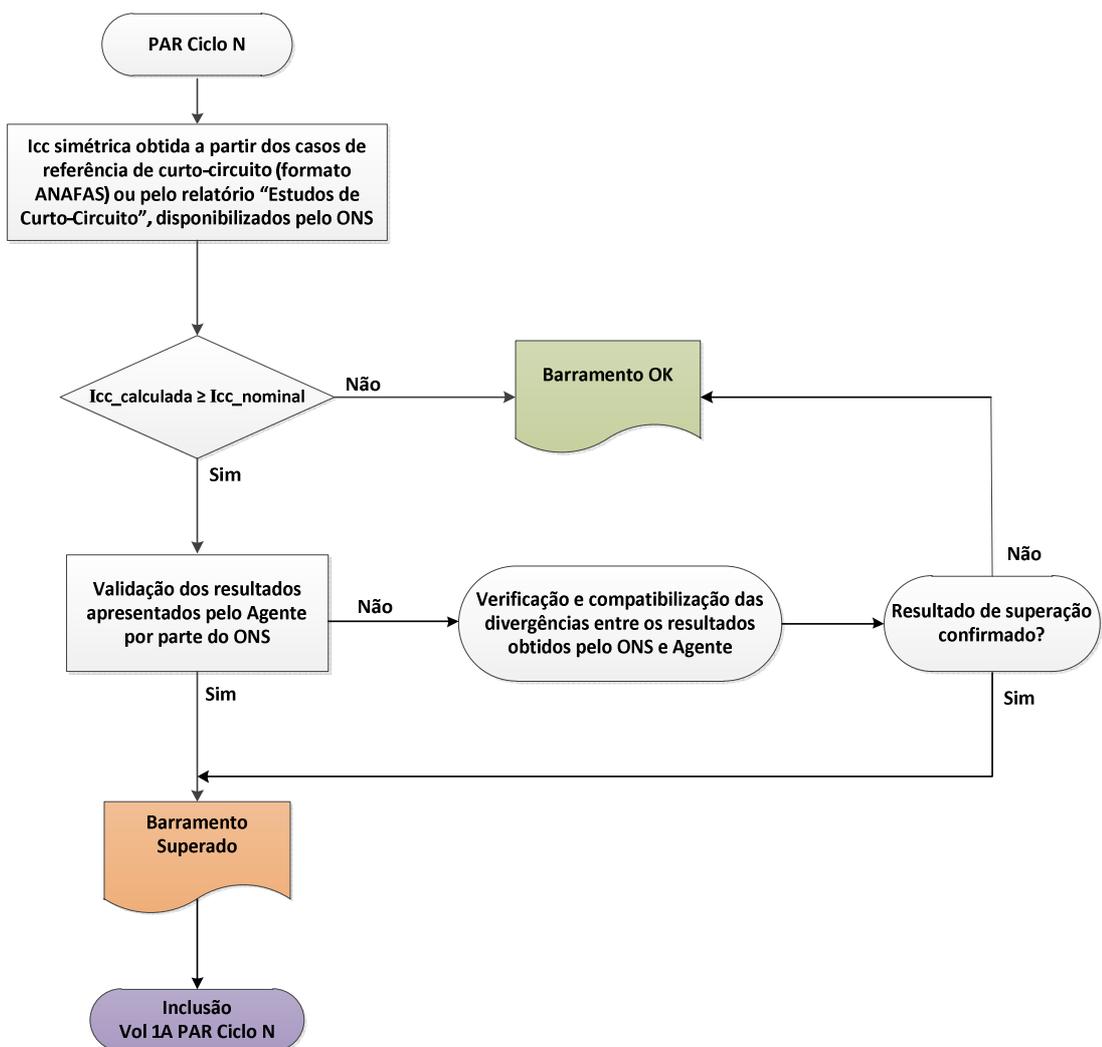
$$I_{cc_calculada} \geq I_{cc_nominal} \quad \Rightarrow \quad \underline{\text{Barramento superado}}$$

Caso ocorram divergências entre as indicações de superação efetuadas pelo Agente e o valor de corrente passante no equipamento obtido pelo relatório de curto-circuito do ONS, o Agente deverá verificar o motivo da diferença e apresentá-las ao ONS. Dessa forma, pretende-se garantir fidelidade da base de dados de curto-circuito, mantendo-se a compatibilidade entre os valores calculados pelos

Agentes e ONS, bem como chegar a um consenso sobre a indicação da superação por curto-circuito simétrica.

O fluxograma da Figura 48 ilustra os procedimentos a serem seguidos na avaliação da superação de barramento por corrente de curto-circuito simétrica.

Figura 48 - Procedimento para avaliação da superação de barramento por corrente de curto-circuito simétrica



2.6.2 Verificação da Superação por Crista da Corrente de Curto-Circuito

Conforme citado anteriormente, o valor de crista da corrente de curto-circuito é uma solicitação crítica para o barramento em termos de superação. Portanto, a superação neste caso é caracterizada pela ocorrência de valores de crista da corrente de curto-circuito com magnitudes superiores àquelas definidas como nominais para o barramento em análise, no horizonte do ciclo do PAR, ou seja:

$$I_{\text{crista_calculada}} \geq I_{\text{crista_nominal}}$$



Barramento superado

A crista da corrente de curto-circuito pode ser calculada em função da corrente de curto-circuito simétrica e da constante de tempo da rede, determinadas por meio dos casos de referência de curto-circuito ou também pelo relatório “Estudos de Curto-Circuito”, através da seguinte fórmula:

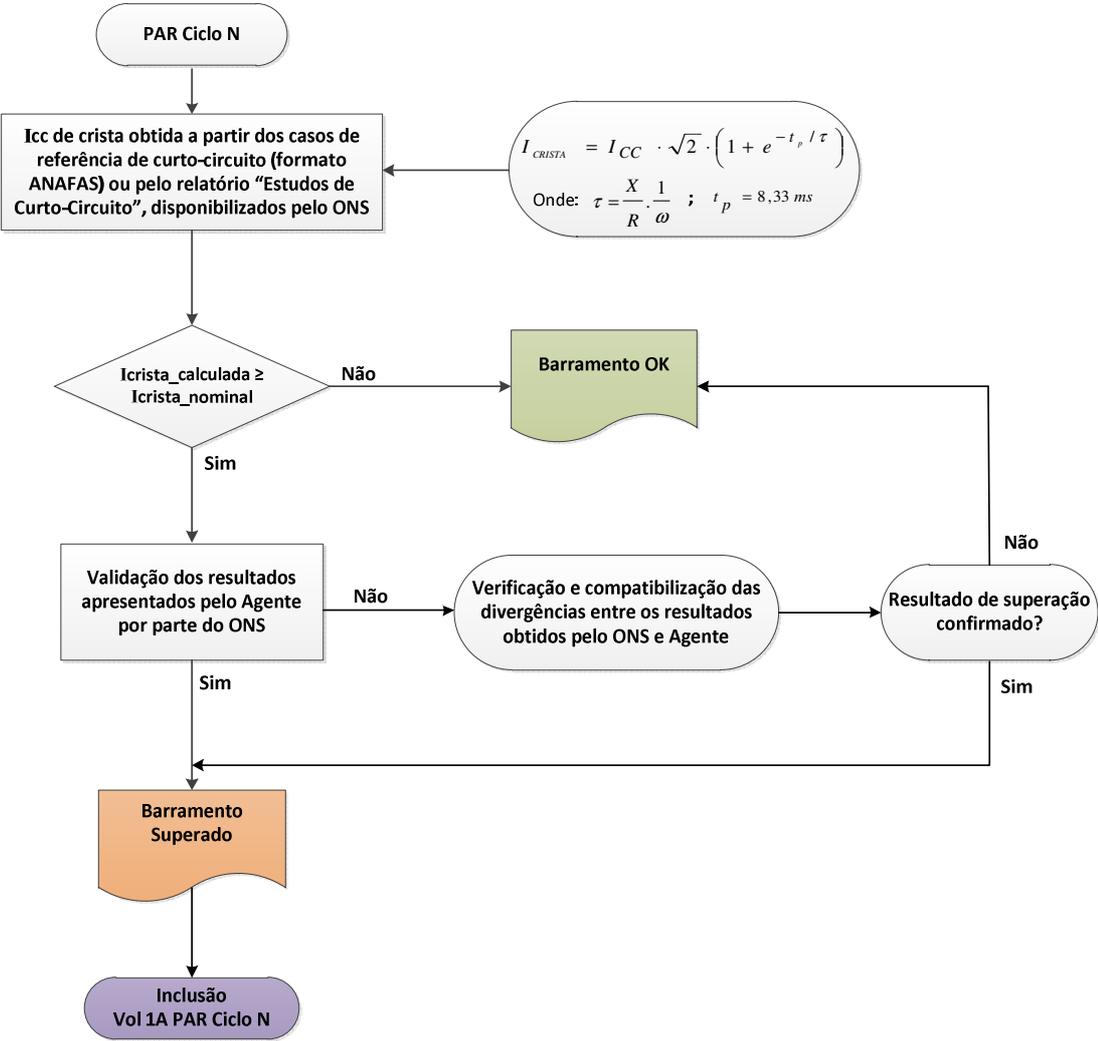
$$I_{\text{CRISTA}} = I_{\text{CC}} \cdot \sqrt{2} \cdot (1 + e^{-t_p/\tau}) \quad \Rightarrow \quad \tau = \frac{X}{R} \cdot \frac{1}{\omega}$$

- I_{crista} : valor de crista da corrente de curto-circuito calculada
 I_{cc} : valor eficaz da corrente de curto-circuito simétrica calculada
 t_p : tempo de crista da corrente de curto-circuito (8,33 ms para 60 Hz ou 10 ms para 50 Hz)
 τ : constante de tempo calculada para a barra onde o equipamento é instalado (L/R)

A determinação de I_{crista} deve ser realizada tanto para curto-circuito monofásico quanto para trifásico, na barra da subestação com topologia completa, sendo que o maior dos dois valores é que deve ser adotado na análise de superação.

O fluxograma da Figura 49 ilustra os procedimentos a serem seguidos na avaliação da superação de barramento por crista da corrente de curto-circuito.

Figura 49 - Procedimento para avaliação da superação de barramento por crista da corrente de curto-circuito



3 REFERÊNCIAS

- [1] GT-AS – Grupo de Análise de Superação de Equipamentos de AT, “Superação de Barramento: Critérios de Análise”, nota técnica ONS NT-128/2007, 31/08/2007.

VI - SUPERAÇÃO DE MALHA DE TERRA: CRITÉRIOS DE ANÁLISE



VI - SUPERAÇÃO DE MALHA DE TERRA: CRITÉRIOS DE ANÁLISE

ONS NT 136/2007

Revisões do relatório

Emissão Inicial 30/08/2007

seção	página(s)	descrição
-------	-----------	-----------

1 APRESENTAÇÃO

A rápida evolução do sistema interligado nacional (SIN), particularmente após a reforma do arcabouço institucional entre 1995 e 1997, vem causando um substancial crescimento das solicitações elétricas sobre os equipamentos das instalações existentes. Este fato tem como consequência a acentuada incidência de superação de equipamentos de alta tensão, que então necessitam ser substituídos.

De forma a equacionar a solução do ponto de vista regulatório para autorização de reforços na Rede Básica e DIT devido à superação de equipamentos e instalações, a ANEEL emitiu a Resolução Normativa nº 158, de 23 de maio de 2005, revogada em 26 de julho de 2011 pela Resolução nº 443, por sua vez alterada pela Resolução Normativa Nº 643 de 16 de dezembro de 2014. De acordo com estas resoluções, cabe ao ONS a indicação final da substituição de equipamentos superados dos módulos de manobra e instalações de infraestrutura de subestações da RB e DIT. Aos Agentes cabe a implementação de tais reforços, uma vez autorizados pela ANEEL.

O equacionamento dado pelo ONS e Agentes para a realização das análises requeridas para as indicações de substituição de equipamentos superados foi a criação em 2004 do Grupo de Trabalho para Análise da Superação de Equipamentos de Alta Tensão (GT-AS). Este grupo, integrado aos processos do Plano de Ampliações e Reforços (PAR) do ONS, é formado pelo ONS, Agentes de Transmissão e alguns Agentes de Distribuição e Geração. Seu objetivo é levar a termo, de forma cooperativa, as análises e indicações de superação de equipamentos das subestações da RB e DIT. Num primeiro momento, o GT-AS se ocupou do estabelecimento de critérios, metodologias e processos para as análises de superação. Em 2006, o GT-AS realizou o primeiro ciclo de análise de superação de equipamentos de alta tensão (2007-2009), sendo que o segundo ciclo, 2008-2010, se encontra em fase final de consolidação.

Uma vez condensados os critérios e processos de análise de superação para disjuntores, seccionadores, transformadores de corrente e bobinas de bloqueio, estão sendo levados a termo esforços para a proposição de critérios de análise de instalações de infraestrutura de subestações, conforme previsto no item V do artigo 3º da Resolução ANEEL 443/2011.

Desta forma, o ONS tomou a iniciativa de através de seu Plano de Ação 10.20 “Metodologias para Avaliação da Superação de Equipamentos de Alta Tensão” abordar a questão da superação de malha de terra por curto circuito. Esse relatório apresenta as conclusões e recomendações a respeito deste tema e propõem critérios para análise e mitigação deste tipo de superação. O relatório de consultoria que detalha este tema se encontra no corpo desse documento, a partir do item 1. No item “CONCLUSÕES e RECOMENDAÇÕES” é apresentado o sumário da proposta de metodologia de malha de terra.

2 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- a) Principais causas de superação de malhas de terra por curto circuito:
- Elevação das tensões de toque e de passo no interior e nos limites da subestação para além das tensões de segurança recomendadas;
 - Elevação das correntes de falta que podem circular nos condutores da malha de terra ou nos cabos de conexão de equipamentos à terra, acima de seus limites de suportabilidade térmica e mecânica.
- b) Critérios de análise da superação de malhas de terra por curto circuito:
- Determinação da nova corrente que entra no solo (I_g) devido a curtos-circuitos na área da subestação envolvendo a terra, levando-se em conta a configuração atual da subestação. Por exemplo, a conexão de novos cabos para-raios à malha, devido a extensões da subestação original, pode levar a uma redução de I_g , mesmo em casos onde a corrente de falta (I_f) seja superior à de projeto da subestação;
 - Verificação dos níveis de tensão de toque e de passo levando-se em conta os novos níveis de curto circuito da rede (I_f), a nova corrente que efetivamente entra no solo (I_g), assim como a mudança de critério¹⁴ das normas de malha de terra para cálculo da resistência entre pé do operador e o solo, ocorrida a partir do ano 2000;
 - Verificação da suportabilidade térmica dos cabos que compõem a malha de terra em relação à nova corrente máxima que entra na terra – I_g .
- c) Medidas mitigadoras da superação de malhas de terra devido à corrente de curto-circuito:
- Aumento da resistência de solo superficial da subestação, por exemplo, através do aumento da espessura da camada de brita, troca da camada de brita por outra de maior resistividade,
 - Redução da resistividade da malha de terra, por exemplo, através de novas hastes, cabos ou contrapesos enterrados, ou interligar a malha de terra com bases de concreto que possuam estrutura metálica soldada (*radiers* de edificações etc.), as quais apresentam baixa resistência de aterramento, ou aumento artificial da umidade do solo nas faixas acima dos cabos enterrados, ou tratamento químico da malha, para reduzir a resistividade do solo no entorno dos metais enterrados,

¹⁴ Critérios menos conservativos de cálculo da resistência entre pé do operador e do solo levaram ao aumento da resistência calculada. Consequentemente, para a mesma malha, isto leva a um valor admissível de corrente que entra no solo superior ao calculado segundo as normas anteriores ao ano de 2000. Este aumento da corrente de curto admissível pode ser utilizado em benefício do cálculo da superação de malhas projetadas segundo as normas antigas.

