



Diretrizes para a Elaboração de **Projetos Básicos** para Empreendimentos de **Transmissão**

Revisão 1

Estudos Elétricos,
Especificação das
Instalações,
de Equipamentos e de
Linhas de Transmissão



Operador Nacional
do Sistema Elétrico

Diretrizes para a Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão

**Estudos Elétricos, Especificação
das Instalações, de Equipamentos
e de Linhas de Transmissão**



Copyright © 2019 ONS

Todos os direitos reservados. A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação do copyright (Lei n 9.610/98)

Diretoria do ONS:

Diretor Geral: Luiz Carlos Ciocchi

Diretor de TI, Relacionamento com Agentes e Assuntos Regulatórios: Marcelo Prais

Diretor de Planejamento: Alexandre Nunes Zucarato

Diretor de Operação: Sinval Zaidan Gama

Diretor de Assuntos Corporativos: Jaconias de Aguiar

Redação original:

Antônio Carlos de Carvalho

Carlos Campinho

Delmo Correia

Hélio Pessoa de Oliveira Junior

Humberto Arakaki

José Augusto Martins Junior

Márcio Accioly Lins

Sérgio Cordeiro Sobral

Redação da Revisão 1

Adriano de Andrade Barbosa

Antonio Samuel Neto

Carlos Belmiro Campinho de Carvalho

Carlos Eduardo Monteiro Fernandes

Daniel Sinder

Dilton Serra Seca Vasconcelos Filho

Eduardo Henrique Mafra

Flavia Maria Cavalcanti Ferreira

Hélio Pessoa de Oliveira Junior

Luiz Filipe Alvarenga

Márcio Nunes Accioly Lins

Ricardo Antunes

Sérgio Cordeiro Sobral

Thiago Ferreira da Silva Costa

Projeto gráfico e editoração: Assessoria de Planejamento e Comunicação do Operador Nacional do Sistema Elétrico

Qualquer alteração é proibida sem autorização.

Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS

Rua Júlio do Carmo, 251 | Cidade Nova

Rio de Janeiro | RJ | 20211-160

www.ons.org.br

Esta publicação é fruto do amplo diálogo sobre o tema promovido em diversos seminários e reuniões – contribuição imprescindível à realização deste trabalho. O ONS agradece a todos que, direta ou indiretamente, participaram deste processo, como: Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), Empresa de Pesquisa Energética (EPE), transmissoras, empreendedores, consultores, centros de pesquisa e universidades.

| | |
|---|------------|
| 1. Introdução | 10 |
| 2. Objetivo | 12 |
| 3. O processo de Análise de Conformidade do Projeto Básico | 12 |
| 4. Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos..... | 14 |
| 4.1. Estudos Elétricos na Frequência Fundamental..... | 15 |
| 4.1.1. Aspectos Gerais | 15 |
| 4.1.2. Estudo de Fluxo de Potência | 24 |
| 4.1.3. Estudos de Energização de Linha de Transmissão | 25 |
| 4.1.4. Estudos de Rejeição de Carga | 26 |
| 4.1.5. Estudos de Curto-Circuito..... | 28 |
| 4.1.6. Geração de Equivalentes para Estudos de Manobra | 29 |
| 4.1.7. Estudos Dinâmicos | 30 |
| 4.1.8. Modelo do Relatório do Estudo Elétrico na Frequência Fundamental | 31 |
| 4.1.9. Estudos de Fluxo de Potência em Barramentos | 32 |
| 4.2. Estudos de Transitórios Eletromagnéticos | 36 |
| 4.2.1. Aspectos Gerais | 36 |
| 4.2.2. Abrangência | 38 |
| 4.2.3. Seccionamento de Linhas de Transmissão..... | 39 |
| 4.2.4. Disponibilização dos Casos de Simulação..... | 39 |
| 4.2.5. Modelagem da Rede | 40 |
| 4.2.6. Avaliação da Adequação da Compensação Shunt de Linhas de Transmissão | 51 |
| 4.2.7. Estudo de Energização de Linhas de Transmissão | 53 |
| 4.2.8. Estudo de Religamento Tripolar de Linhas de Transmissão | 56 |
| 4.2.9. Estudo de Rejeição de Carga | 59 |
| 4.2.10. Estudo de Religamento Monopolar de Linhas de Transmissão..... | 61 |
| 4.2.11. Estudo de Energização de Transformadores | 68 |
| 4.2.12. Estudo de Energização de Banco de Capacitores (BC) | 80 |
| 4.2.13. Estudo de Desenergização de Reatores e Reignição | 85 |
| 4.2.14. Estudo de Tensão de Restabelecimento Transitória | 87 |
| 4.2.15. Estudo de Assimetria das Correntes de Curto-Circuito | 96 |
| 4.2.16. Estudo das Tensões e Correntes Induzidas em Lâminas de Terra de Seccionadoras 98 | |
| 4.2.17. Estudo de Coordenação do Isolamento | 103 |
| 4.2.18. Estudos Associados à Compensação Estática Shunt (CER) | 109 |
| 4.2.19. Estudos Associados à Compensação Série..... | 124 |
| 4.2.20. Estudos relacionados a GIS (Gas Insulated Substation) - Sobretensões de Frequência Elevada | 130 |
| 4.3. Estudos Relacionados a Projetos HVDC | 133 |
| 4.3.1. Aspectos Gerais | 133 |

| | | |
|--------------|---|------------|
| 4.3.2. | Estudos para Concepção do Projeto e Definição de Características..... | 133 |
| 4.3.3. | Estudos Convencionais | 175 |
| 4.3.4. | Estudos para Avaliação do Desempenho Dinâmico do Projeto..... | 176 |
| 4.3.5. | Estudos para Comprovação de Premissas do Projeto e Avaliações Adicionais | 178 |
| 4.3.6. | Medições | 181 |
| 4.3.7. | Modelos de HVDC para Estudos Elétricos..... | 182 |
| 5. | Diretrizes para a Especificação da Instalação/Equipamentos..... | 183 |
| 5.1. | Aspectos Gerais | 183 |
| 5.1.1. | Tensão Nominal e Sobretensão Admissível..... | 186 |
| 5.1.2. | Nível de Isolamento dos Equipamentos..... | 187 |
| 5.1.3. | Corrente Nominal dos Equipamentos | 187 |
| 5.1.4. | Barramento das Subestações..... | 188 |
| 5.2. | Unidades Transformadoras de Potência..... | 189 |
| 5.3. | Reatores em Derivação | 194 |
| 5.4. | Banco de Capacitores em Derivação | 196 |
| 5.5. | Disjuntores..... | 198 |
| 5.6. | Secionadoras, Lâminas de Terra e Chaves de Aterramento | 202 |
| 5.7. | Para-raios..... | 204 |
| 5.8. | Transformadores de Corrente | 207 |
| 5.9. | Transformadores de Potencial..... | 209 |
| 5.10. | Compensação Estática Shunt (CER)..... | 210 |
| 5.11. | Compensação Série (CS) | 213 |
| 6. | Referências para Estudos e Equipamentos..... | 216 |
| 7. | Diretrizes e Critérios para Linha de Transmissão | 218 |
| 7.1. | Definição do Traçado Preliminar | 218 |
| 7.2. | Levantamento dos Parâmetros Meteorológicos e Ambientais..... | 219 |
| 7.2.1. | Temperatura Ambiente | 219 |
| 7.2.2. | Velocidade de Vento..... | 223 |
| 7.2.3. | Umidade Relativa do Ar e Pressão Atmosférica..... | 225 |
| 7.2.4. | Descargas Atmosféricas | 225 |
| 7.3. | Escolha do Condutor..... | 225 |
| 7.4. | Cálculo das Capacidades Operativas..... | 226 |
| 7.5. | Cálculo da Capacidade de Corrente dos Cabos Para-raios e Definição dos Pontos de Troca de Bitola..... | 228 |
| 7.5.1. | Cálculo da Capacidade de Corrente dos Cabos Para-raios de Nova Linha de Transmissão..... | 230 |
| 7.5.2. | Verificação das Capacidades de Corrente dos Cabos Para-raios Existentes de Linha de Transmissão Seccionada..... | 231 |
| 7.6. | Avaliação das Perdas de Potência Ativa no Condutor e nos Cabos Para-raios | 232 |

| | | |
|--------------|---|------------|
| 7.6.1. | Perda de Potência Ativa no Condutor | 232 |
| 7.6.2. | Perda de Potência Ativa nos Cabos Para-raios | 232 |
| 7.7. | <i>Avaliação dos Desequilíbrios de Tensão e Transposição das Fases</i> | 232 |
| 7.8. | <i>Estudo de Coordenação do Isolamento e Definição dos Espaçamentos Fase-terra e entre Fases no Topo da Estrutura</i> | 233 |
| 7.8.1. | Determinação do Ângulo de Balanço da Cadeia de Isoladores..... | 233 |
| 7.8.2. | Desempenho da LT à Tensão na Frequência Nominal do Sistema..... | 234 |
| 7.8.3. | Desempenho da LT às Sobretensões de Manobra | 235 |
| 7.8.4. | Desempenho da LT às Descargas Atmosféricas | 236 |
| 7.9. | <i>Cálculo dos Parâmetros Elétricos</i> | 237 |
| 7.10. | <i>Determinação da Largura da Faixa de Passagem</i> | 237 |
| 7.11. | <i>Cálculo das Distâncias de Segurança Condutor ao Solo e Condutor aos Obstáculos</i> 238 | |
| 7.12. | <i>Cálculo Mecânico dos Cabos</i> | 239 |
| 7.12.1. | Temperaturas Ambientes Adotadas nas Avaliações de Desempenho Mecânico ... | 239 |
| 7.12.2. | Velocidades de Vento de Projeto | 239 |
| 7.12.3. | Condições de Governo dos Cabos | 239 |
| 7.13. | <i>Definição da Série de Estruturas, Hipóteses de Carregamento e Árvores de Carga</i> 240 | |
| 7.14. | <i>Definição do Sistema de Aterramento das Estruturas</i> | 241 |
| 7.15. | <i>Definição das Fundações Típicas</i> | 241 |
| 8. | Referências para Linhas de Transmissão | 242 |
| 9. | Padronização de Relatórios de Estudos | 243 |
| 9.1. | <i>Frequência Fundamental</i> | 243 |
| 9.2. | <i>Fluxo de Potência em Barramentos</i> | 253 |
| 9.3. | <i>Cálculo de Parâmetros de LT</i> | 255 |
| 9.3.1. | Rotina Line Constants - ATP - Representação para Matriz de Transformação Modal 255 | |
| 9.4. | <i>Transitórios Eletromagnéticos de Energização de Linhas, Religamento Tripolar e Rejeição de Carga</i> | 260 |
| 9.5. | <i>Transitórios Eletromagnéticos de Religamento Monopolar de Linhas de Transmissão.</i> | 269 |
| 9.6. | <i>Transitórios Eletromagnéticos de Energização de Transformadores</i> | 275 |
| 9.7. | <i>TRT, Abertura de Linhas de Transmissão em Vazio, Manobra de Lâminas de Terra de Seccionadoras de Aterramento e Assimetria das Correntes de Curto-Circuito</i> | 280 |
| 9.8. | <i>Coordenação do Isolamento</i> | 286 |
| 10. | Planilhas de Dados Técnicos | 289 |

1.Introdução

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) tem como uma de suas atribuições a participação no processo de definição e de integração de novas instalações à Rede Básica. Por meio do Plano de Ampliações e Reforços (PAR), o ONS incorpora a visão da operação do sistema nas soluções propostas pelo planejamento, atribuição da Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Como Poder Concedente, o Ministério de Minas e Energia (MME) compatibiliza as obras propostas pela EPE e ONS, definindo o rol de empreendimentos que irão compor os leilões de transmissão. À Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) cabe a coordenação e realização do processo do leilão.

Na fase de detalhamento das instalações a serem leiloadas, o ONS colabora na definição dos requisitos técnicos mínimos, em conformidade com os Procedimentos de Rede, visando assegurar a confiabilidade e a flexibilidade operativa do Sistema Interligado Nacional (SIN), para a elaboração dos Anexos Técnicos dos leilões de Transmissão, atuando conjuntamente com a ANEEL.

Uma vez realizado o leilão de transmissão, o Agente concessionário possui um tempo, definido em contrato, para a apresentação da versão inicial do projeto básico da nova instalação de transmissão. O objetivo do projeto básico é a apresentação das características técnicas e das premissas de engenharia das instalações, assim como das especificações básicas dos equipamentos de transmissão, proteção, controle e comunicação que irão compor a nova instalação.

Conforme também previsto nos Procedimentos de Rede, compete ao ONS emitir parecer sobre a conformidade do projeto básico do empreendimento licitado em relação aos Procedimentos de Rede e aos requisitos técnicos do edital do leilão.

Ao final do processo de análise do Projeto Básico é emitido pelo ONS o Certificado de Conformidade do Projeto Básico (CCPB). Tal documento é um dos itens necessários para subsidiar a aprovação do Projeto Básico pela ANEEL, o que por sua vez é um dos requisitos necessários para a emissão do Termo de Liberação para Testes (TLT) do empreendimento, sem o qual não é possível iniciar o processo de sua entrada em operação.

O CCPB se refere ao empreendimento como um todo, ou seja, se aplica a todas as instalações envolvidas na análise, não existindo a figura de uma conformidade parcial. Não é possível, portanto, dentro do processo regular de análise, destacar uma parte da(s) instalação(ões) de um lote para a entrada em operação sem que todo o empreendimento tenha sido classificado como conforme.

Ressalta-se que a emissão desse certificado não exime a Transmissora da responsabilidade objetiva pelo projeto do empreendimento, não cabendo ao ONS exercer atribuições que competem eminentemente à engenharia do proprietário.

Cerca de 6 anos após a emissão da primeira versão deste documento – DIRETRIZES PARA A ELABORAÇÃO DE PROJETOS BÁSICOS DE TRANSMISSÃO, é notória a evolução do Sistema Interligado Nacional (SIN) tanto em termos de expansão sistêmica, quanto de inovações tecnológicas. A incorporação de novos equipamentos FACTS (*Flexible AC Transmission System*), novas instalações de corrente contínua, a aplicação crescente de subestações isoladas a gás (SF₆ e outros) e de módulos de manobra isolados a gás em subestações convencionais (subestações híbridas), bem como a utilização de linhas de potência natural elevada (até 1650 MVA), trouxeram novos desafios a serem enfrentados pela engenharia nacional e, neste contexto, o ONS entende ser oportuno apresentar uma nova revisão deste documento contemplando o estado da arte e incorporando a experiência adquirida nas análises e pesquisas realizadas neste período.

2. Objetivo

O objetivo deste documento é apresentar diretrizes para a elaboração dos projetos básicos de empreendimentos da transmissão. A sua organização levou em conta o tipo de segmentação dos tópicos normalmente aplicáveis a um projeto básico.

De forma geral, um projeto básico pode subdividir-se em quatro grupos principais de documentos:

- Estudos elétricos (a frequência fundamental e de transitórios eletromagnéticos).
- Especificação de subestações e equipamentos (arranjos, desenhos, barramentos e equipamentos principais).
- Estudos e dimensionamento básico de linhas de transmissão.
- Aspectos operacionais (Supervisão e Controle, Telecomunicação e Proteção).

O presente documento se limita a abordar os três primeiros grupos, ou seja, estudos, instalações/equipamentos e linhas de transmissão.

3.O processo de Análise de Conformidade do Projeto Básico

Uma vez recebida a documentação relativa à primeira versão do Projeto Básico, com o material protocolado na ANEEL e no ONS, o(s) empreendimento(s) passa(m) a integrar a programação de análise de projetos que inclui todas as instalações dos lotes e leilões realizados.

Assim que a análise for concluída, o ONS emite um Parecer de Análise de Conformidade do Projeto Básico, em que solicita à Transmissora, para demonstração do atendimento aos comentários feitos pelo ONS, um relatório “de respostas” resumindo as alterações realizadas em cada um dos documentos revisados, facilitando um entendimento mais rápido do projeto revisado.

O atendimento integral aos requisitos estabelecidos nos Anexos Técnicos dos Editais e nos Procedimentos de Rede requer ajustes e correções no Projeto Básico que demanda novas revisões da documentação. Com isso, o ONS tem observado que o número médio de revisões dos Projetos Básicos vem se mantendo elevado: em torno de 3 além da emissão inicial. Isto envolve retrabalho tanto da Transmissora quanto do ONS e da ANEEL, retardando o processo de aprovação da conformidade do projeto. Algumas das questões identificadas durante as análises são recorrentes. Exemplo típico, entre diversos outros, é a inadequada coordenação entre o projeto da linha de transmissão com a especificação dos equipamentos e os estudos de transitórios eletromagnéticos.

Desta forma, este documento procura expor, de forma clara e com nível de detalhamento necessário, o que, em linhas gerais, deve constar nos Projetos Básicos das novas instalações de Transmissão.

Não é seu propósito substituir livros texto nem guias de elaboração de projeto. Referências técnicas são citadas ao longo do texto e podem servir de base para um maior detalhamento do assunto abordado.

4. Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos

Instalações oriundas de leilões de transmissão são o objeto principal dos estudos elétricos de projeto básico. Entretanto, em situações especiais, a ANEEL encaminha para análise do ONS projetos básicos de empreendimentos que são objeto de resoluções autorizativas. As diretrizes e os critérios descritos neste documento se aplicam a projetos básicos de empreendimentos licitados ou autorizados.

Ao longo deste documento, são feitas menções aos seguintes submódulos dos Procedimentos de Rede, vigentes no 2º semestre de 2022:

- ✓ Submódulo 2.3 – Premissas, critérios e metodologia para estudos elétricos;
- ✓ Submódulo 2.6 – Requisitos mínimos para subestações e seus equipamentos;
- ✓ Submódulo 2.7 – Requisitos mínimos para linhas de transmissão;
- ✓ Submódulo 2.8 – Requisitos mínimos para elos em corrente contínua;
- ✓ Submódulo 2.9 – Requisitos mínimos de qualidade de energia elétrica para acesso ou integração à Rede Básica.

Os estudos elétricos que compõem o Projeto Básico das subestações e equipamentos são subdivididos em estudos na frequência fundamental e estudos de transitórios eletromagnéticos.

Os estudos de transitórios eletromagnéticos trabalham com versões reduzidas do SIN, onde uma parte da rede permanece íntegra e outra parte é representada por equivalentes.

Duas diretrizes básicas devem ser observadas na apresentação dos relatórios de estudos elétricos que irão compor o Projeto Básico:

- ✓ Todo relatório que, em função do parecer do ONS, sofre uma revisão de conteúdo, ao ser reapresentado para análise deverá destacar visualmente em seu texto as alterações em relação à versão previamente encaminhada (vide item 9);
- ✓ Todo relatório de estudos de transitórios eletromagnéticos deverá conter um diagrama unifilar da rede simulada, claro e em escala legível, contendo todos os equivalentes de rede, usinas, geradoras, cargas, transformadores de 2 ou 3 enrolamentos, reatores (linha e barra), reatores de neutro, bancos de capacitores etc. Se necessário, o diagrama pode ser subdividido em várias folhas, com indicação via desenho das passagens de uma folha para outra. Nos casos em que houver necessidade de redes retidas e/ou equivalentes diferentes entre estudos, diagramas unificares específicos devem ser apresentados em cada relatório.

Essas diretrizes têm por objetivo viabilizar um processo de análise mais eficiente dos estudos apresentados e o seu não cumprimento por parte da Transmissora é motivo suficiente para que a análise dos relatórios dos estudos do Projeto Básico seja interrompida, com comunicação ao agente de necessidade de complementação das informações. Nesses casos, a análise completa dos relatórios será reiniciada assim que o ONS receber os relatórios com revisões destacadas e/ou o diagrama da rede, em avaliação, corretamente representada.

4.1. Estudos Elétricos na Frequência Fundamental

Os estudos na frequência fundamental objetivam demonstrar, sob o aspecto do desempenho em 60 Hz, a conformidade do projeto básico do empreendimento aos requisitos técnicos estabelecidos nos anexos técnicos geral e específico do lote do leilão de transmissão ao qual o empreendimento em análise está associado e aos Procedimentos de Rede.

Nos casos de autorizações, na ausência de um documento técnico de outorga, o ONS avaliará a conformidade das instalações aos requisitos estabelecidos nos Procedimentos de Rede.

4.1.1. Aspectos Gerais

4.1.1.1. Configuração da Rede e Base de Dados

O desempenho do sistema elétrico e da instalação devem ser estudados considerando-se o ano previsto para a entrada em operação do empreendimento. Esta condição deverá refletir a topologia real existente na época do comissionamento das novas instalações e pode diferir daquela considerada pelos estudos de planejamento.

Também devem ser efetuadas avaliações para o horizonte futuro, em função da evolução da configuração do sistema, levando-se em conta a existência do período de concessão.

Na preparação das bases de dados para os estudos na frequência fundamental, é necessário observar os seguintes aspectos associados aos componentes do empreendimento:

- Para as linhas de transmissão, os parâmetros elétricos devem corresponder aos apresentados nos estudos de projeto básico das linhas de transmissão, e devem estar de acordo com os requisitos estabelecidos no anexo técnico do edital;
- Para os equipamentos (transformadores, reatores, banco de capacitores, compensação estática shunt, compensação série de linhas de transmissão etc), os parâmetros elétricos e ajustes de componentes devem atender aos requisitos estabelecidos no anexo técnico do edital.

Na fase de projeto básico, a utilização de valores típicos é admissível para os novos equipamentos, caso não estejam ainda disponíveis os dados dos fabricantes. Todavia, deve-se tomar como DIRETRIZES PARA A ELABORAÇÃO DE PROJETOS BÁSICOS DE TRANSMISSÃO – REVISÃO 1

referência os dados de equipamentos de mesmo porte, existentes em instalações similares já em operação no SIN.

Devem ser utilizadas as seguintes bases de dados para as simulações na frequência fundamental, em correspondência com os horizontes a serem avaliados e apresentados no estudo:

- Base de dados do ONS – PAR, para as análises referentes ao ano de entrada em operação do empreendimento, com o horizonte de 5 anos;
- Base de dados da EPE – PD (Plano Decenal), para as análises relativas ao horizonte superior a 5 anos.

Tendo em vista que o horizonte do PAR é de 5 anos, a maior parte dos novos empreendimentos de transmissão em corrente alternada está dentro ou, no máximo, 1 ano à frente do horizonte do ONS.

Nestes casos, para as análises relativas ao horizonte de entrada em operação do empreendimento, deve ser dada prioridade aos casos de referência do ONS, fazendo-se a evolução desta base incorporando as novas obras, no que se fizer necessário, até a data de entrada em operação prevista no edital de leilão, o que vale para as bases de dados de fluxo de potência e de curto-circuito. Não cabe, na etapa de projeto básico, usar os dados dos estudos de planejamento que definiram as ampliações (R1, R2).

Caso o cronograma da Transmissora antecipe sua entrada em operação em relação à data contratual, a topologia resultante dessa antecipação deve ser considerada nos estudos de Projeto Básico. Nesses casos, essa antecipação deverá ser fornecida ao sistema de acompanhamento dos empreendimentos de transmissão da ANEEL, denominado SIGET.

4.1.1.2. Tipos de Estudos – Documentos de Referência e Ferramentas de Simulação Aplicáveis

Os documentos relativos ao Projeto Básico, independentemente da configuração proposta, devem apresentar um número mínimo de estudos, englobando os seguintes tipos:

- Fluxo de potência;
- Curto-circuito;
- Rejeição de carga;
- Energização de linha de transmissão;
- Estudos de estabilidade eletromecânica;
- Fluxo de potência nos barramentos das subestações.

Em função das características do empreendimento, pode ser que determinado tipo de estudo não se aplique, sendo, portanto, dispensada a sua apresentação.

Por exemplo, não são solicitados, usualmente, estudos de rejeição de carga e energização na frequência fundamental para linhas de transmissão com comprimentos inferiores a: 100 km (230 kV), 70 km (345 kV), 50 km (440/500/525 kV).

No anexo técnico do edital existe um item dedicado à demonstração da conformidade dos equipamentos, no qual são relacionados os tipos de estudos que, obrigatoriamente, devem ser apresentados pela TRANSMISSORA.

Para a elaboração dos estudos na frequência fundamental, consideram-se indispensáveis as orientações e diretrizes contidas nos seguintes documentos:

- Anexo Técnico Geral do Edital de Leilão da Aneel e Anexo Técnico Específico do correspondente Lote do Leilão de Transmissão;
- Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede, que contém as premissas e os critérios para estudos elétricos, bem como a sua metodologia;
- Relatório R1 da EPE – Estudos para a Licitação da Expansão da Transmissão – Análise técnico-econômica das alternativas;
- Relatório R2 da EPE – Detalhamento da Alternativa de Referência;
- Relatório R4 da EPE – Caracterização das Instalações Existentes;
- Plano de Ampliações e Reforços vigente à época da realização do leilão.

Visando garantir a reprodutibilidade dos estudos, as ferramentas de simulação para a sua realização devem ser aquelas de uso oficial no SIN, ou seja: programas ANAREDE, ANATEM, ANATO e ANAFAS do CEPEL.

4.1.1.3. Proposta de solução alternativa à referência

O Anexo Técnico estabelece uma alternativa de referência, baseada nos estudos técnico-econômicos da EPE (R1 e R2). Entretanto, de modo geral, ele permite que a Transmissora concessionária do empreendimento proponha uma solução técnica alternativa, respeitando as condições e restrições devidamente descritas no Anexo Técnico, dentre as quais cita-se notadamente que a proposta apresente desempenho equivalente ou superior à alternativa de referência.

Citamos abaixo alguns exemplos extraídos de situações anteriores:

- substituição de uma subestação isolada a ar por uma subestação isolada a gás SF-6, com arranjo alternativo;

- substituição de um cabo subterrâneo/submarino com área condutora de cobre por outro com área condutora de alumínio;
- substituição de transformadores por autotransformadores e vice-versa;
- substituição de unidades trifásicas por monofásicas e vice-versa;
- especificação de faixas de tapes diferentes das estabelecidas.

Nesses casos, a Transmissora deve encaminhar, já na primeira versão de seu projeto básico, a sua proposição, pois ela fica sujeita a aceitação com base na comprovação por parte da Transmissora da equivalência técnica da proposta alternativa em relação à referência do Anexo Técnico.

Devem ser apresentados estudos comparativos pela Transmissora e, para isso, tanto a referência quanto a alternativa devem ser simuladas, com os parâmetros atualizados do projeto, do PAR e da EPE.

A aceitação final caberá à ANEEL, considerando o parecer do ONS depois de avaliar a proposição de solução alternativa à referência.

Para uma alteração de escopo na etapa de projeto básico, a equivalência técnica deve ser comprovada de forma apurada. Os fluxos de potência considerados pela EPE são, de uma forma geral, valores médios. Os casos operativos (PAR) abordam uma maior variedade de casos, e suas premissas levam a situações mais críticas. O horizonte de 5 anos do PAR fornece uma boa diversidade de cenários para se avaliar a alternativa.

A análise de equivalência técnica entre a solução de referência e a proposta alternativa deve comprovar que a solução alternativa oferece um desempenho sistêmico em regime permanente e dinâmico frente a perturbações externas ou de variações de topologia tão ou mais estáveis e robustos quanto à referência. A aquisição de equipamentos especiais, antecipação da troca de equipamentos existentes ou incorporação de equipamentos adicionais aos licitados, deverá ser submetida à ANEEL e, não havendo determinação contrária, correrão por conta da Transmissora proponente.

Do ponto de vista de confiabilidade, os equipamentos, os arranjos de barramentos e linhas de transmissão também deverão apresentar patamares equivalentes ou superiores à alternativa de referência. Linhas de transmissão concebidas pelo edital como circuitos simples não serão aceitas em circuitos duplos ou com compartilhamento de torres, salvo quando explicitamente permitido no edital.

4.1.1.4. Nível de Compensação Shunt de Linhas de Alta Tensão

Com o crescente grau de interconexão entre barras de mesma tensão (sistemas predominantemente malhados), se torna cada vez mais difícil direcionar o fluxo de potência na quantidade desejada pelos

novos troncos idealizados nos estudos de planejamento. A solução adotada para aumentar o fluxo nesses troncos tem sido aumentar a potência natural ou *Surge Impedance Loading* (SIL) das linhas de transmissão envolvidas.

Os projetos de referência de linhas de transmissão adotados para a expansão do SIN nos estudos de planejamento, têm evoluído ao longo dos últimos anos, no sentido da adoção de estruturas mais compactas, para todos os níveis de tensão, com destaque para a rede de 500 kV.

Atualmente, têm sido planejadas séries de estruturas de 500 kV com SIL elevado de aproximadamente 1.670 MW para circuito simples e 1.200 MW para circuitos duplos. Tais valores estão necessariamente associados a menores distâncias entre as fases e/ou circuitos, o que eleva o acoplamento entre os condutores.

Em função do aumento do acoplamento, que dificulta a extinção do arco e o consequente religamento monopolar, e que pode trazer impactos à magnitude da tensão na fase aberta (quando da ativação do religamento monopolar, por exemplo), pode vir a ser necessário uma alteração no nível de compensação shunt da linha, para níveis mais baixos que os usuais, deslocando parte da compensação fixa na linha para a barra, de forma manobrável.

Esse movimento de transferência da compensação shunt da linha para a barra encontra um limite na possibilidade de energização da linha com sucesso e essa questão é tanto mais crítica quanto maior o SIL e quanto maior o comprimento do trecho estudado. A tensão na extremidade da linha manobrada não deve exceder os limites estabelecidos nos Procedimentos de Rede, em vazio, por uma hora, mesmo com tensão máxima a montante da manobra.

Da mesma forma, com linhas longas e alto fluxo nas linhas rejeitadas, e considerando desconectados os recursos de controle de tensão locais (reatores manobráveis), os equipamentos devem ser capazes de suportar as sobretensões advindas da rejeição de carga.

Nas avaliações quanto ao nível da compensação, deve-se levar em conta que a frequência pode variar entre 56 e 66 Hz, e que existe a possibilidade de ocorrer ressonância nesta faixa, o que deve ser evitado, pois pode resultar em sobretensões significativas na fase aberta, após o defeito. Nesse ponto, um contato efetivo entre as equipes que executam o projeto de linhas e aquelas que avaliam as manobras é muito importante para o desenrolar com sucesso do projeto básico. A equipe que trata dos estudos em regime permanente deve ser igualmente envolvida, pois soluções podem, no limite, vir a alterar o nível de compensação das linhas propostas nos estudos de planejamento.

Por outro lado, o crescente número de seccionamentos adotados como parte das soluções de planejamento tem levado a situações de sobrecompensação dos trechos de linha resultantes dos seccionamentos, o que é indesejável. A sobrecompensação pode inviabilizar religamentos, uma vez

que, por vezes, implica no aparecimento de zeros atrasados (atraso na passagem pelo zero da corrente a ser interrompida pelo disjuntor), podendo prejudicar a interrupção da corrente de falta.

A solução mais usual nestes casos tem sido realocar reatores de linha para a barra da subestação adjacente ou eletricamente próxima, onde operaria como compensação manobrável, solução que depende de espaço disponível na subestação. O Projeto Básico deve identificar claramente essas questões.

Portanto, os estudos de 60 Hz do Projeto Básico necessitam, em primeiro lugar, validar a solução proposta nos estudos de planejamento, no que diz respeito ao grau de compensação shunt das linhas, antes e depois dos seccionamentos, quando houver.

4.1.1.5. Descrição das bases de dados de curto-circuito e fluxo de potência disponíveis

Do ponto de vista do empreendimento, são válidas para os estudos elétricos do Projeto Básico as bases de dados vigentes na data em que o leilão foi realizado, ou posteriores.

a) Base de dados EPE

A EPE disponibiliza, anualmente, os casos de referência do Plano Decenal (PDE) para dois cenários de intercâmbio (Norte Exportador e Norte Importador).

A base de dados de curto-circuito da EPE engloba todos os anos da expansão e apresenta duas situações: curto-circuito máximo com todas as máquinas existentes incluídas e outra denominada curto-circuito mínimo, com uma máquina por usina.

Há que se tomar cuidado com a denominação e com a aplicação desses casos nas situações específicas do projeto básico de cada empreendimento, pois a utilização da base de dados de curto mínimo não garante necessariamente que o curto seja mínimo no ponto de manobra.

b) Base de dados ONS:

O ONS disponibiliza, anualmente, os casos de referência do PAR, que procuram refletir as situações mais prováveis da operação futura do SIN, em diferentes sazonalidades, e nos cenários de carga pesada, média e leve.

São realizadas no PAR as análises das interligações entre os subsistemas, que consiste em identificar os limites de intercâmbio entre as regiões por razões elétricas, em que se avalia o comportamento em regime permanente e dinâmico.

As bases de dados de curto-circuito do ONS refletem uma situação hipotética e conservativa onde todas as máquinas do SIN estão inseridas. Trata-se, portanto, de níveis máximos de curto-circuito e não correspondem aos fluxos de potência de referência. Para diversas análises, é necessário ajustar

a base dados de curto-circuito para a configuração de nível mínimo, devendo o projetista ajustar os casos de curto-circuito reduzindo o número de máquinas por usina para uma configuração correspondente à geração mínima do caso de carga leve do PAR.

c) Considerações finais – Escolha de casos

Como se pode depreender da descrição acima, os casos disponíveis e mesmo aqueles que podem ser obtidos sob demanda, sejam eles do planejamento ou da operação, vão necessitar de desenvolvimento e ajustes particulares próprios dentro do âmbito do projeto básico, para que se atinja o objetivo de identificar as situações mais severas para serem simuladas nos estudos de regime permanente (60 Hz), em particular nas situações de energização e de rejeição de carga.

Nessas situações, é necessário garantir que no ponto de manobra (energização ou ponto sobre o qual ocorre a rejeição) a potência de curto-circuito seja a menor possível. Ao contrário do que normalmente se considera, simular as manobras a partir de um caso de carga leve não garante que a situação mais severa será considerada.

A degradação mais acentuada do nível de curto-circuito local pode ser consequente da deterioração da rede a montante, afastando eletricamente as gerações do ponto avaliado, bem como pode ser obtido desligando-se, por exemplo, máquinas de usinas hidráulicas e/ou térmicas eletricamente próximas ao ponto de interesse:

- Nos casos de rejeição de carga, onde é fundamental simular fluxos de potência elevados, deve-se buscar casos com a geração remota, associada aos menores níveis de curto-circuito, porém suficientemente alta para a manutenção de fluxos elevados. Não se trata necessariamente de um caso de carga pesada.
- Por outro lado, para os casos de superação de equipamentos (curto-circuito) se aplica o despacho de todas as máquinas existentes e futuras, especialmente no entorno do local avaliado.
- Quando o foco do interesse se situa eletricamente próximo a interligações regionais, o sentido do intercâmbio e seu montante pode influenciar as possibilidades de despacho, o que pode induzir a escolha de um cenário em detrimento de outro.