- Redução dos tempos de duração dos curtos-circuitos (ts), mediante adoção de proteção digital, proteção redundante ou troca de disjuntores por modelos com menor tempo de interrupção.

d) Medidas a nível de planejamento com potencial de evitar a superação de equipamentos e instalações:

A adoção de critérios de planejamento em muito poderia contribuir para evitar a superação em grande medida de equipamentos e instalações de regiões específicas do SIN. A seguir, algumas sugestões neste sentido são apresentadas:

- Adoção de limites máximos de curto-circuito para equipamentos e Instalações em função do nível de tensão.
- Considerar no planejamento da expansão da rede alternativas que atendam os limites máximos de curto-circuito previamente definidos, Estas alternativas poderiam, por exemplo, considerar a não expansão de subestações existentes críticas, a adoção de configurações de rede que não agrave a questão dos níveis de curto, adoção de *links back-to-back*, etc.

e) Medidas a nível de operação do sistema com potencial de evitar a superação de equipamentos e instalações:

- Redução dos níveis de curto-circuito da rede no entorno de equipamento ou instalação em vias de superação, através da adoção de medidas mitigadoras de caráter sistêmico, como instalação de reatores limitadores, secionamento de barramentos, etc.
- Estudar a adoção a nível planejamento da operação de restrições (inequações) que correlacionem o despacho planejado para unidades geradoras com a superação de equipamentos e instalações.
- Proposta de desenvolvimento futuro: desenvolver estimador de estado da rede on-line, de forma a apontar em tempo real os níveis de curto-circuito aos quais os equipamentos e instalações estão expostas, visando à identificação de equipamentos próximos da superação e a eventual adoção de medidas corretivas.

3 Considerações sobre o efeito do aumento dos níveis de curto-circuito da Rede Básica na superação das malhas de terra

3.1 Introdução

Considerando que o aumento dos níveis de curto-circuito da Rede Básica pode levar à superação das malhas de terra de algumas estações (subestações, usinas etc.) existentes da Rede Básica ou na sua fronteira, o ONS está realizando investigações para definir a forma de avaliar as malhas que estariam superadas e as medidas mais efetivas para contornar este tipo de problema.

Em relação ao aumento do nível de curto-circuito, as malhas de terra poderiam ser superadas por dois razões:

- a) redução das condições de segurança nas estações para pessoas e equipamentos durante os curtos-circuitos,
- b) aumento das correntes nos cabos metálicos da malha de terra e conexões de equipamentos, acima de seus limites de suportabilidade térmica e mecânica.

Considera-se, em geral, que animais não devem ser permitidos dentro das estações e, por este motivo, não são definidas condições de segurança para os mesmos.

No caso das condições de segurança, devem ser consideradas principalmente as tensões de passo e de toque que possam ser interceptadas por pessoas. Estas tensões são proporcionais à corrente que entra no solo (I_g), a qual pode aumentar como consequência do aumento da corrente de curto-circuito, $I_f=3I_o$. Desta forma, não são de interesse as correntes de curto-circuito trifásicas. Também devem ser consideradas as tensões transferidas da estação para pontos externos, os quais podem estar até com potencial inverso em relação ao potencial da terra remota. Por este motivo as tensões transferidas podem ser muito perigosas, devendo ser evitadas no projeto. Junto com as tensões de passo e toque devem ser consideradas as tensões *mesh*, as quais são tensões transferidas dentro da estação. Exemplificando, a tensão de *mesh* poderia ser a diferença de potencial entre algum elemento ou equipamento metálico conectado diretamente à malha e um ponto do solo que poderia estar no centro de um quadrículo da malha. Nesta situação a tensão de *mesh* poderia atingir valores perigosos. Estas tensões *mesh* também podem ser tratadas localmente. Por exemplo, mediante aplicação de isolamento nas partes metálicas que ofereçam perigo deste tipo de tensão transferida, ou por intermédio de:

- a) o aumento da espessura da camada de brita,
- b) a extensão da malha no entorno do equipamento, o que pode ter sido considerado no projeto inicial.

Podem ocorrer também outros tipos de tensões interceptáveis por pessoas, tais como as tensões metal-metal, as quais ocorrem entre dois pontos metalicamente interligados no sistema de aterramento, porém com diferença de tensão entre eles devido a alguma significativa impedância entre ambos os pontos, o que é difícil em malhas supostas equipotenciais no entorno de 60 Hz. Estas tensões são proporcionais à corrente de curto-circuito I_f (não a I_g). Se por medição fossem detectados casos deste tipo, eles podem ter solução local, por exemplo, mediante aplicação de isolamento das áreas críticas. Embora, seja recomendável que este tipo de problema seja investigado nas estações com aumento significativo do nível de curto-circuito, não será considerado nesta análise de superação de malhas de terra, pois sua solução não exige a modificação da malha enterrada.

Portanto, para definir se uma malha de terra se encontra superada e se será necessária sua modificação (*upgrading*) deveríamos considerar basicamente o aumento das tensões de passo e toque entre as condições de projeto e as condições atuais (ou previstas) com maior nível de curto-circuito. Considerando que as tensões de passo e toque são proporcionais à corrente que entra no solo, I_g , a relação principal de interesse é dada por:

$$I_{g_{cc}}/I_{g_0}$$

Onde, $I_{g_{cc}}$ é a corrente que entra no solo correspondente ao nível atual de corrente de curto-circuito;

I_{g_0} que é a corrente que entra no solo correspondente ao nível de corrente de curto de projeto da malha.

Se esta relação for maior que a unidade, a malha de terra estaria em princípio superada. Todavia, as novas normas IEEE Std 80-2000 [1] alteraram a forma de cálculo da resistência de contato do pé das pessoas com o solo, considerando que o cálculo antigo era muito conservativo, o que aumenta os limites aceitáveis para as tensões de passo e toque, como descrito mais detalhadamente no item seguinte. Efetivamente, considerando que as malhas antigas (anteriores ao ano 2000) poderiam ter sido dimensionadas com fatores conservativos de segurança, com base nas normas vigentes à época de seu projeto, IEEE Std 80-1986 [2] e anteriores, foi decidido efetuar uma avaliação das margens de segurança que teriam as malhas antigas projetadas de acordo com as normas ultrapassadas do IEEE/ANSI em relação à norma vigente (IEEE std 80-2000).

Estas margens de segurança ficam evidentes ao se constatar que as equações de cálculo dos limites de tensões de passo e toque da IEEE Std 80-2000 são as mesmas das normas antigas [2], sendo porém maior a resistência de contato entre o pé da pessoa e a camada de brita, expresso através do fator C_s (*surface layer*

derating factor), o qual intervém em ambas as equações. O aumento do fator Cs pode chegar a 30% para condições típicas, supondo 10 cm de espessura da camada de brita, dependendo das resistividades da brita e da camada superficial original do solo. Para camadas de brita menores esta porcentagem aumenta consideravelmente.

Após focar as margens decorrentes dos critérios de cálculo da resistência dos pés com o solo, será analisado o problema do cálculo das correntes que entram no solo, considerando que estas correntes não aumentam proporcionalmente com o aumento do nível de curto-circuito I_f .

Por outro lado, para a análise de uma malha de terra específica será necessário determinar a margem de segurança utilizada no projeto das malhas, ou seja, qual nível de curto-circuito foi considerado no projeto de dimensionamento da malha em relação aos níveis existentes na data do projeto, tendo em conta o aumento natural do nível de curto-circuito das redes elétricas. Em alguns casos pode ter sido algum valor calculado para certo ano horizonte, ou considerada uma margem, por exemplo, da ordem de 50%, sendo que em outros casos, por motivos de compatibilidade de projeto, pode ter sido considerada uma corrente I_f igual à máxima corrente dos disjuntores fabricados na época, por exemplo, 50 kA. Outra possibilidade é que, também por motivos de compatibilidade, tenham sido considerados níveis de curto-circuito similares aos estabelecidos nas normas sobre suportabilidade de correntes de curto-circuito de transformadores, por exemplo, da ordem de 63 kA para 245 e 525 kV no caso das normas IEC 60076-5 [4] e anteriores, e 80 kA e 126 kA, respectivamente, no caso das normas IEEE Std C57.12.00 [5]. Note-se que se tiverem sido aplicadas estas últimas alternativas de compatibilidade, dificilmente existiriam malhas superadas na Rede Básica, pois os níveis de curto-circuito ainda não atingem esses valores. Para o ano 2013 são esperados níveis de curto-circuito máximos de 40 kA para 500 kV e 30 kA para 230 kV. A norma IEEE Std 80-2000 [1] menciona no seu item 15.11 que uma estimativa das futuras condições da rede (quanto a nível de curto-circuito) pode ser obtida incluindo todas as adições previsíveis. Também menciona que em alguns casos as malhas de terra foram calculadas utilizando a corrente I_f , ou seja, desconsiderando o fator de divisão dessa corrente entre a terra e as outras vias, o que poderia ser pessimista (quando esse fator for alto). Outra referência (Choudhary) [6] menciona que em alguns países foram utilizados fatores da ordem de 1,2 a 1,5 (sobre a máxima corrente I_{f0} calculada), mas que na prática foi utilizado um valor fixo de 40 kA (como curto-circuito máximo na estação) para níveis de tensão de 440 kV e 230/132 kV.

Em geral, as informações certas sobre os níveis de curto-circuito considerados nos projetos podem estar na documentação de cada projeto, ou nos procedimentos gerais de cada empresa. Os valores certos dos níveis de curto-circuito de projeto deverão ser informados pelo agente proprietário para cada

malha com suspeitas de estar superada, junto com os cálculos justificativos dos fatores de superação das novas tensões de passo e toque em relação aos novos limites aceitos pelas normas.

Para novas malhas a serem projetadas, sejam da Rede Básica ou da fronteira desta rede, os Procedimentos de Rede deveriam estabelecer critérios sobre a corrente de curto-circuito que deve ser considerada nos projetos, seja por compatibilidade com disjuntores, transformadores etc., seja por consideração de um ano horizonte. Note-se que os anos horizontes do planejamento, são excessivamente próximos (10 anos) e que a malha de terra deve durar até o final da vida útil da estação, da ordem de 30 anos, pelo menos.

3.2 Margens adicionais para malhas antigas resultantes da avaliação da resistência de contato pé-solo da nova norma IEEE, em relação às versões antigas.

As equações de cálculo dos limites de tensões de passo e toque da IEEE Std 80-2000 [1] (item 8.3, página 27) são as mesmas das normas antigas [2], sendo porém maior o fator de contato entre o pé da pessoa e a camada de brita, C_s (*surface layer derating factor*), o qual intervém em ambas as equações. Nas normas antigas este fator era determinado considerando um modelo semiesférico do contato do pé com a brita, sendo que nas normas vigentes este modelo foi substituído por um modelo plano circular, o qual é sem dúvida menos pessimista.

O cálculo de C_s está detalhado no item 7.4, página 21, da IEEE Std 80-2000. Após corrigir evidente erro tipográfico em uma das equações, foi feita a programação do cálculo no Matlab (código anexo), considerando que a integração de superfície feita radialmente, até o raio \underline{b} da placa circular, é igual que a integração na coordenada x , até \underline{b} . Note-se que para cada elemento da somatória é feita uma integral de superfície.

Este código Matlab permite plotar exatamente as mesmas curvas da *Figure 11* da norma, correspondentes a C_s versus h_s (espessura da camada de brita), para vários valores de k (fator de reflexão entre a brita e o terreno inferior), além das curvas equivalentes da norma IEEE Std 80-1986 [2] (item 5.4, página 41). Contudo, para nosso objetivo, não interessam estas curvas, mas o fator de aumento do novo C_s em relação ao antigo, por este motivo foi calculada a tabela 1 seguinte, a qual permite visualizar o fator de aumento do C_s para várias espessuras da camada de brita e para vários fatores de reflexão entre a brita e a camada superficial do solo debaixo da brita.

TABELA 1 - Fator de aumento de Cs (fator do contato pé-brita) entre as normas IEEE dos anos 1986 e 2000, para diferentes espessuras da camada de brita (Hs) e fatores de reflexão (k), com $\rho_{\text{brita}}=3000 \text{ ohm.m}$

Hs(m)	Fator de reflexão k									
	-0.100	-0.200	-0.300	-0.400	-0.500	-0.600	-0.700	-0.800	-0.900	-0.950
0.000	0.9598	0.9595	0.9592	0.9587	0.9581	0.9571	0.9555	0.9523	0.9427	0.9600
0.020	1.0127	1.0765	1.1559	1.2590	1.3996	1.6049	1.9373	2.5753	4.3265	25.0918
0.040	1.0110	1.0712	1.1437	1.2330	1.3461	1.4944	1.6979	1.9954	2.4728	3.3434
0.060	1.0008	1.0468	1.0989	1.1588	1.2286	1.3110	1.4100	1.5314	1.6840	1.8787
0.080	0.9926	1.0279	1.0662	1.1081	1.1544	1.2057	1.2631	1.3278	1.4014	1.4849
0.100	0.9867	1.0148	1.0444	1.0758	1.1092	1.1448	1.1831	1.2243	1.2689	1.3169
0.120	0.9825	1.0056	1.0295	1.0543	1.0800	1.1067	1.1347	1.1641	1.1949	1.2270
0.140	0.9794	0.9990	1.0189	1.0392	1.0599	1.0811	1.1029	1.1253	1.1484	1.1720
0.160	0.9770	0.9939	1.0110	1.0281	1.0454	1.0629	1.0806	1.0986	1.1169	1.1353
0.180	0.9751	0.9900	1.0049	1.0197	1.0345	1.0493	1.0641	1.0791	1.0941	1.1091
0.200	0.9736	0.9869	1.0001	1.0131	1.0260	1.0388	1.0516	1.0643	1.0770	1.0896
0.220	0.9723	0.9844	0.9962	1.0078	1.0192	1.0305	1.0416	1.0527	1.0637	1.0746
0.240	0.9713	0.9823	0.9930	1.0034	1.0136	1.0237	1.0336	1.0434	1.0531	1.0626
0.260	0.9704	0.9805	0.9903	0.9998	1.0090	1.0181	1.0271	1.0358	1.0445	1.0529
0.280	0.9697	0.9790	0.9880	0.9967	1.0052	1.0134	1.0215	1.0295	1.0372	1.0448
0.300	0.9690	0.9777	0.9860	0.9940	1.0019	1.0094	1.0168	1.0241	1.0312	1.0380

Nesta tabela podemos notar, por exemplo, que para $\rho_{\text{brita}}=3000 \text{ ohm.m}$ e $\rho_{\text{solo}}=150 \text{ ohm.m}$, ou seja, para $k=(150-3000)/(150+3000)=-0,905$, ter-se-ia um aumento de Cs da ordem de 27%, para 10 cm de espessura da camada de brita.

Contudo, o aumento de Cs não reflete diretamente o aumento dos limites de tensões de passo e toque, sendo necessário avaliar diretamente o aumento destes valores, o que é feito pelo mesmo código Matlab, gerando as Tabelas 2 e 3, respectivamente, calculadas considerando os valores de Cs da Tabela 1 em conjunto com as equações 30 e 32 da norma IEEE 80-2000 [1] para os limites de passo e toque, respectivamente, reproduzidas a seguir:

$$E_{\text{passo}} = (1000+6 \cdot Cs \cdot \rho_{\text{brita}}) \cdot (0,116/\sqrt{ts}) \quad (1)$$

$$E_{\text{toque}} = (1000+1,5 \cdot Cs \cdot \rho_{\text{brita}}) \cdot (0,116/\sqrt{ts}) \quad (2)$$

Sendo ts = duração do curto-circuito, s.

TABELA 2 - Fator de aumento do limite de tensão de passo entre as normas IEEE dos anos 1986 e 2000 para diferentes espessuras da camada de brita (Hs) e fatores de reflexão (k), com $\rho_{\text{brita}}=3000 \text{ ohm.m}$

Hs(m)	Fator de reflexão k									
	-0.100	-0.200	-0.300	-0.400	-0.500	-0.600	-0.700	-0.800	-0.900	-0.950
0.0000	0.9622	0.9625	0.9629	0.9633	0.9639	0.9647	0.9658	0.9678	0.9715	0.9620
0.0200	1.0120	1.0710	1.1425	1.2319	1.3480	1.5063	1.7373	2.1096	2.8181	4.5876
0.0400	1.0103	1.0665	1.1327	1.2123	1.3101	1.4335	1.5944	1.8136	2.1305	2.6188
0.0600	1.0008	1.0438	1.0920	1.1466	1.2089	1.2809	1.3653	1.4656	1.5872	1.7354
0.0800	0.9930	1.0262	1.0619	1.1005	1.1426	1.1886	1.2393	1.2955	1.3583	1.4280
0.1000	0.9875	1.0140	1.0417	1.0708	1.1015	1.1339	1.1684	1.2052	1.2445	1.2862
0.1200	0.9834	1.0053	1.0278	1.0508	1.0746	1.0992	1.1248	1.1513	1.1790	1.2075
0.1400	0.9805	0.9990	1.0178	1.0368	1.0561	1.0757	1.0957	1.1162	1.1372	1.1585
0.1600	0.9782	0.9943	1.0103	1.0264	1.0426	1.0588	1.0752	1.0917	1.1085	1.1253
0.1800	0.9764	0.9906	1.0046	1.0185	1.0324	1.0462	1.0600	1.0738	1.0877	1.1014
0.2000	0.9750	0.9876	1.0001	1.0123	1.0244	1.0364	1.0483	1.0601	1.0719	1.0835
0.2200	0.9738	0.9852	0.9964	1.0073	1.0181	1.0286	1.0391	1.0494	1.0596	1.0697
0.2400	0.9728	0.9832	0.9933	1.0032	1.0129	1.0223	1.0316	1.0407	1.0498	1.0586
0.2600	0.9720	0.9815	0.9908	0.9998	1.0085	1.0171	1.0254	1.0336	1.0417	1.0495
0.2800	0.9712	0.9801	0.9886	0.9969	1.0049	1.0127	1.0203	1.0277	1.0350	1.0420
0.3000	0.9706	0.9789	0.9868	0.9944	1.0017	1.0089	1.0159	1.0227	1.0293	1.0357

TABELA 3 - Fator de aumento do limite de tensão de toque entre as normas IEEE dos anos 1986 e 2000 para diferentes espessuras da camada de brita (Hs) e fatores de reflexão (k), com pbrita=3000 ohm.m

Hs(m)	Fator de reflexão k									
	-0.100	-0.200	-0.300	-0.400	-0.500	-0.600	-0.700	-0.800	-0.900	-0.950
0.000	0.9681	0.9693	0.9708	0.9724	0.9744	0.9769	0.9799	0.9837	0.9887	0.9670
0.020	1.0101	1.0584	1.1133	1.1766	1.2509	1.3400	1.4495	1.5880	1.7703	2.0097
0.040	1.0088	1.0554	1.1079	1.1676	1.2363	1.3165	1.4113	1.5256	1.6661	1.8398
0.060	1.0007	1.0369	1.0762	1.1189	1.1659	1.2176	1.2752	1.3396	1.4122	1.4938
0.080	0.9940	1.0222	1.0518	1.0830	1.1160	1.1510	1.1883	1.2282	1.2710	1.3166
0.100	0.9892	1.0119	1.0351	1.0591	1.0837	1.1093	1.1358	1.1633	1.1921	1.2217
0.120	0.9857	1.0046	1.0235	1.0427	1.0622	1.0820	1.1021	1.1227	1.1438	1.1651
0.140	0.9832	0.9992	1.0151	1.0311	1.0470	1.0630	1.0792	1.0954	1.1118	1.1282
0.160	0.9812	0.9951	1.0088	1.0224	1.0359	1.0493	1.0626	1.0760	1.0893	1.1025
0.180	0.9796	0.9919	1.0039	1.0157	1.0274	1.0389	1.0502	1.0615	1.0727	1.0837
0.200	0.9784	0.9894	1.0001	1.0105	1.0207	1.0308	1.0406	1.0504	1.0600	1.0694
0.220	0.9773	0.9873	0.9969	1.0062	1.0154	1.0243	1.0330	1.0415	1.0499	1.0581
0.240	0.9765	0.9855	0.9943	1.0027	1.0110	1.0189	1.0267	1.0344	1.0418	1.0491
0.260	0.9758	0.9841	0.9921	0.9998	1.0073	1.0145	1.0216	1.0284	1.0351	1.0416
0.280	0.9751	0.9828	0.9902	0.9973	1.0042	1.0108	1.0172	1.0235	1.0295	1.0354
0.300	0.9746	0.9818	0.9886	0.9952	1.0015	1.0076	1.0135	1.0192	1.0248	1.0302

Para o mesmo exemplo anterior, podemos ver que o aumento do limite da tensão de passo seria 25%, e que o aumento do limite da tensão de toque seria 20%; valores significativos na determinação de uma eventual superação da malha de terra do exemplo.

Para casos reais, notar que a tabela 1 é geral, mas que as tabelas 2 e 3 são específicas para cada resistividade da brita e camada superficial do solo, devendo, portanto, serem calculadas para cada caso específico, por exemplo, com o código Matlab anexo, entrando os dados correspondentes, ou seja, as resistividades da brita e do solo debaixo dela. Alternativamente, podem ser geradas curvas paramétricas gerais com a resistividade da brita como parâmetro adicional, mediante modificação deste código Matlab.

Este tipo de avaliação considera que sejam conhecidos os critérios do projeto da malha, em termos da norma aplicada.

Para a aplicação destes fatores de aumento dos limites das tensões de passo e toque deve ser calculado também o fator de aumento da corrente I_g que penetra na terra entre as condições de projeto e a situação atual com maior nível de curto-circuito, o que será discutido no item seguinte. Por enquanto, podemos dizer que o aumento de I_g não é necessariamente proporcional ao aumento da corrente de curto-circuito, $I_f=3I_o$, especialmente quando novas LTs entram na estação com diferentes contribuições ao curto-circuito e diferentes sistemas de blindagem para descargas atmosféricas e de aterramento das torres, além de novos transformadores com neutros aterrados etc., modificando as vias de retorno metálico das correntes de curto-circuito.

Se o fator de aumento de I_g for inferior ao fator de aumento dos limites das tensões de passo e/ou de toque, a malha não estaria superada do ponto de vista da segurança de pessoas, embora os aumentos das tensões de passo e toque sejam proporcionais a I_g , para uma malha determinada. Contudo, devem ser investigados outros problemas de tensões não proporcionais a I_g , tais como tensões metal-metal, tensões *mesh*, tensões transferidas, eventuais sobrecorrentes nos cabos da malha e conexões, etc., problemas que podem ser resolvidos com soluções de baixo custo nos pontos de ocorrência.

Observa-se que a norma IEC 60479-2 [16] pode ser um pouco mais ou menos conservativa que a IEEE 80-1986 [2], quanto a limites de tensões de passo e toque. Por este motivo, se a malha de terra suspeita de superação tiver sido projetada segundo essas normas IEC, deverão ser aplicados fatores de correção em relação ao método de avaliação da margem das tabelas 2 e 3 acima, de acordo com [17].

3.3 Cálculo da corrente que entra na terra

3.3.1 Geral

Para avaliar o efeito do aumento da corrente de falta, I_f , que entra na malha de terra de uma estação elétrica, quanto à possibilidade de superação de sua malha de terra, é importante a avaliação do aumento da corrente que entra na terra, I_g , em relação ao valor de projeto, pois os principais indicadores de segurança, ou seja, as tensões de passo e de toque são proporcionais a I_g , sendo que I_g não é proporcional a I_f , pois depende da distribuição da corrente entre a terra da SE e os cabos de terra das LTs conectados na malha [1] [14], a qual pode mudar ao longo do tempo dependendo de alterações na estação, tais como: instalação de transformadores adicionais, entrada de novos circuitos com características relevantes, especialmente quanto a tipo de cabos para-raios, aterramento das torres, contrapesos contínuos etc.

Como mencionado no item anterior, a elevação do potencial da malha (GPR, *grid potential rise*) em relação à terra remota é proporcional a I_g , sendo as tensões de passo e de toque proporcionais ao GPR. Outras tensões de segurança, tais como as tensões metal-metal e tensões *mesh*, não são proporcionais ao GPR, sendo que, se fossem superadas, sua solução pode ser local em cada ponto de ocorrência.

Por estes motivos, para saber se houve superação de uma malha de terra, no caso que seja verificado aumento significativo de $I_f=3I_o$ na estação, deve ser avaliado o aumento real de I_g , entre as condições de projeto e as condições atuais.

Note-se que, antigamente, em muitos casos, foi utilizada diretamente a corrente de curto-circuito I_f como se fosse a corrente I_g , o que é muito conservativo, pois nestes casos a malha de terra fica superdimensionada. Por este motivo, na avaliação de superação de malhas de terra esta informação de malhas antigas pode representar uma margem considerável que pode evitar que a malha esteja superada. Por outro lado, como demonstrado no item 2 acima, as novas normas IEEE Std 80-2000 permitem adicionalmente uma margem significativa de tensões de passo e toque devido ao novo método de cálculo, mais realista do fator C_s de contato do pé das pessoas com o solo. Esta margem é aplicável somente para malhas projetadas antes da publicação da norma referida.

Considerando que as corrente de curto-circuito I_f máxima que entra na malha de terra da SE, para as condições de projeto e atuais, podem ser calculadas com programas tradicionais (Anafas etc), para se avaliar o aumento da corrente I_g que entra no solo, ou do fator $S_f = I_g/I_f$ (*fault current division factor*), pode ser feito um cálculo simplificado e aproximado deste fator, entre ambas essas condições. Este cálculo pode ser feito aplicando gráficos gerais apresentados no Anexo C das normas IEEE Std 80-2000 [1], desde que exista razoável informação da rede do ano horizonte do projeto original, incluindo a rede ligada à SE nessa época. Adicionalmente, a aproximação do cálculo vai depender da viabilidade de assimilar os gráficos da norma às condições de projeto e atuais da SE.

Note-se que I_f é definida pela norma IEEE Std 80-2000 como $I_f = 3I_o$, sendo I_o a corrente máxima de falta de sequência zero. Mais exatamente, esta norma considera a relação $I_f(0+) = 3I_o''$, onde $I_f(0+)$ é o valor inicial RMS simétrico da corrente de falta à terra, e I_o'' é a máxima corrente RMS inicial simétrica imediatamente após o início da falta, refletindo a aplicação de reatâncias subtransitórias para as máquinas próximas. A norma IEEE [1] considera também um fator de decremento da corrente, D_f , dependente da relação X/R, o qual não tem muita importância para durações acima de 0,5 s ($D_f=1$, recomendação da norma), pois embora, seja um pouco diferente da unidade, fica quase compensado pela queda da componente subtransitória da corrente CA.

Observa-se que podem existir situações nas quais as correntes máximas que entram no solo de uma SE ocorrem para faltas distantes poucos quilômetros da

SE ao longo de alguma das LTs com blindagem ligada na SE. Este caso, pode ocorrer quando existem transformadores aterrados na SE, sendo maior a corrente injetada na malha localmente em relação às contribuições externas.

3.3.2 Exemplos de cálculo simplificado de I_g

A seguir apresentamos dois exemplos de cálculo simplificado / aproximado de aumento da corrente que entra no solo a partir de malhas de terra de subestações nas quais ocorre aumento das correntes de curto-circuito com variação das características da SE e da rede, supondo a conveniência de verificar eventual suspeita de superação das malhas.

Estes exemplos estão baseados nos dois exemplos apresentados no Anexo C da norma IEEE Std 80-2000 [1] para explicar a aplicação de método gráfico aproximado de avaliação da divisão da corrente de curto-circuito de uma SE entre a terra em contato com a malha local e os cabos de blindagem das LTs e alimentadores conectados na SE. Na presente aplicação, será considerada como condição básica de projeto exatamente a condição definida para cada exemplo apresentado na norma, sendo considerada como condição atual, com maior nível de curto-circuito, uma variação da condição básica de cada exemplo, incluindo modificações na rede, porém não nas malhas de terra.

3.3.2.1 Exemplo A

Neste caso será considerada a rede da *Figure C.23* da norma (pág. 163), correspondente a uma SE de distribuição com duas LTs de alimentação e três alimentadores de distribuição ligados na barra de baixa tensão, alimentada mediante um transformador com conexão delta/estrela-aterrada. Neste exemplo a resistência da malha de terra está definida como sendo 1 ohm (descrição das páginas 146-147), valor que será mantido na condição atual.

Na condição básica a corrente de curto-circuito, I_f , calculada com programa digital (EPRI TR-100622), é de 9148,7 A. O sistema básico tem duas LTs com resistências de aterramento $R_{tg}=15$ ohm e três alimentadores de distribuição com resistências de aterramento $R_{dg}=25$ ohm. Com estas informações aplicam-se as curvas da *Figure C.3* (pág 153), encontrando-se uma curva para duas LTs e dois alimentadores e outra para duas LTs e quatro alimentadores, sendo necessário efetuar uma interpolação. Para a resistência da malha de 1 ohm (abscissas) encontram-se os seguintes valores para o fator de divisão da corrente de falta: $Sf_2=0,32$ e $Sf_4=0,23$, resultando um valor médio $Sf=(Sf_2+Sf_4)/2= 0,275$. Portanto a corrente que entra na terra deveria ser $I_g=9148,7*0,275=2516$ A. Este valor é conservativo, pois, segundo a norma, o cálculo completo com o programa do EPRI entrega um valor de 2354,6 A, ou seja, o valor aproximado obtido é da ordem de 7% maior que o valor calculado mais exatamente.

Note-se que neste método são considerados valores típicos para os comprimentos das LTs e alimentadores, bem como para os vãos, pois estaria sendo considerado que após certa distância ou certo número de aterramentos das torres ou postes, ocorreria saturação do efeito dos eletrodos de aterramento, o que parece razoável aplicando o método *ladder* a LTs e alimentadores radiais. Também para estes gráficos são considerados valores típicos de condutores e cabos de blindagem, o que não deve ser muito exato especialmente no caso dos cabos de blindagem, considerando as variações significativas existentes entre os diversos tipos de cabos, incluindo os cabos OPGW, os quais apresentam menores impedâncias. Contudo, como o objetivo é determinar um fator de aumento de I_g para avaliação de superação, estas diferenças poderiam ser consideradas aceitáveis, exceto nos casos próximos da superação onde deveriam ser efetuadas avaliações mais exatas.