4.1.1.6. Discussão de Critérios – Energização e Rejeição de Carga a 60 Hz

a) Variação de Tensão superior a 5% após manobra:

Consta do submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede o seguinte requisito:

5.3.5.5 Em estudos para dimensionamento de equipamentos de compensação reativa, o chaveamento de reatores ou capacitores não deve provocar variações de tensão superiores a 5% da tensão nominal de operação. Analogamente, a variação de tensão entre a condição inicial e

final decorrente de manobras (energização e desenergização de linhas de transmissão, transformadores, reatores, capacitores, etc.) deve ser limitada a 5% da tensão nominal de operação.

[...]

8.6.8 Os valores máximos de tensão admissíveis em estudos de energização a 60 Hz de linhas de transmissão devem ser fornecidos pelos agentes. Na ausência desses valores:

(a) os níveis de tensão em regime permanente no terminal emissor antes e depois da energização

Tabela 1 – Tensões entre fases admissíveis a 60Hz

| Tensão nominal de operação ⁽¹⁾ | Condição operativa normal | | Condição operativa de emergência | |
|---|---------------------------|---------------------|----------------------------------|---------------------|
| | (kV) | (pu) ⁽²⁾ | (kV) | (pu) ⁽²⁾ |
| < 230 | — | 0,95 a 1,05 | — | 0,90 a 1,05 |
| 230 | 218 a 242 | 0,95 a 1,05 | 207 a 242 | 0,90 a 1,05 |
| 345 | 328 a 362 | 0,95 a 1,05 | 311 a 362 | 0,90 a 1,05 |
| 440 | 418 a 460 | 0,95 a 1,046 | 396 a 460 | 0,90 a 1,046 |
| 500 | 500 a 550 | 1,00 a 1,10 | 475 a 550 | 0,95 a 1,10 |
| 525 | 500 a 550 | 0,95 a 1,05 | 475 a 550 | 0,90 a 1,05 |
| 765 | 690 a 800 | 0,90 a 1,046 | 690 a 800 | 0,90 a 1,046 |

(1) Valor eficaz de tensão pelo qual o sistema é designado.

(2) Valores em pu tendo como base a tensão nominal de operação.

não devem exceder os valores máximos apresentados na Tabela 1 deste submódulo;

A variação de tensão estática estabelecida em regime permanente, nessas manobras, pode ser aproximada por

$$\Delta V(\%) = \text{Mvar manobrado} / \text{SCC}_{\text{mínimo}} \text{ (MVA)}$$

Entende-se que o requisito estabelecido no item 5.3.5.5 acima reproduzido tem como principal objetivo a limitação da modularização da potência reativa dos bancos de reatores e capacitores.

A energização de bancos de capacitores/reatores de potência muito elevada causa uma perturbação no sistema a cada manobra, podendo causar variações bruscas de tensão que resultem no desligamento de usinas ou cargas mais sensíveis ou em restrições operativas que evitem esses problemas.

Quanto ao critério de variação máxima de tensão (antes/após a manobra) de 5%, temos algumas observações:

- Os bancos de reatores e capacitores são importantes recursos de controle de tensão à disposição da operação do sistema, devendo estar disponíveis para manobra sempre que necessário. Por isso, tendem a ser manobrados com frequência, muitas vezes diária.

- Já as linhas de transmissão e transformadores são instalações que, quando desenergizadas, degradam a confiabilidade do suprimento e, portanto, não devem ser submetidos a um grande número de manobras.

Os critérios de variação máxima de 5% e de máximo nível de tensão após a manobra, quando aplicados a linhas de transmissão, têm sido, em muitos casos, de difícil atingimento, especialmente para linhas longas, de SIL elevado, pouco compensadas. O atingimento fica ainda mais dificultado quando se pretende energizar a linha com tensão pré-manobra elevada nos terminais. Nessas situações específicas, investigações mais abrangentes são necessárias,

Tais situações devem ser objeto dos estudos de energização e de rejeição de carga do projeto básico. Linhas muito extensas conectadas de forma radial com baixa potência de curto a montante, podem também ocasionar sensíveis elevações de tensão após rejeição de carga.

Estes requisitos têm impacto na elaboração, análise e conclusões dos estudos de energização e rejeição de carga de linhas de transmissão na frequência fundamental.

b) Cuidados com a escolha dos casos críticos para a energização:

Para a energização das linhas de transmissão, deve-se procurar a configuração de menor potência de curto-circuito no ponto de manobra. Em outras palavras, sempre que possível, geração remota, com o menor número de máquinas ligadas.

Essa situação não é garantida pela simples utilização de um caso de carga leve da EPE ou do ONS, os quais geralmente não representam as situações mais críticas para a energização de linhas de transmissão. A partir de um caso de referência escolhido como bom ponto de partida, é necessária uma preparação prévia por parte do projetista, para que a simulação seja realizada considerando pontos de operação que reflitam as situações mais críticas possíveis.

Adicionalmente, é importante mencionar que, nos processos de energização de linhas de transmissão, restrições operativas relacionadas à imposição de limites para as tensões pré-manobra podem fragilizar a confiabilidade do sistema em função do tempo necessário para efetivação da manobra.

c) Cuidados com a escolha dos casos críticos para a rejeição de carga:

Os casos de rejeição de carga também devem buscar situações com geração remota (baixa potência de curto-circuito no local de manobra), embora com fluxos mantidos elevados.

Com relação aos reatores fixos de linha, definidos em estudos de rejeição de carga para limitar a elevação de tensão pós rejeição, há uma tendência crescente de dificuldades em termos de controle de tensão por parte da operação do sistema, em função dos comprimentos cada vez mais elevados

dessas linhas, dos valores de SIL cada vez mais altos e da necessidade de ajustar a compensação shunt para evitar ressonâncias.

Por fim, há necessidade tanto nos casos de energização quanto de rejeição de carga de realizar simulações dinâmicas, de modo que a identificar as maiores sobretensões dinâmicas decorrentes das manobras.

4.1.2. Estudo de Fluxo de Potência

O estudo de fluxo de potência deve analisar as condições da rede, em termos de carregamentos, níveis de tensão e faixa de derivação dos comutadores dos transformadores.

As análises de fluxo de potência devem considerar as condições de carga, cenários de intercâmbios e despachos de geração os mais críticos possíveis, sob os aspectos do controle da tensão e da imposição de carregamentos nos componentes da rede.

Deve-se priorizar a utilização dos casos do PAR, principalmente para estudos correspondentes à data de entrada em operação. Caso necessário, deve-se incluir no caso do último ano do PAR as ampliações na região de influência das instalações do Projeto Básico. Em termos gerais, vale destacar os seguintes aspectos:

- As avaliações de fluxo de potência devem contemplar a configuração da rede correspondente ao ano previsto para a entrada em operação do empreendimento, adotando-se como referência os casos base do PAR. Também é necessário que sejam efetuadas avaliações para configurações futuras, adotando-se como referência os casos base do último ano do horizonte do plano decenal da EPE.
- O estudo de fluxo de potência deve conter análise das condições da rede em regime normal de operação e sob condição de emergência de um dos componentes da transmissão (n-1).
- Para todas as condições, é necessário observar o limite de tensão nos barramentos e os limites de carregamento (longa duração e curta duração) das linhas de transmissão e de equipamentos associados ao empreendimento, com o objetivo de comprovar a adequação da instalação aos requisitos estabelecidos no Anexo Técnico e nos Procedimentos de Rede.
- Caso a instalação de unidades transformadoras faça parte do empreendimento, o estudo deve comprovar que a faixa de tapes estabelecida no Anexo Técnico é adequada e suficiente para permitir o controle da tensão dentro das necessidades da rede e, caso não o seja, deverá apontar a nova faixa a ser especificada. Para transformadores de fronteira, metodologia mais conservativa deverá ser necessária, diante de baixos fluxos observados nos casos do PAR e da EPE.

- Na hipótese de bancos de capacitores série fazerem parte do empreendimento, deve-se identificar as tensões máximas em regime permanente, às quais ficarão sujeitas as suas barras terminais, em condições nominais de operação e de sobrecarga por 30 minutos.
- Também devem ser verificadas e relatadas eventuais violações de tensões e de carregamentos que vierem a ocorrer na rede elétrica adjacente ao empreendimento, em função da entrada em operação das novas instalações.

Os limites de tensão e de carregamentos a serem observados devem corresponder aos limites estabelecidos no Anexo Técnico, e, quando não informados naquele documento, deve-se adotar como referência o disposto no submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede.

4.1.3. Estudos de Energização de Linha de Transmissão

Estes estudos visam identificar se a compensação reativa definida para a linha é adequada, bem como identificar se os recursos de controle de tensão, a montante da manobra, são suficientes para garantir as condições de pré-manobra necessárias.

Os estudos devem demonstrar que a energização da linha é possível, sem a necessidade de adoção de restrições de operação de qualquer tipo. Se, para atingir tais objetivos, houver necessidade de equipamentos/instalações adicionais, o estudo deverá recomendar a sua aquisição. Neste caso, o ONS tomará ciência do fato e encaminhará as tratativas necessárias junto à ANEEL para sanar estas questões.

O estudo de energização de linha de transmissão deve pesquisar as máximas tensões de regime permanente e dinâmico na extremidade da linha de transmissão e nas barras das subestações, com o objetivo de verificar a sua adequação aos limites estabelecidos no anexo técnico do edital e nos Procedimentos de Rede.

Além disso, o estudo deve subsidiar o dimensionamento dos equipamentos terminais — como, por exemplo, reatores de linha — situados nas extremidades das linhas de transmissão, considerando-se que estes possam ficar em vazio e sujeitos ao valor da tensão sustentada estabelecido no anexo técnico do edital.

Sua realização deve dar-se, em princípio, para ambos os sentidos de energização da linha de transmissão em análise, tomando-se como ponto de partida configurações que resultem de solicitações mais severas, o que geralmente é obtido em casos de fluxo de carga ajustados com menor número de unidades geradoras sincronizadas e com a máxima tensão de pré-manobra na barra do terminal a ser manobrado. A tensão de pré-manobra deve corresponder ao limite estabelecido no anexo técnico do edital, para a máxima tensão de regime permanente permitido para a barra correspondente ao ponto da manobra.

Além disso, é importante que sejam analisadas condições de indisponibilidade simples de equipamentos da Rede Básica da região de integração da nova linha de transmissão. De modo geral, a indisponibilidade que resulta no menor nível de curto-circuito no barramento de manobra indica a condição mais severa em termos de variação de tensão e pode ser utilizada como uma boa referência para os estudos. Destaca-se que a indisponibilidade que resulta na condição mais severa para a energização pode ser diferente para cada terminal onde ocorre a manobra.

No caso da existência de compensação série na linha de transmissão manobrada, a energização deverá ser possível, mesmo com o banco de capacitores série *by-passado*.

No desenvolvimento do estudo de energização de linhas de transmissão, devem-se considerar as compensações reativas indutivas recomendadas no anexo técnico do edital para as extremidades da linha de transmissão “em operação”, com o objetivo de comprovar a sua efetividade no controle das sobretensões.

Se houver compensação reativa indutiva em derivação prevista para a barra, é preciso considerá-la no estudo da energização da linha de transmissão “fora de operação”, e, a seguir, verificar o efeito da inserção dessa compensação no controle das sobretensões, se for necessário.

No caso da existência de compensador estático shunt ou compensador síncrono associado ao empreendimento, deve-se considerá-lo “disponível”, devendo-se verificar o impacto da sua indisponibilidade na energização da linha de transmissão.

No caso de linhas de transmissão curtas, o estudo de energização pode vir a ser dispensado, devendo-se, neste caso, ser apresentada uma justificativa embasada em argumentos técnicos ou regulatórios.

4.1.4. Estudos de Rejeição de Carga

O estudo de rejeição de carga deve pesquisar as máximas tensões de regime permanente e dinâmico na extremidade da linha de transmissão e nas barras das subestações, com o objetivo de verificar a sua adequação aos limites estabelecidos no anexo técnico do edital.

- Em se tratando de linha de transmissão de circuito duplo, deve-se também efetuar a análise da rejeição dupla (C1+ C2). Em certos casos, os estudos de rejeição de carga são aqueles que definem a necessidade de instalação de compensação fixa de linha. Este estudo pode, inclusive, identificar condições de abertura desfavoráveis para o disjuntor situado a montante da rejeição de carga, no momento em que ocorre a transferência de disparo para o isolamento da linha sob defeito, durante a ocorrência da sobretensão no instante imediatamente após a rejeição (t_0+).

- Este estudo, em conjunto com o de energização da linha de transmissão, identifica a necessidade de compensação reativa fixa na linha de transmissão, considerando que os equipamentos terminais situados na extremidade aberta das linhas de transmissão podem ficar em vazio e sujeitos ao valor da tensão sustentada.

Nos casos de linha de transmissão para escoamento de parque gerador, a rejeição de carga pode identificar problemas relacionados à autoexcitação, se porventura o montante de reativos a ser absorvidos pelas unidades geradoras for superior à sua capacidade de absorção, por exemplo. Tal fato pode ser indicativo da necessidade de compensação reativa fixa, inclusive no terminal emissor.

É necessário que as análises sejam realizadas para ambos os terminais da linha, e devem-se adotar casos de fluxo de carga ajustados com a maior condição de carregamento possível na linha de transmissão, tendo em vista a maximização do impacto da rejeição de carga.

Devem ser consideradas, como premissas do estudo:

- as compensações reativas indutivas recomendadas no anexo técnico do edital para as extremidades da linha de transmissão “em operação”, com o objetivo de comprovar a sua efetividade no controle das sobretensões.
- Se houver compensação reativa indutiva em derivação prevista para a barra, deve-se considerá-la no estudo da rejeição de carga “fora de operação”, e, a seguir, deve-se verificar o efeito da inserção dessa compensação no controle das sobretensões, quando necessário.
- No caso da existência de compensador estático shunt ou compensador síncrono associado ao empreendimento, deve-se considerá-lo “disponível” e verificar o impacto de sua indisponibilidade na rejeição de carga.

Além disso, é importante que sejam analisadas condições de indisponibilidade simples de equipamentos da Rede Básica da região de integração da nova linha de transmissão. De modo geral, a indisponibilidade que resulta no menor nível de curto-circuito no barramento oposto ao que ocorre a abertura do disjuntor indica a condição mais severa em termos de variação de tensão e pode ser utilizada como uma boa referência para os estudos. Destaca-se que a indisponibilidade que resulta na condição mais severa para a rejeição de carga pode ser diferente para cada terminal onde ocorre a abertura do disjuntor.

No tocante às linhas de transmissão curtas, o estudo de rejeição de carga pode vir a ser dispensado, devendo-se, nesse caso, ser apresentada uma justificativa embasada em argumentos técnicos ou regulatórios.

Atenção especial é necessária em situações específicas, tais como na abertura de uma linha de 500 kV sobre uma rede de tensão inferior e sobre a transformação de acoplamento entre redes de

tensões diferentes. Essa situação pode indicar a necessidade de adoção de medidas operativas, tais como a abertura por um lado preferencial, por segurança ou condição sistêmica. Nessa condição, caso ocorra uma falha no *transfer trip*, as instalações a montante da rejeição podem ficar submetidas a tensões maiores que 1,4 pu de 550 kV, situação na qual pode não haver tempo hábil para que a abertura dos disjuntores da linha possa operar com segurança. Essa situação terá também que ser abordada nos estudos de manobra (TRT) descritos mais adiante neste documento.

4.1.5. Estudos de Curto-Circuito

O estudo de curto-circuito tem por objetivo identificar o impacto do novo empreendimento nos níveis de curto-circuito locais, no mínimo até a segunda vizinhança, e identificar as topologias mais críticas a serem investigadas nos estudos de transitórios de manobra e à frequência fundamental. Deverá abordar também os valores de X/R que servem de base para a especificação de disjuntores, seccionadores e transformadores de corrente do empreendimento.

O estudo deve necessariamente ser efetuado considerando uma parcela resistiva típica nos transformadores, sendo que, na falta de uma informação mais precisa do fabricante, pode ser considerado um X/R típico baseado, por exemplo, na norma IEEE Std C37.010-1999 ou calculado pelas perdas em carga, estimada a partir do rendimento mínimo constante nos Procedimentos de Rede.

O escopo do estudo deve conter, no mínimo, as informações relativas a:

- Relação X/R nos pontos de manobra;
- Corrente de curto-circuito assimétrica;
- Corrente de curto-circuito simétrica.

Deve ser prospectada a possibilidade de superação de disjuntores existentes por corrente de curto-circuito simétrica (ampliação de subestações existentes, terminais de novas linhas etc.), e avaliar a corrente passante nos disjuntores supostamente superados. Para a análise de superação, pode ser utilizada como subsídio e referência a Nota Técnica ONS nº 0048/2014 – Revisão 1 – fevereiro de 2015 ou versão posterior “Critérios para análise de superação de equipamentos e instalações de alta tensão”.

As avaliações de curto-circuito devem contemplar a configuração da rede correspondente ao ano previsto para a entrada em operação do empreendimento, adotando-se como referência os casos base do PAR. Também é necessário que sejam efetuadas avaliações para configurações futuras, adotando-se como referência os casos base do último ano do horizonte do plano decenal da EPE.

4.1.6. Geração de Equivalentes para Estudos de Manobra

Transitórios eletromagnéticos provenientes de manobras são mais críticos quanto menor é a capacidade de amortecimento dos fenômenos pelo sistema existente no entorno. Manobras como energização, religamento e rejeição de carga geram transitórios de tensão, que tendem a ser mais críticos quanto menor é o nível de curto-circuito (NCC) local. Por outro lado, manobras como TRT tendem a ser mais críticas quanto maior é a corrente de curto-circuito interrompida. Sendo assim, o projetista deve avaliar quais são os pontos de operação mais críticos para cada tipo de manobra, o que tem impacto direto sobre os equivalentes de sistema gerados para a realização das simulações.

Nos tipos de manobra que demandam simulações com nível reduzido de curto-circuito, deve-se avaliar as condições operativas que implicam nesta condição, o que envolve encontrar um cenário operativo com despacho de unidades remotas e o desligamento de usinas próximas ao ponto de interesse. Isso implica em encontrar um fluxo de potência adequado e, a partir dele, ajustar o caso de curto-circuito, reproduzindo o nível de curto-circuito correspondente a este cenário.

Cabe lembrar que é necessário simular situações de rede deteriorada, dentro do critério (n-1), que tendem a reduzir ainda mais o nível de curto-circuito.

Deverá ser gerado, a partir das bases de dados existentes, casos de curto-circuito referentes a fluxos de potência que correspondam a:

- Energização (baixo NCC no ponto de manobra);
- Rejeição de carga/religamento (fluxo elevado nas linhas em análise, baixo NCC na barra sobre a qual ocorrerá a rejeição de carga);
- TRT e superação de equipamentos (NCC elevado, na entrada em operação e no ano horizonte de planejamento);
- Os estudos de rejeição de carga e energização a 60 Hz também devem levar esses fluxos de potência em consideração, na definição dos casos que serão simulados para compor os respectivos relatórios.

Os relatórios de estudos de Projeto Básico devem apresentar claramente as razões da escolha das topologias/despachos/número de máquinas para cada situação estimada como crítica, que servirão de base a avaliações posteriores. É facultada a opção de produzir um relatório específico sobre dados, a ser referenciado nos relatórios de estudos.

Essas informações devem ser utilizadas para a elaboração dos equivalentes a serem adotados nos estudos de manobra do Projeto Básico, devendo ficar explicitadas as premissas adotadas, os resultados e os equivalentes a serem considerados.

4.1.7. Estudos Dinâmicos

Os estudos dinâmicos devem ser apresentados quando solicitados no anexo técnico do edital de leilão ou desenvolvidos de maneira complementar, visando a subsidiar a especificação de equipamentos, ou em apoio aos estudos de transitórios eletromagnéticos associados a manobras condicionadas ao comportamento dinâmico do sistema.

Para efeito de projeto básico, entende-se por modelo típico (geradores, síncronos, CERs, STATCOMs) um modelo elaborado e devidamente documentado pelo fornecedor contratado pela Transmissora para o empreendimento. O equipamento modelado deve pertencer à mesma família do equipamento a ser fornecido para cada empreendimento e deve dispor de todas as lógicas previstas no Anexo Técnico.

Ainda em relação ao modelo elaborado para utilização no programa ANATEM, a ser utilizado nos estudos dinâmicos na etapa de projeto básico, o mesmo deve vir acompanhado de um documento com a descrição das suas funções e controles, com a devida correspondência com o modelo prescrito pelo fabricante, e com simulações que demonstrem o efetivo desempenho do equipamento e dos controles modelados, tais como limitadores, PSS, entre outras funções de controle pertinentes e previstas no Anexo Técnico e nos Procedimentos de Rede.

A seguir são relacionadas as principais situações para as quais são necessários o desenvolvimento e a apresentação de estudos dinâmicos:

- **Geradores e compensadores síncronos:** quando estes existirem dentre os equipamentos que fazem parte dos empreendimentos relacionados no anexo técnico do edital, deve-se apresentar o estudo de estabilidade eletromecânica, considerando-os integrados ao sistema. Devem-se englobar análises de manobras de energização, rejeição de carga e emergências (abertura de linha de transmissão após aplicação de curto-circuito). O estudo deve ser desenvolvido — caso ainda não esteja disponível o modelo definitivo dos sistemas de controle da unidade geradora ou do compensador síncrono — com a utilização de modelos típicos, implementados na base de dados do programa ANATEM. Deve também ser obtido junto ao fabricante o modelo final do gerador para simulação dinâmica com o programa ANATEM. Esse modelo deve ser encaminhado ao ONS, conforme exigido no anexo técnico do edital.
- **Compensação Estática de Reativos (CER):** quando esta existir dentre os equipamentos que fazem parte dos empreendimentos relacionados no anexo técnico do edital, deve-se apresentar o estudo da resposta dinâmica do CER frente a manobras de energização, rejeição de carga e sob emergências (abertura de linha de transmissão após aplicação de curto-circuito). Se ainda não estiver disponível o modelo definitivo do sistema de controle do CER, é preciso adotar modelo típico, implementado na base de dados do programa ANATEM. Deve

também ser obtido junto ao fabricante o modelo final do CER para simulação dinâmica com o programa ANATEM. Esse modelo deve ser encaminhado ao ONS, conforme exigido no anexo técnico do edital.

- **Compensação série:** quando esta existir para a linha de transmissão, dentre os equipamentos que fazem parte dos empreendimentos relacionados no anexo técnico do edital, deve-se desenvolver estudo dinâmico com o objetivo de obter a corrente máxima de swing (primeiro swing), que ficará sujeito ao banco de capacitor série durante oscilações de potência no sistema elétrico, após a ocorrência de faltas na barra da compensação série. Este estudo deve ser encaminhado ao fabricante para efeito do dimensionamento da compensação série.
- **Viabilidade do religamento monopolar:** se houver necessidade e o estudo da extinção do arco secundário assim o exigir, deve ser demonstrado, por meio da realização de estudo dinâmico, que a adoção de tempo morto para o religamento monopolar superior a 500ms não compromete o desempenho dinâmico do sistema. Isso se aplica exclusivamente a abastecimento de redes radiais.
- **Abertura em oposição de fases:** em apoio aos estudos das tensões de restabelecimento transitórias de disjuntores, pode-se optar por identificar a pior condição de defasagem angular a ser imposta ao disjuntor, por meio da realização de estudo dinâmico, simulando — a partir de uma condição de rede degradada ou não — a separação de blocos de geração, com a perda do sincronismo entre eles.
- Outros tipos de demanda por estudos dinâmicos podem vir a ser identificados e apresentados durante o desenvolvimento dos estudos de projeto básico.

Os estudos dinâmicos devem ser realizados adotando-se a base de dados do ONS para estudos de transitórios eletromecânicos.

4.1.8. Modelo do Relatório do Estudo Elétrico na Frequência Fundamental

Os relatórios dos estudos elétricos na frequência fundamental devem apresentar todos os estudos elétricos de sistema solicitados pelo anexo técnico do edital (tais como fluxo de potência, energização de linha de transmissão, rejeição de carga, curto-circuito e estudos dinâmicos).

Quanto ao seu conteúdo, é recomendável, tendo em vista a emissão do parecer pela ANEEL, que este possua redação clara e objetiva, com foco na comprovação da conformidade do projeto básico da instalação aos requisitos técnicos estabelecidos no anexo técnico do edital.

O item 9.1 apresenta uma sugestão de itens para o relatório dos estudos elétricos na frequência fundamental

4.1.9. Estudos de Fluxo de Potência em Barramentos

Os estudos de fluxo de potência nos barramentos de subestações objetivam o seu dimensionamento, viabilizando a seleção dos condutores constituintes (cabos e/ou tubos) adequados. Tais estudos também possuem importante papel no dimensionamento dos equipamentos (disjuntores, chaves seccionadoras e transformadores de corrente) que compõem os vãos da subestação. Portanto, a execução desses estudos deverá garantir que os dimensionamentos de tais barramentos e vãos não se tornem um elemento limitador para o uso pleno dos recursos da subestação, respeitando ainda os requisitos mínimos estabelecidos no anexo técnico.

Dentre as diretrizes para os estudos de fluxo de potência em barramentos, destacamos a seguir aquelas que, em muitos projetos básicos, não têm sido devidamente observadas:

- ✓ As premissas de carregamento dos equipamentos devem considerar a capacidade nominal dos mesmos, ou valores próximos proporcionais e, portanto, adequados ao dimensionamento de longo prazo (período de concessão da instalação);
- ✓ É necessário investigar a topologia futura prevista nos estudos de planejamento, tanto para a expansão da subestação quanto do sistema de transmissão que tem influência nos fluxos de potência nos barramentos;
- ✓ Todas as situações degradadas da topologia da subestação devem ser avaliadas;
- ✓ A disposição física dos equipamentos deve ser consistente com as plantas de arranjo de equipamentos do mesmo projeto;

Adicionalmente aos itens acima descritos, destacamos a seguir diretrizes básicas a serem consideradas:

- ✓ No caso de novas subestações ou pátios, os barramentos principais devem ser especificados com capacidade igual ou superior, na temperatura de operação, à capacidade dos equipamentos (disjuntores, chaves e TCs) definidos no Anexo Técnico.
- ✓ Em caso de expansão de barramentos principais existentes, essa expansão deve apresentar uma capacidade igual ou superior a do barramento existente.
- ✓ Nos casos em que a expansão da SE implicar na superação do barramento principal existente, essa situação deve ficar bem caracterizada nos estudos apresentados pela Transmissora, onde devem ser identificados os trechos de barramento superados e as respectivas correntes calculadas.

Nesta situação, a Transmissora deverá enviar correspondência à concessionária do barramento superado, com cópia para o ONS, encaminhando o estudo de fluxo de barramentos que identificou a superação. Ressalta-se que os critérios de estudos para a

indicação de reforços motivados pela superação de equipamentos diferem daqueles utilizados para a especificação de novas instalações (dimensionantes). Nesses casos, caberá à Transmissora concessionária das instalações avaliar e, caso necessário, indicar o reforço no âmbito do SGPMR.

- ✓ É possível especificar para os barramentos de conexão das linhas específicos do empreendimento a capacidade de corrente de curta duração da linha que utiliza o vão, mesmo que esta seja inferior a capacidade determinada pelo Anexo Técnico para os disjuntores, TCs e chaves.

4.1.9.1. Desenvolvimento dos Estudos

O desenvolvimento dos estudos de fluxo de potência em barramentos deve partir das seguintes premissas:

- **Conhecimento da disposição física:** Os estudos somente devem ser executados com o conhecimento da posição exata a ser ocupada por cada conexão (linha, transformador, disjuntor de acoplamento/transferência, reator de barra, etc.) ao longo do barramento. Essa informação é obtida realizando-se o confronto entre os diagramas unifilares e a planta básica da instalação (nas suas versões definitivas da etapa de Projeto Básico), pois é por intermédio desse modelo preciso que se obtêm os fluxos que circulam em cada seção do barramento (trechos entre conexões adjacentes).
- **Carregamentos admissíveis:** Uma premissa fundamental para o dimensionamento de barramentos é a utilização das capacidades máximas admissíveis em cada conexão, quer seja de longa, como de curta duração. Inicialmente, deve-se utilizar a capacidade operativa de longa duração para linhas de transmissão e as capacidades nominais dos transformadores de potência, para a avaliação do balanço carga-geração da subestação e após proceder com os ajustes necessários. Esses dados estão disponíveis no anexo técnico do edital. No caso de expansão de instalações, as capacidades das instalações existentes podem ser obtidas no SINDAT/ONS. Ressalta-se que não cabe utilizar capacidades sazonais nesse tipo de estudo.
- **Condições de carga/configurações de pátio:** No que diz respeito à definição das premissas de carregamento dos equipamentos da subestação em análise, há duas situações que merecem distinção na definição das condições de estudo, as quais são explicitadas a seguir:

Estudos envolvendo subestações novas a serem implantadas: Neste caso, o estudo visa o dimensionamento da instalação, de modo a atender os carregamentos impostos tanto pelos equipamentos a serem implantados imediatamente na nova subestação como pelas expansões futuras. Destaca-se que, nas hipóteses operativas estudadas, os barramentos da

subestação devem suportar a utilização plena dos recursos e equipamentos da instalação, não se permitindo que os barramentos configurem restrição para a utilização da capacidade máxima dos equipamentos pertencentes à mesma. Neste sentido, os aspectos previamente citados devem ser levados em conta na definição das premissas de carregamento dos equipamentos durante a elaboração do estudo.

Estudos envolvendo ampliação de subestações existentes: Neste caso, quando há ampliação de barramentos existentes, o estudo visa tanto o dimensionamento dos novos trechos, quanto a verificação da capacidade de os barramentos existentes suportarem a respectiva ampliação. Desta forma, o novo trecho de barramento não deve implicar em restrição para a utilização plena dos novos equipamentos implantados em conjunto com o mesmo. Em relação aos barramentos existentes, deve ser analisado o impacto da ampliação da subestação no carregamento imposto aos mesmos.

Vale ressaltar, entretanto, que esta análise visa averiguar a ocorrência ou não de superação por corrente nominal nos barramentos existentes, e não os dimensionar, sendo necessário ponderar as premissas temporais de carregamento dos equipamentos, tanto existentes quanto futuros, em função dos carregamentos observados nos casos de referência de fluxo de potência do ONS e da EPE, ajustados, evidentemente, de tal forma a representar os pontos de operação mais críticos para as instalações em análise, sob o ponto de vista de carregamento.

A partir da obtenção dos carregamentos mais elevados impostos aos barramentos existentes, o estudo deve contemplar a comparação da capacidade dos barramentos, tanto de regime normal como de emergência, com os resultados, concluindo se foi constatada a possibilidade de superação dos mesmos e destacando os trechos com possível superação por corrente nominal.

Adicionalmente, mesmo para o caso visando a análise de superação de barramentos existentes, podem ser explorados, para identificação de limites e comparação com os valores encontrados previamente, a utilização das linhas e transformações em sua capacidade máxima, mesmo que os fluxos de potência identifiquem valores mais baixos.

- **Contingências:** 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 (n-1) tanto internos, para os casos de utilização de máximo carregamento, quanto externos à mesma, para as situações temporais envolvendo os casos base do ONS e da EPE.

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

A seguir, apresentam-se algumas particularidades a serem observadas como diretrizes na seleção das contingências, em função do tipo de arranjo de barramentos adotado:

- **Arranjo barra principal e transferência (BPT):** a partir dos resultados obtidos para a configuração normal da subestação, considerar os efeitos da conjugação de posição física ocupada no barramento pelo disjuntor de transferência; conexão mais carregada transferida; e 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 caso a caso);
- **Arranjo barra dupla a quatro ou cinco chaves (BD4 ou BD5):** nesta configuração, considerando que o disjuntor de acoplamento também exerce o papel de transferência, aplica-se a mesma diretriz para o arranjo BPT.

Avaliar a possibilidade de contingências nas quais o disjuntor de acoplamento pode ter que suportar o fluxo total no sentido geração-transmissão ou “fonte”-“carga” da subestação (por exemplo: todas as conexões “fonte” ligadas ao barramento I e as conexões “carga” ao barramento II);

- **Arranjo barra dupla disjuntor e meio (DJM):** dentre as contingências a serem estudadas, deve-se contemplar a perda de cada disjuntor e a perda de uma das barras da subestação.

Na eventualidade de haver mais de uma conexão “fonte”, considerar a indisponibilidade do disjuntor de interligação de barras (IB) de uma delas associada à perda de outra conexão “fonte” (o mesmo se aplica às conexões tipo “carga”).

4.1.9.2. Relatório de Apresentação dos Resultados

O item 9.2 apresenta uma sugestão de modelo para o relatório dos estudos de fluxo de potência em barramentos.

4.2. Estudos de Transitórios Eletromagnéticos

4.2.1. Aspectos Gerais

Embora as instalações do SIN operem, na maior parte do tempo, em condições de regime permanente, elas devem ser projetadas e seus equipamentos especificados para suportar as maiores solicitações a que possam ser submetidas.

Desta forma, os condicionantes advindos da operação durante condições transitórias são os que, na maior parte das vezes, determinam a especificação dos componentes da instalação.