No hipotético caso atual onde teríamos dúvidas sobre eventual superação da malha de terra, podemos supor que foi aumentado o número de máquinas equivalentes EQ1 e EQ2, de maneira que o mesmo programa de cálculo de curto-circuito indique um aumento de 20% na corrente de falta em relação ao valor de projeto, resultando $I_f=10978$ A. Adicionalmente, neste exemplo, podemos supor que foi instalado um alimentador adicional. Entrando no mesmo gráfico da *Figure C.3* encontramos um fator de divisão da corrente de falta $S_f=0,23$, o que significa que na terra entraria uma corrente $I_g=0,23*10978=2525$ A, que corresponde a um valor 0,36% maior que o valor de projeto.

Para avaliar se neste caso a malha de terra teria sido superada, devemos investigar se no projeto original foi considerada alguma margem, ou seja, se as tensões de passo e de toque calculadas com a corrente de falta $I_f=9148,7$ A, tinham margem em relação aos limites da norma dessa época. Se essa margem fosse maior que 0,36%, a malha de terra não estaria superada. Por outro lado, mesmo que essa margem não fosse maior que 0,36%, considerando que nas normas antigas o cálculo de C_s era feito em forma incorreta, levando a limites de tensões de passo e de toque excessivamente conservativos, muito provavelmente a malha não estaria superada, o que pode ser verificado com as tabelas do item 2 acima, dependendo principalmente da resistividade de camada superior do solo e da resistividade e espessura da camada de brita. Por exemplo, se a resistividade da brita fosse 3000 ohm.m, com 10 cm de espessura, e a resistividade da camada superior do solo fosse 150 ohm.m, existiria uma margem de 20% no limite da tensão de toque e 25% no limite da tensão de passo, o que permite concluir que a malha não está superada.

A norma IEEE Std 80-2000 apresenta ainda um método adicional, baseado na *Table C.1* do *Annex C*, o qual não será considerado, pois seus resultados são menos aproximados, segundo exemplo apresentado nesse documento.

3.3.2.2 Exemplo B

Neste exemplo usaremos como condição básica o segundo exemplo apresentado no *Annex C* da norma, correspondente à *figure C.24*, com descrição na página 147. Este sistema está formado por uma SE de transmissão, onde chegam duas LTs, existindo um transformador estrela-aterrada/delta conectado no lado delta a um equivalente de geração. Este exemplo é similar ao anterior, exceto que a rede de distribuição é substituída por uma geração local. Por este motivo, neste caso existem contribuições remotas e contribuições locais ao curto-circuito, sendo esta a principal diferença em relação ao exemplo anterior, onde toda a contribuição chega de fora.

Neste caso, o mesmo programa de curto-circuito, entregou uma corrente total $I_f=19269,6$ A na barra de 115 kV, com 48,7% de contribuição local e 51,3% de contribuição externa. A curva mais adequada neste caso está na *Figure C.19* desse anexo, correspondendo a uma divisão 50% / 50% da corrente total entre a terra local e os cabos de blindagem ligados na malha da SE.

Para a resistência da malha de terra de $R_g=0,9$ ohm especificada na *Figure C.24*, a curva da *Figure C-19* para 2 LTs, sem alimentadores, indica um fator de divisão da corrente de falta $S_f=0,29$, ou seja, 29% da corrente total entraria na terra localmente, sendo $I_g=19269,6*0,29= 5588$ A.

Este valor seria bastante conservativo, pois, segundo a norma, o cálculo completo com o programa do EPRI entrega um valor de 4034,8 A, ou seja, o valor aproximado obtido é da ordem de 21% maior que o valor calculado mais exatamente. Contudo, como o objetivo é determinar um fator de aumento de I_g para avaliação da superação da malha, estas diferenças poderiam ser consideradas aceitáveis, supondo que afetariam similarmente ambos os cálculos em comparação, exceto em casos próximos da superação, onde deveriam ser efetuadas avaliações mais exatas.

Na hipotética condição atual, com maior nível de curto-circuito, onde teríamos dúvidas sobre eventual superação da malha de terra, podemos supor que foram duplicados os circuitos de transmissão e que foram aumentados os equivalentes EQ1 e EQ2, de maneira que o mesmo programa de cálculo de curto-circuito indique um aumento de 50% na corrente de falta em relação ao valor de projeto, resultando $I_f=1,5*19269,6=28905$ A. Entrando no mesmo gráfico da *Figure C.19*, agora para 4 circuitos de transmissão, encontramos um fator de divisão da corrente de falta $S_f=0,2$, o que significa que na terra entraria uma corrente $I_g=0,2*28905=5781$ A, que corresponde a um valor 3,5% maior que o valor de projeto, 5588 A.

Para avaliar se neste caso a malha de terra teria sido superada, devemos investigar se no projeto original foi considerada alguma margem, ou seja, se as tensões de passo e de toque calculadas com a corrente de falta $I_f=19269,6$ A

tenham margem em relação aos limites da norma dessa época. Se essa margem fosse maior que 3,5%, a malha de terra não estaria superada. Por outro lado, mesmo que essa margem não fosse maior que 3,5%, considerando que nas normas antigas o cálculo de C_s era feito em forma incorreta, levando a limites de tensões de passo e de toque excessivamente conservativos, muito provavelmente a malha não estaria superada, o que pode ser verificado com as tabelas do item 2 acima, dependendo principalmente da resistividade de camada superior do solo e da resistividade e espessura da camada de brita. Por exemplo, se a resistividade da brita fosse 3000 ohm.m, com 10 cm de espessura, e a resistividade da camada superior do solo fosse 150 ohm.m, existiria uma margem de 20% no limite da tensão de toque e 25% no limite da tensão de passo, o que permite concluir que a malha não está superada.

Note-se que nos exemplos A e B acima estamos supondo que a resistência de aterramento da malha de terra, R_g , seria conhecida: 1 ohm e 0,9 ohm, respectivamente. No entanto, podem ocorrer casos onde esta resistência seja desconhecida, especialmente no caso de malhas de terra muito antigas das quais não exista documentação. Neste caso, podem ser considerados valores gerais de projeto estabelecidos nos procedimentos da época pelo agente proprietário da estação. Valores da ordem de 1 ohm vêm sendo tradicionais, o que pode levar a utilizar valores deste tipo nas avaliações. Note-se, porém, que o valor de R_g objetivo de um projeto deve ser coerente com a corrente que entraria no solo (I_g) no ano horizonte e com a constituição da malha, pois o que interessa finalmente não é a R_g , nem sequer a GPR, mas as tensões de passo, de toque e *mesh*. Ou seja, a R_g pode variar desde que a constituição da malha e a I_g permitam tensão de passo e toque inferiores aos limites de segurança.

Se não for encontrada informação confiável da R_g da malha com suspeita de superação, podem ser efetuadas medições de acordo com os procedimentos estabelecidos nas normas IEEE [1] [7], etc., e em documentos do GCOI [9], para malhas de estações desligadas ou em operação. Estas medições devem ser feitas com solo seco. Se a medição for considerada inviável, deverão ser feitos cálculos de avaliação da impedância de aterramento, sendo necessário recuperar ou reconstituir os dados básicos da malha, bem como um modelo de resistividade do solo, seja com duas camadas ou com camada única equivalente. Esta última possibilidade, a qual é considerada viável na norma IEEE Std 80-2000 [1] (*Annex E*) pode ser aceitável para cálculos comparativos de superação. No entanto, deve ser feita uma verificação com revisão do cálculo do exemplo da *table E-2*, pois existe erro evidente, dado que sendo as resistividades das duas camadas 300 e 100 ohm.m, a resistividade aparente da camada equivalente não deveria ser nunca inferior a 100 ohm.m, para qualquer separação entre eletrodos utilizados na medição das resistividades com o método de Wenner, sendo que nessa tabela mostram-se valores inferiores a 100 ohm.m para pequenas separações.

3.3.3 Cálculos mais exatos da corrente que entra no solo, I_g

Em casos onde o método simplificado indicar pouca margem nas tensões de passo e de toque em relação aos valores limites das normas, existiria dúvida quanto à possibilidade que a malha de terra esteja ou não superada, sendo conveniente efetuar cálculos mais exatos.

Os métodos mais precisos podem considerar o modelo equivalente de uma camada de solo, mencionado na norma IEEE Std 80-2000, sendo mais exato considerar programas computacionais com modelo de duas camadas para o cálculo das resistências de aterramento. Existem também programas com modelo de três camadas, por exemplo o programa MTER do professor Dr. C. M. Portela da COPPE-UFRJ, Todos estes programas consideram equipotencialidade da malha. O cálculo da distribuição das correntes entre o solo e os cabos de blindagens, incluindo outros eletrodos próximos, podem ser feitos com programas especiais incluindo os de transitórios eletromagnéticos (ATP, EMTP etc). Nesses programas deve ser representada, junto com a rede aérea, a matriz de impedâncias de aterramento de todos os eletrodos próximos, incluindo a malha de terra em análise, com as mútuas entre eles. Note-se que em casos especiais a corrente máxima que entra na malha de terra de uma estação pode ocorrer para curto-circuito em algum ponto próximo da estação [15], em alguma das LTs derivadas dela; por exemplo, no cálculo da malha de terra da SE São José de Furnas, este ponto foi encontrado em uma das LTs a cerca de 2 km da SE. [11]

Outro programa interessante é o NEC-4 da Universidade de Califórnia [12], o qual calcula para frequências entre 0 e 1 GHz, cuja vantagem é o cálculo simultâneo de redes de cabos aéreos e enterrados, com as mútuas entre todos eles, sem assumir equipotencialidade. Este programa utiliza o método dos momentos (MoM). Existem outros programas similares que calculam com método de elementos finitos (FEM), por exemplo o programa CIGMUT [13], o qual calcula com modelo de uma camada, porém sem assumir equipotencialidade, utilizado para cálculos de redes de cabos aéreos e/ou enterrados submetidos a frequências entre zero e poucos MHz, por exemplo, malhas peninsulares de bancos de capacitores, considerando transitórios de manobras e curto-circuito.

3.3.4 Soluções para casos de superação de malhas de terra por motivos de segurança de pessoas

Nos casos onde o agente proprietário de uma estação demonstrar a superação da malha de terra devido a aumento do nível de curto-circuito, por motivos de segurança de pessoas, ele poderá estudar e definir a solução de mínimo custo global, considerando as seguintes medidas, entre outras:

- a) Aumento da espessura da camada de brita, tanto internamente como no entorno da estação. Esta medida é mais efetiva quanto maior seja o aumento da fator C_s de contato pé-solo, ou seja, quanto menor seja o fator original de reflexão

(negativo) entre a brita e o solo e quanto menor seja a espessura da camada de brita original, o que fica evidente das curvas de Cs (vide Fig.11 de [1]);

- b) Trocar a camada de brita por outra de maior resistividade, mantendo a mesma espessura. Esta medida será mais efetiva quanto maior seja o aumento da resistividade da brita e quanto maior seja o aumento do fator Cs. Como existem britas até de 50.000 ohm.m (granito, gries etc), esta medida pode ser muito efetiva, por exemplo, poderia aumentar os limites de segurança em até da ordem de 10 vezes, se a camada de brita original tivesse resistividade de 3000 ohm.m, de acordo com as equações (1) e (2) do item 2, acima. Contudo, neste caso, assim como em outras soluções de alta efetividade, devem ser estudadas soluções para casos particulares de tensões transferidas, tensões metal-metal e tensões *mesh*;
- c) Medidas a e b mistas;
- d) Interligações com outros eletrodos de terra próximos sejam mediante contrapesos enterrados, ou cabos de blindagem de LTs etc.;
- e) Instalação malha satélite na proximidade da malha principal, interligada com cabos enterrados, preferencialmente. Se a separação entre as malhas não for pequena, os cálculos do projeto devem ser feitos com programa computacional para malhas não equipotenciais;
- f) Redução da resistência de aterramento da malha mediante hastes enterrados verticais e/ou em 45° (tipo pé de galinha) de máximo comprimento possível;
- g) Redução da resistência de aterramento mediante novos cabos enterrados horizontais no meio dos retângulos originais da malha;
- h) Redução da resistência de aterramento da malha mediante eletrodos verticais em concreto em pontos livres próximos dos nós da malha, inclusive na periferia;
- i) Aumento artificial da umidade do solo nas faixas acima dos cabos enterrados, por exemplo mediante regado manual ou automático em tempo seco. A norma IEEE 80-2000 [1], apresenta curva (pág. 50) que mostra que um aumento da umidade de 10% para 20% faz cair a resistividade de certo tipo de solo de 2500 ohm.m para 90 ohm.m.
- j) Tratamento químico da malha, para reduzir a resistividade do solo no entorno dos metais enterrados, o que deve levar em conta problemas de aumento da corrosão de acordo com a vida útil remanescente da subestação, tanto da malha como de outras estruturas metálicas. Por causa do aumento da corrosão a quantidade de líquido injetado deve ser a mínima possível para reduzir as tensões de passo e toque dentro dos limites de segurança. Este tratamento pode ser realizado mediante injeções do líquido somente em pontos preferenciais, tais como pontos com hastes enterrados e/ou eletrodos verticais em concreto. O efeito do líquido deve ter máxima durabilidade, além de mínimo aumento de corrosão. Deve ser

considerado que a redução do diâmetro dos cabos enterrados por corrosão produz aumento de Rg. A norma IEEE 80-2000 [1], apresenta curva (pág. 50) que mostra que um aumento do sal 3% para 8% faz cair a resistividade de certo tipo de solo de 5000 ohm.m para 100 ohm.m. Lembre-se que a corrosão é maior para menor resistividade do solo, sendo muito pequena para solos com mais de 100 ohm.m [6].