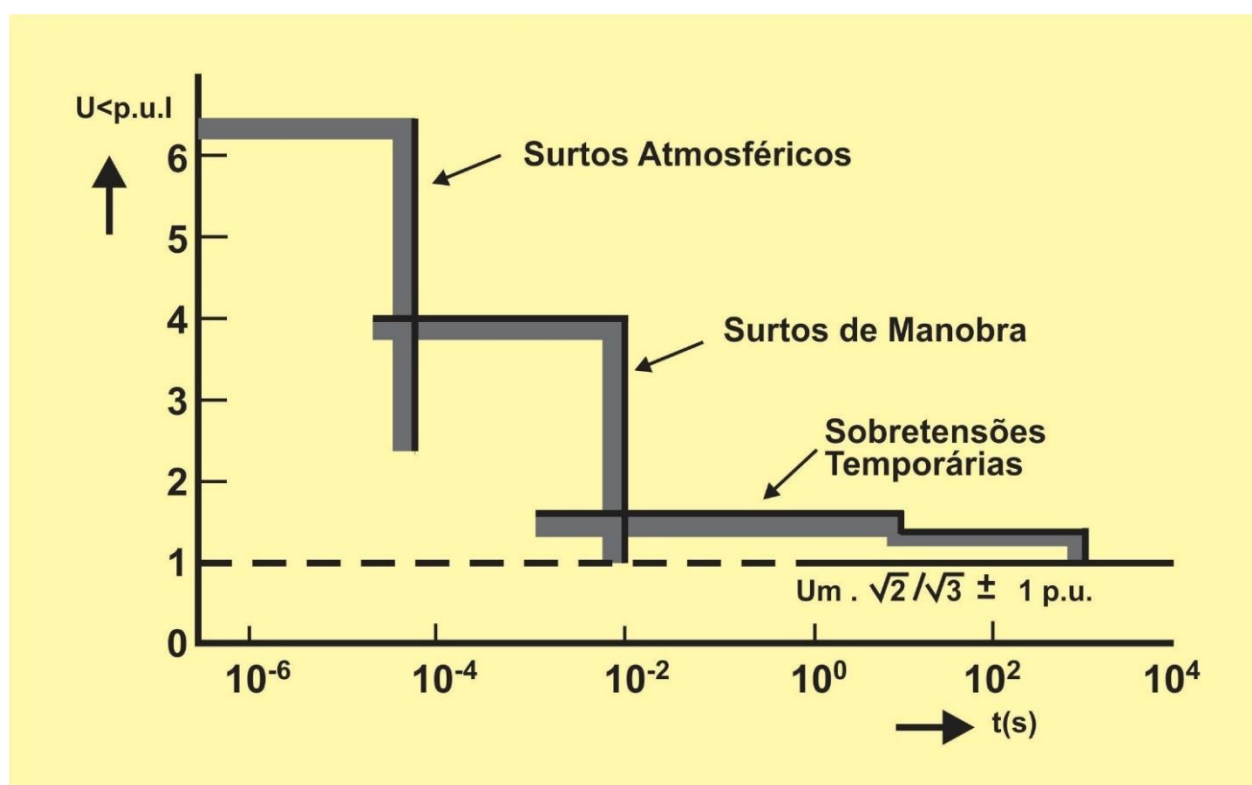
O objetivo do projeto básico é identificar as solicitações mais severas dos equipamentos e especificá-los de acordo.

Tais solicitações não necessariamente ocorrerão durante condições operativas usuais. Daí a necessidade de separar os estudos de dimensionamento (projeto básico) dos estudos operativos.

De forma geral, é possível subdividir as grandezas a serem acompanhadas durante a operação transitória da rede em quatro grandes grupos: sobretensões, sobrecorrentes, formas de onda “anormais” (harmônicos) e transitórios eletromagnéticos/eletromecânicos (torques transitórios/oscilações subsíncronas, fenômenos que possam também necessitar de representação trifásica).

A Figura 4.1 ilustra os tipos de sobretensão encontrados:

Figura 4.1 Representação Esquemática Tipos de Sobretensão em Sistemas EAT [5.3].



Ressalta-se que nem sempre é possível classificar as sobretensões de forma completamente estanque. Muitos eventos resultam de combinações dos tipos acima mencionados.

A elaboração dos estudos de transitórios eletromagnéticos requer uma modelagem de acordo com o tipo de fenômeno e das características da rede. Uma modelagem inadequada levará a resultados inconsistentes.

Os tipos de estudos de transitórios eletromagnéticos necessários ao projeto básico das instalações podem variar, dependendo dos equipamentos que fazem parte do empreendimento (existência de transformadores, banco de capacitores, reatores, compensadores estáticos, dentre outros), como também das características das linhas de transmissão existentes.

Dependendo dos aspectos acima mencionados, é necessário desenvolver e apresentar — no conjunto de atividades necessárias ao projeto básico da instalação — os seguintes tipos de estudos de transitórios eletromagnéticos:

- Energização de linhas de transmissão;
- Religamento tripolar de linhas de transmissão;
- Religamento monopolar de linhas de transmissão;
- Ressonância por indução em linhas compensadas por reatores em derivação:
 - Ressonância por indução em linhas que utilizam religamento monopolar;
 - Ressonância por indução em linhas paralelas.
- Tensões e correntes induzidas em circuitos paralelos e seus efeitos em lâminas de terra de seccionadoras;
- Energização de transformadores;
- Manobra de banco de capacitores:
 - Energização (um só banco ou banco adicional na presença de outro);
 - Eliminação de curto próximo a banco de capacitores.
- Rejeição de carga;
- Tensão de restabelecimento transitória (TRT), compreendendo:
 - Curto-circuito terminal;
 - Curto-circuito quilométrico;
 - Abertura de linha de transmissão em vazio;

- Abertura em discordância de fases;
- Abertura de pequenas correntes indutivas.
- Assimetria das correntes de curto-circuito;
- Coordenação do isolamento;
- Estudos associados à compensação estática shunt;
- Estudos associados à compensação série;
- Estudos relacionados à GIS (Gas Insulated Substation).

No anexo técnico do edital há um item dedicado à demonstração da conformidade dos equipamentos, no qual são relacionados os tipos de estudos cuja apresentação é obrigatória.

Estudos de recomposição de rede não fazem parte do rol de estudos do projeto básico. Entretanto, para o dimensionamento adequado dos equipamentos constantes da concessão de transmissão, muitas vezes é necessário avaliar configurações/topologias de rede que são ou poderão vir a ser utilizadas em processos deste tipo.

Devem-se considerar, para a elaboração dos estudos de transitórios eletromagnéticos, as informações contidas nos seguintes documentos, por ordem de prioridade:

- Anexo técnico do edital da Aneel do correspondente lote do leilão de transmissão;
- Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS, contendo as diretrizes e os critérios para estudos elétricos;
- Relatório R2 da EPE – Detalhamento da Alternativa de Referência;
- Relatório R1 da EPE – Estudos para a Licitação da Expansão da Transmissão – Análise técnico-econômica das alternativas.

Um dos aspectos mais importantes no desenvolvimento dos estudos de transitórios eletromagnéticos refere-se à modelagem da rede e ao ajuste da base de dados para as simulações com o ATP (Alternative Transient Program).

4.2.2. Abrangência

A obrigatoriedade de realização dos estudos de transitórios eletromagnéticos para todos os níveis de tensão, comprimentos de LT e potência de transformadores resulta na necessidade de apresentar e avaliar relatórios para situações em que, por vezes, as solicitações impostas às instalações são significativamente inferiores às respectivas capacidades.

A experiência leva a prever que em diversos casos como em linhas de transmissão curtas, baixo nível de tensão, potência de transformadores reduzida, entre outros, determinados estudos terão resultados extremamente favoráveis.

Por este motivo, os Anexos Técnicos, via de regra, estabelecem quais são os estudos obrigatórios e quais não são, no Item – Demonstração da Conformidade dos Equipamentos aos Requisitos do Anexo Técnico.

4.2.3. Seccionamento de Linhas de Transmissão

O planejamento da expansão da transmissão do SIN tem-se utilizado, cada vez mais, do recurso de seccionamento de linhas de transmissão existentes. Como as linhas são projetadas originalmente para operar de uma forma otimizada com um determinado nível de compensação shunt, estes seccionamentos têm levado, por diversas vezes, ao surgimento de níveis de compensação fora das faixas usuais, cujas consequências devem ser avaliadas.

Linhas sobrecompensadas podem trazer problemas de diversos tipos, desde dificuldades para a extinção do arco durante religamentos monopolares, surgimento de ressonâncias na fase aberta após abertura monopolar, impedimento de manobra de transformadores (ressonância a 60 Hz), e até a ocorrência de atraso na passagem por zero, o que impede a atuação adequada da interrupção da corrente de falta pelos disjuntores quando da ocorrência de um curto-circuito.

Esse assunto deve ser tratado no âmbito do regime permanente, em primeiro lugar. Por vezes, o próprio estudo de planejamento pode ter avaliado essas situações e previsto remanejamentos de reatores de linha e/ou sua substituição por outros reatores de tamanho diferente, para evitar tais situações. Mas quando isso não ocorre, é necessário indicar soluções na etapa de projeto básico.

A solução usual é simplesmente desconectar o reator da subestação terminal no trecho que ficou sobrecompensado e transferi-lo para a subestação do seccionamento. Pode-se também transferir o equipamento para ser utilizado como compensação manobrável em alguma subestação adjacente, desde que haja espaço físico disponível. Nestes casos, onde o planejamento possa não ter identificado essa situação, análises realizadas no âmbito do PAR levam à indicação do reforço a ser implantado.

4.2.4. Disponibilização dos Casos de Simulação

O Anexo Geral dos Editais de Leilão estabelece que “Os estudos de transitórios eletromagnéticos deverão ser desenvolvidos na ferramenta ATP (Alternative Transients Program)” e que “a TRANSMISSORA deverá disponibilizar à ANEEL os casos base de cada um desses estudos, no formato do programa ATP, em meio digital, para fins de registro na base de dados de estudos”.

Ressaltamos que deve ser cumprido o requisito de fornecimento dos casos referentes a cada tipo de estudo, que sejam representativos dos resultados mais críticos. Estes casos devem ser fornecidos em meio magnético e estar prontos para simulação pelo ONS, sem restrições.

4.2.5. Modelagem da Rede

4.2.5.1. Barras de Fronteira – Equivalentes de Curto-Circuito

As redes elétricas, ao operarem em regime permanente, em mudanças bruscas (tensão ou corrente), ficam submetidas a transitórios, até que se atinja novo regime permanente.

Os componentes da rede podem apresentar respostas oscilatórias (amortecidas ou não) a estímulos que variam com a frequência de excitação. As características não lineares de diversos equipamentos podem ocasionar o surgimento de frequências diferentes da fundamental — à qual se superpõem.

Nesse contexto, a relação de impedâncias no ponto de injeção do surto e a representação de não linearidades dos equipamentos impactam o resultado das simulações de transitórios eletromagnéticos.

Ao contrário das simulações de fluxo de potência, onde a rede é considerada equilibrada e a representação é monofásica, nas simulações de transitórios eletromagnéticos deve-se considerar a representação trifásica, levando-se também em conta os acoplamentos possíveis, de acordo com o fenômeno investigado.

Para a simulação de transitórios, o regime permanente da rede pré-defeito/pré-manobra tem a função de definir apenas as condições iniciais da simulação, e não tem a mesma importância de uma simulação de fenômenos apenas a 60 Hz.

Entretanto, qualquer regime permanente factível implica uma rede bem representada, com todas as relações de impedância importantes incluídas, e uma topologia adequada e realista.

Como não é factível — por limitações da ferramenta — a representação de todo o sistema interligado no programa de simulação, há necessidade de que se escolha uma sub-rede representativa, porém limitada, que não distorça o fenômeno em análise.

Tendo em vista que um dos efeitos transitórios mais significativos é ocasionado pelo surto injetado pela aplicação/remoção de defeito, caso a rede de sequência positiva e de sequência zero sejam adequadamente representadas, os valores de magnitude dos curtos-circuitos no programa de transitórios eletromagnéticos deverão ser próximos àqueles obtidos por meio do programa ANAFAS. Para tal, é necessário representar equivalentes de curto-circuito, a 60 Hz, na rede representada pelo programa de transitórios eletromagnéticos. Isto é feito pela inclusão de uma fonte ideal, com frequência 60 Hz, em série com uma impedância.

A grande questão é: caso as fontes ideais estejam eletricamente próximas do ponto avaliado, praticamente só as ondas de 60 Hz surgirão nas simulações, o que não é conceitualmente correto, ocasionando um resultado fictício, sem sustentação física.

Sempre que possível, é importante a representação dos parques geradores, não por equivalentes de curto-circuito a partir do ANAFAS, mas pela representação de seus transformadores elevadores e de suas máquinas; estas são modeladas, a princípio, pelas fontes ideais (tipo 14 no ATP) em série com a reatância subtransitória. A representação da máquina pelo modelo completo também é aceitável, embora não seja essencial para boa parte dos fenômenos em análise.

Outra questão importante diz respeito ao amortecimento da rede elétrica. Essa rede, quando reduzida aos itens mais elementares, é composta por uma associação de resistências, indutâncias e capacitâncias.

O amortecimento é uma realidade física e se manifesta nas representações das cargas e dos fatores de qualidade dos diversos equipamentos modelados.

Muitas vezes, na tentativa de reproduzir fielmente as condições de regime permanente, representam-se inúmeros equivalentes de curto-circuito, mesmo quando não são significativos, e se ajustam os fluxos por meio do acerto dos ângulos das fontes. Nestes casos, não se representam as cargas.

As simulações advindas desse tipo de representação acarretam, geralmente, resultados equivocados e distantes da realidade física.

Os equivalentes de rede a serem utilizados na representação do sistema devem ser indicados por suas impedâncias de curto-circuito de sequência zero e positiva, vistas a partir da(s) barra(s) de fronteira.

Como diretriz para a definição das barras de fronteira, é necessário escolher pontos da rede nos quais o circuito equivalente — representado pelas impedâncias de curto-circuito, próprias e de transferência — tenha influência mínima sobre o comportamento transitório do restante do sistema, o qual deve ser representado em detalhes por ser o foco do estudo. Os elementos não lineares, como transformadores e suas curvas de saturação, devem ser modelados; caso contrário, podem-se suprimir as excitações que existem, de fato, fora da frequência fundamental.

Na localização das barras de fronteira para a alocação dos equivalentes, deve-se adotar a regra de representar adequadamente (como rede retida na simulação) no mínimo a segunda vizinhança após a barra de manobra. Entende-se por 1ª vizinhança uma barra distante (adjacente) à barra de manobra. Como segunda vizinhança, compreende-se a segunda barra distante da barra de manobra.

Entretanto, a escolha das barras de fronteira deve considerar uma análise de engenharia que, em alguns casos, pode levar à necessidade de extrapolar a segunda vizinhança, por exemplo, quando esta se encontrar ainda eletricamente próxima do ponto de manobra. Exemplo: uma subestação existente, cuja

ampliação, uma segunda subestação, é dela separada por uma linha de 5 km. Do ponto de vista elétrico elas estão no mesmo ponto, não podendo a ampliação ser considerada como 1ª vizinhança da subestação existente.

Fenômenos de transitórios eletromagnéticos advêm da superposição de ondas trafegantes, em diversas frequências e nas três fases — que se refletem e se refratam, se superpõem ou se cancelam. Para o fenômeno poder de fato manifestar-se, é necessário um afastamento elétrico mínimo dos equivalentes de 60 Hz. Portanto, a regra é geral e necessária, por evitar maiores imprecisões.

É necessário ainda levar em conta o fenômeno estudado. Por exemplo: um equivalente situado na extremidade de uma linha, distante 350 km do ponto de manobra (apenas uma barra), pode ser mais adequado do que outro equivalente, situado a duas barras de distância, na extremidade de duas linhas em série de 30 km cada. A localização mais adequada do equivalente deve levar em conta não somente a distância elétrica, mas também a topologia da rede estudada.

Os estudos de transitórios eletromagnéticos devem ser realizados considerando como referência a configuração do sistema correspondente ao ano de entrada em operação do empreendimento, devendo, também, levar-se em consideração as ampliações e os reforços já autorizados pela Aneel — previstos no PAR-ONS para os anos subsequentes — na área de abrangência do empreendimento. Ressalta-se que a entrada em operação deve sempre ocorrer sem restrições advindas da incorporação de novas instalações à Rede Básica.

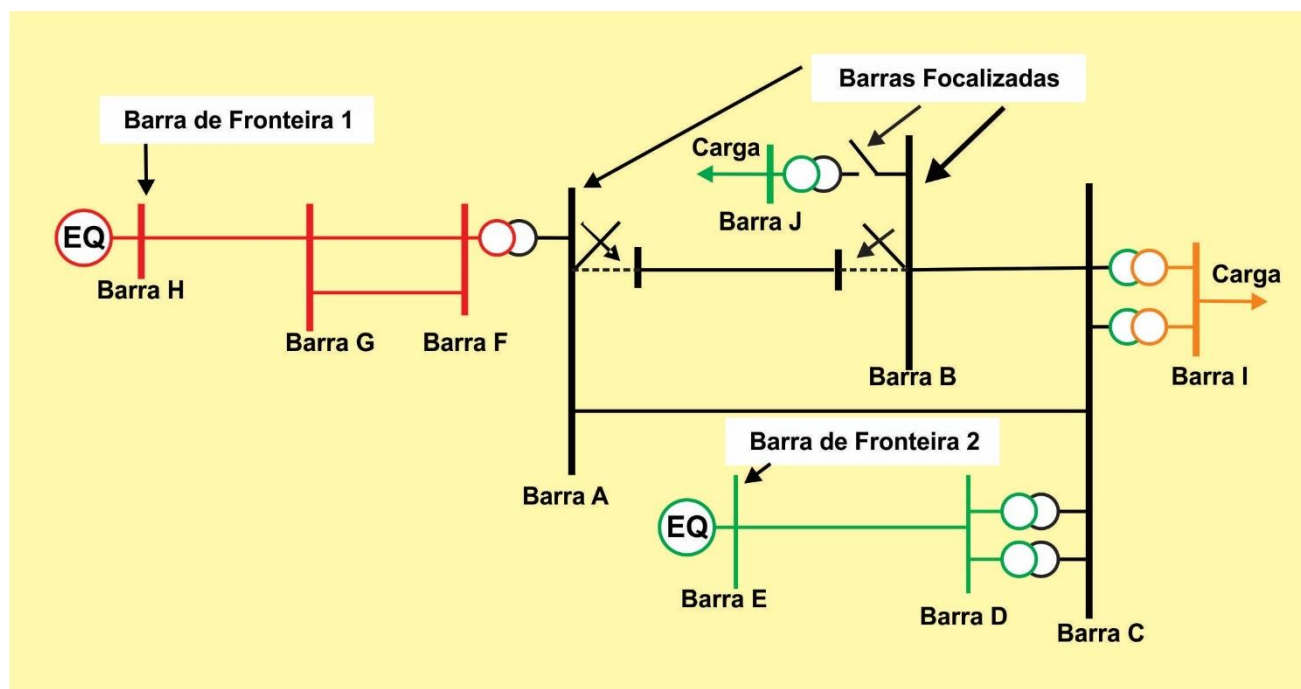
Adicionalmente, diversos estudos podem necessitar avaliação no horizonte de planejamento. Citamos como exemplo o dimensionamento de bancos de capacitores série (MOVs) e o de filtros de compensadores estáticos (lugar geométrico de impedâncias).

Outros estudos, tais como avaliação de TRT de disjuntores e de rejeição de carga, podem também vir a necessitar de horizontes mais à frente na elaboração do projeto.

Embora não seja possível estabelecer regras precisas, há algumas indicações a ser levadas em conta. Por exemplo: estudos de TRT avaliam a tensão entre contatos durante a abertura de disjuntores. Portanto, dependem tanto da impedância vista do ponto de manobra, quanto da magnitude da corrente que vão interromper ($\Sigma(Z(f) \times I(f))$).

Como não se trata de fenômeno linear, nem sempre é simples identificar a priori qual situação é a mais conservadora.

Figura 4.2 Modelagem da Rede – Barras de Fronteira – Barras Focalizadas.



A validação da modelagem no ATP tem por objetivo certificar-se de que as relações de impedância (de sequência positiva e zero) estão adequadas. Ou seja, se a topologia de fato corresponde à realidade.

Os estudos de manobra necessitam de condições iniciais previamente ajustadas. Basicamente, são as seguintes: tensão pré-manobra adequadas, níveis de curto-circuito realistas e topologia de rede válida, com a inclusão dos elementos não lineares, tais como transformadores.

Inicialmente ajusta-se a condição inicial de tensão pré-manobra. Para tal procura-se, na medida do possível, reproduzir o perfil de tensões do caso base de fluxo de potência, que para o ano de entrada em operação reflete um caso do PAR.

Os fluxos entre barras refletirão o ajuste de tensões obtido e, caso a rede de sequência positiva esteja correta, refletirão de forma próxima os resultados de fluxo do ANAREDE.

ATP e ANAREDE são ferramentas diferentes com metodologias de cálculo, modelagens e recursos distintas; portanto, suas soluções poderão ser parecidas, mas não idênticas. Em especial os ângulos.

Ressalta-se, neste ponto, que para estudos de transitórios eletromagnéticos o fluxo não é objeto da análise, mas condição inicial. Claro que, em estudos específicos, como por exemplo os relativos à rejeição de carga, a magnitude se torna um insumo importante.

Como o projeto básico não é uma análise de ocorrência específica, não se espera nesta fase, e nem faz sentido, o mesmo grau de precisão na reprodução das condições pré-manobra.

Portanto, a validação da modelagem da rede no ATP, representada na frequência fundamental, deve ser complementada considerando-se os níveis de curto-circuito para as barras das manobras e outros pontos de relevância na comparação das correntes de curto-circuito trifásicos e monofásicos obtidas no ATP com os resultados do programa de curto-circuito (ANAFAS), a partir da base de dados correspondente à configuração da rede em estudo.

Por fim, todo o projeto básico deve apresentar um diagrama unifilar da rede representada, identificando claramente o posicionamento dos equivalentes de curto-circuito, da geração representada, das cargas e das linhas incluídas no caso base.

4.2.5.2. Dados dos Componentes da Rede

Devem-se apresentar, nos documentos de estudos de transitórios eletromagnéticos, todos os dados dos componentes utilizados na modelagem da rede no programa ATP, incluindo as considerações pertinentes à utilização de determinado tipo de modelagem em função da representação requerida no estudo.

A seguir, relacionam-se as principais informações necessárias à apresentação dos dados utilizados na modelagem da rede:

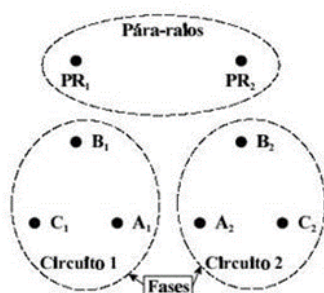
- **Linhas de transmissão**

- Devem-se apresentar, em forma de tabelas, os dados de sequência zero e positiva, por classe de tensão, por km, de todas as linhas representadas no estudo.
- Os parâmetros das linhas de transmissão pertencentes ao Lote do Leilão de Transmissão objeto do estudo devem respeitar os dados de projeto básico da(s) linha(s) de transmissão, os quais também devem ser apresentados no conjunto de estudos do projeto do empreendimento.
- Caso exista compensação série nas linhas de transmissão, os seus dados também devem ser informados.
- No caso de linhas de transmissão em circuito duplo com circuitos na mesma torre ou não, assim como das que correm em paralelo acopladas a outras linhas de transmissão, deve-se fazer referência à geometria da(s) torre(s) considerada(s) no estudo e ao esquema de transposição, se existente, além de informar se a distância entre eixos e a extensão do percurso em paralelo, em se tratando de linhas de transmissão que compartilham a mesma rota. Deve ser apresentada, nos documentos referentes aos estudos de transitórios eletromagnéticos, a entrada dos dados correspondentes à rotina Line Constant do ATP, utilizada na obtenção dos parâmetros com os acoplamentos.

Atenção especial deverá ser dada ao esquema de transposição, principalmente nos casos em que se trata de linhas em circuito duplo. O esquema de transposição, nestes casos, deve seguir

o preconizado no submódulo 2.7 dos Procedimentos de Rede (item 3.8.2), onde se estabelece que circuitos duplos devem empregar a transposição no sentido oposto. A adoção de esquemas de transposição no mesmo sentido para linhas em circuito duplo resulta em solicitações consideravelmente distintas, as quais, dependendo do tipo de estudo, podem resultar em solicitações otimistas ou conservadoras. Desta forma, é necessário que as fases dos circuitos paralelos sejam posicionadas corretamente de tal forma que um circuito “espelhe” o circuito adjacente.

Representação esquemática de uma linha de circuito duplo.



Pares de condutores simétricos em uma linha de circuito duplo



Com esse posicionamento, é possível então realizar a transposição com sentido oposto e sempre manter o espelhamento entre os 2 circuitos. A título de exemplo, figura a seguir, ilustra o posicionamento inadequado dos cabos fase (numerados em vermelho) e a correção necessária (destacada em azul) para permitir o espelhamento dos circuitos e a aplicação de transposição em sentidos opostos.

| # | Ph.no | Rin [cm] | Rout [cm] | Resis [ohm/km DC] | Horiz [m] | Vtower [m] | Vmid [m] | Separ [cm] | Alpha [deg] | NB |
|---|-------|----------|-----------|-------------------|-----------|------------|----------|------------|-------------|----|
| 1 | 1 | 0 | 1.4625 | 0.0653 | -6.8 | 44.4085 | 23.6285 | 45.7 | 45 | 4 |
| 2 | 2 | 0 | 1.4625 | 0.0653 | -5.6 | 34.2655 | 13.4855 | 45.7 | 45 | 4 |
| 3 | 3 | 0 | 1.4625 | 0.0653 | -12.1 | 33.5085 | 12.7285 | 45.7 | 45 | 4 |
| 4 | 4 | 0 | 1.4625 | 0.0653 | 12.1 | 33.5085 | 12.7285 | 45.7 | 45 | 4 |
| 5 | 5 | 0 | 1.4625 | 0.0653 | 5.6 | 34.2655 | 13.4855 | 45.7 | 45 | 4 |
| 6 | 6 | 0 | 1.4625 | 0.0653 | 6.8 | 44.4085 | 23.6285 | 45.7 | 45 | 4 |
| 7 | 0 | 0.360058 | 0.67 | 0.8033 | -10.4 | 50.88 | 33.43 | 0 | 0 | 1 |
| 8 | 0 | 0 | 0.457 | 4.23 | 10.4 | 50.88 | 33.43 | 0 | 0 | 1 |

TROCAR FASES 4 E 6 PARA ESPELHAR OS CIRCUITOS 1 E 2

No caso de linhas de transmissão de circuito simples, mas com trechos de circuitos duplos, é importante verificar o posicionamento de cada um dos cabos fase dos circuitos que compartilham a mesma torre, conforme citado anteriormente, o que pode mudar para cada trecho (necessidade

de verificar o posicionamento em cada LCC de acoplamento). Nestas condições, recomenda-se também o espelhamento (simetria) dos circuitos a fim de se definir corretamente as solicitações nos diversos estudos previstos.

- **Transformadores**

- Devem-se apresentar, em tabelas, os dados de todos os transformadores modelados (X_p , X_s e X_t), informando-se, também, quais foram representados com as respectivas curvas de saturação.

- Os transformadores eletricamente próximos aos pontos de manobra deverão ser representados com suas curvas de saturação. Sugere-se que estas curvas sejam modeladas com, no mínimo, 5 pontos. Quanto mais precisa a representação, melhor para a simulação. Curvas de saturação mal condicionadas podem afetar as simulações, principalmente caso se trate de manobra do próprio elemento representado. Havendo necessidade da modelagem da histerese magnética do transformador, como no caso dos estudos das manobras desses equipamentos, devem ser apresentados o valor da tensão de joelho (pu), a reatância saturada $-X_{ac}$ (%) e os pontos da curva de saturação adotada.

- **Reatores**

- Devem-se apresentar em tabela todos os reatores, informando a potência em Mvar e a tensão correspondente em kV, se manobrável ou fixo, e o valor do aterramento de neutro, quando considerado, em ohms.

- **Banco de capacitores shunt**

- Devem-se apresentar em tabela todos os bancos de capacitores representados, informando-se a potência em Mvar e a tensão correspondente.

- Nos casos de estudos de manobra de bancos de capacitores, caso existam reatores limitadores em série com o banco, as suas características elétricas devem também ser explicitadas. Em caso de adoção de disjuntores com resistores de pré-inserção ou de chaveamento controlado, as suas características deverão ser informadas no item disjuntores.

- **Compensação série**

- Devem-se apresentar o valor da reatância capacitiva, em ohms, e o valor em Mvar correspondente para a tensão respectiva.

- Nos estudos de dimensionamento de bancos série, deverá ser apresentado também o seu esquema completo, incluindo capacitores, MOVs, by-pass etc.

- **Compensador estático**

- Deve-se apresentar o ponto de operação do ajuste de regime permanente utilizado para a simulação pré-manobra do caso base. A desconsideração do efeito do CER, para avaliações comuns do projeto básico, tais como energizações de linha, religamento tripolar e rejeição de carga, é na maioria das vezes uma hipótese conservadora.

- Para os estudos específicos referentes ao dimensionamento e aos ajustes do compensador estático, normalmente realizados pelo fabricante, deverão ser representados o transformador do CER e sua curva de saturação, a malha de aquisição de dados da rede (V e I) e suas filtragens, a malha de controle PI do AVR, as estratégias de sub e sobretensão, a capacidade de sobrecarga indutiva, bem como o disparo dos RCTs e TSCs. Esses modelos de CER são de responsabilidade da Transmissora e devem ser aferidos pelo fornecedor do equipamento.

- **Elos de corrente contínua (HVDC)**

Nos casos em que os pontos de manobra pertencentes ao empreendimento estiverem eletricamente próximos a estações conversoras de corrente contínua, de tal sorte que estas estações permaneçam dentro da área retida da simulação, o HVDC deve ser representado de forma estática em seu ponto de operação, sem a representação dos seus controles.

Os elos de corrente contínua consomem potência reativa, de uma forma dependente da potência transmitida. Os respectivos projetos são elaborados de forma a que, em regime permanente, a troca de potência reativa entre o subsistema CC e o subsistema CA em seu ponto de conexão seja próxima de zero ou de valor conhecido.

Com isso, toda estação conversora é dimensionada com bancos de capacitores manobráveis para compensação reativa e com bancos de filtros manobráveis e de efeito capacitivo, que equivalem, do ponto de vista de regime permanente, a uma compensação reativa adicional.

Para cada elo de corrente contínua, cada ponto de operação correspondente a uma conversão CA-CC (retificador) ou CC-CA (inversor) implica em uma certa quantidade de harmônicos que resultam do resultado dessa conversão.

Como o sistema CA tem requisitos de qualidade a seguir, esses harmônicos devem ser limitados. Por esse motivo são dimensionados filtros, a partir da necessidade total de compensação reativa das estações conversoras, que são manobrados para limitação desses harmônicos, trazendo por consequência o controle do fluxo de reativos de/para o sistema CA.

Esses filtros têm impacto na resposta transitória da rede no entorno da estação conversora. Por este motivo, devem ser incluídos e representados nas simulações de transitórios eletromagnéticos nas respectivas barras. Os filtros são compostos por um ou mais ramos R-L-C e devem ser assim modelados e não apenas como capacitores puros.

Os transformadores conversores e suas curvas de saturação também devem ser representados, como parte do HVDC incluído na rede retida.

O elo CC deve ser modelado como uma fonte de corrente, conectada no lado de baixa do transformador conversor. O número de transformadores conversores (monofásicos ou trifásicos) e o seu número de enrolamentos, dependem do arranjo adotado no projeto.

Maiores detalhes referentes a sistemas HVDC são apresentados no item 4.3 deste documento.

- **Para-raios**

- Devem-se apresentar a tensão nominal, a capacidade de dissipação de energia (kJ/kV) e, em tabela, os pontos (V x I) utilizados na modelagem dos para-raios.

- Para os estudos de manobra deve ser apresentada a característica da curva de descarga para 30 x 60 μ s. Para os estudos de coordenação do isolamento, deve ser apresentada a curva de 8 x 20 μ s. São duas curvas distintas, para ensaios e fenômenos distintos, e na simulação os pontos não devem ser misturados.

- Geralmente, os catálogos de para-raios informam pontos insuficientes para representação adequada em estudos de transitórios eletromagnéticos, gerando resultados irreais em termos de absorção de energia e podendo ocasionar instabilidades numéricas. Desta forma, é necessária atenção especial à representação do ponto inicial das curvas e adicionar pontos, por interpolação ou consulta aos fabricantes, por exemplo, de forma a eliminar transições abruptas na região de atuação dos para-raios.

- A especificação dos equipamentos deve levar em conta a característica do para-raios simulado. Caso sejam adquiridos para-raios com curvas muito distintas, os estudos serão invalidados.

- **Equivalentes da rede**

- Devem-se apresentar em tabela os dados dos equivalentes próprios e as impedâncias de transferência (mútuas), de mesma tensão ou entre tensões diferentes, informando-se os parâmetros de sequência zero e positiva.

- **Unidades geradoras**

- Modelagem simplificada (Fonte 14 – ATP) – Devem-se apresentar as reatâncias subtransitórias e as potências das unidades geradoras (MVA);

- Modelagem de máquina completa (Fonte 58/59 – ATP) – Não é o caso geral. Entretanto, em casos de estudos específicos, onde se deseja avaliar algum efeito sobre a própria máquina ou onde seja necessário, por algum motivo, estender a simulação por mais tempo ou ainda onde se deva levar em conta o efeito de reguladores de tensão e/ou velocidade, o modelo completo de

máquina pode vir a ser necessário. Neste caso, devem-se apresentar as reatâncias e as constantes de tempo das máquinas consideradas na modelagem.

- **Disjuntores**

- No caso de simulações estatísticas, deve-se informar o número de chaveamentos adotados, o desvio padrão com o truncamento das chaves correspondentes ao contato principal e o auxiliar do disjuntor (para manobra de resistores de pré-inserção), quando este último existir.

- Deve-se informar se nos disjuntores serão empregados resistores de pré-inserção ou dispositivos para manobra controlada (sincronizadores).

- No caso de disjuntores com resistor de pré-inserção, deve ser informado o valor do resistor em ohms e o tempo da inserção considerado.

- No caso de emprego de dispositivo sincronizador, deverão ser fornecidos os parâmetros do conjunto mecânico-eletrônico, tais como: desvio padrão da precisão do dispositivo eletrônico; dispersão máxima para o dispositivo mecânico; taxa de decaimento da rigidez dielétrica (RDDS). Para a modelagem dos dispositivos sincronizadores, recomenda-se a consulta ao documento da Cigré indicado na referência [6.5].

- **Cargas**

Não deverão ser conectadas cargas, de forma direta, em barras com tensões de Rede Básica. Caso seja imprescindível a representação de cargas em sistemas de 230 kV, a mesma não deverá ser realizada dentro da região compreendida até a primeira vizinhança da barra sob análise.

Quando da representação de cargas RL ou RC, a conexão em série é, em geral, a mais adequada e precisa para a faixa de frequência dos estudos de manobra.

Entende-se como modelagem com carga a representação de parâmetros concentrados de resistências e reatâncias (capacitivas ou indutivas), conectadas em barras da rede interna. O uso indevido de cargas pode inserir amortecimentos irrealistas nos picos de ressonâncias paralelas e atenuar as sobretensões transitórias em estudos de manobra.

Assim, sua aplicação é aceitável em condições radiais ou como refinamento de casos críticos, com alocação criteriosa de cargas RL/RC série, em barras com montantes e pontos de conexão compatíveis com a realidade topológica da rede, ou seja, representadas em níveis iguais ou inferiores a 138 kV.