- k) Reduzir os tempos de duração dos curtos-circuitos (t_s), mediante proteção redundante e troca de disjuntores lentos antigos que possam ser reaproveitados em lugares com menor nível de curto-circuito, quando sejam poucos em relação ao total na estação. Quanto aos tempos de duração dos curto-circuitos, lembre-se que as tensões limites de segurança (passo e toque) são reduzidas com a raiz quadrada da redução de t_s , ou seja, uma redução de t_s de 1 s para 0,5 s permite reduzir os limites em 29,3%. Note-se que as normas IEEE 80-2000 não recomendam um valor para t_s , sugerido somente considerar a soma dos tempos de duração do curto-circuito principal e dos religamentos, supostos sem sucesso, dizendo que valores típicos de t_s estão entre 0,25 e 0,5 s.(item 16.2.2). Se no projeto da malha de terra suspeita de superação tivessem sido utilizados valores de t_s muito altos, acima de 0,5 s, poderia existir aqui uma margem adicional significativa para avaliação da superação;
- l) Interligar a malha de terra suspeita de superação com bases de concreto com estrutura metálica soldada (*radiers* de edificações etc.), as quais apresentam baixa resistência de aterramento;
- m) Planejar a Rede Básica para manter níveis de curto-circuito máximos por nível de tensão. Desta forma todos os agentes teriam uma base segura para projetar seus equipamentos sem riscos de superação de nenhum equipamento ou elemento de sua rede, considerando um 10% de margem, por exemplo. Esta forma de planejar está sendo utilizada em alguns países, sendo até considerada como alternativa a instalação de elos HVDC para evitar a elevação dos níveis de curto-circuito; alternativamente pode ser considerada a divisão da rede em setores pouco interligados;
- n) Permitir que teoricamente os níveis acima sugeridos sejam ultrapassados com todos os geradores e elementos ligados, porém controlar a rede *on-line* para que na realidade nunca sejam ultrapassados esses limites, aproveitando aspectos probabilísticos quanto à estado de conectividade de elementos, além de acionar:
 - a) desligamentos temporários de elementos, incluindo capacitores série, b) inserção de reatores série e/ou capacitores shunt etc. Neste sentido, serão úteis as duas medidas seguintes:
 - i) Efetuar o cálculo *on-line* dos níveis de curto-circuito da rede no estado real, utilizando o programa ANAFAS com arquivo atualizado permanentemente segundo o estado dos elementos da rede;

- ii) Verificação periódica de níveis de curto-circuito reais de áreas mediante manobras temporárias de capacitores ou reatores shunt, registrando o ΔV e os Mvar do elemento manobrado; seguindo cálculo computacional correlacionado para determinar os níveis de curto-circuito corrigidos das áreas próximas;
- o) Redução dos níveis de curto-circuito gerais da estação mediante instalação de reatores série em pontos com baixo fluxo de potência normal, entre setores de barramentos (caso de Tucuruí).

3.4 Superação de malhas de terra quanto a suportabilidade de cabos enterrados e conexões

Nestes casos é viável supor que as correntes que circulam pelos cabos da malha de terra são proporcionais à corrente de curto-circuito máxima da estação, pois se trata de uma rede linear passiva. Portanto, neles podemos dizer que se o aumento do nível de curto-circuito exceder a margem de projeto utilizada no dimensionamento dos cabos da malha poderia ocorrer a superação destes cabos, nos pontos onde pode entrar máxima corrente de curto-circuito na malha. Estes pontos correspondem a: a) aterramento de estruturas que suportam isoladores que poderiam sofrer arco durante sobretensões, b) conexões a terra de chaves de aterramento, c) conexões de neutro de equipamentos, etc. Portanto, também neste caso é importante conhecer a corrente máxima de curto-circuito considerada no projeto, incluindo margem de segurança, como discutido no item 1 acima. Note-se que nestas avaliações não interessam as hastes enterradas, as quais conduzem relativamente baixa corrente que entra no solo. Mais importantes, no caso de aumento dos níveis de curto-circuito na estação, seriam as correntes que entram nos cabos de blindagens das LTs, os quais não consideramos como pertencentes ao aterramento, mas que devem ser consideradas independentemente.

Convém esclarecer que as correntes máximas que circulam na malha de terra e nos cabos de conexões entre neutro e malha correspondem a $I_f = 3I_0$, ou seja não interessam os curtos-circuitos trifásicos. No entanto, existem correntes em conexões entre equipamentos e neutros, onde as maiores correntes podem corresponder a curtos-circuitos trifásicos.

Deve ser considerado que nem toda a corrente de curto-circuito circula por um determinado trecho de cabo da malha. Por exemplo, se a conexão de terra estiver no meio de um trecho de cabo que une dois nós da malha, quase a metade da corrente de curto circulará para cada lado do ponto de conexão, o que pode ter sido considerado no projeto dos cabos da malha. Similarmente, a conexão direta num nó da malha produzirá correntes da ordem de 25% em cada cabo derivado desse nó, embora a corrente total circule pelo cabo de conexão à malha.

Nestas avaliações deverá ser considerada eventual deterioração da capacidade condutiva dos cabos, seja por corrosão, seja por corte ou roubo de cabos etc., sendo conveniente uma verificação do estado da malha para aplicação de medidas corretivas. No entanto, estes problemas de deterioração da malha de terra serão aqui considerados como independentes dos aumentos dos níveis de curto-circuito, ou seja, do problema da superação das malhas por curto-circuito, pois as medidas corretivas nestes casos devem ser aplicadas com ou sem superação por curto-circuito.

Nos casos onde for verificada superação por curto-circuito da capacidade de trechos de cabos enterrados ou de conexões, poderão ser aplicadas soluções localizadas, considerando que nem todos os trechos da malha sofrerão igualmente pelo aumento do nível de curto-circuito. Como neste caso não se trata de reduzir a resistência de aterramento da malha, poderão até ser efetuados reforços com cabos isolados superficiais (não enterrados), exceto quando simultaneamente for identificada a necessidade de redução da resistência de aterramento da malha para reduzir tensões de passo e toque.

Nos casos onde o agente proprietário de uma estação demonstrar a superação da malha de terra devido a aumento do nível de curto-circuito, quanto a capacidade dos cabos da malha e conexões correspondentes, ele deverá estudar as soluções de mínimo custo global, considerando os aspectos descritos nos parágrafos anteriores, além dos métodos de dimensionamento das bitolas dos cabos para suportar as temperaturas produzidas pelas novas correntes de curto-circuito, os quais estão explicados na norma IEEE 80-2000 [1].

3.5 Referências

- [1] ANSI/IEEE Std 80-2000, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding (revisão da IEEE Std 80-1986).
- [2] ANSI/IEEE Std 80-1986, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. (revisão da IEEE Std 80-1976).
- [4] IEC 60076-5, Second Edition, 2000-07. Power Transformers. Part 5: “*Ability to withstand short-circuit*”
- [5] Normas ANSI/IEEE Std C57.12.00-2000 *IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*”.
- [6] M. K. Choudhary. Earthing practice – Additional. “Disaster management, electrical safety procedures and accident prevention”. India. Ministry of Power.
- [7] ANSI/IEEE Std 81-1983, IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System.
- [8] Analylis and validation of the performance of grounding sytems buried in soil estructures containning heterogeneous volumes” F P Dawalibi, N. Mitskevitch. 2005;
- [9] Procedimentos, técnicas e critérios para recepção e manutenção de malhas de aterramento de subestações. GCOI. Subcomité de manutenção SCM-115. 1997.
- [10] J. Ma, F. P. Dawalibi, W. Ruan, R. D. Southey, R. Waddell, J-K. Choi: Measurement and Interpretation of Ground Impedances of Substation Grounding Systems Connected to Ground Wires and Metallic Pipes’, Proceedings of the 60th American Power Conference, Vol. 60, pp. , Chicago (USA), 14-16 April, 1998.
- [11] Cálculos relativos à Malha de terra da SE São José, Furnas. Novembro 1988. Promon.
- [12] Programa NEC-4. Numerical Electromagnetic Code. University of California.
- [13] Programa CIGMUT. Promon Engenharia S/A. Desenvolvido por A. R. Saavedra e Mauro Muniz. 1989
- [14] C. Li, X. Wei, Y. Li, and F. P. Dawalibi A Parametric Analysis of Fault Current Division between Overhead Wires and Substation Grounding Systems. Proceedings of the Seventh IASTED International Conference on Power and

Energy Systems, Clearwater Beach, FL, USA, November 28 - December 1, 2004.

- [15] J. Valjus e R. Sarmanto. Practical earthing measurements of large rural and urban substations CIGRÉ. 1984 Session., 36-04
- [16] Norma IEC 60479-2 Effects of current on human beings and livestock - Part 2: Special aspects, 2007.
- [17] Proc. Natl. Sci. Counc. ROC(A) Vol. 23, No. 5, 1999. pp. 612-621
A Comparison of IEC 479-1 and IEEE Std 80 on Grounding Safety Criteria
Chien-Hsing Lee and A. P. Sakis Meliopoulos
<http://nr.stpi.org.tw/ejournal/proceedingA/v23n5/612-621.pdf>

VII - DIRETRIZES PARA A APLICAÇÃO DE MEDIDAS MITIGADORAS NOS CASOS DE SUPERAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO



VII - DIRETRIZES PARA A APLICAÇÃO DE MEDIDAS MITIGADORAS NOS CASOS DE SUPERAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO

ONS RE 2.1 001/2006

Revisões do relatório

Emissão Inicial 04/01/2006

seção	página(s)	descrição
<hr/>		

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVO

Durante a realização do *workshop* sobre o processo de análise de superação de equipamentos de alta tensão, realizado no ONS no dia 31.08.2005, foi constatada a necessidade de abordar o tema “medidas mitigadoras” no âmbito do GT de Análise de Superação de Equipamentos de Alta Tensão.

Da mesma forma, como foram discutidos e acordados os critérios e metodologias para a análise de superação de equipamentos, faz-se também necessário definir uma linha comum de análise para os casos de aplicação de medidas mitigadoras. Somente desta forma pode-se assegurar a uniformidade da análise deste tipo de solução por diferentes Agentes e pelo ONS.

O presente relatório tem como objetivo descrever um roteiro de análise e critérios para a aplicação de medidas mitigadoras, que evitem ou adiem a troca de equipamentos superados.

2 CRITÉRIOS PARA A APLICAÇÃO DE MEDIDAS MITIGADORAS

A solução para os casos de superação de equipamentos de alta tensão deve ser estrutural, tanto na Rede Básica quanto nas DITs, de forma a garantir desempenho e confiabilidade adequados dessas redes. Dentro desta ótica, em se tratando de equipamentos de alta tensão, a solução técnica recomendada para problemas de superação é a substituição integral dos equipamentos superados.

Ocorre por vezes, porém, que a simples substituição de equipamentos pode acarretar problemas operacionais de difícil solução, como grande quantidade de desligamentos ou dificuldades inerentes ao trabalho no campo devido a arranjos pouco otimizados das instalações, ou redundar em custos extremamente elevados de substituição de equipamentos superados. Nesses casos, cabe analisar a viabilidade técnica e econômica da aplicação de medidas mitigadoras, levando-se em consideração a segurança operacional das instalações e das pessoas, bem como a garantia da flexibilidade operativa.

De forma a justificar a aplicação de medidas mitigadoras é necessário levar em consideração os seguintes aspectos:

- Custo da substituição dos equipamentos superados;
- Levantamento no campo das dificuldades de realização das substituições;
- Levantamento dos tempos de desligamentos necessários e o impacto destes na segurança do SIN;
- Estudo de viabilidade técnica de medidas mitigadoras, que necessariamente deverão ser do tipo estruturais, não sendo aceitas soluções definitivas que dependam de esquemas de controle;
- Custo das medidas mitigadoras propostas.

Com base nas informações supra relacionadas, o Agente deverá submeter ao ONS, para análise, estudo justificando a sua proposição de aplicação de medida mitigadora, o qual subsidiará o posicionamento do Operador quanto à indicação formal à ANEEL

do reforço proposto pelo Agente, conforme estabelecido no artigo 3º, inciso V da Resolução Normativa 443/2011 da ANEEL.

O encaminhamento das análises de medidas mitigadoras deverá seguir o processo definido pelo GT de Análise de Superação de Equipamentos de Alta Tensão.

3 SUPERAÇÃO POR CORRENTE DE CARGA

Para a determinação da máxima corrente de carga, deverá ser adotada a metodologia descrita nos **itens I** (“Diretrizes para Análise de Superação de Disjuntores, Chaves Seccionadoras e Bobinas de Bloqueio”) e **II** (Diretrizes para Análise de Superação de Transformadores de Corrente”) do presente documento. Normalmente, a ocorrência de sobrecarga é detectada para condição de emergência crítica, o que significa que em condições normais de operação não ocorre superação. Portanto, sempre que possível deverão ser feitas consultas aos fabricantes para os equipamentos cujo valor de corrente obtido, através da metodologia mencionada anteriormente é maior do que a corrente nominal do equipamento. No caso de transformadores de corrente (TC), a corrente obtida deverá ser comparada com a corrente nominal multiplicada pelo fator térmico (FT) da relação. Tal recomendação pode ser consultada no **item II** (Diretrizes para Análise de Superação de Transformadores de Corrente”) do presente documento.

Ressalta-se que, normalmente, existe uma relação entre o valor da corrente nominal (**In**) e a suportabilidade térmica (**Icc**) do TC, i.e., **Icc = k In**, onde **k** é da ordem de 24 a 32. Logo, quando a relação **Icc / In** é muito diferente do mencionado anteriormente, consultas a fabricantes deverão ser feitas, salvo quando o Agente possuir todas as informações necessárias à avaliação.

3.1 MÉTODO PARA EVITAR SUPERAÇÃO POR CORRENTE DE CARGA

Quando a superação é por corrente de carga a única alternativa possível para evitar a superação consiste em consultar o fabricante do equipamento em sobrecarga no sentido de se verificar a possibilidade de modificação das suas características para a condição de regime permanente.

A seguir é feito um resumo da nomenclatura normalmente utilizada no setor para essas avaliações/modificações nos equipamentos, a saber:

UPRATING – atualização das características elétricas vigentes por meio de avaliação;

UPGRADING/UPGRADE – elevação da capacidade do equipamento por meio de modificação no projeto;

OVERHAUL – revisão geral;

RETROFIT – modificações no equipamento para *uprating*.

Em termos sistêmicos, pode-se utilizar, quando couber, atuação nos transformadores defasadores para ajuste do fluxo da corrente por um determinado circuito. Poder-se utilizar também compensação série em linhas de transmissão menos carregadas e com isso desviar o fluxo da corrente dos circuitos com equipamentos superados, desde que seja uma alternativa técnica e economicamente viável.

4 SUPERAÇÃO POR CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

Para a determinação da máxima corrente de curto-circuito deverá ser adotada a metodologia descrita nos **itens I** (“Diretrizes para Análise de Superação de Disjuntores, Chaves Seccionadoras e Bobinas de Bloqueio”) e **II** (Diretrizes para Análise de Superação de Transformadores de Corrente”) do presente documento.

4.1 MÉTODOS PARA EVITAR SUPERAÇÃO POR CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

No caso de ser detectada a superação por corrente de curto-circuito de algum equipamento, barramento, ou malha de terra, podem ser tomadas medidas sistêmicas ou diretamente no equipamento superado. A seguir é feito um resumo dessas medidas.

4.1.1 MEDIDAS SISTÊMICAS

O objetivo de se tomar uma medida sistêmica é aumentar as impedâncias de sequência positiva e/ou negativa e/ou zero com a conseqüente redução dos níveis da corrente de curto-circuito monofásico e/ou trifásico. Nesse contexto podem-se mencionar as seguintes medidas [1]:

- **Secionamento de barramentos**

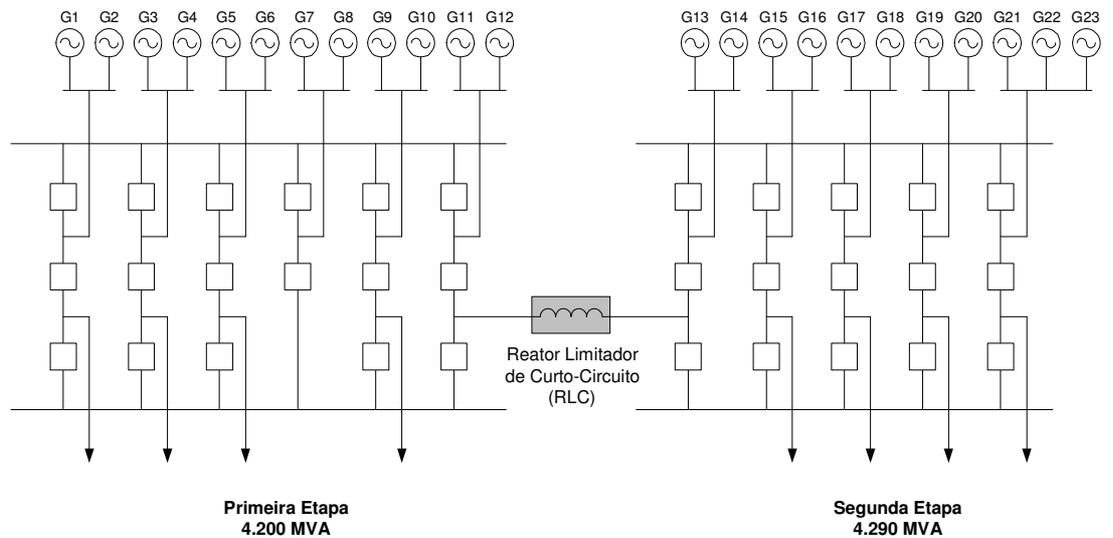
O secionamento de barramentos pode ser realizado, desde que se mantenha a segurança e a flexibilidade operacional, por meio de:

- Chaves seccionadoras;
- Disjuntores;
- Reatores limitadores de curto-circuito (RLC) – Figura 50.