4.2.5.3. Parâmetros da Simulação

Como parâmetros da simulação, devem-se apresentar as seguintes informações:

Tempo total da simulação (ms)

- Para os estudos das manobras de linhas de transmissão e de transformadores, é suficiente um tempo total de simulação da ordem de 300 a 500 ms, após a manobra em análise. Em caso de religamento, deve-se acrescentar o tempo morto para obtenção do tempo total de simulação. Para a manobra de energização de transformadores pode-se estender a simulação por cerca de 1 segundo, mas apenas para efeito de observação da tendência de amortecimento das formas de onda (correntes de Inrush).
- Para os estudos das tensões transitórias de restabelecimento dos disjuntores é recomendável que o tempo total da simulação seja da ordem de um ciclo da frequência fundamental, após a abertura do disjuntor.

Passo de integração (ms)

- Deve ser verificado, para cada tipo de fenômeno estudado, se o passo de integração escolhido está adequado, em função da faixa de frequências envolvidas no fenômeno em análise e das características dos componentes modelados na base de dados do ATP.
- O Guia de Aplicação do Programa ATP orienta acerca da definição do passo de integração a ser calculado, no sentido de garantir resultados precisos das simulações.
- Deve(m) ser informado(s) o(s) passo(s) de integração utilizado(s) para cada um dos estudos de transitórios eletromagnéticos apresentados.

Equipamentos das Instalações em Operação

Para os equipamentos que já estão em operação, especificamente linhas de transmissão e transformadores, poderão ser utilizadas as características dos equipamentos como efetivamente implantados ou os modelos utilizados durante a fase dos estudos pré-operacionais, que devem ser solicitados aos agentes proprietários das instalações.

4.2.6. Avaliação da Adequação da Compensação Shunt de Linhas de Transmissão

Quando tratar-se de linha de transmissão compensada por reator shunt instalado em seus terminais, é recomendável investigar a possibilidade da ocorrência de ressonância na própria linha, entre circuitos, caso esta seja em circuito duplo, ou entre linhas que correm em paralelo dividindo a mesma faixa de passagem.

Tensões induzidas elevadas que surgem em função de uma condição de ressonância, ou condição operativa próxima a esta, resultam em dificuldades na extinção do arco secundário e no atraso do decaimento da carga residual da linha de transmissão, inviabilizando as manobras de religamento tripolar e monopolar, além de poder ocasionar o aumento da TRT aplicada aos disjuntores, durante a manobra de eliminação de falta.

Além disso, existe o risco de danificação dos equipamentos instalados na linha e de se comprometer a segurança da instalação.

Quando identificada a condição de ressonância, é necessário propor medidas para a sua mitigação. Nesses casos, a instalação de reatores ou resistores de neutro tem-se mostrado uma medida efetiva. Complementarmente, deve ser verificada a adequação do esquema de transposição da(s) linha(s), quando esta for empregada.

A solução pela alteração do grau de compensação shunt da linha somente poderá ser adotada mediante a comprovação de que o novo valor proposto para os reatores não resulte em restrições quanto ao desempenho do sistema, sob os aspectos da frequência fundamental e de transitórios eletromagnéticos.

Antes do desenvolvimento dos estudos de transitórios eletromagnéticos associados às manobras das linhas de transmissão, considera-se necessária a verificação da sua adequação quanto à compensação shunt proposta, investigando-se o risco da ocorrência de ressonâncias e levando-se em consideração a faixa de frequência operativa do sistema (56–66Hz).

Além de influenciar no desempenho do religamento automático, a interação reator-linha influencia diretamente as manobras das chaves de aterramento da linha, em função dos acoplamentos eletrostáticos e eletromagnéticos entre linhas na mesma estrutura, ou ainda em linhas na mesma faixa de servidão. Tais situações podem impor a superação dos limites normalizados para as correntes e tensões induzidas para a manobra de abertura da chave de terra, colocando em risco a operação desses equipamentos e o pessoal de manutenção. Os valores de reatância dos reatores em paralelo e dos reatores de neutro, caso existam, são parâmetros que permitem controlar o grau de severidade imposto às chaves de terra.

Recomenda-se a realização das seguintes avaliações:

- Verificação do grau de compensação da linha de transmissão e da possibilidade de ocorrer ressonância na frequência fundamental:
 - O grau de compensação de uma linha de transmissão é dado pela relação do montante total da compensação shunt (Mvar), soma das potências dos reatores instalados em seus terminais e pela capacitância de sequência positiva (Mvar) total da linha.
 - De acordo com a referência [6.4], a condição de ressonância caracteriza-se quando $1/(\omega.L) = \omega.(C1 + C0)/3$, onde: L= indutância dos reatores da linha, C1= capacitância sequência positiva, e C0= capacitância sequência zero da linha; sendo $k = C0/C1$ e $h = 1/(\omega^2.L.C1)$. Deduz-se que a ressonância na frequência fundamental ocorre quando o grau de compensação da linha for dado por $h=(2+k)/3$. A título de exemplo, considerando uma linha com a relação (C0/C1), $k=0,40$, a ressonância ocorre somente quando o seu grau de compensação for da ordem de 80%.
 - Essa metodologia pode ser considerada simplificada por utilizar somente os parâmetros transversais com os acoplamentos entre as fases e a fase-terra de um circuito de linha de transmissão, sendo indicada para uma primeira avaliação.
- Verificação da existência de ressonância por indução entre circuitos ou entre linhas paralelas, sob condição de abertura tripolar ou monopolar:
 - Nesse caso, é recomendada uma análise mais rigorosa, feita pela simulação digital, usando, por exemplo, o programa ATP e considerando-se a modelagem completa da linha com todos os acoplamentos eletrostáticos e eletromagnéticos representados. Adicionalmente, deve-se considerar na modelagem, caso existente, o detalhamento do esquema das transposições da(s) linha(s) envolvidas.

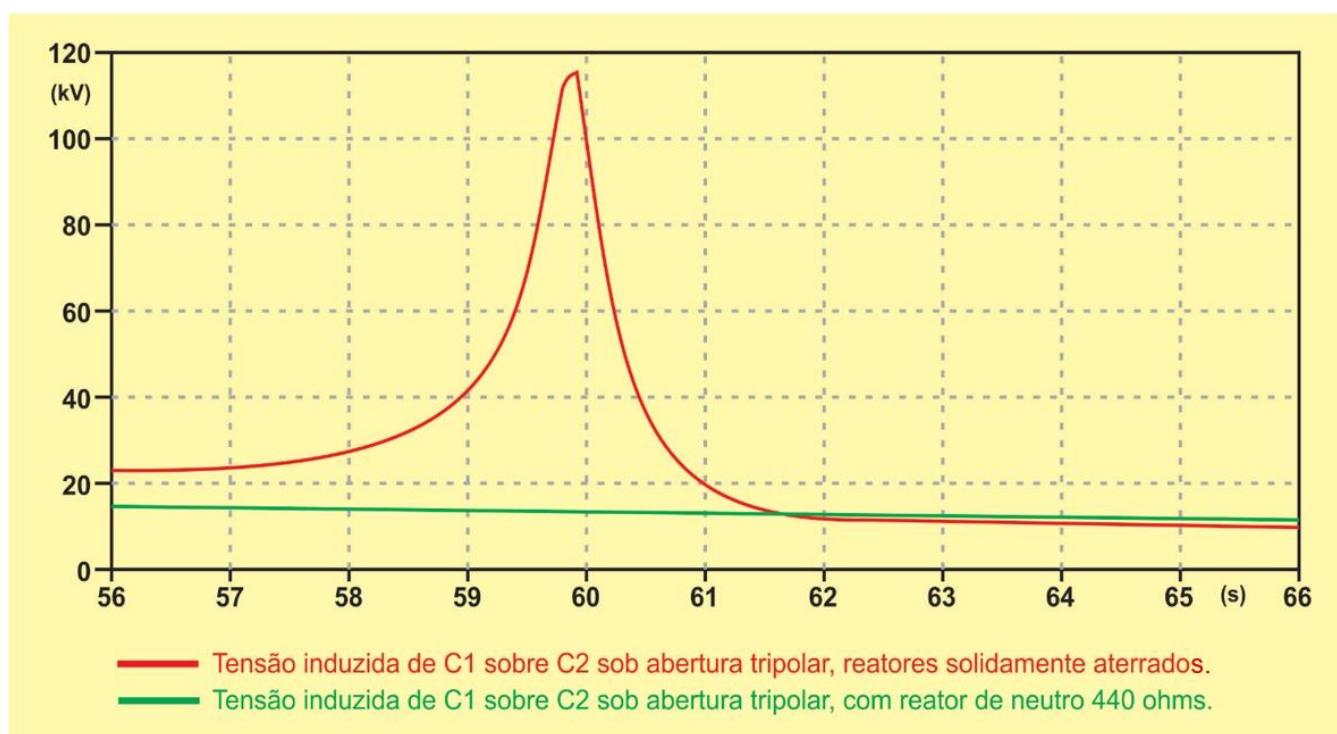
No item 9.3, é apresentado um exemplo da obtenção da matriz com os parâmetros modais de uma linha de transmissão em circuito duplo, pelo processamento da rotina Line Constant do ATP. No mesmo anexo, é também mostrada a implementação da modelagem na base de dados do ATP, a partir da matriz com os parâmetros modais, incluindo o detalhamento da transposição, conforme o projeto básico da linha.

As avaliações serão efetuadas pela obtenção — a partir de simulações com o programa ATP — da resposta em frequência vista dos terminais da linha associados à(s) fase(s) ou circuitos investigados, abrangendo as condições de abertura tripolar e monopolar. Deve-se avaliar a faixa da frequência operativa do sistema (56-66Hz), verificando-se se todos os reatores terminais da linha estão conectados, devendo-se representar adequadamente o aterramento utilizado nesses reatores.

A Figura 4.3 ilustra uma condição de ressonância observada para uma linha de transmissão em circuito duplo com grau de compensação de 56%, cujas características estão apresentadas no exemplo de

modelagem da linha no ATP do item 9.3. Foi identificada ressonância no entorno da frequência fundamental, por ocasião da abertura tripolar de um dos circuitos da linha. A curva na cor vermelha refere-se à tensão induzida por acoplamento eletrostático e eletromagnético de C1 sobre C2, sob a condição de abertura tripolar de C2. A curva na cor verde mostra a mitigação do problema através da instalação de reator de neutro.

Figura 4.3 Exemplo de Condição de Ressonância – Abertura Tripolar – Linha de Transmissão em Circuito Duplo.



4.2.7. Estudo de Energização de Linhas de Transmissão

O estudo de energização de linha de transmissão deve ser desenvolvido dentro das atividades do projeto básico da instalação, com os seguintes objetivos principais:

- Avaliar as máximas sobretensões transitórias impostas aos barramentos das subestações e aos terminais das linhas de transmissão;
- Avaliar as energias dissipadas nos para-raios de linha, tendo em vista o seu dimensionamento sob o ponto de vista da capacidade de absorção de energia (kJ/kV);
- Verificar a adequação da coordenação do isolamento das estruturas das linhas de transmissão frente a surtos de manobras, efetuando-se a integração com os estudos do seu projeto básico.

4.2.7.1. Diretrizes para os Estudos de Energização de Linhas de Transmissão

Nos estudos, deve ser considerada a possibilidade de energização por ambos os sentidos da linha de transmissão, com o sistema íntegro e degradado, sob a indisponibilidade de um componente da rede

(n-1). Se houver reatores na linha, devem ser consideradas as indisponibilidades somente dos elementos manobráveis.

É necessário que as avaliações sejam efetuadas com e sem a aplicação de defeitos ao longo da linha. Esses defeitos devem ser aplicados, pelo menos, no terminal energizado, no meio da linha e na extremidade oposta da linha. Mais pontos para a aplicação do defeito, em particular para as linhas mais longas, resultam em avaliações mais precisas.

Os tempos de eliminação dos defeitos devem corresponder aos relacionados na Tabela 2 do item 2.4.1.12. do Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS, em função da tensão nominal da rede.

No caso do estudo de energização de linhas de transmissão com compensação série, deve-se realizar o by-pass do capacitor série, após a aplicação do defeito, considerando-se as informações do projeto básico do equipamento; e caso ainda não disponíveis, é preciso considerar os tempos para o by-pass, conforme recomendado no item 2.5.4.1.12 do Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS.

Conforme descrito no item 4.2.5.2, atenção especial deverá ser dada ao esquema de transposição, principalmente nos casos em que se trata de linhas em circuito duplo. O esquema de transposição, nestes casos, deve seguir o preconizado no submódulo 2.7 dos Procedimentos de Rede (item 3.8.2), onde se estabelece que circuitos duplos devem empregar a transposição no sentido oposto.

4.2.7.2. Premissas para Ajuste dos Casos ATP

As sobretensões causadas por energização de linhas de transmissão são geralmente mais severas sob condição da rede mais fraca: com menor nível de curto-circuito, a montante da manobra, como é o caso das configurações com menor número de unidades geradoras despachadas, verificado na maioria das vezes em condição de carga leve, ou em condição de recomposição de rede.

Para este tipo de manobra, o ajuste de caso tem por objetivo certificar-se de que as relações de impedância (de sequência positiva e zero) estão adequadas. Ou seja, se a topologia de fato corresponde à realidade. Em resumo, para a manobra de energização de linhas, são importantes a tensão pré-manobra na barra emissora, a topologia da rede e o nível de curto-circuito trifásico e monofásico, nas barras em análise.

Neste sentido, o caso base de ATP será ajustado de maneira a reproduzir o caso base de fluxo de potência do PAR-ONS, o qual deve ser escolhido de maneira a contemplar a condição mais crítica para a manobra.

A tensão de pré-manobra deve ser ajustada igual à máxima tensão operativa em correspondência à classe de tensão da rede, conforme o Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS.

4.2.7.3. Desenvolvimento das Simulações e Análises

Em função da aleatoriedade dos instantes de fechamento dos polos do disjuntor, o estudo das manobras de energização deve ser realizado de maneira estatística, considerando-se pelo menos uma amostragem de duzentos chaveamentos.

Para o controle das sobretensões, pode ser adotado, quando necessário, resistor de pré-inserção, devendo-se informar o seu valor (em ohms) com o seu tempo de inserção (ms). Caso o estudo conclua pela sua necessidade, devem-se determinar os parâmetros de sua especificação (tempo de inserção, corrente de curta/longa duração e potência).

Para a modelagem do disjuntor no programa ATP, aplicam-se as recomendações do item 2.5.4.1 do Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS, destacando-se os seguintes aspectos:

- O disjuntor deve ser representado pela chave estatística, com os tempos de fechamento caracterizados por distribuição gaussiana, com o tempo de fechamento uniformemente distribuído ao longo de um ciclo da senoide, sendo recomendados, pelo menos, (± 2) desvios padrões em correspondência com a máxima dispersão entre polos das três fases do disjuntor;
- Na modelagem de disjuntores dotados de resistores de pré-inserção, tanto os contatos principais quanto os auxiliares devem ser modelados como chaves estatísticas; a operação dos contatos principais precisa ocorrer de maneira dependente daquela associada aos contatos auxiliares, após o tempo de inserção dos resistores das três fases, levando-se em conta sua dispersão e tempo médio.

No desenvolvimento do estudo, as análises serão focadas nos aspectos relevantes para o projeto básico da instalação, destacando-se: o valor das sobretensões a que ficam submetidos os equipamentos localizados nas subestações e nos terminais das linhas de transmissão; os para-raios de linha, que devem ser dimensionados para dissipar, sozinhos, a energia resultante da manobra de energização; e a verificação da coordenação do isolamento da linha de transmissão frente às sobretensões fase-fase e fase-terra, advindas da manobra da linha.

Com o intuito de determinar a sobretensão a ser usada como referência, na coordenação do isolamento da linha de transmissão para surto de manobras devem considerar-se aquelas resultantes da energização sob condição sem defeito, visto que, sob falta, ocorre o desligamento da linha pela atuação da proteção. Já para o dimensionamento da capacidade de dissipação de energia dos para-raios, considere-se a condição da manobra sob falta.

A energização deve ser viabilizada mesmo para a máxima tensão pré-manobra.

4.2.7.4. Apresentação dos Resultados

A apresentação dos resultados estatísticos das simulações no documento do estudo deve ser em tabelas, contendo: a identificação do caso estudado; a configuração do sistema; o local do defeito, quando aplicado; o valor da tensão de pré-manobra (pu); os valores médios (pu); os desvios padrões (pu), os valores máximos (pu); e a energia dissipada nos para-raios (kJ), para todos os pontos de interesse investigados.

Devem também ser efetuadas simulações determinísticas, apresentando-se os gráficos das formas de onda das sobretensões e das energias dissipadas nos para-raios, correspondentes às condições mais críticas encontradas.

Na apresentação dos gráficos com as formas de onda das sobretensões e energia dissipada nos para-raios, deve haver coerência na escala dos tempos que caracterizam os fenômenos de transitórios eletromagnéticos.

O item 9.4 apresenta uma sugestão de itens a serem contemplados no relatório dos estudos de transitórios eletromagnéticos de energização, religamento tripolar e rejeição de carga.

4.2.8. Estudo de Religamento Tripolar de Linhas de Transmissão

O estudo de religamento tripolar de linhas de transmissão, em complementação aos estudos de energização de linhas de transmissão e rejeição de carga, deve ser desenvolvido dentro das atividades para o projeto básico da instalação, tendo os mesmos objetivos principais do estudo de energização, descritos no item 4.2.7:

As manobras de religamento tripolar, de maneira geral, sempre resultam nos piores valores das sobretensões, em complemento às obtidas no estudo da manobra de energização da linha de transmissão.

Os reatores fixos de linhas manobradas podem, eventualmente, ficar sujeitos a solicitações elevadas de tensão e de corrente advindas de oscilações livres fruto da interação entre o reator (elemento indutivo) e as capacitâncias da linha (elemento capacitivo). Essas oscilações se iniciam após a abertura dos disjuntores terminais, e permanecem solicitando o reator durante o tempo morto do religamento.

Caso a Transmissora deseje avaliar essa questão, os reatores devem ser representados em maior detalhe na linha manobrada, considerando inclusive a sua característica de saturação. Caso esse refinamento não seja feito, não será possível identificar adequadamente essas oscilações/solicitações sobre o reator.

Fato que minimiza a probabilidade de ocorrência desse fenômeno é a especificação e aquisição de reatores com os valores do joelho das curvas de saturação suficientemente elevados (maior ou igual 1,5 pu da tensão nominal do reator).

Conforme descrito no item 4.2.5.2, atenção especial deverá ser dada ao esquema de transposição, principalmente nos casos em que se trata de linhas em circuito duplo. O esquema de transposição, nestes casos, deve seguir o preconizado no submódulo 2.7 dos Procedimentos de Rede (item 3.8.2), onde se estabelece que circuitos duplos devem empregar a transposição no sentido oposto.

4.2.8.1. Diretrizes para os Estudos de Religamento Tripolar

Deve-se avaliar o religamento tripolar da seguinte forma:

- Manobras com e sem sucesso, a partir dos dois terminais da linha de transmissão, considerando sempre conectados os reatores fixos da linha, caso existam, e com reator (ou resistor) de neutro, quando este for recomendado; as indisponibilidades dos reatores devem ser consideradas somente quando forem manobráveis por meio de energização;
- Linhas em circuito simples, que não compartilhem a mesma faixa com outras linhas de transmissão, poderão ser modeladas com parâmetros distribuídos, valendo-se da representação de Bergeron, com parâmetros desacoplados. Entretanto, quando existirem linhas de transmissão em circuito duplo, com circuitos na mesma torre, a modelagem deve considerar, todos os acoplamentos eletrostáticos e eletromagnéticos presentes entre fases e entre circuitos. Também deve ser representado o esquema de transposição, quando este for empregado. Nos casos em que houver linhas de transmissão, com comprimentos apreciáveis, que corram em paralelo com outras linhas, por longos trechos, na mesma faixa de passagem ou em situações onde a distância entre eixos dessas linhas seja pequena, o tipo de modelagem acima poderá, em alguns casos, vir a ser necessário. Deve ser considerada a seguinte sequência de eventos:
 - Defeito monofásico aplicado em um dos terminais ou no meio da linha de transmissão;
 - Abertura tripolar do terminal mais próximo ao defeito com o tempo após a sua incidência, definido de acordo com a Tabela 2 do item 2.4.1.12 do Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS, em função da tensão nominal da rede;
 - Abertura da outra extremidade da linha com um tempo correspondente ao da transferência de disparo da proteção de 20 ms, após abertura do 1º terminal;
 - Extinção do defeito, após a abertura do segundo terminal (tempo de extinção típico da ordem de quatro ciclos);
 - Contagem do tempo morto para o religamento de 500 ms;
 - Simulação do religamento estatístico, com amostragem de duzentos chaveamentos por manobra estudada.

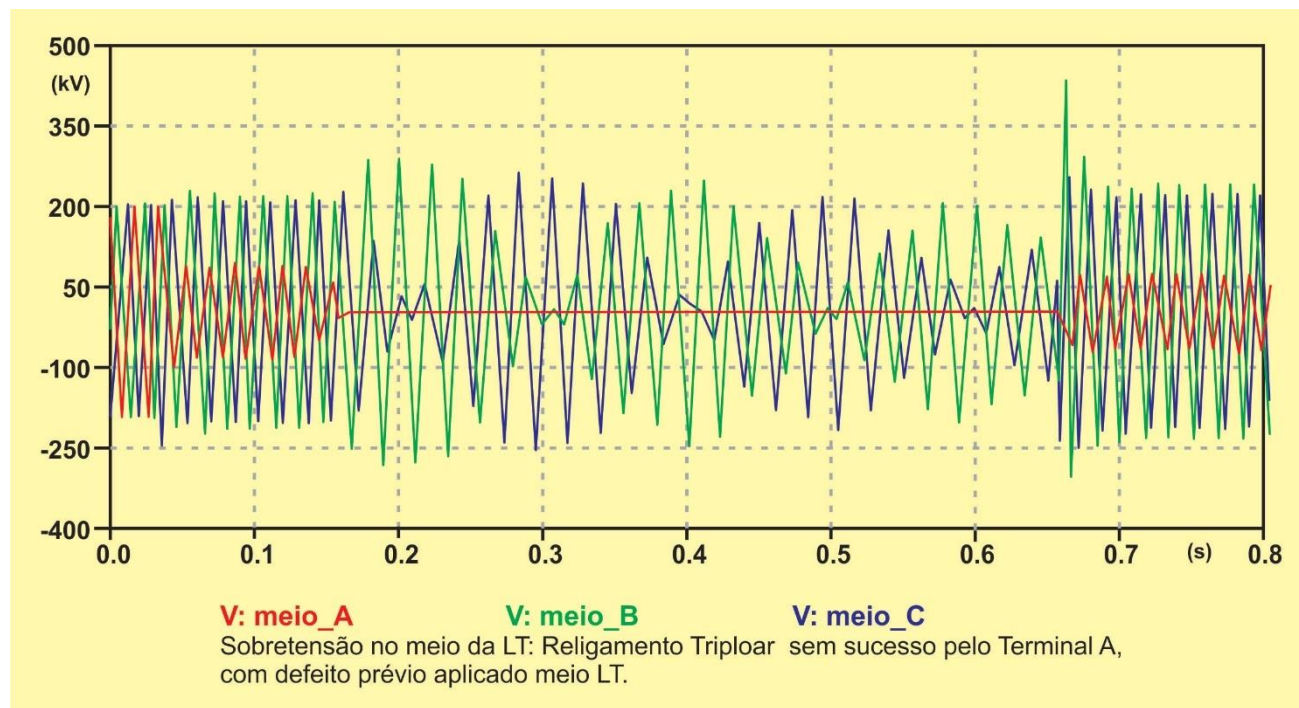
No caso do estudo do religamento tripolar para linhas de transmissão com compensação série, é necessário realizar o by-pass do capacitor série após a aplicação do defeito, considerando-se as informações do projeto básico do equipamento; caso ainda não estejam disponíveis, devem-se considerar os tempos para o by-pass, conforme recomendado no item 2.5.4.1.12 do Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS.

Na avaliação de religamento tripolar, para a etapa de projeto básico, deve-se manobrar com a compensação serie já reinserida, antes do religamento da linha de transmissão.

Aplicam-se as diretrizes do item 4.2.5.3 do presente documento, relativo aos parâmetros da simulação, devendo-se, no caso do religamento tripolar, ajustar o tempo total da simulação e apresentação dos resultados com margem suficiente para abranger todas as temporizações envolvidas na manobra, geralmente da ordem de 800 ms.

A Figura 4.4, a seguir, apresenta como exemplo das temporizações envolvidas nesse tipo de manobra o oscilograma da sobretensão no meio de uma linha de transmissão de 230 kV, também com defeito monofásico aplicado, no meio da linha, ao religamento tripolar sem sucesso, a partir de um dos terminais. Pode-se observar, também, as oscilações livres de sobretensões e sobrecorrentes nas fases sãs durante o tempo morto.

Figura 4.4 Religamento Tripolar – Temporizações Envolvidas na Manobra.



Atenção especial deve ser dada ao monitoramento das sobrecorrentes nos reatores e o impacto no seu respectivo dimensionamento.

A localização dos pontos de aplicação dos defeitos pode ser orientada a partir dos casos que apresentaram as piores sobretensões no estudo de energização da linha de transmissão.

4.2.8.2. Premissas para Ajuste dos Casos ATP

O caso base do ATP a ser utilizado nas simulações do religamento tripolar deve ser o mesmo adotado nos estudos das manobras de energização, considerando-se os aspectos dos ajustes do fluxo de potência e das tensões de pré-manobra, conforme diretrizes estabelecidas no item 4.2.7.2 do presente documento.

4.2.8.3. Desenvolvimento das Simulações e Análises

Aplicam-se as mesmas diretrizes apresentadas no item 4.2.7.3, referente ao desenvolvimento das simulações e análises do estudo de energização de linhas de transmissão.

4.2.8.4. Apresentação dos Resultados

Aplicam-se as mesmas recomendações apresentadas no item 4.2.7.4, referente à apresentação dos resultados do estudo de energização de linhas de transmissão.

4.2.9. Estudo de Rejeição de Carga

Em complementação aos estudos de energização e religamento tripolar de linhas de transmissão, o estudo de rejeição de carga tem por objetivo avaliar as máximas sobretensões transitórias que serão impostas aos barramentos das subestações e aos equipamentos terminais das linhas de transmissão, como também as energias dissipadas nos para-raios, tendo em vista o seu dimensionamento sob o ponto de vista da capacidade de absorção de energia.

Conforme descrito no item 4.2.5.2, atenção especial deverá ser dada ao esquema de transposição, principalmente nos casos em que se trata de linhas em circuito duplo. O esquema de transposição, nestes casos, deve seguir o preconizado no submódulo 2.7 dos Procedimentos de Rede (item 3.8.2), onde se estabelece que circuitos duplos devem empregar a transposição no sentido oposto.

4.2.9.1. Diretrizes para os Estudos de Rejeição de Carga

Deve-se estudar a rejeição de carga, considerando:

- Manobras sem a aplicação de defeito prévio;
- Manobras com a aplicação de defeito monofásico prévio;
- Manobras com aplicação de defeito posterior à rejeição e no instante correspondente ao valor máximo (pico) da sobretensão após a abertura;

- Tempos de eliminação dos defeitos, os quais devem corresponder aos relacionados na Tabela 2 do item 2.4.1.12 do submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS, em função da tensão nominal da rede. Para o tempo de abertura do terminal remoto, deve-se considerar mais 20 ms, para a análise sob a aplicação de defeito prévio.
- Realização da manobra por ambos os sentidos da linha e com o fluxo de potência passante o mais próximo possível da capacidade de carregamento de longa duração da linha de transmissão em análise;
- Indisponibilidades somente dos reatores manobráveis, quando existirem reatores na linha;
- Em caso de linha de transmissão em circuito duplo, a condição de rejeição dupla também deve ser estudada.

4.2.9.2. Premissas para Ajuste dos Casos ATP

Os impactos causados pela rejeição de carga são mais severos sob a condição de maior carregamento da linha de transmissão sob análise.

Neste sentido, deve-se ajustar o fluxo de potência no caso ATP, de maneira a impor na linha de transmissão, objeto do estudo, a condição de carregamento com valor o mais próximo possível do limite de carregamento de longa duração da linha. É necessário escolher, como ponto de partida para o ajuste, o caso base de fluxo de potência do PAR-ONS mais adequado possível.

A tensão de pré-manobra deve ser ajustada igual à máxima tensão operativa em correspondência à classe de tensão da rede, de acordo com o Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS.

4.2.9.3. Desenvolvimento das Simulações e Análises

As simulações devem ser realizadas de maneira determinística, merecendo atenção especial a escolha do passo de integração e o tempo máximo da simulação, conforme diretrizes estabelecidas no item 4.2.5.3 do presente documento.

O desenvolvimento do estudo deve priorizar os aspectos relevantes para o projeto básico da instalação, destacando-se, no caso da rejeição de carga, o valor das sobretensões transitórias a que ficam submetidos os equipamentos localizados nas subestações e nos terminais das linhas de transmissão e os para-raios de linha. Estes devem ser dimensionados para dissipar, sozinhos, a energia resultante da manobra de rejeição de carga.

4.2.9.4. Apresentação dos Resultados

A apresentação dos resultados das simulações determinísticas no documento do estudo deve ser feita em tabelas e conter: a identificação do caso estudado; o terminal da realização da rejeição; o tipo de

rejeição; a configuração do sistema; o fluxo na linha; a indicação de com ou sem defeito; a tensão pré-manobra; as sobretensões máximas; a energia dissipada nos para-raios; e a identificação dos gráficos correspondentes à plotagem com as formas de onda das tensões e energias dissipadas nos para-raios.

Na apresentação dos gráficos com as formas de onda das sobretensões e a energia dissipada nos para-raios, deve haver coerência na escala dos tempos que caracterizam os fenômenos de transitórios eletromagnéticos, conforme diretriz estabelecida no item 3.2.2.3 do presente documento.

O item 9.4 apresenta uma sugestão de itens a serem contemplados no relatório dos estudos de transitórios eletromagnéticos de energização, religamento tripolar e rejeição de carga.

4.2.10. Estudo de Religamento Monopolar de Linhas de Transmissão

O sucesso do religamento monopolar traz benefícios para a operação do SIN, já que reduz significativamente o impacto do evento nas tensões dos barramentos e na estabilidade do sistema, podendo em alguns casos evitar desligamentos em cascata e a interrupção do suprimento.

Após a ocorrência do defeito, o religamento tem por finalidade possibilitar a recomposição do sistema, no menor tempo possível, mantidas as condições de segurança operativa, continuidade do abastecimento e qualidade do suprimento.

O estudo deve ser desenvolvido dentro das atividades do projeto básico da instalação, com os seguintes objetivos principais:

- Verificar a viabilidade da implementação do religamento monopolar na LT em análise, determinando o tempo morto mínimo para tal;
- Identificar a possibilidade da ocorrência de situações de ressonância, que podem ocorrer inclusive em função do grau de compensação da LT;

No caso de LT compensada por reator, o estudo deve identificar a necessidade de utilização de reatores de neutro e/ou outros dispositivos de mitigação de correntes de arco secundário, bem como subsidiar a sua especificação e dos para-raios associados.

O documento a ser apresentado deve abranger os seguintes aspectos:

- Estudo das sobretensões transitórias de manobra para o religamento monopolar;
- Estudo da extinção do arco secundário;
- Estudo de ressonância em fase aberta.

Conforme descrito no item 4.2.5.2, atenção especial deverá ser dada ao esquema de transposição da LT, principalmente nos casos de linhas em circuito duplo. O esquema de transposição, nestes casos, deve seguir o preconizado no submódulo 2.7 dos Procedimentos de Rede (item 3.8.2), onde se estabelece que circuitos duplos devem empregar a transposição no sentido oposto. A adoção, nos

estudos, de esquemas de transposição no mesmo sentido para linhas em circuito duplo, produz resultados equivocados. No caso da análise de extinção de arco secundário, por exemplo, a representação incorreta do esquema de transposição pode resultar em solicitações consideravelmente otimistas, conforme apresentado em [6.27].

4.2.10.1. Diretrizes para o Estudo das Sobreensões da Manobra

À modelagem da linha de transmissão e ao ajuste do fluxo de potência no caso ATP para as simulações, aplicam-se as mesmas considerações estabelecidas no item 4.2.8.1 do estudo do religamento tripolar, relativas ao sentido das manobras, devendo ser também com e sem sucesso.

Deve ser considerada a seguinte sequência de eventos para o estudo de manobra do religamento monopolar:

- Defeito monofásico franco aplicado em um dos terminais da linha de transmissão;
- Abertura monopolar do terminal mais próximo ao defeito, com o tempo após a sua incidência definido de acordo com a Tabela 2 do item 2.4.1.12 do Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS, em função da tensão nominal da rede;
- Abertura monopolar do terminal oposto ao defeito no tempo correspondente ao de transferência de disparo da proteção (20 ms), após a abertura do primeiro terminal;
- Extinção do defeito, após a abertura do segundo terminal (como sugestão, pode ser adotado tempo de extinção típico da ordem de quatro ciclos);
- Contagem do tempo morto para o religamento de 500 ms;
- Simulação do religamento estatístico, com amostragem de duzentos chaveamentos, por manobra estudada.

Em circuitos duplos, o ciclo de transposição tem forte influência tanto na corrente de arco secundário quanto no primeiro pico da TRT. Sua análise é fundamental e pode viabilizar o religamento monopolar.

Seccionamentos de linhas existentes, algumas vezes, também levam a operação em condições desfavoráveis, no que se refere ao percentual de compensação reativa shunt dos novos trechos de linha, os quais passam a operar mais próximos da ressonância que no projeto original da linha. Em várias destas situações, os reatores de linha não foram dimensionados com reatores de neutro; portanto, seus neutros não foram dimensionados para suportar tensões elevadas, porque muitas vezes o nível de compensação era originalmente baixo. O religamento monopolar, com as condições de projeto original, funcionava a contento.

Entretanto, a nova condição operativa deve ser avaliada com cuidado. Principalmente se houver circuitos paralelos na mesma faixa de passagem. O problema do acoplamento entre circuitos pode tornar-se ainda mais sério, com o crescimento do nível de tensão de transmissão.

No caso do estudo do religamento monopolar para linhas de transmissão com compensação série, deve-se realizar o by-pass do capacitor série, após a aplicação do defeito, considerando as informações do projeto básico do equipamento; caso ainda não estejam disponíveis, considerar os tempos para o by-pass conforme recomendado no 2.5.4.1.12 do Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS.

A compensação série deve ser reinserida antes do religamento da linha de transmissão. Trata-se de um requisito de projeto.

Aplicam-se as mesmas diretrizes estabelecidas dos itens 4.2.8.2, 4.2.5.3 e 4.2.8.4 do presente documento, relativas ao religamento tripolar, no tocante aos ajustes do caso ATP, desenvolvimento das análises e apresentação dos resultados.

4.2.10.2. Diretrizes para o Estudo da Extinção do Arco Secundário

O arco secundário é aquele mantido para a terra, no ponto de defeito, pelo acoplamento eletrostático e eletromagnético entre as fases sãs e a fase aberta da linha de transmissão.

O sucesso do religamento monopolar dependerá da extinção do arco secundário em função do tempo.

A extinção do arco, por sua vez, depende de diversos fatores, inclusive os atmosféricos, destacando-se os seguintes:

- Amplitude da corrente do arco secundário;
- Amplitude e taxa de crescimento da tensão de restabelecimento do arco secundário;
- Duração do tempo morto;
- Acoplamento eletromagnético entre fases;
 - Silhueta da torre
 - Geometria dos subcondutores por fase
 - Transposição
 - Geometria e proximidade entre circuitos (duplo ou simples)
- Tensão sustentada (regime) na fase aberta;
- Componentes harmônicos da corrente de arco secundário;
- Outros fatores, como velocidade do vento, umidade e temperatura.

Nas variáveis associadas à extinção do arco secundário, exercem influência direta o acoplamento entre as fases sãs e as abertas, assim como a existência de outros acoplamentos em paralelo com o circuito em análise, juntamente com a condição de transposição da linha de transmissão.

A análise da física do arco também mostra que, mesmo na condição em que o arco não tenha mais o montante de energia para se manter no momento do religamento, pode ocorrer, neste instante, a reignição do arco, caso surjam sobretensões transitórias (TRT) que reionizem o meio em decorrência da tentativa de religamento da LT.

O critério atualmente em vigor para aplicação nas instalações da Rede Básica do SIN, conforme o Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS, estabelece que — para o sucesso da extinção do arco secundário — o seguinte par de valores (V_p, I_a) deve ser considerado:

- Valor eficaz do último pico da corrente do arco secundário (I_a); e
- Valor do primeiro pico da tensão de restabelecimento transitória (V_p), estabelecida através do canal do arco extinto.

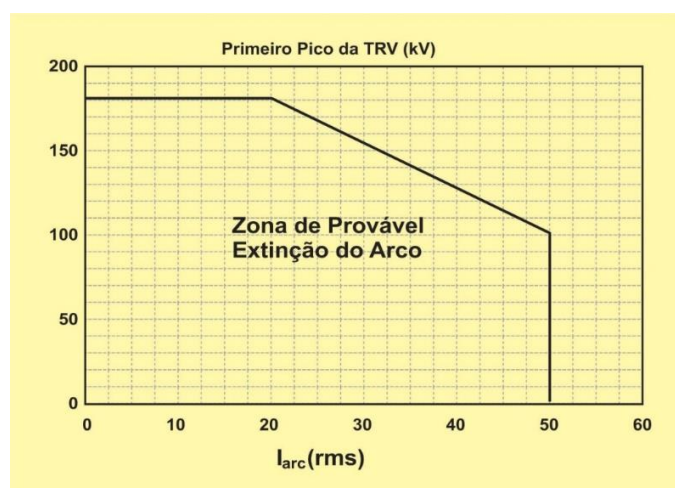
O par de valores (V_p, I_a) deve ser obtido por meio de simulações com o programa ATP, considerando a sequência do religamento monopolar inicialmente sob condição de regime permanente e, em seguida, de transitório da extinção do arco.

Para o sucesso do religamento monopolar, o par de valores (V_p, I_a) deve estar localizado dentro da zona de alta probabilidade de curvas indicativas para a extinção do arco secundário.

Deve ser priorizada a implantação do religamento monopolar em soluções técnicas, garantindo-se a extinção do arco secundário em tempos inferiores a 500 ms. Nesse caso, aplica-se a curva indicativa para análise da corrente de arco secundário da Figura 4.5.

Figura 4.5 Curva Indicativa para Análise da Corrente de Arco Secundário para Tempo Morto até 500 ms.

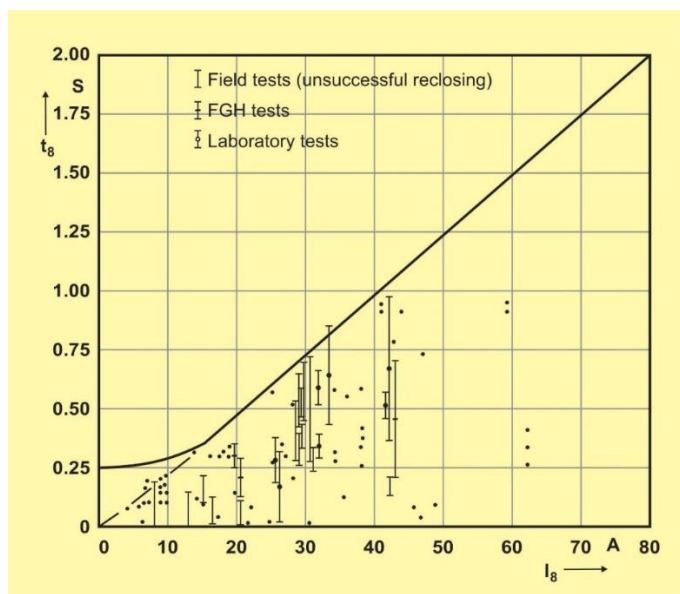
Fonte: Procedimentos de Rede do ONS, Submódulo 2.3.



Somente quando for demonstrada, pela apresentação de resultados, a inviabilidade do atendimento ao requisito com tempos inferiores a 500 ms, é que se deve optar pela utilização do critério para tempos de extinção superiores a 500 ms. Neste caso, aplica-se a curva indicativa para análise da corrente de arco secundário da Figura 4.6.

Figura 4.6 Curva Indicativa para Análise da Corrente de Arco Secundário para Tempo Morto Superior a 500 ms.

Fonte Procedimentos de Rede do ONS, Submódulo 2.3.



Antes de optar pela adoção de tempos de extinção de arco superiores a 500 ms, deve ser avaliada a possibilidade da utilização de métodos de mitigação convencionais, como a adoção de reator de neutro.

No caso de tempos superiores a 500 ms, deve ser demonstrado pela realização de estudo dinâmico que a adoção de tempo morto superior a 500 ms não compromete o desempenho dinâmico do sistema.

Mesmo para tempos superiores a 500 ms, deve-se priorizar a adoção de métodos de mitigação convencionais, e somente quando estes não se mostrarem suficientes, outros meios devem ser considerados. Como método não convencional, pode-se mencionar a adoção de chaves de aterramento rápido, entre outras.

É necessário procurar o menor tempo morto possível, sem exceder 2,0 segundos, e sem extrapolar este critério para correntes de arco superiores a 80 A.

Outro aspecto a ser levado em conta está relacionado ao esquema de transposição dos circuitos da linha de transmissão, como é o caso de linha em circuito duplo, devendo a transposição de um circuito em relação ao outro estar devidamente adequada, no sentido de não acarretar condições desfavoráveis de acoplamento mútuo que inviabilizem o sucesso do religamento monopolar.

Vale destacar, uma vez mais, que a importância da modelagem da linha de transmissão deve ser feita de maneira adequada na base de dados do ATP, para o estudo da extinção do arco secundário no religamento monopolar. Este deve representar todos os acoplamentos eletrostáticos e eletromagnéticos presentes entre fases, entre circuitos e, quando existir, com outras linhas próximas que dividem a mesma faixa de passagem. Também será representado o esquema de transposição quando o mesmo for adotado nas linhas envolvidas.

Em casos como este, é recomendável representar com parâmetros modais a linha de transmissão na base de dados do ATP pela matriz. Esses parâmetros são obtidos por meio do processamento da rotina Line Constant do programa ATP, levando-se em consideração os dados de projeto das linhas (geometria torre típica, características do cabo fase, cabos para-raios e flechas). No item 9.3 é apresentado um caso como exemplo desse tipo de modelagem requerida.

4.2.10.3. Desenvolvimento das Simulações para a Obtenção do Par de Valores (V_p, I_a) e da Tensão Induzida na Fase Aberta

As simulações pelo programa ATP para a determinação do par de valores (V_p, I_a) e da tensão induzida na fase aberta devem ser conduzidas em duas etapas, levando-se em consideração os aspectos da modelagem da rede do item 4.2.5 do presente documento e a representação da linha de transmissão, conforme referência no parágrafo anterior:

- Etapa 1 – Estudo de regime permanente com o objetivo de obter as correntes de arco secundário (I_a) e a tensão induzida na fase aberta;
 - A corrente de arco secundário e a tensão induzida na fase aberta sob condição de abertura monopolar devem ser obtidas para defeito aplicado em ambos os terminais da linha de transmissão e com o fluxo na linha ajustado em patamar o mais elevado possível, com o objetivo de maximizar as correntes induzidas.
 - A corrente de arco secundário e a tensão induzida na fase aberta devem ser obtidas para a faixa de frequência operativa da rede (56 a 66 Hz, com passo não superior a 1 Hz), com o objetivo de verificar possíveis condições de ressonância. Caso seja encontrado qualquer indício de ressonância, a simulação deverá ser refeita com passo inferior, uma vez que as ressonâncias poderão ocorrer para qualquer valor real no intervalo supracitado.
 - A corrente de arco secundário máxima deve ficar limitada em $50 A_{eficaz}$, de acordo com a curva indicativa para análise da corrente de arco secundário do critério adotado.
 - A tensão induzida na fase aberta não deve ser superior à máxima tensão operativa em correspondência à classe de tensão da rede, de acordo com o Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS.

- No caso de linhas híbridas (subterrâneas/subaquáticas/aéreas), compensadas, com trechos aéreos relevantes, deve-se identificar riscos potenciais de ressonância em fase aberta mesmo que, quando da entrada em operação do empreendimento, não se vislumbre habilitação do religamento monopolar. Cabe ressaltar que, futuramente, com uso consolidado de proteções com sistemas de localização de faltas confiáveis, o religamento monopolar pode vir a ser habilitado, sem restrições.

- Etapa 2 – Estudo transitório da manobra de extinção do arco com o objetivo de obter a curva de tensão de restabelecimento transitória do arco (V_p).

- O valor da TRT (primeiro pico) correspondente ao valor (V_p) deve ser obtido para os pontos de aplicação do defeito nos terminais da linha de transmissão, na frequência de 60 Hz, a partir da tensão entre os contatos da chave, durante a sua abertura — simulando a extinção da corrente de arco secundário, conforme estabelecida na primeira etapa de simulação de regime permanente.

Com o par de valores (V_p, I_a), é possível, então, avaliar o sucesso da extinção do arco secundário por sua localização na curva indicativa para análise da corrente de arco secundário, conforme apresentado nas Figura 4.5 e Figura 4.6.

4.2.10.4. Extinção do Arco Secundário pela Utilização de Reator de Neutro

Caso a extinção do arco secundário não seja favorável, deve-se buscar a sua adequação, inicialmente, pelos meios convencionais, como a adoção de reatores de neutro. As etapas 1 e 2, conforme acima descritas, devem, então, ser reprocessadas com o objetivo de definir o valor mais adequado do(s) reator(es) de neutro.

Observa-se que valores compreendidos na faixa de 400 a 600 ohms têm sido adotados com sucesso na adequação do arco secundário, em estudos de religamento monopolar desenvolvidos para as instalações da Rede Básica do SIN.

Durante as etapas de simulação do arco secundário, cobrindo a faixa de frequência operativa do sistema, as tensões no neutro do reator de linha devem ser observadas, tendo em vista a especificação do seu nível de isolamento, juntamente com as correntes no reator de neutro, para efeito do seu dimensionamento. Também deve ser dimensionado o para-raio de neutro.

Devem ser adotadas, preferencialmente, soluções que não resultem na necessidade de fabricação de equipamentos especiais, com nível de isolamento do neutro superior ao valor padronizado em 72,5 kV, conforme recomendado no Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS.

A Tabela 3.1, a seguir, apresenta o roteiro para a especificação do reator de neutro.

Tabela 3.1 – Roteiro para especificação do reator de neutro

| | |
|---|---|
| Valor da Reatância do Reator de Neutro (OHMS) | Valor escolhido em função da necessidade de adequar o par de valores (V_p, I_a) à tensão induzida na fase aberta. Obs.: O reator de neutro também pode vir a ser recomendado para atenuar os pontos de ressonância, em função do grau de compensação reativa shunt da linha (vide item 3.2.3). |
| Corrente de Curta Duração 1 Minuto (AMPERES) | Sugere-se adotar a maior corrente no reator de neutro, verificada nas simulações sob condição de regime permanente (etapa 1) com defeito aplicado, adicionando-se uma margem de segurança (típica), da ordem de 20%, visando a acomodar evoluções futuras dos níveis de curto-circuito na rede. |
| Corrente de Regime Permanente (AMPERES) | Sugere-se valor da ordem de 15% da corrente de curta duração. |
| Potência de Regime Permanente (KVAr) | $P=(Z * I^2)$, em (KVAr), onde: Z= reatância do reator de neutro em (ohms) e I a corrente de regime permanente (em ampères), calculada conforme linha anterior. |
| Nível de Isolamento do Neutro do Reator de Linha (KV) | Valor padronizado – 72,5kV ou maior caso indispensável. |

4.2.10.5. Apresentação dos Resultados

Na apresentação dos resultados estatísticos e determinísticos do estudo das sobretensões transitórias do religamento monopolar, aplicam-se as mesmas diretrizes estabelecidas no item 4.2.8.4 referentes ao estudo do religamento tripolar do presente documento.

Os resultados das simulações referentes às etapas 1 e 2 do estudo da extinção do arco secundário devem ser apresentados em tabelas e complementados com os gráficos das formas de onda das correntes de arco secundário e das tensões correspondentes às condições mais críticas verificadas.

As tabelas devem apresentar os valores das correntes de arco secundário ($K A_{eficaz}$), primeiro pico da TRT ($K V_{pico}$), a tensão induzida na fase aberta ($K V_{eficaz}$), indicando-se os pontos de aplicação dos defeitos, o valor do reator de neutro em ohms com os parâmetros para a sua especificação, caso aquele seja recomendado. A apresentação dos resultados deve abranger a faixa de frequência operativa do sistema (56-66 Hz) considerada nas simulações.

O item 9.5 apresenta uma sugestão de itens a serem contemplados no relatório dos estudos de religamento monopolar.

4.2.11. Estudo de Energização de Transformadores

Esse estudo tem como objetivo principal identificar, na etapa de projeto básico da subestação, as solicitações transitórias de tensão e corrente resultantes da manobra da energização de transformadores impostas ao próprio transformador manobrado, à rede e aos equipamentos circunvizinhos.

Entre as conclusões mais importantes esperadas nesse tipo de estudo, mencione-se em primeiro lugar a identificação da necessidade da indicação de parâmetros adequados à sua especificação (características ferromagnéticas), bem como a orientação quanto à necessidade ou não de instalação

de elementos ou sistemas que limitem os transitórios de energização desses equipamentos, tais como resistores de pré-inserção e/ou dispositivos de manobra controlada para os disjuntores de manobra dos transformadores.

Caso sejam identificadas nos estudos elevados valores de correntes de inrush e/ou sobretensões sustentadas pós-manobra, deve-se alterar as características ferromagnéticas do transformador (joelho da curva de saturação e reatância de núcleo de ar). Na impossibilidade de alterar tais características, são aplicáveis dispositivos limitadores, tais como resistores de pré-inserção ou dispositivos de manobra controlada (sincronizadores).

Cabe mencionar que elevadas correntes de inrush podem causar esforços mecânicos aos transformadores com risco de dano permanente ou comprometimento da sua vida útil. Sobretensões sustentadas pós-manobra podem colocar em risco a integridade de algum equipamento e/ou acionar as proteções de sobretensão instantâneas ou temporizadas das linhas conectadas às barras da subestação, ocasionando desligamentos não programados.

Os transformadores são dimensionados para suportar as correntes de curto-circuito em seu projeto. Entretanto, os esforços calculados para essa situação têm a duração de apenas alguns poucos ciclos e não é esperada a sua aplicação de forma cíclica, ou seja, em curtos-circuitos repetidos e sucessivos.

A energização de transformadores por vezes leva a correntes muito elevadas por períodos de tempo de vários segundos, de forma repetida a cada manobra e, principalmente, com forma de onda não simétrica. O comportamento transitório das correntes de inrush impõe esforços distintos e mais severos entre enrolamentos quando comparados àqueles resultantes de curto-circuito. Desta forma, os reflexos de elevadas correntes de inrush podem resultar, em casos extremos, na falha pura e simples do isolamento durante a manobra, com dano permanente à transformação (curto-circuito entre enrolamentos). Em casos de menor severidade, elevadas correntes de inrush podem implicar na redução da vida útil do isolamento da transformação e necessidade de redução de períodos entre manutenções.

Ressalta-se que a corrente dimensionada para fazer frente a curto-circuito externos e que passa pelo transformador não é aquela definida pelo Anexo Técnico para o pátio (ex:40, 50, 63 kA) pois ela é limitada pela reatância dos enrolamentos da transformação. Adicionalmente, há uma tendência crescente de os fabricantes fazerem uso das impedâncias do sistema visando otimização neste quesito, o que reduz ainda mais as margens de segurança em termos de esforços mecânicos internos aos transformadores. Em princípio, se durante a manobra de energização são atingidos patamares de 60% ou mais do valor estabelecido pelo fabricante para o curto-circuito [6.26], já se trata de um forte motivo para mudanças nas características ferromagnéticas do equipamento ou, caso não seja possível, a adoção de dispositivos de limitação (resistores de pré-inserção ou dispositivos de manobra controlada

– sincronizadores). Cabe à Transmissora ratificar a suportabilidade às correntes de inrush perante o fabricante, considerando-se as particularidades do projeto do transformador.

Dispositivos de manobra controlada, ou sincronizadores (também denominados POW – *Point of Wave Device*) são teoricamente efetivos na redução das solicitações. Entretanto, a “solução sincronização” engloba disjuntores, sincronizadores, cabos de conexão, TPs dentro de um mesmo pacote. Se apenas um deles não operar com a precisão requerida, ou, se a implementação não for tecnicamente bem realizada, a solução pode falhar.

Caso a solução sincronização necessite como recurso extremo, para a obtenção de sucesso, a predição de magnetismo residual, isso implicará na redução do número de fornecedores (não é uma tecnologia disseminada) e na ampliação da repercussão elétrica no SIN de uma possível falha, pois a necessidade da utilização deste recurso é proveniente de uma forma de onda de tensão ou de corrente extremamente desfavorável. Neste caso recomenda-se atuar, previamente, na fase de especificação técnica elevando-se os valores de joelho da curva de saturação e/ou X_{ac} do transformador de modo a se atenuar essas solicitações extremas.

Resistores de pré-inserção (RPI), por outro lado, são elementos com confiabilidade reconhecida, devendo ser aplicados aos disjuntores de transformadores cujos estudos de energização indiquem elevados níveis de correntes de inrush e cujo impacto da falha na manobra possa trazer consequências danosas para a operação e/ou para o equipamento. Isso se aplica principalmente a transformadores sistêmicos, de potência elevada, com tensão superior a 230 kV no lado de alta. Disjuntores padronizados de 230 kV e abaixo não dispõem de RPIs como solução. Portanto, recomenda-se que sejam adotados preferencialmente RPIs em detrimento da adoção de sincronizadores nas manobras de energização de transformadores por disjuntores do nível de tensão igual ou superior a 345 kV, quando necessário.

Caso, mesmo ciente dos riscos, a Transmissora proponha a adoção de chaveamento controlado com predição de fluxo residual em transformadores, deverão ser apresentados os seguintes documentos na etapa de projeto básico:

- Catálogo do fornecedor com os dados técnicos referentes ao modelo a ser adquirido, com informações que comprovem as premissas adotadas nos estudos. Além das dispersões típicas associadas a sincronizadores tradicionais (POW - point of wave device), deverá ser informado o erro máximo entre o fluxo residual estimado e o real, considerando-se, inclusive, a influência dos instrumentos de medição (TPC, DCP, tap capacitivo, dentre outros).
- Documentos técnicos, como artigos ou publicações internacionalmente reconhecidos, que demonstrem a efetividade do sincronizador a ser adquirido em condições de manobras reais, validando seu desempenho de forma prática.

- Parecer técnico do fabricante relativo à taxa média entre falhas do equipamento por ano, parâmetro conhecido na literatura como MTBF ("Mean Time Between Failures"). Tal informação é atribuída a um determinado dispositivo ou aparelho para descrever a sua confiabilidade.
- Explicitar, na planilha de dados dos disjuntores associada ao transformador, os requisitos citados anteriormente, bem como o modelo do sincronizador.

4.2.11.1. Característica de Magnetização do Transformador – Corrente de “Inrush”

O núcleo do transformador é composto de material ferromagnético que, na presença de campo magnético alternado, opera em ciclo de histerese ($\Phi \times I_m$). A partir da curva de histerese é possível obter, de maneira aproximada, a curva de magnetização ou curva de saturação do transformador, que é o lugar geométrico dos vértices dos ciclos de histerese.

A curva de magnetização pode ser dividida em duas regiões: até o ponto em que o fluxo atinge o valor (Φ_s), definido como joelho da curva, e após este valor.

A condição de operação até o “joelho” é considerada de regime permanente e possui característica linear. A inclinação ($\Phi \times I_m$) representa a indutância de magnetização.

Na região de operação além do joelho, observa-se que, com pequena variação no fluxo em função da variação da tensão, ocorre grande variação na corrente de magnetização. Nessa condição, os enlaces de fluxos se estabelecem pelo ar, ficando caracterizada a reatância de núcleo de ar (X_{ac}), ou reatância saturada.

A Figura 4.7 apresenta, a título de exemplo, a curva de saturação com a indicação do joelho e da reatância saturada (X_{ac}) de um transformador 230/69 kV – 100 MVA, obtida a partir do ensaio do transformador em vazio.

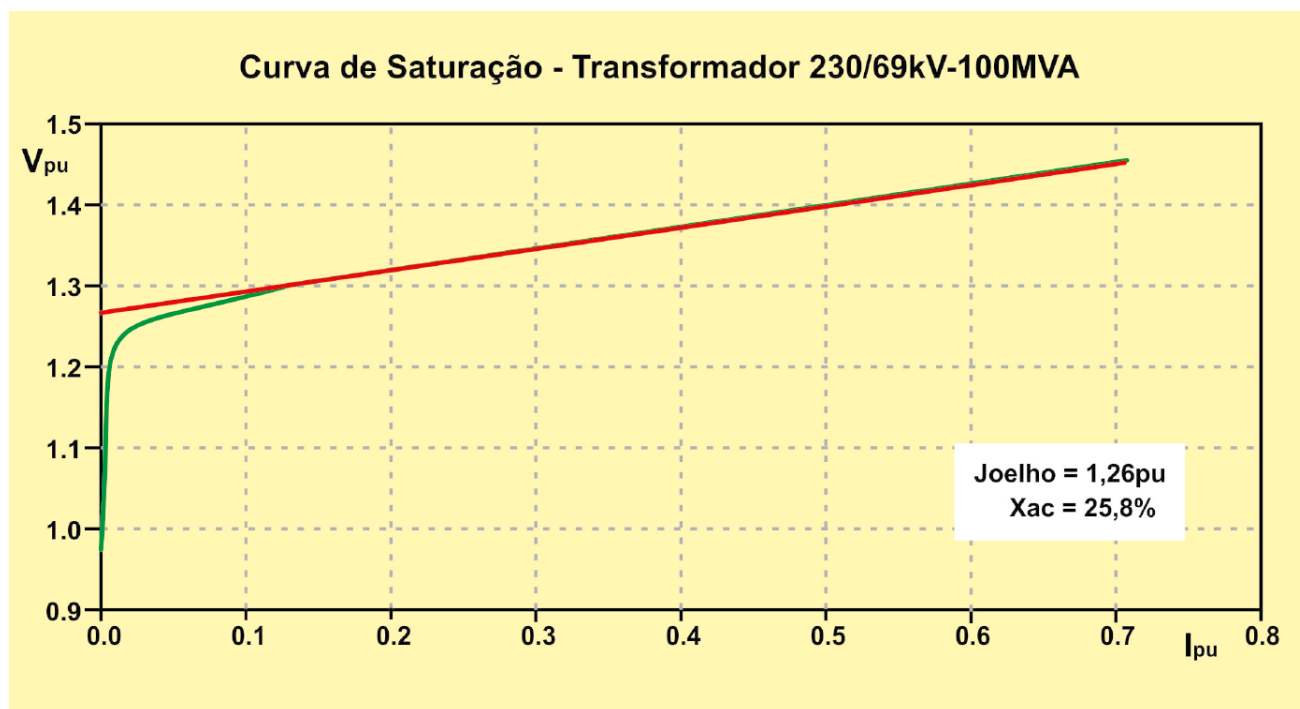
As características construtivas do transformador determinarão o valor do joelho (em pu) e o valor da reatância de núcleo de ar. Autotransformadores, em geral, possuem valores de X_{ac} mais elevados que os transformadores propriamente ditos.

Um valor típico para o joelho da curva de saturação é de 1,20 pu. Valores maiores podem acarretar sobrecustos. A especificação de baixos níveis de ruído leva a valores de joelho mais elevados.

A escolha da utilização de autotransformadores ou transformadores está normalmente associada à relação de transformação. Relações menores (próximo a 2 ou inferior) levam, por motivos econômicos, à escolha de autotransformadores. Por exemplo: as relações 500/440 kV, 500/345 kV, 345/230 kV são tipicamente de autotransformadores. Por sua vez, relações 500/138, 500/69, 345/69, 230/69 kV costumam levar à adoção de transformadores.

Os valores de X_{ac} são consequência de uma série de fatores, atribuídos durante o projeto do transformador, entre os quais citamos: tipo construtivo (SHELL type ou CORE type), tipo de transformação (transformador ou autotransformador), valor de impedância especificado, no caso de autotransformadores, relação de transformação e layout dos enrolamentos adotados no projeto.

Figura 4.7 Exemplo de Curva de Saturação – Transformador 230/69kV – 100MVA.



A operação na região além do joelho é observada durante transitórios da manobra de energização ou na eliminação de defeitos aplicados aos terminais do transformador. A corrente observada nos enrolamentos durante a manobra é denominada corrente de “inrush”, a qual depende dos seguintes fatores: ponto na forma de onda da tensão onde ocorre a energização; polaridade do magnetismo residual que permanece no núcleo do transformador, após a última abertura; característica da curva de saturação; e impedância da rede no ponto da manobra.

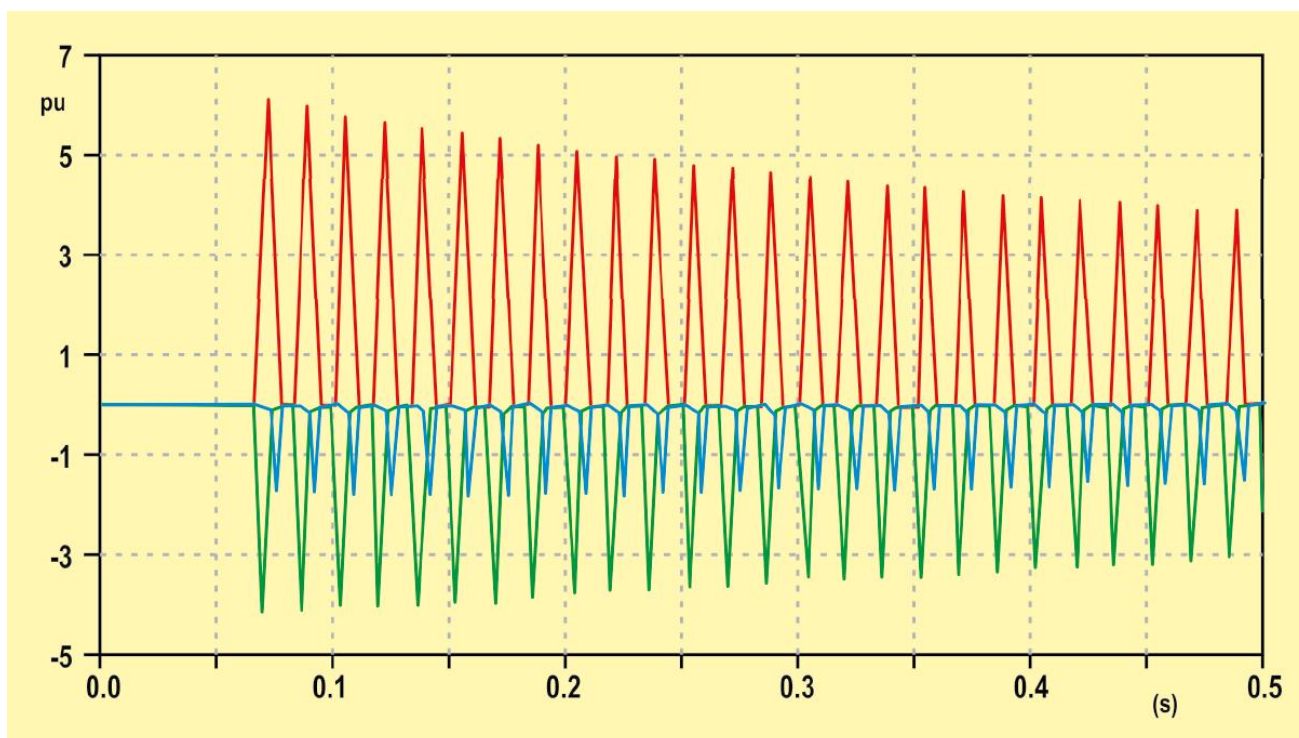
A condição teórica que resulta em valor máximo da corrente de “inrush” corresponde à realização da energização no instante em que a tensão passa pelo zero, com o fluxo magnético residual em seu valor máximo em uma das fases e o fechamento do disjuntor no instante de polaridade de fluxo inverso ao fluxo residual, conforme referência [6.3].

A corrente de “inrush” pode atingir, nos primeiros ciclos após a energização, valores elevados, correspondentes a várias vezes o valor da corrente nominal do transformador manobrado, decrescendo em amplitude até atingir o regime permanente e com duração relativamente longa, da ordem de segundos. A corrente de “inrush” em patamares elevados resulta em esforços mecânicos para os

enrolamentos do transformador, podendo de maneira acumulativa ocasionar falhas internas, devido à danificação do equipamento.

A Figura 4.8 apresenta a forma de onda típica da corrente de “inrush” da energização de um transformador 230/69kV – 100MVA.

Figura 4.8 Exemplo de Corrente “Inrush” – Manobra Transformador 230/69 kV - 100 MVA.



A análise da característica de saturação permite concluir que, quanto menor for a inclinação da curva de saturação além do joelho, correspondente à reatância saturada (X_{ac}), mais severas poderão ser as correntes de “inrush”, pois uma inclinação menor indica maior não linearidade. Nesta condição, para se obter variação mínima de fluxo, é necessário um aumento significativo da corrente.

Na realização do estudo de energização do transformador, deve-se avaliar a adequação dos parâmetros (joelho e X_{ac}), como também a adoção de outras medidas as mais usuais. Por exemplo: resistores de pré-inserção e dispositivos de manobra controlada a ser instalados nos disjuntores, de maneira a contribuir para a redução dos impactos das manobras de energização sobre os transformadores e na própria rede, com benefícios para a vida útil dos equipamentos.

O termo “manobra controlada” é comumente empregado para descrever a utilização de equipamento de controle, de maneira a facilitar a operação dos contatos do disjuntor em ponto pré-determinado em relação a um sinal elétrico de referência. No caso da manobra de energização do transformador — no sentido de reduzir a corrente de “inrush” —, o alvo corresponde a promover o fechamento dos contatos do disjuntor no pico máximo da tensão ou de condição de fluxo nulo. Teoricamente, não estando

presente o fluxo residual, isto resulta em corrente de “inrush” nula. Existe no mercado um dispositivo de manobra controlada dotado de lógica preditiva de fluxo residual.

É recomendável a consulta à referência [6.5] na qual é apresentada, em detalhe, a filosofia de funcionamento de dispositivos de manobra controlada.

A corrente de “inrush” apresenta como característica as componentes harmônicas de baixa ordem, sendo as mais significativas situadas entre a 2ª e a 7ª ordem. Durante a manobra de energização de um transformador ocorre a interação entre este equipamento e a rede. Neste caso, havendo coincidência de valor de impedância elevada da rede para algumas destas frequências características da corrente de “inrush”, poderá surgir sobretensão com forma de onda distorcida, devido à circulação destas correntes harmônicas.

Essa sobretensão, composta pela frequência fundamental somada às componentes harmônicas, pode atingir patamares severos, com riscos de danificar equipamentos ou sensibilizar proteções de sobretensão com o desligamento de parte do sistema.

Uma maneira de prever a possibilidade de ocorrência da condição de ressonância acima descrita é o conhecimento da impedância da rede $Z(\omega)$ para as várias frequências esperadas, levando em consideração a configuração do sistema, inclusive sob condição de rede degradada.

Se a adoção das medidas usuais supramencionadas — disjuntores com dispositivos de manobra controlada ou resistores de pré-inserção não for suficiente para a eliminação das restrições à manobra, será necessário especificar, para a transformação, uma característica ferromagnética (joelho e X_{ac}) e/ou suportabilidade suficientemente elevadas para a eliminação completa das restrições, mesmo que isto implique eventuais sobrecustos.

Portanto, **a transformação só deve ser definitivamente especificada para aquisição após realização do estudo de manobra.** É recomendável que os contatos com os fabricantes sejam feitos previamente ao leilão/autorização, pois o estudo poderá assumir premissas iniciais com base na experiência do fornecedor em potencial, para unidades de reatância, porte e relação de tensão semelhante já fornecidas anteriormente. Dependendo dos resultados do estudo pode ficar evidenciado, desde o início, ser necessário alterar as características ferromagnéticas da transformação a ser adquirida, em relação àquela previamente ofertada pelo potencial fornecedor.

4.2.11.2. Diretrizes para Estudos de Energização de Transformadores

Nos estudos, deve ser considerada a possibilidade da energização por ambos os terminais do transformador, com o sistema íntegro e degradado, sob indisponibilidade de um componente da rede (n-1), tendo em vista as manobras de recomposição no sistema.

As avaliações serão efetuadas para o transformador em vazio sem falta aplicada, considerando-se os recursos de controle de sobretensões, como resistores de pré-inserção e/ou dispositivos de manobra controlada. Também deve ser considerado o fluxo residual do transformador.