Nesses casos, deverá ser analisada a possibilidade das cargas ficarem equilibradas nas seções de cada barramento, para se evitar uma corrente de valor elevado passando pelo equipamento que está secionando os barramentos e o seu conseqüente sobre dimensionamento.

No caso da utilização de RLC deverá ser dada uma atenção especial para os disjuntores existentes, uma vez que é recomendável um estudo de TRT devido à instalação desse novo dispositivo no circuito. Esse problema poderá ser resolvido com a instalação de capacitores conectados fase-terra, entre o reator e esses disjuntores [2].

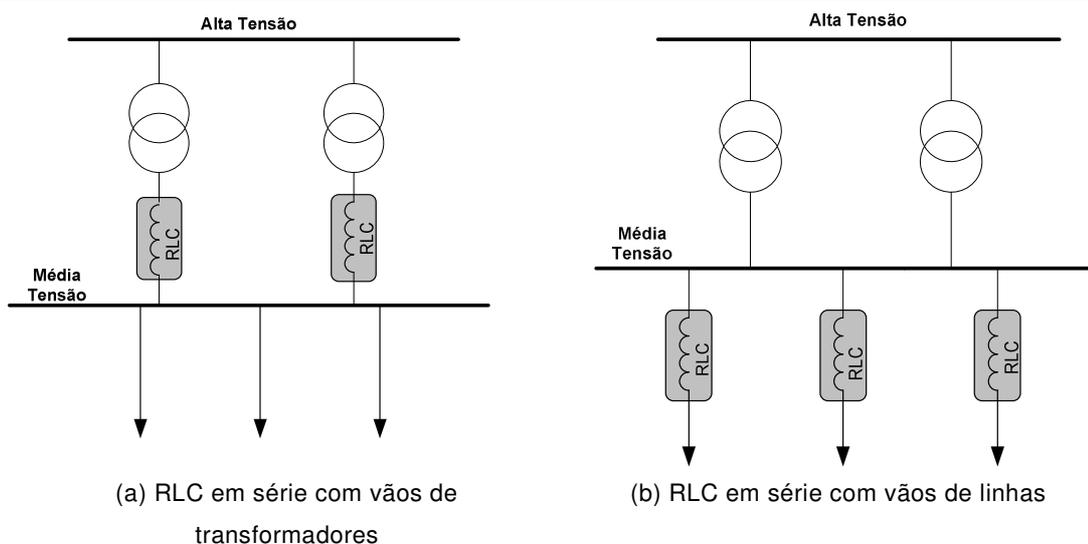
Figura 50 - RLC seccionando o barramento na SE Tucuruí 500 kV [2]



- **RLC em série com transformadores e linhas**

O emprego de RLC em série com transformadores e linhas de transmissão é muito utilizado no sistema elétrico brasileiro, principalmente no vão do enrolamento terciário de transformadores, para diminuição do nível de curto-circuito nos equipamentos do terciário, e no ponto de conexão na chegada de linhas de transmissão no seu respectivo vão de entrada na subestação [2], para diminuição da corrente de curto-circuito na subestação (Figura 51).

Figura 51 – Exemplo de reatores limitadores em série com vãos de transformadores e linhas



- **Alternativas para os casos de curto-circuito monofásico**

Em situações em que a superação da instalação é somente devido ao curto-circuito monofásico, a alternativa de desaterrar ou aterrar o neutro de transformadores através de resistores ou reatores poderá ser utilizada. Nessa alternativa devem ser examinadas as características de isolamento do terminal de neutro dos transformadores, uma vez que estes terão que suportar as solicitações tanto de surtos de manobra quanto de surtos atmosféricos.

Outra solução poderá ser a abertura do delta do enrolamento terciário dos transformadores. Nesse caso, devem ser analisadas as consequências da circulação de correntes de sequência zero, de terceiro harmônico e a transferência de surto entre os enrolamentos do transformador.

- **Chaveamento sequencial**

Uma alternativa para se evitar a abertura de disjuntores superados por TRT numa condição desfavorável, é a utilização de abertura sequencial dos disjuntores, de forma que aquele que estiver com sua capacidade superada atue, somente, após a abertura do outro equipamento. A utilização dessa alternativa deve ser acompanhada de estudos sistêmicos, de maneira que sejam analisadas as consequências devido ao retardo na atuação de alguns disjuntores. Por isso, o emprego dessa alternativa, normalmente, não é recomendável em sistemas de extra alta tensão.

- **Geradores e transformadores de maior reatância**

No caso de instalação de uma nova geração ou transformação, pode-se cogitar o emprego de geradores e/ou transformadores com reatâncias maiores que as usuais, para limitar as correntes de curto-circuito. Nesses casos, também, deverão ser feitas análises técnicas, para se avaliar o impacto dessa solução no sistema elétrico, e econômicas.

- **By-pass de linhas nas subestações**

Em subestações em que a configuração física e a confiabilidade o permitem, pode ser verificada a possibilidade de “by-passar” circuitos, procurando-se assim reduzir o nível de curto-circuito no barramento com instalações e/ou equipamentos superados.

- **Considerações Gerais**

Ressalta-se que nesse documento procurou-se descrever soluções mitigadoras de superação de equipamentos por curto-circuito já utilizadas em sistemas de potência. Para maiores esclarecimentos de outras soluções em desenvolvimento, recomenda-se a leitura do trabalho da referência [4].

4.1.2 MEDIDAS MITIGADORAS NOS EQUIPAMENTOS SUPERADOS

- **Disjuntores**

Em princípio a modelagem completa, mais conservativa do que a refinada, deve ser utilizada nas análises de superação por TRT. Caso seja detectada superação do disjuntor analisado por TRT, a adoção da modelagem refinada da rede elétrica deve ser então utilizada, de forma a se obter um maior grau de precisão na análise. Tais modelagens (completa e refinada) são abordadas detalhadamente no item IV do presente documento (“Metodologia de cálculo da TRT para estudos de superação de disjuntores”) e em [3]. Persistindo a superação, poderá ser analisada a utilização de capacitores instalados entre fases e terra, conforme [2].

- **Transformadores de corrente**

Para os transformadores de corrente (TC), recomenda-se adotar a metodologia descrita com detalhes no item II do presente documento (Diretrizes para Análise de Superação de Transformadores de Corrente”). Para os casos em que a superação seja pela suportabilidade da corrente de curto-circuito, deve-se ficar atento para os aspectos mencionados no item 4 deste relatório.

No caso de superação por saturação do núcleo secundário, poderão ser tomadas algumas medidas pelo Agente, a saber:

- Diminuição da impedância da carga secundária do TC. Isto poderá ser feito aumentando-se a bitola dos cabos do secundário do TC ou duplicando esses cabos. Uma outra forma pode ser a construção da casa de relés mais próxima ao referido TC;
- Substituição de toda a proteção por uma de outro tipo, de maneira que o TC não sature ou mesmo que o desempenho da proteção fique imune à saturação do TC;
- Utilização de dois enrolamentos secundários do TC em série.

Obviamente, todos esses processos de solução terão que ser compatibilizados com a viabilidade técnica-econômica. Essa viabilidade tem que ser analisada não só sob o ponto de vista do custo da troca dos equipamentos, como também das dificuldades de sua implementação.

5 CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS

Sempre que possível deverão ser feitas consultas aos fabricantes solicitando-se mais esclarecimentos dos equipamentos e se os mesmos suportam as solicitações vislumbradas.

Nestas consultas, deverá ser fornecido o maior número de informação do equipamento e a pergunta deverá ser a mais clara e objetiva possível.

A seguir um caso exemplo de uma possível consulta a um fabricante perguntando se o equipamento suporta uma corrente superior que a nominal (e no caso do TC, In x FT):

- Equipamento: Disjuntor
- Fabricante: XXXXXXXXXXXXX
- Tipo: XXXXXXXXXXXXX
- Número de série: XXXXXXXXXXXXX
- Ano de fabricação: 1980
- Número da Ordem: XXXXXXXXX

Dados de Placa:

- . Tensão nominal: 242 kV
- . Corrente nominal: 1600 A
- . Corrente térmica nominal: 40 kA
- . Corrente dinâmica nominal: 100 kA

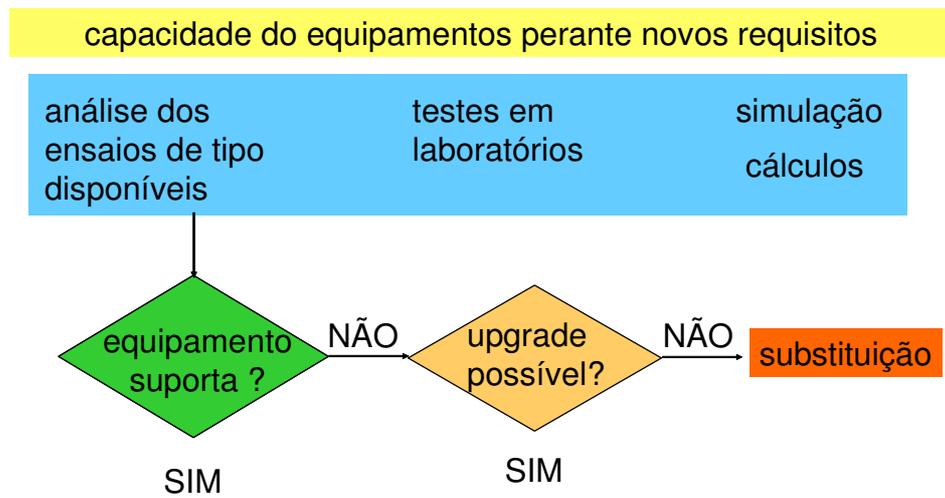
Pergunta: O equipamento suporta uma corrente de **2000 A** durante **2 horas**, numa periodicidade de **2 em 2 meses**, partindo de uma corrente em regime de **1400 A** ?

Notas:

1. O valor da corrente, a duração e a periodicidade deverão ser estimados de uma maneira mais realística possível.
2. Deverá ser dada uma atenção especial para as cargas conectadas aos transformadores de corrente, uma vez que poderá ocorrer o caso em que circule uma corrente no enrolamento secundário superior a nominal e/ou das cargas conectadas (relés, medidores, etc).

A Figura 52 resume uma análise de possibilidade de upgrade em um equipamento.

Figura 52 - Upgrade de um equipamento



6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Livro: Equipamentos Elétricos – Especificação e aplicação em subestações de Alta Tensão – Capítulo XIV – Superação de Equipamentos – Jorge Amon Filho.
- [2] Brazilian Successful Experience in the Usage of Current Limiting Reactors for Short-Circuit Limitation – IPST/2005 – J. Amon F., P.C. Fernandez, E. H. Rose, A. D’Ajuz, A. Catanheira.
- [3] Metodologia de cálculo da TRT para estudos de superação de disjuntores – Relatório ONS – RE – 2.1/079/2005.
- [4] Monteiro A. M. - Um Estudo de Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-Circuito com Ênfase no IPC (Interphase Power Controller) - Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica – COPEE/UFRJ - 2005.

7 CRÉDITOS

Participantes	Empresa
Ary D´Ajuz (coordenador da atividade)	ONS
Marta Lacorte	ABB
Jean Altwegg	AREVA
Paulo Ricardo Oliano	CEEE
Angélica da C. O. Rocha	CEMIG
Sebastião Otávio Moreira	CEMIG
Fernando Rodrigues Alves	CHESF
Francisco José de A Baltar	CHESF
Methodio V. Godoy	CHESF
Júlio César Xavier Chiaradia	COELBA
Waldecy de Macedo	GTEEP
Nilson Kozlowski	ELETRONORTE
Ricardo Antunes	ELETROSUL
Roberto M. Rocha	EPE
Denesmar Gomes Pimenta	FURNAS
Jorge Amon Filho	FURNAS
Marco Antonio de Paiva Fontes	FURNAS
Rogério Silveira Machado	FURNAS
Antonio Carlos R. A. Oliveira	LIGHT
Andreia Maia	ONS
Antonio Carlos Carvalho	ONS
Antonio Sérgio Corrado	ONS
Benedito A. Souza da Silva	ONS
Daniel Sinder	ONS
Humberto Arakaki	ONS
Marcilio Valença	ONS
Vinicius Caldeira Oliveira	SIEMENS
Marcos Bennert Schwarz	VATECH

VIII - REQUISITOS MÍNIMOS A SEREM OBSERVADOS NA APLICAÇÃO DE DISPOSITIVOS LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO NA REDE BÁSICA



**VIII - REQUISITOS MÍNIMOS A SEREM OBSERVADOS NA
APLICAÇÃO DE DISPOSITIVOS LIMITADORES DE CORRENTE DE
CURTO-CIRCUITO NA REDE BÁSICA**

Revisões do relatório

Emissão Inicial 13/10/2013

seção	página(s)	descrição

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVO

O sistema elétrico brasileiro tem se expandido nos últimos anos de forma bastante acelerada. A potência instalada do SIN já atingiu a ordem de 120 GW e a rede de transmissão ultrapassou os 100.000 km, o que corresponde a um crescimento de, praticamente, 100% nos últimos 12 anos. Tal crescimento acelerado do sistema é acompanhado pela elevação dos níveis de curto-circuito da rede, impactando diretamente nas solicitações de curto-circuito impostas aos equipamentos e instalações. Em alguns casos, tal solicitação pode ultrapassar a capacidade nominal dos equipamentos em operação, causando a superação dos mesmos. Neste contexto, é de fundamental importância que seja realizado um acompanhamento contínuo da evolução dos níveis de curto-circuito, de forma a evitar a superação de equipamentos no SIN.

Por força da regulação em vigor, o ONS possui a atribuição de conduzir anualmente o processo de levantamento de potenciais condições futuras de superação, por meio do Grupo de Trabalho para Análise de Superação de Equipamentos de Alta Tensão (GT-AS). Este grupo coordenado pelo Operador foi formado em 2004 e é composto por agentes de transmissão, distribuição e geração. Todo ano, portanto, o ONS emite um volume específico do PAR (Plano de Ampliações e Reforços), Volume I-A, que contém o rol de instalações e equipamentos da Rede Básica que se encontram superados e que, portanto, deverão ser substituídos, ou que deverão apresentar alguma medida mitigadora que elimine a superação. O Volume I-A do PAR é enviado oficialmente à ANEEL e ao MME, que providenciam a autorização dos devidos reforços necessários para evitar a inaceitável ocorrência de superação de equipamentos na operação da rede, pois esta impõe riscos não somente operativos, mas de segurança pessoal.