As simulações de energização sob defeito têm por finalidade identificar as máximas sobretensões advindas da manobra, avaliando os impactos sobre os para-raios. Entretanto, a experiência no acompanhamento de estudos desta natureza ao longo dos anos tem mostrado que, embora as sobretensões aumentem de fato, este tipo de manobra não costuma causar valores tão elevados de sobretensão que venham a impactar a definição dos para-raios.

Para a modelagem completa do transformador na base de dados ATP, é necessário incluir a representação da curva de histerese, cujos pontos podem ser obtidos, por exemplo, pelo processamento da rotina "HYSTERESIS HEVIA" do ATP, considerando-se os valores de joelho, reatância saturada (X_{ac}) e os pontos da curva de saturação vista dos terminais do enrolamento da realização da manobra. Os valores de X_{ac} , joelho e fluxo residual são grandezas que podem ser obtidas na própria fase de projeto do transformador, por cálculos, e apresentam grande aderência aos resultados de ensaios, a exceção do fluxo residual, obtido apenas por cálculos baseados em informações das chapas de ferro-silício de grão orientado. Assim, caso a Transmissora opte por iniciar os estudos sem a definição do fabricante, o fluxo residual pode ser ajustado, inicialmente, em valor da ordem de 60% do fluxo nominal da transformação. Com a definição do fabricante, é possível obter os valores garantidos pelo mesmo e, caso o fluxo residual informado seja superior ao sugerido, revisões dos estudos poderão ser necessárias para readequação do projeto a fim de se evitar eventuais restrições operativas.

Visando a impor a condição mais crítica, o fluxo residual deve ser considerado com seu valor máximo numa das fases e abranger o fechamento do disjuntor no instante de polaridade de fluxo inverso em relação ao fluxo residual, conforme recomendado no Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS.

Considerando-se que os estudos estão desenvolvendo-se na etapa de projeto básico da subestação, na maioria das vezes a curva de saturação de transformadores ainda não está disponível, já que é obtida a partir de testes em fábrica (ensaio em vazio). Neste caso, devem ser adotados dados típicos, sendo recomendada a comprovação da sua adequação ao caso estudado.

Considerando a obtenção de resultados que estejam aderentes aos fenômenos transitórios, a modelagem do transformador a ser manobrado deve seguir as seguintes diretrizes:

- Representação do circuito equivalente através do componente SATURABLE TRANSFORMER, sem considerar, neste, a curva de saturação.

- O comportamento não linear do núcleo deverá ser representado por laço de histerese, elaborado através da utilização da rotina HYSTERESIS HEVIA [5.22]. A curva de saturação com histerese representada deverá ser modelada a partir de um indutor não linear (“type 96”).
- O laço de histerese poderá ser associado ao transformador das seguintes maneiras:
 - 1ª Alternativa: Laço conectado no terminal externo do circuito equivalente do transformador, no lado a ser energizado. Esta opção é considerada a mais conservativa uma vez que não há queda de tensão que, fisicamente, seria promovida pela reatância de dispersão e resistência do lado correspondente, elevando, assim, o grau de saturação do núcleo.
 - 2ª Alternativa: Laço conectado no terminal externo do circuito equivalente do transformador, associado ao lado a ser energizado, ou no ramo de magnetização do mesmo com a devida compensação da reatância de dispersão e resistência. A primeira alternativa é considerada mais conservativa uma vez que não há queda de tensão promovida pela reatância de dispersão e resistência do lado correspondente, elevando o grau de saturação do núcleo. Neste caso, há queda de tensão sobre a impedância associada ao terminal energizado, resultando em menor grau de saturação.
 - 3ª Alternativa: Conexão no ramo de magnetização (terminal BUSSTOP). Esta opção necessita atenção especial para implementação uma vez que a ordem de escrita no cartão ATP, envolvendo o indutor não linear “type 96” e respectivo transformador, pode causar instabilidade numérica.
 - Vale ressaltar que, como os modelos disponíveis no ATP tratam de representação com parâmetros concentrados, ambas as hipóteses apresentam um certo grau de imprecisão quando comparadas a modelos que consideram parâmetros distribuídos obtidos, por exemplo, por modelagem em elementos finitos. No entanto, para o propósito de estudos de energização de transformadores, as alternativas propostas apresentam resultados satisfatórios, já comprovados por medições de campo e trabalhos técnicos disponíveis na literatura.

Atenção especial deverá ser dada aos demais transformadores presentes na subestação a qual o transformador será manobrado e as unidades localizadas na região de influência da manobra. São necessários os seguintes requisitos de modelagem:

- Representação dos transformadores através do componente SATURABLE TRANSFORMER.
- Efetuar a representação das curvas de saturação através da rotina SATURA. Recomenda-se a representação da curva de saturação completa, ou seja, incluindo

joelho e X_{ac} , com a quantidade máxima de 5 pontos a fim de se evitar instabilidades numéricas.

- Para o caso da ausência da informação da resistência dos transformadores, a fim de evitar problemas decorrentes de baixo amortecimento do sistema, poderá ser usada a relação $X/R=100$ para definição dos valores.
- Todos os transformadores deverão estar com o campo referente ao fluxo (FO) e a corrente do ramo de magnetização (IO) do cartão TRANSFORMER, em regime permanente, preenchidos com os valores da primeira linha da curva de saturação, valores esses não inferiores a 1,05 pu.

Na avaliação da suportabilidade dos transformadores, na falta de informações oficiais do fabricante, devem-se adotar os valores indicativos de sobretensões admissíveis a 60Hz para transformadores em vazio, de acordo com o Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS.

4.2.11.3. Premissas para Ajuste dos Casos ATP

Os impactos de sobretensão causados por energização de unidades transformadoras são, geralmente, mais severos, sob condição da rede mais fraca, com menor nível de curto-circuito. É o caso das configurações com menor número de unidades geradoras despachadas, verificadas, na maioria das vezes, em condição de carga leve ou mínima. Por outro lado, os impactos na magnitude da corrente de *inrush* tendem a ser mais severos quanto maiores forem os níveis de curto-circuito. Sendo assim, para os estudos de energização de transformadores, ambos os cenários devem ser avaliados.

Para aferição da topologia representada, redes de sequência zero e positiva, é necessário aferir os níveis de curto-circuito trifásico e monofásico.

A tensão de pré-manobra precisa ser ajustada igual à máxima tensão operativa em correspondência à classe de tensão da rede, de acordo com o Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS.

4.2.11.4. Desenvolvimento das Simulações e Análises

Em função da aleatoriedade dos instantes de fechamento dos polos do disjuntor, o estudo das manobras de energização de transformadores deve ser realizado de maneira estatística, considerando-se, pelo menos, uma amostragem de duzentos chaveamentos.

Para a modelagem do disjuntor no programa ATP, aplicam-se as recomendações do Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS, com destaque para os seguintes aspectos:

- O disjuntor deve ser representado pela chave estatística, com os tempos de fechamento caracterizados por distribuição gaussiana, com média uniformemente distribuída ao longo de um ciclo da senoide, sendo recomendados, pelo menos, (± 2) quatro desvios-padrões em correspondência à máxima dispersão entre polos das três fases do disjuntor;

$$freq = 60 \text{ Hz}$$

$$ciclo = \frac{1}{freq} = 0.0167 \text{ s}$$

$$disp = \frac{ciclo}{4} = 4.1667 \times 10^{-3} \text{ s}$$

$$6x\sigma = 4.1667 \text{ ms} \rightarrow \sigma = 0.69444 \text{ ms}$$

- Na modelagem de disjuntores dotados de resistores de pré-inserção, tanto os contatos principais quanto os auxiliares devem ser modelados como chaves estatísticas; a operação dos contatos principais deve ocorrer de maneira dependente daquela associada aos contatos auxiliares, após o tempo de inserção dos resistores das três fases, levando-se em conta sua dispersão e tempo médio;
- Na modelagem de disjuntores dotados de dispositivos sincronizadores, é necessário definir-se previamente, com auxílio de simulação determinística, o instante ideal de fechamento de cada polo do disjuntor. Esse instante de tempo é adotado como tempo médio de operação de cada polo a ser representado por chave estatística com distribuição gaussiana. As dispersões em torno dos tempos médios de cada polo são representadas pelo desvio padrão do tempo de fechamento do conjunto disjuntor-sincronizador. Essas dispersões são função da precisão mecânica do disjuntor, da precisão do sincronizador, bem como da variação da taxa de decremento da rigidez dielétrica (RDDS) do meio dielétrico entre os contatos, durante o fechamento do disjuntor;
- A modelagem de disjuntores com sincronizadores precisa basear-se na referência [6.5], as quais apresentam a metodologia a ser considerada na representação desse dispositivo, nos estudos de energização de transformadores. Na modelagem com o ATP, é necessário considerar um desvio padrão de (± 3) de dispersão total para o tempo de fechamento do conjunto disjuntor-sincronizador, quando este for calculado segundo a metodologia descrita naquela referência;
- Na modelagem dos transformadores, deve-se representar um fator de qualidade para as reatâncias do primário, secundário e terciário. Representar adequadamente os amortecimentos existentes faz diferença no resultado das simulações;
- Na avaliação da suportabilidade do transformador, deve-se considerar a curva de suportabilidade garantida pelo fabricante, e, na falta dessa informação, devem ser utilizados os valores indicativos apresentados no Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede;
- Para subestações com até 3 unidades transformadoras em paralelo, contemplar cenários de energização como 1ª, 2ª e 3ª unidade.

- No cenário de 1 transformador paralelo em operação, deverá ser simulada a energização da 2ª unidade, com a 1ª previamente energizada, também em vazio (com o disjuntor associado ao lado oposto ao energizado aberto).
- No cenário de 2 transformadores em paralelo em operação, deverá ser simulada a energização da 3ª unidade, com a 1ª e 2ª previamente energizadas, com fluxo passante.
- Para subestações com mais de 3 unidades transformadoras em paralelo, contemplar cenários de energização como 1ª, 2ª e última unidade.
- Não se aplicam à manobra de energização dos transformadores os requisitos de desempenho harmônico definidos no submódulo 9.7;
- A representação adequada da curva de saturação do elemento manobrado é fundamental para a credibilidade dos resultados da manobra simulada:
 - Utilização de valores de joelho e X_{ac} realistas;
 - Um número de pontos $V \times I$ que garanta mínima precisão;
 - Cuidado em evitar descontinuidades abruptas na curva $V \times I$, que origina a curva $F_i \times I$. Isto pode levar a problemas numéricos de simulação;
- Aplicam-se as diretrizes do item 4.2.5.3 do presente documento relativo aos parâmetros da simulação.

4.2.11.5. Apresentação dos Resultados

A apresentação dos resultados estatísticos das simulações no documento do estudo deve ser feita por meio de tabelas e conter: identificação do caso estudado; configuração do sistema (se completa ou n-1); se houve aplicação de defeito; se a manobra foi com ou sem resistor de pré-inserção ou sincronizador; valor da tensão de pré-manobra (pu); valor médio das sobretensões (pu); desvio padrão correspondente (pu); valor da sobretensão máxima (pu); máxima energia dissipada nos para-raios (kJ); e valor máximo da corrente de “inrush” (pu).

Devem-se também efetuar simulações determinísticas, apresentando os gráficos com as formas de onda das sobretensões e das energias dissipadas nos para-raios, correspondentes às condições mais críticas encontradas.

Convém lembrar que os casos mais severos de tensão, corrente de inrush ou energia nos para-raios, oriundos das simulações estatísticas, muitas vezes não pertencem a uma mesma simulação física. Desta forma, os oscilogramas a ser apresentados muitas vezes não pertencem a um só caso determinístico.

Na apresentação dos gráficos com as formas de onda das sobretensões, correntes de “inrush” e energia dissipada nos para-raios, deve haver coerência na escala dos tempos que caracterizam os fenômenos de transitórios eletromagnéticos, conforme diretriz estabelecida no item 4.2.5.3 do presente documento.

Complementarmente, podem ser apresentados os gráficos com as curvas de variação da impedância com a frequência vista pelos terminais da manobra do transformador, quando este tipo de avaliação for empregado nas análises.

O item 9.6 apresenta uma sugestão de itens a serem contemplados no relatório dos estudos de transitórios eletromagnéticos de energização de transformadores.

4.2.12. Estudo de Energização de Banco de Capacitores (BC)

Este estudo compreende avaliações dos transitórios de corrente e de tensão, devido a manobras de energização, aplicação e eliminação de defeito associado a banco de capacitores em derivação, cujos transitórios podem resultar em impactos sobre os demais equipamentos locais, dentro da mesma subestação, como também em barras remotas.

Os resultados dessas avaliações precisam ser considerados na etapa de projeto básico da instalação, com o objetivo de subsidiar a especificação, caso necessário, de indutores limitadores de corrente a ser instalados em série com o banco de capacitores, como também para controle das sobretensões e da recomendação de disjuntores dotados com resistores de pré-inserção e/ou de sincronizadores, além do dimensionamento dos para-raios.

4.2.12.1. Aspectos Gerais

Dentre os diversos estudos necessários à instalação de banco de capacitores no sistema, o da energização do banco e o de curto-circuito aplicado na sua proximidade estão relacionados ao fenômeno de transitórios eletromagnéticos.

O estudo de energização pode ser dividido sob o aspecto da tensão e da corrente.

Sob o aspecto da tensão, objetiva-se o dimensionamento dos dispositivos para o controle das sobretensões — como o resistor de fechamento ou sincronizadores para o disjuntor de manobra do banco de capacitores e de para-raios.

Quanto ao aspecto da corrente, a finalidade é identificar o seu valor e a respectiva frequência, no sentido de especificar, caso necessário, o indutor limitador de corrente a ser instalado em série com o banco.

O estudo que considera a aplicação de curto-circuito em diversos pontos da subestação — nas proximidades do banco de capacitores — tem também por objetivo a identificação das solicitações impostas aos demais equipamentos por contribuição do banco de capacitores.

Na referência [6.4], são apresentados os fenômenos transitórios associados à manobra de banco de capacitores pela teoria de circuitos elétricos, podendo-se relacionar os seguintes aspectos considerados mais relevantes:

- A corrente no capacitor, devido à manobra de energização e a descarga sob curto-circuito, é diretamente proporcional à tensão do banco no instante da manobra;
- O valor da resistência série presente no circuito formado pela indutância do barramento e a capacitância do banco, por ocasião da sua descarga sob condição de curto-circuito, contribuem para amortecer as oscilações da corrente de descarga. Este é o caso de quando se empregam resistores de pré-inserção;
- As sobretensões transitórias mais severas são resultantes, sempre, da energização do primeiro banco de capacitores, dentre vários em paralelo e pela desenergização do último banco de capacitores, devido ao reacendimento do arco;
- As sobrecorrentes mais severas ocorrem pela energização de um banco de capacitores na presença de outros já energizados no mesmo ponto da subestação (back-to-back), isto é, o último de um conjunto de bancos energizados; e pela ocorrência de defeito na subestação e descarga dos bancos de capacitores;
- Na energização (back-to-back) ocorre a descarga dos bancos sobre os quais estão sendo energizados, tornando as solicitações crescentes em função do número de bancos; além disso, devido às indutâncias entre bancos serem de pequeno valor, as correntes produzidas caracterizam-se por altas frequências;
- Como forma de reduzir a amplitude e a frequência das correntes que surgem devido à energização (back-to-back) e sob curto-circuito nas proximidades dos bancos, são empregados indutores em série com os bancos. Tais valores, usualmente, são da ordem de centenas de micro Henries (μH);
- Para redução da sobretensão ocasionada pela manobra de banco de capacitores, as soluções adotadas podem ser a instalação de dispositivos de manobra controlada nos disjuntores ou de resistores de pré-inserção, assim como de para-raios;
- O ponto ideal da energização de um banco de capacitores com conexão do tipo estrela aterrada, no sentido de reduzir a amplitude da corrente de energização e as sobretensões, deve corresponder ao instante do zero da tensão pelos contatos do disjuntor em cada fase.

4.2.12.2. Diretrizes para os Estudos de Manobra e Descarga de Banco de Capacitores

Com o objetivo de avaliar os transitórios de tensão e de corrente, deve ser estudada a energização sob as seguintes condições:

- Energização do primeiro banco de capacitores, com e sem a presença de falta prévia, com tensão residual de 10% conforme prevê a norma IEC-60871. Tal requisito visa agilizar o processo de recomposição do BC no menor tempo possível a partir de seu desligamento;
- Abertura do último banco de capacitores com ocorrência do reacendimento do arco;
- Energização do último banco de capacitores com os demais já energizados; e
- Curto-circuitos próximos aos bancos de capacitores:
 - Descarga do(s) BC(s) frente a curtos-circuitos aplicados no terminal do BC e nas saídas de linhas/transformadores existentes;
 - Aplicação e eliminação de faltas nas saídas de linhas/transformadores para avaliação de sobretensões pouco amortecidas.

A abertura capacitiva de um dos bancos — sem a aplicação de defeito e com a presença dos demais — também deve ser avaliada (tanto para o disjuntor do banco quanto para o disjuntor de transferência).

Os bancos de capacitores para as instalações da Rede Básica são do tipo estrela aterrada, e devem ser considerados, na modelagem, os valores das suas perdas e da sua indutância intrínseca, como também a indutância dos barramentos.

No dimensionamento das medidas mitigadoras, tais como o dimensionamento de reatores limitadores, deve-se levar em conta a suportabilidade dos transformadores de corrente.

Uma vez conhecidas a tensão máxima suportável, as cargas secundárias e a relação de transformação, é possível estabelecer o produto $I \cdot F$ (corrente*frequência) máximo admissível.

Este critério, embora usual e conservador, não exclui a possibilidade de que ocorram situações nas quais a frequência predominante da corrente de “inrush” esteja sintonizada com alguma frequência de ressonância paralela contida no $Z(j\omega)$ das cargas secundárias dos TCs (cabos, relés etc.). Entretanto, a utilização de proteções digitais em novos empreendimentos reduz a carga secundária dos TCs de proteção, de forma geral, à indutância dos cabos de controle, ou seja, bastante inferiores às cargas padronizadas de norma. Assim sendo, a utilização de cabos de controle de maior bitola poderá contribuir para a redução das solicitações aos secundários dos TCs.

O produto $I \cdot F$ também pode ser reduzido pela diminuição da magnitude da corrente de “inrush”, por meio, por exemplo, da utilização de fechamento sincronizado.

As tensões aplicadas às bobinas de bloqueio das linhas que chegam/saem da subestação, devido à circulação de correntes de alta frequência (descarga dos bancos de capacitores), também devem ser avaliadas, pois podem exceder a suportabilidade destes equipamentos.

Outros equipamentos potencialmente afetados pela inserção de novos bancos de capacitores na subestação são os disjuntores, uma vez que as TRTs de sua abertura podem ser alteradas. Adicionalmente, os para-raios próximos também podem ser afetados pelas manobras dos bancos de capacitores. Principalmente se forem para-raios antigos, de gap. Neste caso, a suportabilidade do gap é afetada pela frequência da solicitação, podendo ocorrer disparos não originalmente previstos.

Por fim, ressalta-se que as manobras de bancos de capacitores de porte podem ocasionar sobretensões temporárias e transitórias, fase-fase e fase-terra, com magnitude e frequência capazes de impor solicitações a equipamentos localizados não só na própria subestação, mas, algumas vezes, em subestações eletricamente próximas.

Em suma, deve-se avaliar:

- Sobretensão em circuitos secundários de TCs novos e existentes na instalação.
- Formas de mitigação de sobretensões em circuitos secundários: indutores de amortecimento, varistores e gaps.
- Definição de suportabilidade dos circuitos secundários de TCs e equipamentos conectados (relés, RDPs, PMUs e medidores).
- Produto I_{xf} verificado nos disjuntores de saída de linha/transformadores quando de faltas aplicadas nestes pontos.
- Adequação do produto I_{xf} em disjuntores, novos e existentes, com aplicação de indutores de amortecimento.

Sugere-se a leitura da referência IEEE PES-TR16/2014, “Transient Limiting Inductor Applications in Shunt Capacitor Banks” que apresenta, de forma atual, os principais aspectos associados à combinação de elevadas correntes e elevadas frequências quando de descargas em BCs, suas consequências e principais medidas mitigadoras.

Evidentemente, avaliações em subestações vizinhas, caso venham a ser realizadas, têm caráter apenas prospectivo, identificando problemas potenciais para posterior detalhamento dos donos dos ativos afetados e estudos operativos.

Do ponto de vista do empreendedor dono dos ativos de um novo empreendimento de transmissão, cabe lembrar o seguinte: o rating (suportabilidade) de seus equipamentos deve levar em conta, caso existam, a presença de bancos de capacitores de porte em locais eletricamente próximos.

4.2.12.3. Premissas para Ajuste dos Casos ATP

O caso base do ATP a ser utilizado nas simulações da manobra de energização do banco de capacitores deve considerar a condição do caso de referência do PAR-ONS, no qual os bancos de capacitores encontram-se em operação na rede, e com a tensão de pré-manobra ajustada à mais próxima possível da máxima tensão operativa em correspondência à classe de tensão da rede, de acordo com o Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS.

4.2.12.4. Desenvolvimento das Simulações e Análises

Os estudos de energização dos bancos de capacitores, abertura com reacendimento e descarga devido a curto-circuitos, devem ser realizados de maneira estatística, considerando-se, pelo menos, uma amostragem de duzentos chaveamentos.

Para a definição dos tempos médios de fechamento dos disjuntores, deve ser considerado o tempo de dispersão máximo entre contatos do disjuntor.

Nas simulações, é necessário considerar os para-raios dos bancos de capacitores e o reator limitador de corrente, cujo valor precisa ser comprovado por meio das simulações.

Devem ser processados casos determinísticos para os instantes de fechamento que resultaram em maiores sobretensões, sobrecorrentes e energias nos para-raios, em correspondência com os casos estatísticos.

Nas manobras sob a aplicação de falta, a mesma deve ser considerada aplicada em regime permanente e do tipo monofásica.

Aplicam-se as diretrizes do item 4.2.5.3 do presente documento, relativo aos parâmetros da simulação. Tendo em vista a alta frequência do fenômeno estudado, o tempo de integração deve ser de valor baixo o suficiente para permitir a análise adequada.

No caso do emprego de disjuntores com sincronizadores, deve ser adotada a referência [6.5], que apresenta o detalhamento da filosofia de funcionamento e das modelagens associadas.

Uma das dificuldades deste tipo de estudo é a modelagem da rede adjacente à manobra. Por muitas vezes o banco de capacitores se situa em redes de 138 kV ou menos. Neste nível de tensão, as linhas costumam ser curtas, e às vezes tão curtas — com subestações próximas que possuem bancos de capacitores shunt manobráveis — que os casos de fluxo de potência eventualmente consideram como embutidos na carga total da barra. Nestas situações o desconhecimento da informação é capaz de suprimir frequências adicionais que poderiam influenciar os resultados das simulações.

4.2.12.5. Apresentação dos Resultados

A apresentação dos resultados estatísticos das simulações no documento do estudo deve ser realizada por meio de tabelas que contenham: a identificação do caso estudado; o ponto monitorado para efeito das sobretensões na subestação; o valor do indutor série com o banco e do resistor de pré-inserção do disjuntor, caso necessário; o valor da tensão de pré-manobra (pu); o valor médio das sobretensões (pu); o correspondente desvio padrão (pu); o valor da sobretensão máxima (pu); a máxima energia dissipada nos para-raios (kJ); e o valor máximo da corrente de energização (kA_{pico}) com a sua frequência (Hz).

Para as simulações determinísticas, devem ser apresentados gráficos com as formas de onda das sobretensões, correntes de energização e energias dissipadas nos para-raios, correspondentes às condições mais críticas encontradas.

Na apresentação dos gráficos com as formas de onda das sobretensões, correntes de energização e de descarga (inrush e out-rush) e energia dissipada nos para-raios, deve haver coerência na escala dos tempos que caracterizam os fenômenos de transitórios eletromagnéticos, conforme diretriz estabelecida no item 4.2.5.3 do presente documento.

4.2.13. Estudo de Desenergização de Reatores e Reignição

4.2.13.1. Aspectos Gerais

Durante o processo de desenergização de reatores manobráveis, o disjuntor responsável pela manobra efetua a interrupção de uma corrente consideravelmente inferior à sua capacidade de interrupção de curto-circuito. Tendo em vista que a interrupção da corrente no disjuntor ocorre na proximidade da passagem da senóide de corrente pelo valor zero e dado que a corrente nominal do reator é relativamente baixa, ocorre, durante o processo de abertura do disjuntor, o fenômeno conhecido como instabilidade de arco. Esta instabilidade do arco, por sua vez, resulta em interrupção prematura da corrente antes da sua passagem natural por zero (*current chopping*), gerando sobretensões elevadas sobre o reator. Estas sobretensões, resultantes da variação brusca da corrente indutiva, são mitigadas, por exemplo, com a aplicação de para-raios instalados junto aos reatores.

Após a interrupção da corrente, outro fenômeno de relevante impacto ocorre sobre os reatores e disjuntores, conhecido como reignição. A reignição ocorre durante a separação dos contatos do disjuntor, logo após a interrupção da corrente, quando a tensão de restabelecimento transitória ultrapassa a suportabilidade dielétrica do disjuntor, causando então o restabelecimento da corrente no reator. Esse processo se repete até que a distância entre contatos do disjuntor seja suficiente para garantir a extinção definitiva da corrente. Durante a reignição, a tensão imposta ao reator apresenta elevada taxa de variação, sendo, em alguns casos, semelhantes às verificadas em surtos atmosféricos, podendo danificar o isolamento, seja por superação de suportabilidade ou por desencadeamento de

ressonâncias internas. As frentes de onda provenientes de reignições não podem ser amenizadas com o uso de para-raios, pois os mesmos não são sensibilizados em tais situações. Reignições também são responsáveis por desgastes prematuros dos contatos principais dos disjuntores. A quantidade de reignições pode ser consideravelmente mitigada pelo uso de chaveamento controlado (sincronizadores), cuja função é sincronizar a passagem pelo zero de corrente com o instante de máxima separação de contatos do disjuntor. Porém, em caso de falha ou na indisponibilidade do sincronizador, seja por manutenção ou por atuação de proteção onde, neste último cenário, filosoficamente o sincronizador é desconsiderado na lógica de proteção para acelerar a eliminação da falta, o fenômeno de reignição se torna inevitável e deve, portanto, ser considerado para efeito de projeto dielétrico do reator.

4.2.13.2. Diretrizes para os Estudos de Desenergização de Reatores e Reignição

Estes estudos visam adequar o projeto dielétrico de reatores shunt durante manobras de desenergização quando da indisponibilidade de chaveamento controlado.

A corrente de corte deve ser estimada, preferencialmente, a partir dos dados de número de corte a serem fornecidos pelo fabricante dos disjuntores. No caso de ausência desta informação, recomenda-se empregar valor conservativo.

Por se tratar de fenômenos de elevada frequência, recomenda-se a representação dos para-raios com parâmetros dependentes da taxa de crescimento das sobretensões. Modelagens clássicas de para-raios tendem a apresentar resultados mais otimistas.

A subestação deve ser modelada em detalhes para representação adequada dos fenômenos de alta frequência envolvidos, considerando-se as distâncias entre as conexões de equipamentos e barramentos, conforme propostas no projeto básico. As capacitâncias parasitas dos diversos equipamentos devem ser representadas, sobretudo aquelas associadas aos próprios reatores e às câmaras de equalização dos disjuntores.

Deve-se verificar o impacto de indisponibilidade (N-1) de linhas e equipamentos dentro da subestação de modo a se identificar os casos dimensionantes.

Em termos de modelagem, caso disponível, considera-se adequada a representação do reator em termos de sua resposta em frequência teórica, por circuitos RLC. As capacitâncias das buchas devem ser modeladas e as tensões nos terminais do próprio reator devem ser quantificadas e monitoradas no início do enrolamento de forma a subsidiar o fabricante em suas análises e projeto.

4.2.13.3. Premissas para Ajuste dos Casos ATP

O caso base do ATP a ser utilizado nas simulações deve considerar tensão de pré-manobra ajustada no valor máxima operativo, em correspondência à classe de tensão da rede, de acordo com o Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede.

4.2.13.4. Apresentação dos Resultados

Dentre os principais resultados a serem explicitados nos estudos, para cada configuração avaliada, torna-se necessária a apresentação das formas de onda das sobretensões sobre o reator durante o corte de corrente e o detalhe da reignição, cobrindo-se a segunda oscilação paralela. Em termos de valores a serem registrados, deve-se apresentar um tabelamento dos valores máximos das sobretensões após o corte de corrente, as taxas médias e instantâneas de variação de tensão sobre o reator (em kV/ μ s) e os valores de frequência da segunda oscilação paralela (em kHz).

Após as necessárias interações entre estudos e fabricantes para a conclusão do projeto básico, a versão final deste deve conter parecer do fabricante quanto aos resultados obtidos, considerando-se as questões apresentadas no presente documento, onde o fabricante deverá atestar a viabilidade de manobras diárias, a quantidade máxima de manobras permitidas por ano ou a restrição das mesmas, quando de indisponibilidade do chaveamento controlado.

4.2.14. Estudo de Tensão de Restabelecimento Transitória

Estudos desta natureza objetivam quantificar as solicitações impostas aos disjuntores que integram o empreendimento quando da abertura de faltas. Abrangem avaliações da Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT), sob as diversas condições de manobras de abertura de disjuntores.

4.2.14.1. Aspectos Gerais

A interrupção da corrente de curto-circuito pode ser subdividida em três etapas. A primeira ocorre com os contatos ainda fechados. Nesta fase predomina o efeito Joule. Durante esta fase, o disjuntor opera inicialmente com a corrente de carga e logo após com a corrente de curto-circuito.

Na segunda etapa, com os contatos principais já em movimento, ocorre a comutação da corrente passante para os contatos de arco. Nesta fase se inicia a separação dos contatos de arco, mas não ainda a interrupção da corrente mantida pelo arco elétrico. Inicia-se a fase térmica da interrupção. Em seguida, ainda nesta fase, há a passagem por zero da corrente. Nas proximidades deste ponto o comportamento térmico determinará o sucesso da interrupção.

Por fim, inicia-se a fase dielétrica da interrupção. Durante o processo de interrupção, o arco perde rapidamente a condutividade, quando a corrente se aproxima do zero. Alguns microssegundos após a passagem por zero, a corrente deixa de circular e o sistema responde, surgindo a TRT.

A TRT é definida pela diferença de tensão através dos contatos dos disjuntores e é composta pela parcela da tensão na frequência fundamental (tensão de restabelecimento) e por uma parcela de tensão com frequência mais elevada. A natureza e o valor da TRT dependem, também, do tipo de circuito interrompido (resistivo, capacitivo ou indutivo), da impedância do sistema vista dos terminais do disjuntor, da tensão nominal do sistema, da carga, do tipo da falta, de sua magnitude e localização.

Na interrupção da corrente de falta, a tensão na frequência fundamental (tensão de restabelecimento), a qual surge entre os polos do disjuntor após o amortecimento da oscilação transitória, está relacionada diretamente à tensão da rede, variando em função do aterramento do sistema (solidamente aterrado ou neutro isolado), além de depender do tipo de curto-circuito (trifásico aterrado ou não, bifásico aterrado ou não, e monofásico).

O fator de primeiro polo é um dos parâmetros utilizados na especificação de disjuntores, e relaciona a tensão à frequência fundamental entre os terminais do primeiro polo a interromper a corrente de curto-circuito à tensão fase-terra da rede, antes da ocorrência do curto-circuito.

Nas referências [[6.2] e [6.4]], são apresentadas as demonstrações desta e de outras correlações existentes entre a característica do aterramento do sistema versus os tipos de defeitos aplicados, considerando-se a situação pré-abertura de fases perfeitamente equilibradas e defasadas (120°), bem como tensões do lado fonte de 1,0 pu.

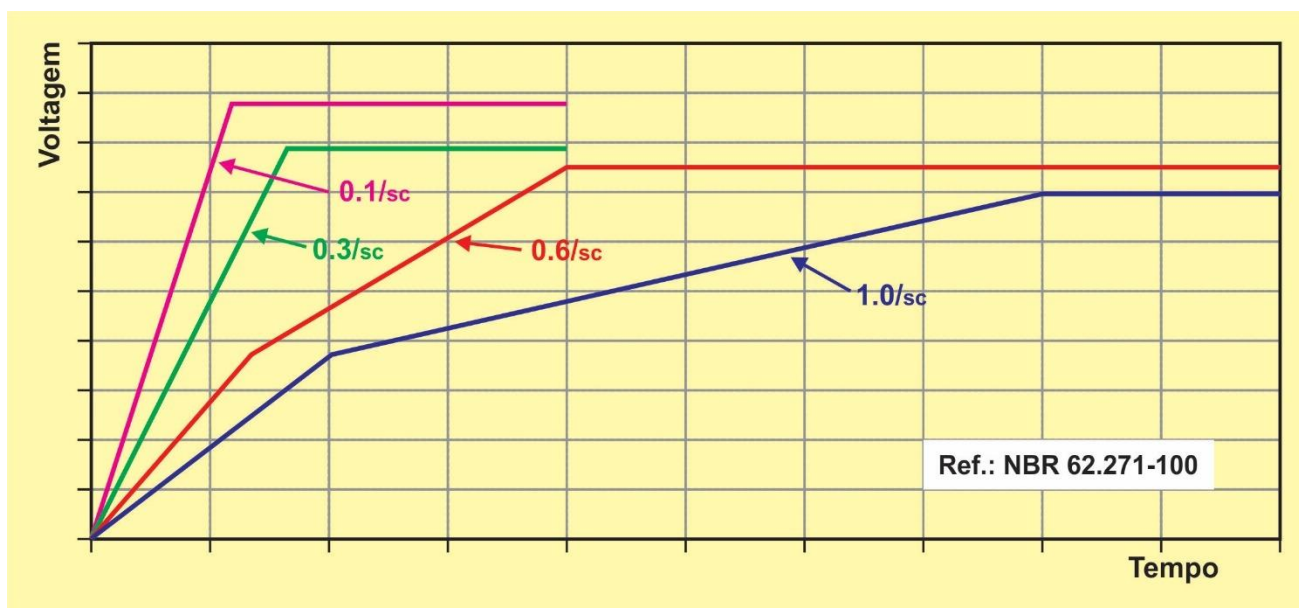
Como regra geral, pode-se afirmar que, para sistema robusto e assumindo-se as simplificações acima, o fator de primeiro polo é menor do que 1,3, exceto no caso de curto-circuito trifásico não aterrado, que pode ser considerado estatisticamente raro.

O fator de primeiro polo e a tensão de restabelecimento na frequência fundamental são parâmetros determinantes no estabelecimento dos valores das TRTs, sob o ponto de vista da normalização dos disjuntores.