Como os custos envolvidos na substituição de equipamentos superados são normalmente elevados, abre-se espaço para que sejam pesquisadas outras formas de evitar a superação. Dentro deste contexto, vem crescendo a nível internacional a oferta de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito (DLCC) em redes de transmissão e distribuição. Tais dispositivos foram durante longa data representados na prática por reatores limitadores a núcleo de ar, ao passo que outras tecnologias de limitação de correntes de curto-circuito passaram longas décadas como apenas projetos de pesquisa e desenvolvimento. Nos últimos anos, entretanto, vem crescendo a oferta de dispositivos limitadores baseados em diferentes tecnologias, tal como eletrônica de potência e supercondutividade.

Diante deste fato, faz-se necessária a análise da aplicação de novas tecnologias de limitação de corrente de curto-circuito, visando identificar os possíveis impactos que as mesmas podem causar à operação do Sistema Interligado Nacional (SIN).

Ao ONS cabe se preparar para a possibilidade de adoção desses dispositivos não convencionais por agentes do setor elétrico. O presente artigo visa discutir este tema e oferecer subsídios para a definição de requisitos mínimos para a aplicação de DLCC na Rede Básica.

2 SUPERAÇÃO DE EQUIPAMENTOS

As redes de transmissão são planejadas, especificadas e construídas visando a expansão do sistema elétrico. Os equipamentos elétricos de um sistema de potência devem ser especificados para permanecerem em serviço por um período de tempo que seja suficiente para compensar os custos de sua aquisição e instalação. Conseqüentemente, devem ser dimensionados para suportar as eventuais ampliações que venham a ocorrer no sistema durante esse período de tempo, sem que haja superação de suas capacidades nominais.

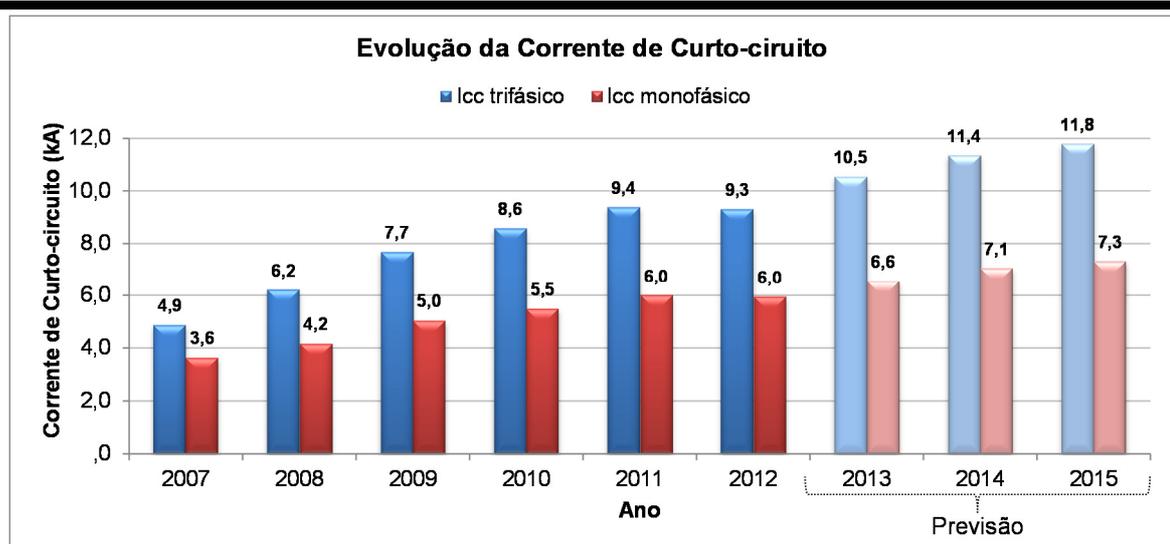
Entretanto, durante o tempo em que o equipamento encontra-se em operação, é possível que ocorram mudanças na configuração do sistema que não haviam sido previstas no planejamento original. O atual modelo do setor elétrico que visa, entre outras, maior competitividade no setor de geração, têm como consequência a viabilização em prazos relativamente curtos, de 3 a 5 anos, de empreendimentos de geração, que muitas vezes se conectam ao SIN em pontos não considerados originalmente pelo planejamento de longo prazo. Uma consequência dessa expansão é a elevação dos níveis de curto-circuito em diversas subestações do sistema elétrico, podendo, em muitos casos, ocasionar a superação de seus equipamentos.

A Figura 53 apresenta um gráfico de evolução da média da corrente de curto-circuito de 2007 a 2015, nas subestações do SIN. Os resultados apresentados baseiam-se nos casos de referência de curto-circuito elaborados pelo ONS e disponíveis em seu sítio eletrônico. Os valores obtidos nos anos de 2013 a 2015 contemplam as obras já consolidadas pelo Ministério de Minas e Energia no ciclo 2013, as informações técnicas consideradas nos estudos elaborados pelo órgão de planejamento setorial EPE, as solicitações de acesso à rede básica e às DIT e conexão dos agentes e as ampliações e/ou reforços propostos pelo PAR 2013-2015 (Plano de Ampliações e Reforços) (1) e pelos agentes do setor. A elevação dos níveis de curto-circuito devido à expansão do sistema elétrico é, portanto, claramente evidenciada no gráfico da Figura 53, cujos valores mostram um aumento de mais de 90 % da corrente de curto-circuito entre os anos de 2007 e 2012, com uma previsão de continuidade do crescimento nos anos seguintes.

Além da expansão da rede e da geração acima do previsto nos planos de expansão à época da implantação das instalações sob análise, outro ponto que

pode levar a superação é a idade das instalações, que se aproximam do horizonte para os quais foram planejadas e especificadas. No entanto, seja qual for a razão da superação, é importante dispor-se de meios adequados para a identificação dos equipamentos com potencial grau de superação dentro de um prazo que possibilite o planejamento e a efetivação da substituição dos equipamentos, ou a aplicação de medidas mitigadoras que posterguem ou evitem a superação.

Figura 53 - Evolução do valor médio da corrente de curto-circuito das barras do SIN



3 SOLUÇÕES PARA SUPERAÇÃO DE EQUIPAMENTOS POR CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

O planejamento prévio da substituição de equipamentos que venham a ser superados no curto e no médio prazo é de extrema importância e é um dos aspectos fundamentais para se garantir a confiabilidade e segurança operativa da rede.

A eventual não substituição dos equipamentos superados, ou a postergação da mesma, pode causar impactos não desejáveis no desempenho do sistema elétrico, no suprimento de cargas e na segurança de instalações e de pessoal. Quando estudos específicos demonstram a existência de equipamentos superados em uma subestação, alguns métodos podem ser adotados para evitar tal situação. As soluções utilizadas para resolver o problema de superação de um equipamento são aqui classificadas como convencionais e não convencionais.

As soluções convencionais são aquelas mais comumente utilizadas e, por conseguinte, já existe um conhecimento disseminado de suas principais características, desempenho e modo de aplicação. São, portanto, medidas que podem ser adotadas em um curto horizonte, como, por exemplo:

- Substituição do equipamento superado por outro de maior capacidade;
- Seccionamento de barramentos;
- Abertura sequencial de disjuntores;
- “By-pass” de linhas nas subestações com equipamentos superados;
- Instalação de reatores limitadores de núcleo de ar;
- Instalação de fusíveis “pirotécnicos”;
- Instalação de geradores e transformadores com reatâncias mais elevadas;
- Elevação da impedância de aterramento nos neutros de transformadores para reduzir curtos monofásicos.

A aplicação dessas soluções deve ser revestida de investigação detalhada sobre a sua viabilidade técnica e econômica. Questões operativas da rede também devem ser levadas em consideração, pois em determinados pontos da rede, os desligamentos necessários à execução dos serviços de substituição dos equipamentos superados pode torna-la inviável, ou somente viável em um horizonte plurianual, pela impossibilidade de retirada de serviço de diversos vãos de manobra ou trechos de barramento de forma concomitante.

As soluções não convencionais, como o próprio nome indica, são aquelas que utilizam tecnologias emergentes e, portanto, ainda não tão disseminadas. As soluções não convencionais de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito são, especialmente, baseadas em eletrônica de potência e em supercondutividade. Outro equipamento que vem se despontando como uma solução viável para limitação de correntes de curto é o reator saturável controlado. Tais métodos vêm ganhando espaço entre as medidas de mitigação de corrente de curto-circuito, especialmente, devido à evolução recente da relação custo/benefício de sua aplicação. Além disso, embora os custos de soluções não convencionais ainda sejam mais elevados que o das soluções convencionais, tais métodos podem agregar outros benefícios à operação da rede, tal como maior grau de controlabilidade desta.

Atualmente encontram-se disponíveis dispositivos limitadores não convencionais de diferentes graus de maturidade tecnológica, desde produtos consolidados até conceitos ainda em fase de pesquisa e desenvolvimento. Entretanto, o aumento verificado nos últimos anos da oferta de produtos industrializados para soluções ditas não convencionais leva a crer que existe um potencial crescente no médio prazo para sua aplicação nas redes de transmissão e distribuição. Existem também tecnologias mais incipientes, como o limitador de corrente de curto baseado em metal líquido (ligas de metais líquidos não tóxicos como, por exemplo:

gálio, índio e estanho), os circuitos de ressonância série controlados (em regime normal de operação, as chaves de eletrônica de potência estariam fora de operação – redução das perdas) e o limitador de permeabilidade incremental. Embora alguns destes dispositivos já apresentem testes experimentais com sucesso, ainda não existem informações suficientes para avaliar o potencial da aplicação desses equipamentos nas redes de transmissão e distribuição (2).

Os dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito (DLCC), foco deste trabalho, foram acima elencados de forma não exaustiva (3). Dois desses equipamentos pertencem ao rol das soluções convencionais (reatores limitadores à núcleo de ar e fusíveis pirotécnicos) e os demais são considerados não convencionais. Tal conjunto de dispositivos compõem o alvo de análise do presente trabalho.

4 REQUISITOS PARA APLICAÇÃO DE DLCC

A aplicação de dispositivos limitadores de curto-circuito em redes de alta tensão deve ser implementada de forma a solucionar o problema de nível de correntes de curto-circuito sem, contudo, causar outros problemas de ordem operacional, que seja de difícil ou de alto custo de solução. Aspectos da aplicação de DLCC relacionados ao desempenho elétrico da rede, de suas instalações e dos sistemas de proteção devem ser claramente identificados e tratados de forma adequada ainda na fase de planejamento e engenharia da solução.

Algumas características devem ser observadas na escolha destes dispositivos, principalmente para aqueles que são conectados permanentemente em série com a rede elétrica. Para dimensionar o DLCC é necessário determinar as condições do sistema às quais o equipamento será submetido, de acordo com a aplicação especificada de cada dispositivo. Nos itens que se seguem são abordados os principais aspectos a serem analisados.

4.1 Regime de Operação

A aplicação de DLCC demanda a clara explicitação dos regimes de operação a que estarão submetidos. As condições de operação normal, em curto-circuito, assim como a recuperação do DLCC após sua atuação são a seguir discutidas.

4.1.1 Operação normal

Nessa situação, os dispositivos não deverão limitar a corrente de regime e devem apresentar baixas impedâncias, evitando contribuir para as perdas e quedas de tensão na rede.

As características do DLCC para operação normal devem incluir a máxima impedância permitida em regime, o valor máximo de perdas tolerável e a máxima queda de tensão permitida para o DLCC na condição normal de operação com corrente nominal.

As questões relacionadas à qualidade de energia são abordadas mais a diante em item específico para este fim.

4.1.2 Durante o curto-circuito

Na condição de curto-circuito, os DLCCs devem apresentar alta impedância, para que a redução das correntes de falta seja obtida. O nível desejado de limitação da corrente de curto-circuito deve ser explicitado em termos da amplitude máxima da corrente de curto-circuito simétrica que se deseja atingir e do correspondente valor de crista máximo da corrente de defeito. Além destes, devem ser explicitados os níveis máximos da corrente presumida de curto-circuito, que é o valor da corrente de defeito passante pelo circuito onde o DLCC será instalado, caso não haja limitação da corrente de defeito. O valor de crista da corrente presumida e a constante de tempo da rede na barra sob análise são também necessárias, pois são insumos básicos para o dimensionamento do DLCC.

O regime de transição do estado de condução em regime permanente para o estado de limitação do DLCC deve ser considerado nas análises de planejamento da solução, pois influenciam diretamente na engenharia da solução adotada. Por exemplo, DLCC que apresentem rápida transição entre os estados de regime para o de limitação, podem reduzir significativamente os requisitos de corrente de crista para os equipamentos situados em série com o limitador, o que pode impactar nas características mínimas necessárias para estes equipamentos e, conseqüentemente, possui potencial para redução do custo total da instalação.

Caso alguma aplicação específica requeira uma característica dinâmica de limitação de corrente, esta deve ser identificada na fase de planejamento da solução, pois será um insumo fundamental para a seleção do tipo de DLCC a ser adotado.

4.1.3 Recuperação do DLCC após o curto-circuito

Diferentes tecnologias ou tipos construtivos de DLCCs possuem diferentes características de recuperação após sua atuação. Essa diversidade é geralmente relacionada a questões de dimensionamento térmico do elemento limitador ou, por vezes, é uma questão intrínseca da tecnologia adotada. Por exemplo, dispositivos limitadores que exigem a substituição do elemento ativo após sua operação, como os dispositivos pirotécnicos, não se aplicam a casos onde o religamento automático do circuito seja necessário. Em suma, é necessário definir precisamente os requisitos de recuperação do DLCC após a limitação de uma falta. Questões básicas relacionadas à recuperação do DLCC são o tempo máximo de recuperação após uma falta para retornar à operação normal e número de ciclos consecutivos de faltas que devem ser aplicados sucessivamente.

4.2 Influência/interação no sistema de proteção

Os dispositivos limitadores de curto-circuito (DLCC) têm a finalidade de limitar as correntes de curto-circuito cujos valores são superiores às características nominais das instalações existentes. Desta forma, a interrupção da corrente de curto-circuito pode ser efetivada pelos disjuntores existentes da instalação, ou diretamente pelos próprios DLCCs, em tempos extremamente rápidos. A forma da eliminação do defeito, por intermédio dos disjuntores existentes ou pela atuação do próprio DLCC, assim como a sua influência na amplitude da corrente de defeito possuem impacto direto nos esquemas de proteção. Tal impacto deve ser claramente identificado para cada tipo de DLCC e as providências para os reajustes dos sistemas de proteção devem ser tomadas para que a sua efetividade não seja prejudicada. Os ajustes das proteções envolvidas devem considerar o funcionamento do DLCC de modo que atuem coordenadamente.

Algumas das principais precauções que se deve tomar em relação aos sistemas de proteção devido a aplicação de DLCCs são a seguir destacadas.