Em função da tensão nominal do sistema, da magnitude da corrente de falta e de outras variáveis, as formas de onda das TRTs podem ser descritas e normalizadas através de dois ou quatro parâmetros. Geralmente, aquela caracterizada por dois parâmetros se refere à TRT com apenas uma frequência de oscilação, e a de quatro parâmetros se refere à TRT de duas ou mais frequências de oscilação.

A Figura 4.9 apresenta exemplos de envoltórias normalizadas pela representação a dois e a quatro parâmetros, mostrando sua variação em função da magnitude da corrente de falta, para tensão nominal do sistema igual ou superior a 72,5kV.

Figura 4.9 Exemplo de Característica Típica da Envoltória Normalizada da TRT em Função da Magnitude da Corrente de Falta para Tensão Nominal Superior a 72,5kV – Representação a Dois e a Quatro Parâmetros.



A norma adotada como referência para a obtenção das envoltórias da TRT de disjuntores é a IEC 62271-100, cujos valores são normalizados para a condição de fator de primeiro polo igual a 1,3.

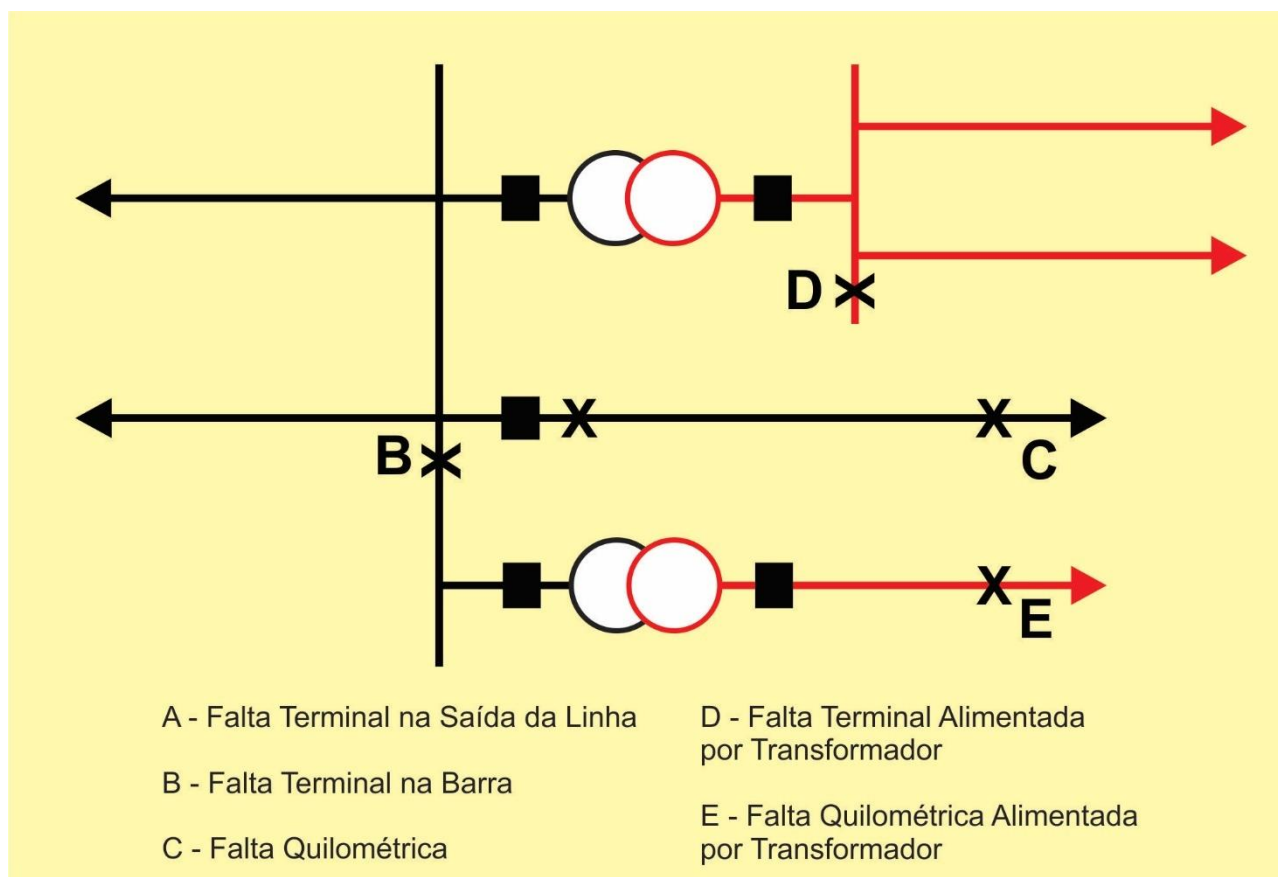
A referida norma apresenta os parâmetros das envoltórias da TRT, para faltas “terminais”, correspondentes a ensaios de corrente de curto-circuito simétrico com 10%, 30%, 60% e 100% da corrente de interrupção nominal de curto-circuito simétrica do disjuntor. Para disjuntores com tensão superior a 72,5 kV, as envoltórias da TRT para ensaios entre 10% e 30% são descritas por meio de envoltórias de dois parâmetros, e, para os acima de 30%, descritas pelas de quatro parâmetros.

Nas tabelas da norma, os parâmetros que definem as envoltórias podem ser identificados da seguinte maneira: quando definida por dois parâmetros em valores (u_1 e t_1) e quando por quatro parâmetros em valores (u_1 , t_1 , u_c , t_2), sendo (u_c) o valor da crista da TRT.

Para a especificação do disjuntor, é necessária a determinação dos valores da TRT por meio de acurados estudos, devendo-se levar em consideração as seguintes condições mais críticas de aberturas, que, em função do ponto de aplicação do disjuntor, necessitam ser consideradas na sua totalidade ou parcialmente, Figura 4.10:

- Falta terminal: deve ser aplicada no barramento e na saída da linha, representando a condição com característica de maior TRT após a interrupção da falta;
- Falta quilométrica: condição com característica de maior solicitação para o disjuntor no início da TRT;
- Abertura de linha de transmissão em vazio, cabos ou banco de capacitores;
- Abertura em discordância de fases.

Figura 4.10 Exemplo de Pontos de Aplicação das Falhas para Estudos de TRT.



Para o caso da falta quilométrica, a norma IEC 62271-100 apresenta, também no seu anexo A, o roteiro de cálculo das envoltórias complementares, considerando o lado da fonte e o lado da linha, com a determinação da distância crítica para aplicação de falta monofásica.

No desenvolvimento do estudo de TRT, os dois parâmetros a seguir relacionados, que caracterizam o fenômeno, devem ser observados e comparados aos valores normalizados, para concluir se o disjuntor está adequado ou não para a manobra:

- Taxa de crescimento da tensão transitória (TCTRT), em (kV/ μ s);
- Valor de pico da onda da TRT, em (kV).

Entretanto, a simples comparação desses valores em tabela não exime a Transmissora de avaliar de forma completa os oscilogramas da TRT verificando, especialmente, se houve ultrapassagem das envoltórias normalizadas em algum ponto.

Como tendência geral a ser considerada nas análises, pode-se afirmar que a falta terminal resulta em valores sempre mais críticos para o pico da TRT, enquanto a falta quilométrica resulta em valores mais severos para TCTRT.

Diversos fatores contribuem para agravar ou atenuar a severidade da TRT, conforme relatado nas referências [6.3] e [6.4]. Uma delas é a influência das capacitâncias e indutâncias a montante do ponto de manobra, a qual pode ser associada à frequência natural de oscilação da TRT do circuito formado pela rede e componentes da subestação, ($\omega_0 = 1/\sqrt{L.C}$). A frequência natural de oscilação é proporcional a TCTRT: quanto maior a frequência natural de oscilação, mais rápido será o crescimento da tensão (TCTRT).

A observação acima permite concluir que a elevação da potência de curto-circuito, traduzida como redução da indutância (L), resulta em redução da TCTRT e aumento da crista da TRT. A representação das capacitâncias parasitas associadas a barramentos, a equipamentos da subestação e a banco de capacitores em derivação, caso existentes na barra do disjuntor, também contribui para elevar o valor da capacitância (C) e, com isso, atenuar a TCTRT.

Dada a complexidade exigida na modelagem da rede, o cálculo da TRT deve ser realizado por ferramenta de simulação digital, como o programa ATP, devendo-se considerar as diretrizes estabelecidas no item 4.2.5 do presente documento, sobre a modelagem da rede e, adicionalmente, a representação das capacitâncias parasitas de barramentos e demais equipamentos da subestação.

No caso do disjuntor que manobra o transformador que alimenta a corrente de curto-circuito passante, a modelagem atualmente disponível e adotada nas simulações com o ATP para o estudo da TRT não representa com fidelidade a resposta em frequência do transformador. Isto acarreta distorções severas nos resultados, conforme referência [6.8].

Mesmo considerando as imprecisões dos resultados para esse tipo de simulação quando não está disponível a modelagem de alta frequência do transformador, sua realização é escopo do projeto básico. Caso sejam verificadas violações de envoltórias normalizadas da TRT, o modelo de transformador utilizado deve ser revisto, ou, alternativamente, os resultados do estudo devem ser submetidos aos fabricantes dos disjuntores para avaliação do adequado desempenho do equipamento frente à manobra de abertura de corrente de falta alimentada por transformador.

4.2.14.2. Diretrizes para a Realização dos Estudos de Tensão de Restabelecimento Transitória

Deverão ser simuladas no programa ATP, no mínimo, as faltas (tipo/localização) mencionadas no Anexo Técnico associado ao Edital de Licitação do empreendimento. Em princípio, devem ser avaliadas faltas aplicadas em ambos os lados do disjuntor.

A tensão de pré-manobra precisa ser ajustada igual à máxima tensão operativa em correspondência à classe de tensão da rede, de acordo com o Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS.

Uma vez encontradas nos estudos violações das envoltórias normalizadas pela IEC 62271-100 em seu valor máximo, devem ser especificados disjuntores com fator de primeiro polo 1,5. Neste caso, as características de TRT devem ser corrigidas para a nova condição, multiplicando-se as grandezas de tensão e tempo pela relação 1,5/1,3. Caso essa medida ainda seja insuficiente para evitar a ultrapassagem das envoltórias ou essa ultrapassagem ocorra por taxa de crescimento e não por valor máximo, a Transmissora deverá apresentar documento do fornecedor dos disjuntores afetados no qual haja explícita garantia de abertura para a(s) envoltória(s) superiores às normalizadas identificadas pelos estudos da Transmissora.

Deve ser informada a envoltória cujos parâmetros (U_1 , t_1 , U_c , t_2 , corrente máxima) são garantidos pelo fornecedor. Nesse caso, os oscilogramas de TRT que ultrapassam as envoltórias normalizadas devem ser reapresentados em comparação com as envoltórias garantidas. O fornecedor deve prover à Transmissora, caso ela julgue necessário, a comprovação da garantia mencionada, seja mediante ensaios prévios executados para aquele tipo de equipamento atestado pelos laboratórios executantes ou pela execução de ensaios de tipo para a condição atestada pelo fabricante.

Disjuntores não classificam as faltas que interrompem segundo a organização da norma. Eles percebem apenas uma combinação de taxa de crescimento com valor máximo de TRT. Por exemplo: nem todas as faltas simuladas como quilométricas se comportam como tal.

Não serão consideradas simulações simplificadas em ferramentas alternativas, para efeito de projeto básico. No entanto, as justificativas, desde que tecnicamente embasadas, poderão ser apresentadas para a não simulação de algum tipo de defeito, que serão avaliadas pelo ONS.

Abertura de defeito terminal

- Devem ser adotadas as envoltórias da IEC 62271-100, assim como os parâmetros pico da TRT e TCTRT nela contidos, em função da classe de tensão e da característica de aterramento do sistema. Deve-se considerar o percentual da corrente imediatamente superior ao maior valor de corrente de defeito que circula pelo disjuntor, conforme verificado nas simulações com o ATP, observando-se cada uma das três fases.
- A título de exemplo, para um disjuntor com capacidade nominal de interrupção de curto-circuito igual a 40 kA e valor máximo eficaz da corrente de curto-circuito passante de 7,5 kA, cerca de 18,75% da sua capacidade nominal, resulta na aplicação da envoltória normalizada de 30% e fator de primeiro polo 1,3.

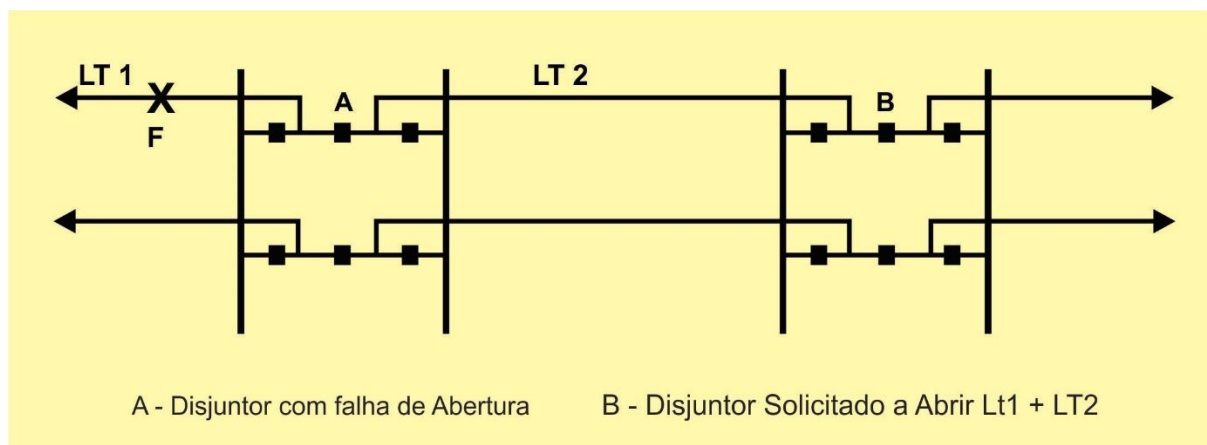
Abertura de defeito quilométrico

- Para o cálculo da abertura da falta quilométrica nas proximidades da subestação, é necessário considerar a aplicação de curto-circuito monofásico, com as distâncias de aplicação da falta calculadas de acordo com metodologia de cálculo do Anexo A da norma IEC 62271-100.
- Deve-se adotar, para a taxa de crescimento e para o valor máximo da oscilação do lado linha (onda dente de serra), aquela calculada de acordo com a metodologia do Anexo A da referida norma.
- Pode ser levada em consideração, caso seja necessário, a representação das capacitâncias parasitas dos barramentos e de equipamentos existentes na subestação, em parâmetros concentrados. As referências [6.7] e [6.13] apresentam valores típicos que podem ser adotados como referência para as capacitâncias dos elementos da subestação.
- Deve-se adotar, para o valor de pico da TRT, as envoltórias da norma IEC 62271-100, para a correspondente classe de tensão e característica de aterramento do sistema.

Abertura de linha a vazio

- Deve ser simulada a abertura em vazio a 60 Hz, com aplicação de falta monofásica na fase A (falha da abertura da fase em falta pelo disjuntor adjacente, com transferência do disparo para o terminal oposto, onde as fases B e C operarão a abertura em vazio) e sem a aplicação de falta (abertura do terminal emissor de linha em vazio).
- Caso a região do sistema onde o disjuntor for instalado esteja sujeita a sobrefrequências em regime dinâmico, a simulação deve levar em conta a máxima sobrefrequência identificada nestes estudos.
- Deve ser considerada a possibilidade de manobra da linha de transmissão em conjunto com o(s) equipamento(s)/linha(s) de transmissão conectados a ela em subestações adjacentes. Esse evento é possível, por exemplo, em caso de falta no equipamento/linha de transmissão da subestação adjacente, seguido de falha do respectivo disjuntor, com configuração de barra do tipo disjuntor e meio, e com linhas de transmissão que compartilham o mesmo vão. A Figura 4.11 ilustra esta condição.
- A envoltória normalizada da TRT será obtida a partir das recomendações de ensaios que constam da cláusula 6.111.7 e Tabela 20 da norma IEC 62271-100.
- A condição de interrupção de correntes capacitivas (em condição de regime permanente) também deve ser avaliada a partir da simulação do ATP. Caso sejam superiores à capacidade nominal de manobra de correntes capacitivas — estabelecida na Tabela 5 da norma IEC 62271-100 —, o fabricante deverá ser consultado.

Figura 4.11 Exemplo de Manobra de Abertura de Duas LTS em Série Sob Condição de Falha de Abertura de Disjuntor de SE Adjacente.



Abertura em discordância de fases

- A especificação da capacidade de abertura em discordância de fases para os disjuntores, requisito sempre exigido nos leilões de transmissão, resulta em uma suportabilidade a um valor de TRT máximo maior, desde que as condições de taxa de crescimento da TRT se comportem dentro de limites estabelecidos para este tipo de abertura.
- Entretanto, este valor de TRT não necessariamente corresponde à defasagem angular de 180° no ponto de operação do disjuntor. Por este motivo, deve ser identificada a solicitação mais crítica de tensão aos polos do disjuntor imposta pela rede, para a abertura em discordância de fases, na condição sem falta aplicada.
- Do ponto de vista da rede, é absolutamente improvável alcançar uma defasagem de 180° na abertura. Por exemplo: disjuntores localizados em linhas que possuam mais de uma linha em paralelo, ou disjuntores localizados em sistemas muito malhados, onde a separação angular só ocorreria numa contingência múltipla de ordem elevada.
- Deve ser simulada com o programa ATP a imposição da condição sistêmica máxima de discordância de fases possível de ser simulada no ATP entre os terminais abertos do disjuntor.
- Em função do resultado encontrado, caso ocorra a ultrapassagem da envoltória normalizada do disjuntor, deve-se identificar o máximo ângulo de defasagem em que a característica normalizada de TRT garante a abertura.
- Neste caso, para ângulos no segundo quadrante, dinamicamente improváveis, mesmo durante um processo de desmonte do sistema se pode avaliar a possibilidade de adoção de lógica de proteção que obrigue a abertura do disjuntor para ângulos inferiores ao limite estabelecido nas simulações. Não há necessidade de aquisição de equipamentos especiais.

- Caso sejam identificadas limitações para defasagens angulares baixas, que possam comprometer o desempenho dinâmico do sistema, restam as seguintes alternativas:
 - Avaliar se a adoção de disjuntores de maior capacidade ou classe de tensão permite garantir a abertura para ângulos de discordância de fases suficientemente maiores;
 - Avaliar se, com o refinamento da modelagem, ao identificar-se mais precisamente as tensões pré-abertura (t_{0-}) — por exemplo, por meio de programas de estabilidade transitória, reproduzindo-a no ATP —, é possível operar a abertura;
 - Comprovar a impossibilidade de ocorrer a sequência de eventos que levaria a este tipo de abertura.

4.2.14.3. Desenvolvimento das Simulações e Análises

O desenvolvimento das simulações e análises para o estudo da TRT consiste, basicamente, na obtenção dos valores dos picos das TRTs e das TCTRTs para as condições de aberturas de falta terminal, falta quilométrica, abertura de linha a vazio e abertura em oposição de fases, assim como de sua comparação com as envoltórias padronizadas de acordo com a norma de disjuntores IEC 62271-100.

As simulações devem ser realizadas de maneira determinística, merecendo atenção especial a escolha do passo de integração (recomenda-se 1 microssegundo) e o tempo máximo da simulação, conforme recomendação do item 4.2.5.3 do presente documento.

É imprescindível, para a análise das formas de onda das tensões transitórias de restabelecimento dos disjuntores, a visualização e impressão dos gráficos com os valores dos picos da TRT, dos tempos de ocorrência, da TCTRT, juntamente com as envoltórias normalizadas. Sobre essa aplicação, podem ser indicados alguns trabalhos publicados, conforme relacionados nas referências [6.8], [6.9] e [6.10].

4.2.14.4. Apresentação dos Resultados

Os resultados das simulações devem ser apresentados em tabelas e gráficos com as formas de onda das TRTs e das envoltórias normalizadas.

A apresentação dos resultados será precedida da informação dos parâmetros das envoltórias escolhidas como referência para a verificação da adequação do disjuntor. Deve ser identificada a norma, relacionando-se os parâmetros das envoltórias para as condições de abertura de falta terminal, falta quilométrica, abertura de linha a vazio e abertura em oposição de fase. Destaque-se também o fator de primeiro polo referente às envoltórias.

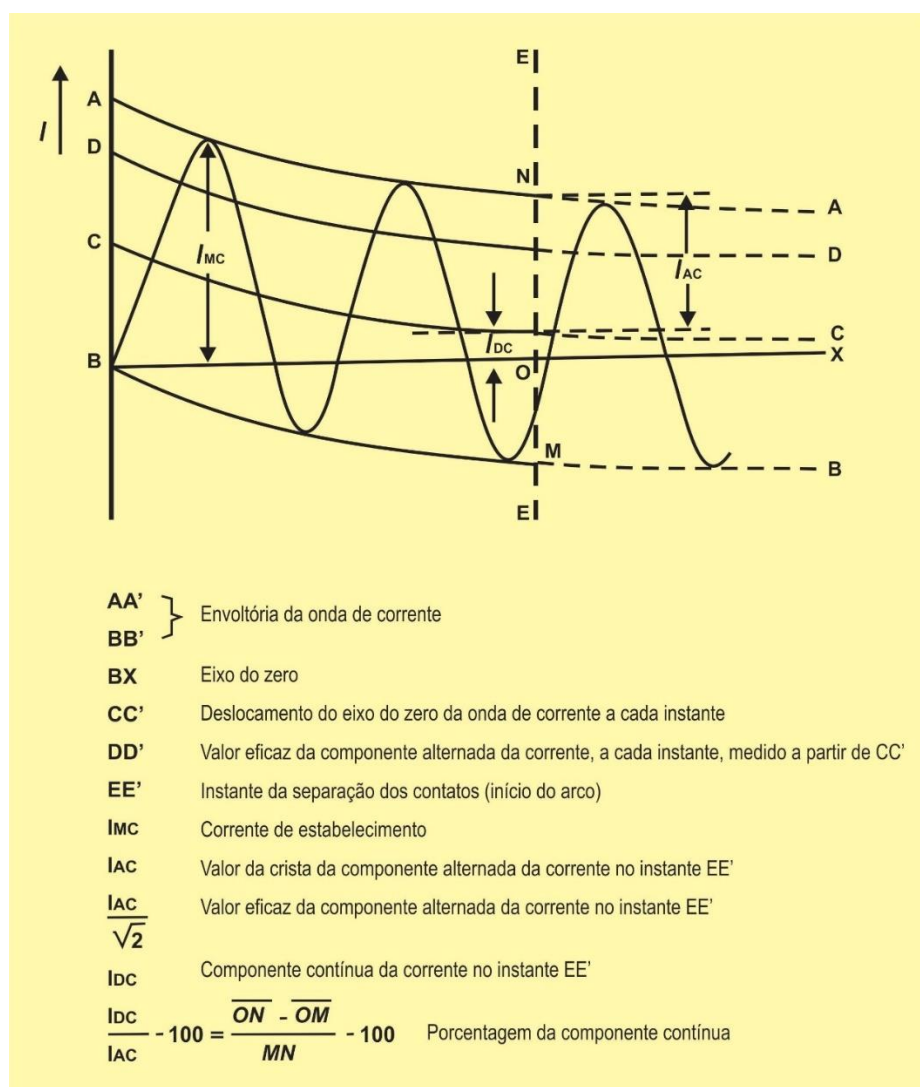
O item 9.7 apresenta uma sugestão de itens a serem contemplados no relatório dos estudos de TRT com exemplos de tabelas e gráficos para a apresentação dos resultados e das envoltórias padronizadas.

4.2.15. Estudo de Assimetria das Correntes de Curto-Circuito

O cálculo da assimetria das correntes de curto-circuito visa a subsidiar tanto a definição da capacidade de estabelecimento nominal em curto-circuito dos disjuntores, como a corrente suportável nominal em curto-circuito dos equipamentos.

A norma de disjuntores IEC 62271-100 apresenta, na seção 4.101, a definição da capacidade de interrupção nominal em curto-circuito (I_{sc}) de disjuntores, caracterizada por dois valores: o valor eficaz de sua componente CA e a porcentagem da componente CC. A Figura 4.12 apresenta a forma de onda da corrente de curto-circuito com a determinação das componentes CA e CC conforme reproduzida a seguir.

Figura 4.12 Determinação das Componentes CA e CC – I_{sc} de Disjuntores. Fonte: IEC 62271-100.



A componente CA ou componente periódica, I_{ca} ($K A_{eficaz}$), imposta pelo sistema, é calculada por programas de curto-circuito, como o ANAFAS, adotando-se como referência as bases de dados do PAR-ONS correspondentes ao ano de entrada em operação do empreendimento.

De acordo com a subseção 4.101.1 da IEC 62271-100, o valor normalizado da componente CA da corrente de interrupção nominal em curto-circuito de um disjuntor deve ser escolhido da série R10 da IEC 60059. A série R10 compreende os números 1 – 1,25 – 1,6 – 2 – 2,5 – 3,15 – 4 – 5 – 6,3 – 8 e seus produtos por 10n. Essa padronização resulta em valores como, por exemplo, 31,5 kA, 40 kA, 63 kA, usualmente adotados para a capacidade nominal de curto-circuito dos equipamentos das instalações da Rede Básica.

A componente CC da corrente de interrupção nominal em curto-circuito, ou componente aperiódica, varia no tempo e pode ser dada pela exponencial, conforme referência [6.2]:

$I_{cc}(\%) = e^{-t/\tau} \times 100$, onde:

τ = tempo contado a partir da falta.

τ = constante de tempo (ms) do circuito visto do disjuntor, dada em função da relação;

$\tau = X/R = (1/\omega) \times (X/R) \times 1000$ ms.

Para curtos trifásicos $X/R = X1/R1$, para monofásicos $X/R = (2X1 + X0)/(2R1 + R0)$.

A capacidade de estabelecimento nominal em curto-circuito é o maior valor instantâneo de corrente que um disjuntor é capaz de estabelecer (fechar), com tensão e frequência nominal. Corresponde ao primeiro pico da corrente após a falta, conforme mostrado na Figura 4.12, e pode ser calculado, conforme estabelecido na referência [6.2]:

$I_{f\text{máx}} = I_{ca} (K A_{\text{eficaz}}) \times f_a$, sendo $f_a = \sqrt{2} (1 + e^{-t/\tau})$; f corresponde ao fator de assimetria.

O tempo τ deve ser tomado igual a 8,33 ms (1/2 ciclo), considerado menor tempo de atuação da proteção, conforme recomendação da norma.

A seção 4.103 da IEC 62271-100 normatiza a capacidade de estabelecimento nominal em curto-circuito de um disjuntor como sendo igual a 2,6 vezes o valor eficaz da componente CA da sua corrente de interrupção nominal em curto-circuito, para a frequência de 60 Hz e uma constante de tempo da rede de 45 ms. A referida norma apresenta alternativamente constantes de tempo superiores ao citado, cobrindo requisitos especiais, conforme referenciado em seu item 4.101.2.

Deve-se, portanto, efetuar o cálculo do fator de assimetria, considerando-se a relação X/R da corrente de curto-circuito, obtida a partir do estudo de curto-circuito no ponto de aplicação do disjuntor. O valor normalizado ($f_a=2,6$) somente deve ser adotado na especificação do disjuntor quando o fator calculado for igual ou inferior a 2,6. Os valores de X/R, constante de tempo τ (ms) e o fator de assimetria calculados devem ser fornecidos para efeito da especificação dos equipamentos.

Caso o maior fator de assimetria calculado no projeto básico seja superior a 2,6, o valor de crista da corrente suportável nominal do respectivo disjuntor deve ser especificado considerando o produto do

fator calculado pela capacidade de curto-circuito nominal estabelecida no Edital de Leilão, mesmo que esta seja superior à máxima corrente de curto-circuito prevista nos estudos. Tal critério se aplica também aos equipamentos em série com o disjuntor, tais como seccionadores, TCs e bobinas de bloqueio, que estarão sujeitos à mesma corrente de falta.

Exceção pode ser feita no caso de equipamentos como compensadores síncronos. Em caso de falta entre o disjuntor e o barramento, a corrente passante pelos equipamentos do vão, embora possa ter elevado fator de assimetria, é proveniente unicamente da contribuição do compensador síncrono. Sendo assim, além de ter valor consideravelmente inferior à capacidade nominal dos equipamentos, tal corrente não sofre influência da evolução da rede. Portanto, deve ser considerado o fator de assimetria da corrente de falta aplicada entre o disjuntor e o compensador síncrono, ou seja, a contribuição proveniente da rede. Tal raciocínio é também aplicável a elementos *shunt*, tais como reatores e capacitores em derivação.

O cálculo da assimetria da corrente de curto-circuito deve ser apresentado, preferencialmente, no relatório do estudo da tensão de restabelecimento transitória, no qual são definidos os demais requisitos para os disjuntores.

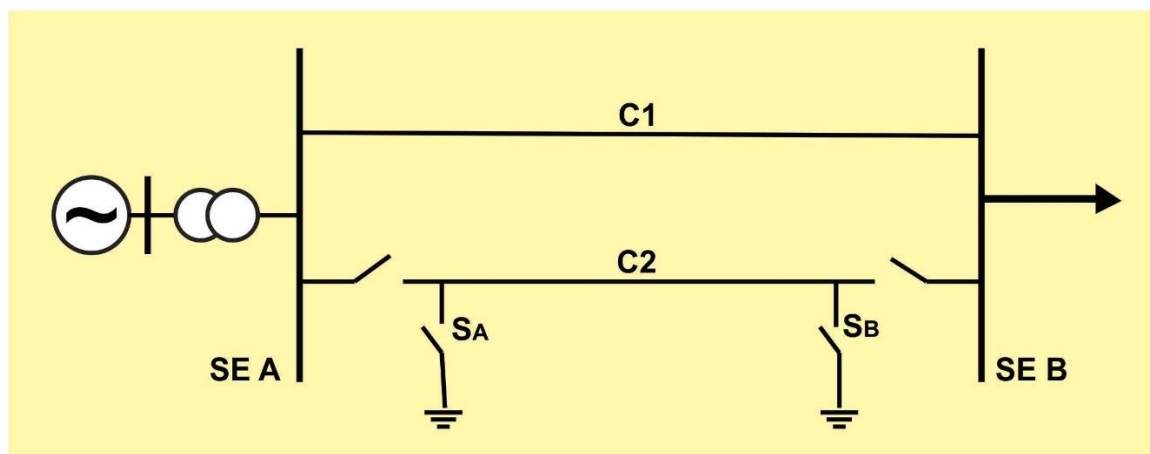
4.2.16. Estudo das Tensões e Correntes Induzidas em Lâminas de Terra de Seccionadoras

Este estudo objetiva calcular os valores das correntes e tensões induzidas em lâminas de terra das seccionadoras instaladas nos terminais das linhas de transmissão, na realização das manobras de fechamento e abertura destas. Aqui, consideram-se as condições mais severas dos acoplamentos existentes entre circuitos em paralelos e de carregamentos máximos, tendo em vista o seu dimensionamento na etapa de projeto básico da instalação.

4.2.16.1. Aspectos Gerais

Na existência de linhas de transmissão que correm em paralelo compartilhando a mesma faixa de servidão, ou de linhas em circuito duplo, quando um deles está com carga e outro desligado e aterrado em seus dois terminais, como ocorre durante as intervenções para manutenção em linhas de transmissão, podem surgir correntes e tensões elevadas no circuito desenergizado, devido ao acoplamento eletromagnético e eletrostático entre os dois circuitos. Nesta condição, ao realizar-se a manobra de abertura das chaves de aterramento, podem surgir solicitações severas de correntes a serem interrompidas e de tensão de restabelecimento transitória (TRT) entre os terminais.

Figura 4.13 Correntes e Tensões Induzidas por Acoplamento Eletromagnético em Lâminas de Terra de Chaves Secionadoras.



No exemplo da figura acima, Figura 4.13, estando o circuito C2 isolado para manutenção, considera-se como condição inicial de análise as duas lâminas de terra S_A e S_B fechadas em ambos os terminais do circuito C2. Antes da energização do circuito C2, é necessário proceder a abertura das chaves de aterramento, uma de cada vez. A primeira delas a abrir, por exemplo S_A , irá interromper um valor elevado de corrente induzida com pequeno valor de tensão de restabelecimento entre seus contatos, já que o outro terminal se encontra aterrado com tensão nula.

Uma vez aberta a chave S_A , na abertura da chave S_B da outra extremidade da linha, ainda existe corrente, porém de pequeno valor, pois, com o outro terminal já desaterrado, o caminho que resulta para a corrente é, somente, devido às capacitâncias parasitas entre as fases e a terra. Todavia, durante a abertura da chave S_B , a tensão a ser estabelecida entre seus contatos poderá ser elevada, já que circuito C2 será efetivamente desaterrado.

A primeira lâmina de terra a abrir (no exemplo citado, S_A) é caracterizada por corrente e tensão induzidas, devido ao acoplamento eletromagnético; e a segunda (no exemplo citado, S_B), por acoplamento eletrostático. As lâminas de terra devem, portanto, ser dimensionadas para suportar a imposição de ambas as condições apresentadas. A referência [6.3] apresenta de maneira detalhada a análise dessa condição da manobra de chaves seccionadoras.

A norma IEC 62271-102, referente a seccionadoras e a chaves de aterramento, apresenta em seu Anexo C, Tabela C.1, os valores nominais de correntes e tensões induzidas para chaves de aterramento em função da classe de tensão. Na referida tabela, são apresentados os limites normalizados para as correntes e tensões induzidas por acoplamento eletromagnético e eletrostático, dividido em duas classes: classe A – baixo acoplamento ou para linhas paralelas relativamente curtas; e classe B – alto acoplamento ou para linhas paralelas relativamente longas.

Na mesma norma, na Tabela C2 do Anexo C, são apresentados os valores normalizados da tensão de restabelecimento para os ensaios de interrupção de correntes induzidas eletromagneticamente, valores esses que devem ser observados como requisito para as lâminas de terra.

4.2.16.2. Diretrizes para os Estudos de Correntes e Tensões Induzidas em Lâminas de Terra

Este estudo se aplica toda vez que existirem linhas de transmissão que corram em paralelo, dividindo a mesma faixa de servidão ou de linhas em circuito duplo.

Na modelagem da linha de transmissão para a simulação com o programa ATP, deve-se levar em consideração todos os acoplamentos eletrostáticos e eletromagnéticos presentes entre fases e entre circuitos.