I. No caso de aplicação de DLCC em série a linhas de transmissão, os seguintes ajustes deverão ser verificados:

- (a) Proteção de distância pilotada 21P (utilizando meio de comunicação):

O ajuste dessa proteção deverá cobrir faltas em toda a extensão da linha protegida incluindo o DLCC com uma certa folga, que pode ser em torno de 20% acima do conjunto linha DLCC. Como consequência, o ajuste da proteção de bloqueio por oscilação dessa unidade também deverá ser verificado.

- (b) Proteção de distância retaguarda 2ª zona 21-2:

O ajuste dessa proteção deverá cobrir faltas em toda a extensão da linha protegida incluindo o DLCC com uma certa folga que pode

variar de 10% a 20% acima do conjunto linha e DLCC. Como consequência, o ajuste da proteção de bloqueio por oscilação dessa unidade também deverá ser verificado.

- (c) Demais proteções de distância de retaguarda 3ª e 4ª zonas 21-3 e 21-4:

O ajuste dessas proteções varia de acordo com a sua aplicação. Se a filosofia for de prover retaguarda para as proteções das linhas remotas, nesse caso além de considerar o dispositivo DLCC, deve ser verificado se com a máxima carga na linha em questão a impedância representativa da mesma não caia dentro da característica do ajuste da proteção. Caso essas proteções utilizem unidades de bloqueio por oscilação, os ajustes dessas unidades também deverão ser verificados.

- (d) Proteção de sobrecorrente direcional 67 pilotada:

O ajuste dessa proteção deverá cobrir faltas em toda a extensão da linha protegida incluindo o DLCC com uma certa folga considerando por exemplo o curto-circuito na segunda barra remota do terminal em ajuste.

- (e) Proteção de sobrecorrente 50/51 e 50N/51N:

A proteção de sobrecorrente instantânea (50/50N) e temporizada (51/51N) em sistema malhado é de difícil ajuste, porém em circuito radial com aplicação de DLCC, o ajuste da unidade instantânea deve ser verificado de modo que sua atuação atinja até o final do circuito. Da mesma forma o ajuste da proteção de sobrecorrente temporizada deve ser coordenado com as proteções remotas do circuito radial.

II. No caso de aplicação de DLCC entre seguimentos de barras, os seguintes ajustes deverão ser verificados:

- (a) O ajuste da proteção de barra deve ser verificado caso utilize o princípio de alta impedância.
- (b) Os ajustes das proteções de retaguarda remotas à barra de instalação do dispositivo DLCC devem ser verificados de modo a continuar desempenhando as suas funções.

III. No caso de aplicação de DLCC em série a transformadores de potência, os seguintes ajustes deverão ser verificados:

- (a) Proteção de sobrecorrente 51/51N:

A proteção de sobrecorrente temporizada (51/51N) utilizada como retaguarda deve ser verificada de modo que não haja descoordenação com os ajustes das proteções de segunda zona das linhas ligadas à subestação.

- (b) Proteção diferencial 87:

O ajuste da proteção diferencial do transformador não sofrerá alteração com ou sem o DLCC. Porém, caso a proteção diferencial englobe o dispositivo DLCC, a atuação desta proteção não se restringirá apenas a falhas no transformador e sim no conjunto transformador + DLCC. Assim sendo, deve ser alertado a operação sobre esse detalhe e as inspeções que deverão ser realizadas no caso de atuação dessa proteção.

No caso de aplicação de DLCC que utilizem eletrônica de potência, primeiro devemos analisar em detalhe o funcionamento desse dispositivo e as suas consequências nos desempenhos das proteções. Os ajustes das proteções mencionados em I, II e III deverão ser verificados e pode até ser necessário que os fabricantes das proteções sejam envolvidos para verificar se a aplicação das proteções oferecidas atendem os requisitos de operação desses DLCC.

4.3 Influência no desempenho do sistema

O efeito físico da aplicação de um DLCC é a inserção de uma impedância em série com um circuito da rede e sua principal função é o gerenciamento da corrente de curto-circuito. Contudo, sua aplicação também pode causar impactos positivos e negativos no sistema, que podem ser intencionais ou não. Portanto, para cada aplicação específica deve-se avaliar a influência do limitador no desempenho do sistema. Nos itens que se seguem são abordados os principais aspectos que merecem ser levados em consideração.

4.3.1 Estabilidade transitória

A influência na estabilidade transitória do sistema pode ser considerada como um subproduto do DLCC, uma vez que sua instalação pode ser positiva ou negativa para a estabilidade. Dentre os fatores que influenciam diretamente no resultado da estabilidade, destacam-se os parâmetros do próprio DLCC, sua localização na rede e o local da falta. Para a análise do desempenho dinâmico do sistema devido à aplicação de um DLCC deve-se considerar a aplicação de curto-circuito trifásico e monofásico.

Dispositivos limitadores que apresentem um aumento da reatância série do circuito, em tese, contribuem para a redução da estabilidade do sistema. O tempo de recuperação do DLCC pode ser importante para a definição dos limites de estabilidade, quando inserido em circuitos radiais que conectam geração ao sistema, ou em interligações entre subsistemas. Em contrapartida, a utilização de alguns DLCCs, como por exemplo, os supercondutores do tipo indutivos, pode aumentar a estabilidade transitória em determinados casos.

Em relação à localização, deve ser avaliada a melhor alocação para que o equipamento favoreça a estabilidade do sistema. Normalmente, é indicado instalar o DLCC nas linhas de transmissão ou transformadores de potência, ao invés de

alocá-los nos ramais dos geradores.

4.3.2 Tensão de restabelecimento transitória (TRT)

Os limitadores de corrente de curto-circuito podem exercer influência na TRT de disjuntores, particularmente de disjuntores em série aos mesmos. Limitadores do tipo resistivo provocam maior amortecimento das oscilações transitórias devido ao chaveamento do circuito e, conseqüentemente, sua tendência é de suavizar a TRT. Limitadores do tipo indutivo podem ocasionar severas TRTs e por tal, é necessária uma detalhada investigação de sua influência através de estudos de transitórios eletromagnéticos (4)(5). Muitas vezes o recrudescimento da TRT devido a limitadores indutivos pode levar a ultrapassagem da TRT normalizada de disjuntores da subestação onde o dispositivo é adotado. Nestes casos, a adoção de medidas para a mitigação da TRT deve ser realizada (5), que pode ser a adoção de capacitâncias paralelas ao dispositivo, ou conectadas à terra, adoção de amortecimentos adicionais no circuito etc. É sempre aconselhável a realização de estudos de simulação transitória do DLCC, mesmo que ele não seja do tipo indutivo, com vistas a determinar o impacto no regime transitório da rede devido à sua atuação durante a ocorrência de um curto-circuito. Tal medida visa evitar surpresas que dificultem ou até inviabilizem a colocação em serviço do dispositivo selecionado.

4.3.3 Ferrorressonância

Ferrorressonância somente ocorre em sistemas com indutâncias não lineares que possam ficar em série a capacitâncias da rede. Geralmente, os DLCCs a base de reator de núcleo saturável é que teoricamente são mais vulneráveis a ocorrência deste fenômeno. A ferrorressonância pode ser transitória ou ocorrer em regime permanente e normalmente é acompanhada por sobretensões e harmônicos. Contudo, apenas o estudo caso a caso pode revelar se para determinada aplicação há o risco de ferrorressonância. Os estudos transitórios de TRT podem ser estendidos para a investigação da ferrorressonância, caso haja indícios de que a tecnologia adotada e a topologia da rede possam desenvolver este tipo de fenômeno.

4.3.4 Qualidade de Energia

A qualidade de energia elétrica (QEE) pode ser, embora em pequena escala, afetada pela operação de DLCC na rede. Dentre os fenômenos que podem resultar em algum impacto na qualidade da forma de onda de tensão destaca-se, essencialmente, a variação de tensão de curta duração e a distorção harmônica. Os requisitos mínimos desses fenômenos da QEE são estabelecidos no Submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede (6) e devem ser observados em quaisquer circunstâncias.

Em relação à variação de tensão de curta duração, o DLCC deve apresentar a

mínima impedância possível durante a operação normal, pois essa impedância influencia diretamente na regulação da tensão do sistema. O submódulo 2.8 define que a máxima variação de tensão de curta duração não pode exceder 0,1 pu, ou seja, 10%.

Já no tocante a distorção harmônica, durante a operação normal, o DLCC não deve fazer com que o nível de tensão individual de qualquer harmônica exceda o valor estabelecido no Submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede.

5 CONFIABILIDADE E DISPONIBILIDADE

Questões ligadas à confiabilidade e à disponibilidade dos DLCCs também devem ser levantadas e analisadas com cuidado. Os dispositivos limitadores devem estar aptos a operar sem falhas durante o período de tempo e sob condições específicas, e ainda se manter a disposição para o desempenho de sua função nominal no período que foi designado para tal. Esses pontos, entretanto, não são tão fáceis de serem avaliados quando a experiência de uso dos DLCCs na rede é limitada ou inexistente. No caso dos dispositivos limitadores supercondutores, por exemplo, aspectos relacionados ao sistema de resfriamento devem ser considerados. Caso alguma falha nesse sistema ocorra (bombas, ventiladores, etc.), o que se deve fazer? Desligar o equipamento? A mesma pergunta vale caso seja necessário fazer uma reposição do nitrogênio líquido nas situações em que seu nível esteja baixo. Que tipo de manutenção pode ser feita com o equipamento em uso? Já no caso de dispositivos pirotécnicos, por exemplo, uma pergunta importante é em relação ao tempo que o equipamento deve ficar indisponível até a substituição do elemento fusível e da câmara do barramento de cobre sejam efetuadas? Esses e diversos outros pontos que impactam diretamente no grau de confiabilidade e disponibilidade dos dispositivos, devem ser levantados antes da aplicação dos mesmos na rede.

Essas questões tornam-se ainda mais relevantes já que as concessionárias de transmissão de energia elétrica devem atender ao que preconiza a Resolução Normativa ANEEL nº 270 de 26 de junho de 2007. A referida resolução estabelece as disposições relativas à qualidade do serviço público de transmissão de energia elétrica, associada à disponibilidade das instalações integrantes da Rede Básica. De acordo com esta REN, a cada indisponibilidade do equipamento aplica-se uma penalidade na forma de um desconto em sua receita anual permitida, denominada parcela variável (PV). Este fato reforça ainda mais a importância de ser ter conhecimento do grau de confiabilidade e disponibilidade dos DLCCs.

6 CONCLUSÃO

O crescimento do sistema elétrico brasileiro nos últimos anos é acompanhado pela elevação dos níveis de curto-circuito da rede e conseqüentemente, pela elevação das solicitações impostas aos equipamentos e instalações da rede. Em alguns casos, tal solicitação pode ultrapassar a capacidade nominal dos equipamentos em operação, causando a superação dos mesmos. Este contexto vem se repetindo mundialmente e por tal, tornou-se crescente a busca de soluções capazes de evitar a superação, dentre elas a utilização de DLCCs.

Atualmente existem DLCCs disponíveis no mercado para uso imediato, como por exemplo, os reatores limitadores de núcleo de ar e os dispositivos pirotécnicos, assim como outros que utilizam tecnologias emergentes e, portanto, ainda não tão disseminadas, como aqueles baseados na eletrônica de potência e na supercondutividade. Outras tecnologias foram citadas no presente trabalho, embora não exaustivamente.

Diante deste fato, faz-se necessária a análise detalhada da aplicação destes equipamentos, visando identificar as possíveis interações entre a rede e os DLCCs. Este trabalho teve, portanto, o objetivo de mostrar os principais aspectos que devem ser considerados quando da instalação de um DLCC. Foram abordadas questões relacionadas às condições de operação normal, em curto-circuito, assim como a recuperação do DLCC após sua atuação.

O trabalho apresentou as principais precauções que devem ser tomados em relação ao sistema de proteção no caso de aplicação de DLCC em série a linhas de transmissão, entre seguimentos de barras e em série com transformadores de potência.

A influência da aplicação destes dispositivos no desempenho do sistema também foi abordada. Ênfase foi dada aos aspectos de estabilidade transitória, tensão de restabelecimento transitória, ferrorresonância e qualidade de energia.

Destacou-se o problema da parcela variável (PV) a ser deduzida da receita da transmissora no caso da não prestação adequada do serviço público de transmissão. Reforçando por isso, a importância de se levantar aspectos ligados à confiabilidade e à disponibilidade dos DLCCs, particularmente das tecnologias emergentes.

Os pontos levantados neste documento são contribuições para que se possa definir um conjunto de requisitos mínimos a serem observados e considerados na aplicação de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito no sistema interligado.

- (1) Plano de Ampliações e Reforços na Rede Básica – período 2013-2015 – ONS RE 2.1-033/2012 – Agosto/2012.
- (2) Application and Feasibility of Fault Current Limiter in Power Systems – CIGRE Working Group A3.23 – Technical Brochure n° 497, Junho/2012.
- (3) A. M. Monteiro, Um Estudo de Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-Circuito com ênfase no IPC (Interphase Power Controller) – dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, em 2005.
- (4) Carvalho, A.C., Sinder, D., Muniz, M., Monteiro, A.M., Silva, B. A., Superação de Equipamentos de Alta Tensão: Critérios de Análise e Processo de Indicações de Substituições na Rede Básica e Demais Instalações da Transmissão, XIX SNPTEE, artigo SGE 97, Rio de Janeiro, outubro 2007.
- (5) Pereira, F.P, Sereno, M.G, Amon, J., Peralta, J.M, Fontes, M.A.P, Superação de Equipamentos – Alternativas das Transmissoras para Evitar a Substituição – Caso Furnas, XIX SNPTEE, artigo GSE-14, Rio de Janeiro, outubro 2007.
- (6) Procedimento de Rede – Submódulo 2.8, Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira, e de seus componentes – Revisão 2.0, data de vigência de 11/11/2011.

IX - CRITÉRIOS PARA SUPERAÇÃO DE PARA-RAIOS E TRANSFORMADORES DE ATERRAMENTO



IX - CRITÉRIOS PARA SUPERAÇÃO DE PARA-RAIOS E TRANSFORMADORES DE ATERRAMENTO

Revisões do relatório

Emissão Inicial 08/12/2009

seção	página(s)	descrição
-------	-----------	-----------

1 INTRODUÇÃO

A seguir são sumarizados os critérios de superação de para-raios e de transformadores de aterramento (TT), acordados pelos participantes do workshop realizado no ONS, em dezembro de 2009.

2 SUPERAÇÃO DE PARA-RAIOS:

De acordo com o critério proposto, os para-raios serão considerados superados por absorção de energia se:

- A expansão da rede vier impor aos para-raios, para alguma condição de manobra, uma absorção de energia superior à nominal do equipamento; ou
- Adoção pela operação do sistema, a partir de entendimentos entre os agentes de transmissão com o ONS, de nova condição de manobra, não contemplada originalmente na fase de projeto da instalação (p. ex. religamento tripolar) e que venha a superar a capacidade de absorção de energia do mesmo.

Quanto a para-raios convencionais de SiC (Carbureto de Silício), a superação da capacidade de absorção de energia para surtos de manobra é caracterizada apenas se houver a possibilidade de disparo destes para-raios provocado, como citado acima, pela expansão da rede ou por adoção de condição de manobra não prevista no projeto da linha.

3 SUPERAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE ATERRAMENTO (TT):

Os critérios de superação propostos para os transformadores de aterramento são:

- $X0/X1 \geq 10$; ou
- Sobretensão sustentada nas fases sãs $> 1,4$ pu.