A representação das linhas de transmissão na base de dados do ATP deve ser feita pela sua matriz de transformação modal, obtida com o processamento da rotina *Line Cable Constants* (LCC) do programa ATP, levando-se em consideração os dados de projeto das linhas (geometria da torre típica, características do cabo fase, cabos para-raios e flechas). No item 9.3 do presente documento, é apresentado um exemplo desse tipo de modelagem.

Conforme descrito no item 4.2.5.2, atenção especial deverá ser dada ao esquema de transposição, principalmente nos casos em que se trata de linhas em circuito duplo. A adoção de esquemas de transposição no mesmo sentido para linhas em circuito duplo resulta em solicitações consideravelmente elevadas, as quais, muitas vezes, acabam por ser exceção aos valores normalizados. No caso de linhas de transmissão de circuito simples, mas com trechos de circuitos duplos, é importante verificar o posicionamento de cada um dos cabos fase dos circuitos que compartilham a mesma torre, conforme citado anteriormente, o que pode mudar para cada trecho (necessidade de verificar o posicionamento em cada LCC de acoplamento). Nestas condições, recomenda-se também o espelhamento (simetria) dos circuitos a fim de se minimizar as solicitações sobre as lâminas de terra.

4.2.16.3. Premissas para Ajuste dos Casos ATP

As correntes e tensões induzidas em lâminas de terra das seccionadoras são mais severas sob condição de maior carregamento dos circuitos que permanecem energizados, acoplados ao circuito desenergizado e aterrado, tanto nos casos de acoplamento eletrostático quanto de acoplamento eletromagnético.

Neste tipo de estudo, não há necessidade de se modelar a rede de forma detalhada ou com equivalentes de curto-circuito nas barras terminais. Para determinação das solicitações sobre as lâminas de terra, a representação da rede pode ser realizada por barras infinitas nos terminais da linha, ajustando-se os módulos e ângulos das fontes de tensão conforme diretrizes apresentadas a seguir.

A tensão de pré-manobra deve ser correspondente à máxima tensão operativa da classe de tensão da rede, conforme o Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede.

Circuitos duplos que adotam cabos guardas diferentes necessitam de avaliação das solicitações em ambos os circuitos uma vez que as solicitações impostas às lâminas de terra vir a ser distintas. Adicionalmente, deve-se apresentar os resultados considerando o fluxo no circuito energizado em ambos os sentidos.

Para ilustrar a influência das premissas citadas anteriormente, a tabela abaixo apresenta os resultados dos acoplamentos eletrostáticos e eletromagnéticos em função do sentido de transposição e do carregamento do circuito paralelo, para uma LT de 500 kV Terminal A – Terminal B em circuito duplo. Percebe-se que a elevação do carregamento da linha paralela resulta em maiores solicitações nas lâminas de terra, tanto para acoplamento eletromagnético quanto eletrostático. Conforme mencionado, o sentido de transposição afeta sobremaneira os resultados. As condições sem carga, ou com a linha energizada por apenas um dos terminais, mostraram resultados muito próximos e consideravelmente inferiores à condição de linha com fluxo máximo (com carga).

| LT 500 kV Circuito Duplo | Transposição | Condição Circuito paralelo | Terminal | Acoplamento Eletromagnético | | Acoplamento Eletrostático | |
|---|---------------------|----------------------------|----------|-----------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------|
| | | | | Corrente induzida [A] | Tensão induzida [kV] | Corrente induzida [A] | Tensão induzida [kV] |
| | | | | | | | |
| Mesmo Sentido C1: [ABC-BCA] C2: [ABC-BCA] | Com carga | | A | 150.31 | 11.94 | 18.99 | 32.77 |
| | | | B | 150.99 | 11.84 | 18.25 | 35.45 |
| | Sem carga (em anel) | | A | 14.13 | 1.46 | 20.09 | 32.19 |
| | | | B | 14.9 | 1.52 | 20.23 | 32.11 |
| | Energizado | | A [1] | 7.7 | 1.18 | 20.64 | 33.28 |
| | | | B | 19.73 | 1.86 | 20.36 | 32.31 |
| Sentidos opostos [2] C1: [ABC-BCA] C2: [ABC-CAB] | Com carga | | A | 100.43 | 8.01 | 15.81 | 28.78 |
| | | | B | 104.8 | 8.32 | 14.31 | 26.02 |
| | Sem carga (em anel) | | A | 9.32 | 1.09 | 10.01 | 16.2 |
| | | | B | 8.31 | 0.97 | 10.08 | 16.01 |
| | Energizado | | A [1] | 5.67 | 0.93 | 10.39 | 16.35 |
| | | | B | 11.93 | 1.28 | 10.15 | 16.13 |

[1]: Tensão de 1.08 pu no terminal aberto do circuito paralelo

[2]: Recomendado pelo S.M 2.4 e Documento de Diretrizes para Elaboração de PB

Para ilustrar a influência do sentido da corrente no circuito paralelo (circuito em operação), a tabela a seguir apresenta os resultados do acoplamento eletrostático nestas condições, para as configurações de transposição no mesmo sentido e em sentidos opostos, para uma segunda LT 500 kV Terminal C – Terminal D em circuito duplo. Da mesma forma como constatado anteriormente, percebe-se que a importância de se transpor os circuitos em sentidos opostos. Pode-se verificar também que o sentido da corrente no circuito paralelo tem influência nos resultados.

| | Transposição | Carregamento | Acoplamento Eletrostático | |
|--------------------------|--------------------------------|---------------------------|--|--|
| | | | Corrente Induzida | Tensão Induzida |
| LT 500 kV Circuito Duplo | C1: [ABC-BCA] C2: [ABC-BCA] | s/carga | Terminal 1: 16,49 Terminal 2: 16,44 | Terminal 1: 16,77 Terminal 2: 16,64 |
| | | fluxo max sentido 1->2 | Terminal 1: 17,53 Terminal 2: 16,08 | Terminal 1: 20,34 Terminal 2: 19,41 |
| | | fluxo max sentido 2->1 | Terminal 1: 16,56 Terminal 2: 17,48 | Terminal 1: 20,71 Terminal 2: 21,71 |
| | C1: [ABC-BCA] C2: [ABC-CAB] | s/carga | Terminal 1: 9,13 Terminal 2: 9,06 | Terminal 1: 9,25 Terminal 2: 9,29 |
| | | fluxo max sentido 1->2 | Terminal 1: 13,72 Terminal 2: 11,64 | Terminal 1: 17,50 Terminal 2: 15,05 |
| | | fluxo max sentido 2->1 | Terminal 1: 10,27 Terminal 2: 11,78 | Terminal 1: 14,36 Terminal 2: 14,99 |

4.2.16.4. Desenvolvimento das Simulações e Análises

Os estudos para obtenção das correntes e tensões induzidas em lâminas de terra são divididos em duas etapas:

- a) A primeira é realizada em regime permanente e visa obter as tensões e correntes induzidas em frequência industrial, conforme descrito a seguir.
- O cálculo das correntes e tensões induzidas, com a utilização do programa ATP, deve ser realizado sob condição de regime permanente, sem falta aplicada, observando-se a corrente e a tensão induzidas nas lâminas de aterramento, tanto das linhas de transmissão que compõem o Projeto Básico, quanto das que compartilham com elas trechos de paralelismo. O carregamento dos circuitos acoplados com a linha em análise deve ser ajustado o mais próximo possível das respectivas capacidades operativas de longa duração, de forma a maximizar as induções eletromagnéticas e eletrostáticas. O circuito em análise deve estar aberto e aterrado pelas lâminas de terra de seus dois terminais.
 - A corrente induzida por acoplamento eletromagnético é a corrente que circula para terra através das lâminas de aterramento, ou seja, com as chaves de ambos os terminais fechadas (linha aterrada). Ao abrir uma das chaves, a tensão induzida por acoplamento eletromagnético é a que surge no terminal da chave aberta.
 - A corrente induzida por acoplamento eletrostático é a corrente que circula para a terra através da lâmina de terra do terminal em análise fechada e com a lâmina de terra do terminal remoto aberta. A tensão induzida por acoplamento eletrostático é a que resulta no circuito em análise, mas com as duas lâminas de terra abertas, isto é, o circuito em análise desaterrado em ambos os terminais.
 - Os valores obtidos com o procedimento acima devem ser comparados aos valores da Tabela C.1 do Anexo C da norma IEC 62271-102, para a especificação da classe de acoplamento das

lâminas de terra dada em função da tensão nominal (classe A – baixo acoplamento; ou classe B – alto acoplamento).

- Em especificações de lâminas de terra para instalações da Rede Básica, tem-se observado, com certa frequência, que os valores normalizados conforme a Tabela C.1 do Anexo C da norma IEC 62271-102 se apresentam com pouca margem, e, em alguns casos, são insuficientes para atender às imposições mais severas de acoplamentos entre circuitos — mesmo considerando-se a classe B de alto grau de acoplamento. Neste caso, o recurso é adotar a especificação da lâmina de terra da classe de tensão imediatamente superior, consultar o fabricante ou adotar dispositivos especiais para mitigação, tais como lâminas com contato de sacrifício ou com câmara de extinção de arco.
- b) A segunda etapa desse estudo visa garantir a capacidade de abertura das correntes induzidas eletromagneticamente sob a ótica da tensão de restabelecimento transitória e, portanto, é realizada em regime transitório. Essa avaliação consiste em verificar o atendimento aos limites normalizados da tensão de restabelecimento transitória para ensaios de interrupção de correntes induzidas eletromagneticamente, conforme a Tabela C.2 do Anexo C da norma IEC 62271-102.
- Além disso, cabe ressaltar que os estudos devem ser realizados considerando a possibilidade de início de abertura das chaves por ambos os terminais. Isto é, deve-se avaliar os efeitos da abertura das chaves na ordem, chave A e depois chave B, como também a possibilidade de abertura na ordem chave B e depois chave A.

Conforme citado no item anterior, circuitos duplos que adotam cabos guardas diferentes necessitam de avaliação das solicitações em ambos os circuitos uma vez que as solicitações impostas sob as lâminas de terra podem vir a ser distintas.

4.2.16.5. Apresentação dos Resultados

O resultado das simulações, conclusões e recomendações referente ao estudo das correntes e tensões induzidas em lâminas de terra das seccionadoras pode ser apresentado juntamente com os estudos de TRT e no mesmo relatório. O item 9.7 deste documento apresenta sugestões de tabelas para a apresentação dos resultados desse tipo estudo.

4.2.17. Estudo de Coordenação do Isolamento

Este estudo objetiva avaliar as sobretensões que atingem os equipamentos das entradas de linha e do interior das subestações, em função da ocorrência de descargas atmosféricas sobre as linhas de transmissão a elas conectadas. Como produto desta análise, são estabelecidos os níveis básicos de isolamento (NBI) a serem especificados para os equipamentos da subestação, bem como as

características nominais dos para-raios e recomendações quanto à sua localização (distâncias dos equipamentos) na instalação.

4.2.17.1. Aspectos Gerais

As descargas atmosféricas que atingem as instalações de transmissão podem ser classificadas como diretas e indiretas:

- As descargas diretas são as que atingem diretamente os cabos fases das linhas de transmissão e se caracterizam por ser de amplitude mais baixa. As correntes associadas às descargas diretas podem ser calculadas em função da distância de incidência, geralmente obtida pelo modelo eletrogeométrico. A referência [6.4] apresenta a metodologia completa, com as equações para a determinação das correntes de descargas diretas, considerando-se o citado modelo.
- As descargas indiretas ocorrem quando os surtos atmosféricos atingem os cabos para-raios ou o topo da torre da linha de transmissão, provocando a sua elevação de potencial e resultando em descarga entre os condutores de uma fase da linha e a torre, através da cadeia de isoladores da linha. A tensão de crista das descargas indiretas é função da magnitude da corrente de descarga, da impedância de surto dos cabos para-raios, da impedância de surto da torre e da resistência do pé de torre. A tensão estabelecida pela cadeia de isoladores é função também do fator de acoplamento entre os cabos para-raios e os cabos fases. Dependendo do valor da tensão através da cadeia de isoladores, poderá ocorrer a disrupção desta, e o surto atmosférico que se propagará nos cabos condutores terá amplitude máxima igual ao valor da suportabilidade da cadeia de isoladores. Neste caso, a frente de onda é bastante íngreme e sofre distorções até atingir a subestação.

O estudo de coordenação do isolamento, no caso de descargas atmosféricas em subestações, é desenvolvido de maneira determinística. A avaliação do nível das sobretensões na subestação, devido a descargas diretas e indiretas que incidem nas linhas de transmissão, leva em conta uma margem de segurança geralmente de 5% para isolamento auto-recuperante (isolamento no ar), e de 15% para os terminais de equipamentos da subestação. Estas margens de segurança referem-se à tensão suportável de impulso atmosférico normalizada, NBI ou *BIL* (*Basic Insulation Level*) dos equipamentos, conforme recomendado pela norma de coordenação do isolamento [6.15]. As margens de segurança visam a compensar os aspectos do envelhecimento do isolamento durante o tempo de vida útil dos equipamentos, as diferenças de características de proteção dos para-raios e as aproximações consideradas nos dados e simulações.

As simulações de descargas atmosféricas precisam levar em consideração as piores condições de imposição de descargas atmosféricas na subestação, como a amplitude das correntes, os tempos de frentes de onda, a resistência de pé de torre mais elevada, a consideração da tensão de 60Hz pré-

descarga e a configuração topológica da subestação. Geralmente, condições topológicas degradadas da subestação, com menor número de circuitos conectados, são as mais desfavoráveis. O surto de descarga atmosférica, ao atingir a subestação, sofre reflexões e flui pelos circuitos internos disponíveis da subestação, assim como retorna pelos circuitos externos (linhas conectadas). Desta forma, quanto maior o número de circuitos conectados à subestação e mais completa for a sua topologia, menores serão os níveis das sobretensões decorrentes das descargas atmosféricas.

A proteção contra surtos atmosféricos é obtida pelos para-raios e se relaciona com a distância dos equipamentos a ser protegidos. Em função das ondas incidentes e refletidas em pontos no interior de uma subestação, podem surgir sobretensões em patamares críticos, e, de maneira geral, quanto maior a distância entre os para-raios e os equipamentos, maiores serão as sobretensões incidentes sobre esses equipamentos.

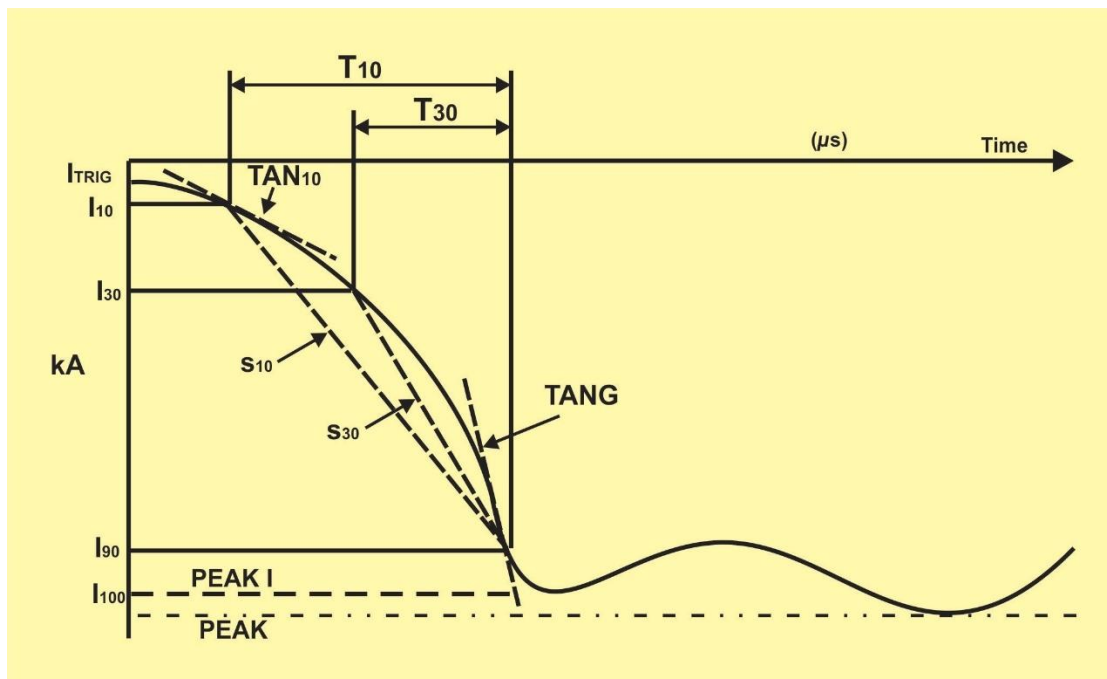
Os para-raios de entrada de linha de transmissão são particularmente importantes para a limitação dos surtos atmosféricos que trafegam no interior da instalação, pois os mesmos já limitam os surtos quando estes adentram a subestação.

O estudo de coordenação do isolamento para as subestações da Rede Básica deve ser realizado por simulação com programas digitais, como, por exemplo, o ATP, devendo-se levar em consideração, na modelagem, o detalhamento da configuração da subestação, com as distâncias, os parâmetros das linhas de transmissão, os cabos para-raios e demais equipamentos da subestação.

4.2.17.2. Modelagem do Surto Atmosférico

Fisicamente, o surto atmosférico é caracterizado por um impulso de corrente. Desta forma, a sua representação mais precisa é modelar o impulso de corrente no programa de simulação, de acordo com as características de forma e amplitude, descritas em referências técnicas reconhecidas internacionalmente [[6.16], [6.17] e [6.18]]. Tal modelagem precisa ser muito criteriosa, pois a forma e a amplitude do surto de corrente têm grande influência no nível das sobretensões atmosféricas que se propagam na subestação. A Figura 4.14 apresenta a forma de onda típica para o surto de corrente de uma descarga atmosférica. A adoção deste tipo de modelagem requer a seleção do valor máximo de corrente de descarga atmosférica representativa para a região em questão. Este valor deve ser implementado na modelagem adotada para o surto de corrente, cuja forma deve preferencialmente seguir as recomendações da referência [6.16], ou outra reconhecida internacionalmente.

Figura 4.14 Exemplo de Onda Típica do Surto de Corrente de uma Descarga Atmosférica [5.16]

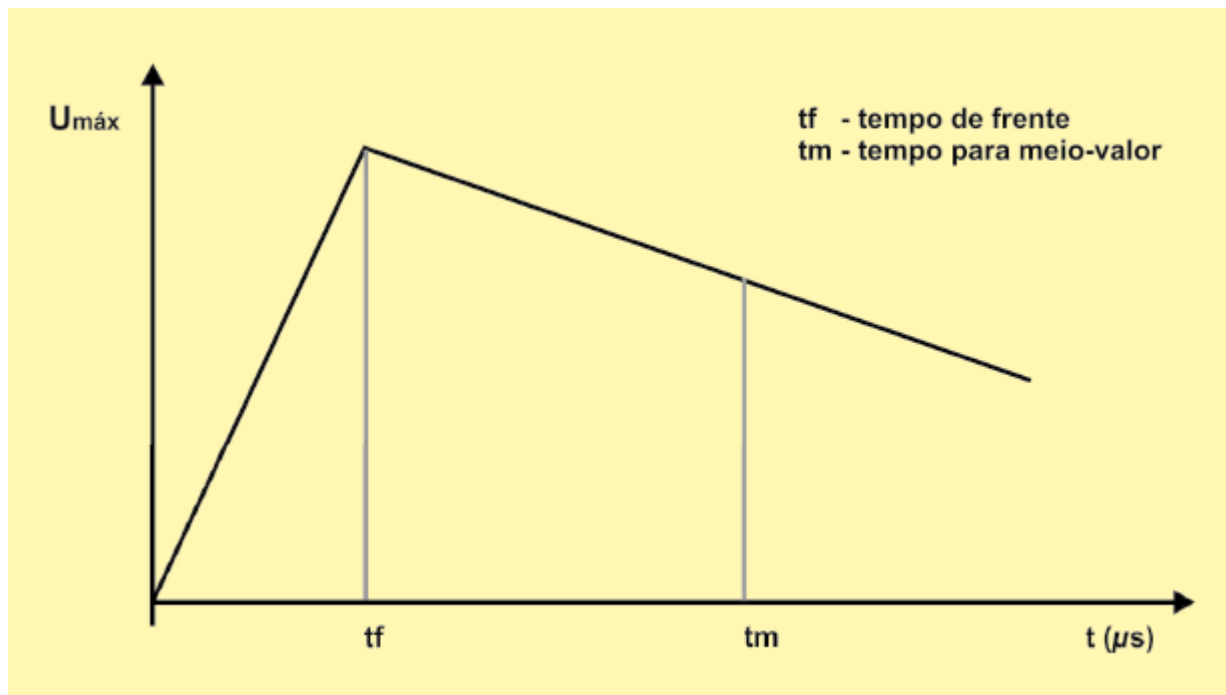


A simplificação geralmente aceita na engenharia de subestações é a adoção de um surto de tensão que represente a onda de corrente propagável para o interior da subestação, devido ao surto atmosférico que atinge a linha de transmissão. Quando o surto de corrente se propaga pela linha, uma onda de tensão se dirige à subestação [6.3], onde Z_c é a impedância de surto de sequência positiva da linha. Tal onda é representada na Figura 4.15 e corresponde à onda típica de surto atmosférico considerada nas normas de ensaios de equipamentos [6.15]. Para simulações de descarga direta por injeção de surto de tensão, os valores adotados de tempo de frente (t_f) e de tempo de cauda (t_m) são de 1 μs e 50 μs , respectivamente. Para descargas indiretas, os valores adotados são 0,5 μs e 50 μs .

A determinação do valor de crista para as descargas simuladas por surto de tensão deve seguir os seguintes critérios:

- Para descargas diretas, a amplitude da tensão de surto é dada por $U_c = I_{surto} / 2 \times Z_c$, onde Z_c é a impedância de surto de sequência positiva da linha e I_{surto} é a crista do surto de corrente para descargas diretas determinada com auxílio do modelo eletrogeométrico;
- Para descargas indiretas, a amplitude da tensão é função da tensão de ruptura da cadeia de isoladores da linha de transmissão, ou seja, $U_c = U_m \times (1 + 3.s)$, onde U_m é o valor médio da tensão suportável para a cadeia de isoladores adotada na LT (geralmente obtida de catálogo de isoladores) e s é o desvio padrão para a suportabilidade de impulsos atmosféricos no ar (3% segundo a norma de coordenação do isolamento [6.15]).

Figura 4.15 Exemplo de Forma de Onda Típica da Descarga Atmosférica.



4.2.17.3. Diretrizes para o Estudo de Coordenação do Isolamento

O estudo deve ser desenvolvido em simulação determinística com programa de cálculo de transitórios eletromagnéticos, adotando-se, por exemplo, o programa ATP, com a aplicação das seguintes diretrizes básicas:

- Considerar a incidência de descargas atmosféricas diretas e indiretas que atinjam as linhas de transmissão nas proximidades das subestações, assim como as magnitudes e formas de onda estabelecidas de acordo com as considerações do item 4.2.17.1 do presente documento;
- Considerar, na modelagem da subestação, as distâncias entre as conexões de equipamentos e barramentos, conforme propostas no projeto básico da subestação;
- Devem-se analisar as condições de subestação com topologia completa e algumas condições com topologia degradada; a escolha das topologias degradadas deve ter como objetivo a maximização das sobretensões no interior da subestação;
- As impedâncias de surto das linhas de transmissão conectadas à subestação, assim como as impedâncias de surto dos barramentos da subestação, devem ser determinadas por rotina específica para este fim, como o Line Constants do ATP. Os cabos e feixes de condutores efetivamente utilizados no projeto precisam ser considerados na determinação das impedâncias de surto. É recomendável adotar-se a determinação das impedâncias de surto para a faixa de frequências compatível com aquelas verificadas para surtos atmosféricos. O valor de 1 MHz é comumente adotado;

- Caso se julgue conveniente, a linha de transmissão pode ter um modelo que leve em consideração a variação dos parâmetros com a frequências, como o modelo J. Marti do ATP. Este tipo de modelagem pode resolver problemas de sobretensões muito elevadas, obtidas pela modelagem tradicional por impedância de surto, pois o modelo leva em conta a variação dos parâmetros com a frequência;
- Considerar a resistência de aterramento das torres, em caso de simulação de descarga indireta e com a modelagem do surto por onda de corrente. Para modelagem do surto por onda de tensão, não há necessidade de representação das torres;
- Considerar, na modelagem da subestação, a capacitância dos disjuntores, de chaves seccionadoras, dos transformadores de corrente e de potencial, das buchas de transformadores e coluna de isoladores;
- Os para-raios devem, preferencialmente, ser modelados com parâmetros dependentes da frequência a fim de se considerar as elevações das tensões residuais como função da frente de onda do surto de tensão. Recomenda-se o modelo sugerido pela referência [5.28], cujos parâmetros podem ser obtidos a partir dos dados típicos dos catálogos de fabricantes, sem a necessidade de informações construtivas específicas;
- Como critério para a avaliação dos resultados das sobretensões, deve estabelecer-se uma margem de segurança de 5% para isolamento auto-recuperante (isolamento no ar) e de 15% para os terminais de equipamentos da subestação com relação à tensão suportável normalizada de impulso atmosférico NBI ou BIL dos equipamentos e da instalação.

4.2.17.4. Desenvolvimento das Simulações e Análises

As simulações devem resultar no mapeamento das sobretensões verificadas nos diversos pontos da subestação, barramentos e terminais dos equipamentos, no sentido de estabelecer os níveis de isolamento a ser especificados para os equipamentos da subestação, bem como as características nominais dos para-raios e recomendações quanto à localização (distâncias) dos equipamentos.

4.2.17.5. Apresentação dos Resultados

Os resultados das sobretensões aplicadas aos terminais dos diversos equipamentos e aos barramentos da subestação devem ser apresentados em tabelas e conter: o tipo da descarga (direta ou indireta); o local da sua aplicação; a configuração da subestação considerada na simulação; os valores das sobretensões máximas em (kVpico), verificadas em cada um dos equipamentos; e a indicação da Figura anexa ao relatório, incluindo a plotagem da forma de onda da sobretensão.

Deve-se também apresentar diagramas unifilares, plantas e cortes correspondentes à subestação, com indicação das distâncias associadas aos barramentos, equipamentos e para-raios.

O item 9.8 deste documento apresenta uma sugestão de itens a serem contemplados no relatório dos estudos de coordenação do isolamento, com exemplos e gráficos para apresentação desses resultados.

4.2.18. Estudos Associados à Compensação Estática Shunt (CER)

Os estudos associados à compensação estática shunt podem ser divididos em duas etapas.

Na primeira, são estabelecidas as condições de contorno sistêmicas visando a subsidiar o projeto do equipamento pelo fabricante. Esta fase deve ser desenvolvida pela Transmissora, conjuntamente com os estudos elétricos do projeto básico da instalação. Ela abrange todos os aspectos necessários a sua especificação.

Deve também ter como produto um documento de Especificação Básica do CER, que servirá como referência para a aquisição do equipamento. Este documento precisa conter, entre outras coisas, a configuração básica, as faixas de potência e de controle, as características de controle a ser atendidas, bem como os requisitos de desempenho harmônico a ser obedecidos e o lugar geométrico de impedâncias da rede a ser considerado no projeto dos filtros.

Por este motivo, nesta etapa deve ser realizada pela Transmissora a determinação das características de impedância harmônica, vista do ponto de acoplamento comum (PAC) da Rede Básica, no qual será instalado o compensador estático (CER).

A segunda etapa, a ser desenvolvida pelo fabricante, refere-se ao seu dimensionamento, a partir das características de contorno fornecidas na primeira etapa. O fabricante deve fornecer inclusive os modelos computacionais do CER, com base nas características e parâmetros finais do equipamento a ser utilizados em futuros estudos de sistema, com as ferramentas para estudos de fluxo de potência, transitórios eletromecânicos e de transitórios eletromagnéticos.

4.2.18.1. Condições de Contorno Sistêmicas para Especificação

O documento a ser produzido com a finalidade de subsidiar a especificação e o projeto do CER abrangerá os seguintes aspectos sistêmicos:

- **Tensão de operação em regime permanente.**

Devem ser fornecidas a tensão fase-fase da barra correspondente ao ponto de acoplamento comum e a sua faixa de controle contínua. Também é necessário informar o desbalanço máximo de sequência negativa V_2/V_1 , conforme estabelecido no submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS.

- **Frequência do sistema.**

Devem ser fornecidas a faixa de variação da frequência em regime permanente, a faixa de variação transitória e a máxima taxa de variação da frequência do sistema no ponto de

acoplamento comum. Estes requisitos devem atender aos requisitos estabelecidos no anexo técnico do edital ou no submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS, ou sucedâneo.

- **Níveis de curto-circuito.**

Deve ser fornecido o nível de curto-circuito, no ponto de acoplamento comum, considerando o sistema completo e degradado, no horizonte da operação (ano de entrada e 4 anos à frente) para efeito de definição do controle.

Caso haja intenção de antecipação da entrada em operação com a utilização de uma rede degradada, é necessário informar a Scc no ponto de conexão para esta configuração específica, para a qual o controle deve ser ajustado pelo fornecedor.

Deve ser fornecido o valor máximo de curto-circuito especificado no anexo técnico para efeito de dimensionamento dos equipamentos que fazem parte do CER.

- **Tempos de eliminação de defeitos.**

Devem ser informados, para efeito do projeto do CER, os tempos de eliminação de defeitos associados ao nível de tensão nominal do sistema no ponto de acoplamento comum, o qual deverá estar de acordo com o estabelecido no submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS.

- **Presença de outros compensadores estáticos nas vizinhanças**

O projeto do controle deve prover malhas de controle que evitem hunting entre os controles de dois compensadores eletricamente próximos.

- **Presença de compensação série nas vizinhanças**

O controle do CER deve lidar com a possibilidade de frequências de baixa ordem que devem ser devidamente tratadas para que não instabilizem o controle ou provoquem ações equivocadas por parte do CER.

Adicionalmente, devem também ser incluídos neste documento os seguintes requisitos:

- Potências nominais contínuas e faixa de controle do CER;
- Potências nominais de curta duração – ciclo de sobrecarga indutiva, que deve ser estabelecida considerando-se a curva de sobretensões, englobando solicitações transitórias e temporárias no ponto de acoplamento comum;
- Configuração e tipo do compensador estático de reativos;
- Características e requisitos do controle e tempo de resposta, englobando também o sistema de medição, sincronização e disparo da válvula de tiristores. Estes requisitos precisam atender às diretrizes estabelecidas no anexo técnico do edital;

- Perdas. Este requisito deve atender ao disposto no anexo técnico do edital;
- Coordenação do isolamento;
- Harmônicos. Este requisito merece destaque especial, devendo ser objeto de elaboração de estudo específico, com o cálculo das impedâncias harmônicas objetivando o dimensionamento dos filtros do CER.

4.2.18.2. Impedâncias Harmônicas para Dimensionamento dos Filtros

Tendo em vista a avaliação do desempenho harmônico do CER e o dimensionamento dos filtros, deve ser determinado o envelope de impedância harmônica da rede CA externa ao CER, considerando os diversos cenários de evolução da rede ao longo do período de concessão do empreendimento, nos patamares de carga pesada, média e leve, com a rede completa e degradada e considerando também as configurações operativas do CER.

Os valores máximos e mínimos das impedâncias harmônicas em módulo e ângulo, vistas do ponto de acoplamento comum, para todas as condições estudadas conforme acima relacionadas, devem ser apresentados em forma de relatório e encaminhados ao fabricante, que, por sua vez, deverá considerar estes valores no dimensionamento dos filtros de harmônicos do CER.

Ressalta-se que deve ser especificada ao fabricante, claramente, a necessidade do atendimento a todo o envelope definido pelo lugar geométrico da rede, e não apenas aos pontos pertencentes à nuvem de pontos que dará origem ao envelope, pois fica nele contida. Este aspecto tem impacto nos custos e não deve deixar margem a dúvidas.

Para a determinação dos nominais dos filtros e limites de distorção harmônica, deve ser considerado o estabelecido no Submódulo 9.7 dos Procedimentos de Rede.

4.2.18.3. Modelos do CER em Programas Computacionais - Projeto Básico e Estudos Pré-Operacionais

O fabricante do CER deve desenvolver os modelos computacionais a serem futuramente utilizados nos estudos pré-operacionais de sistemas, conforme exigência do anexo técnico do edital, para simulação com as seguintes ferramentas:

- Fluxo de potência – programa ANAREDE;
- Estudo de transitórios eletromecânicos – programa ANATEM
 - Documentação do Modelo;
 - Arquivo CDU
 - Casos testes com o CDU considerando o sistema

- Dados e parâmetros as quais se aplica o CDU compatíveis com os dados fornecidos nas Planilhas de Dados do empreendimento em tela
- Estudo de transitórios eletromagnéticos – programa ATP.

Na elaboração do modelo ATP e da sua documentação devem ser seguidas as orientações contidas no documento: **NT_ONS_0149_2018 - Requisitos para Modelagem do CER no ATP**, disponibilizada em no Portal do ONS - SINTEGRE.

A Transmissora deve fornecer, para as simulações em ATP, os arquivos (formatos .acp e .dat) contendo o modelo e a rede à qual está conectado (representada até a segunda vizinhança), os arquivos executáveis (TPBIG.exe) compilados para as dimensões necessárias, o arquivo listsize.dat que gerou a compilação e o arquivo Startup.

Devem ser submetidos os casos adotados para os estudos de energização de transformação, comprovação de desempenho (rise time, settling time e overshoot), ajuste de estratégia de subtensão (resposta a defeitos) e testes para a estratégia de sobretensão, além da comprovação do ajuste dos limitadores existentes no controle (tensão e corrente).

Na Etapa de Projeto Básico o modelo ATP será avaliado quanto:

- (a) Ao tempo para inicialização na rede real à qual está conectado;
- (b) A viabilidade da alteração do tempo de integração sem afetar a viabilidade das simulações do modelo;
- (c) A presença de todas as lógicas estabelecidas no Anexo Técnico e no documento de Estratégias de Controle do fabricante, incluindo estratégias de sub e sobre tensão (ciclo de sobrecarga indutiva);
- (d) Na documentação do modelo deve constar:
 - a. o manual de utilização do modelo;
 - b. o documento com a descrição das lógicas do controle compatível com os documentos de controle do fornecedor. Esta documentação deve apresentar testes executados com o modelo das diversas lógicas de controle: estratégia de subtensão, de sobretensão, atuação dos limitadores, resposta a faltas e distúrbios, supervisão de ganho e estratégias de minimização de hunting
 - c. resultados que comprovem que o atendimento a cláusula de desempenho do CER, estabelecido no Anexo Técnico (rise time, settling time e overshoot), considerando a rede CA representada até a segunda vizinhança;

- d. descrição do procedimento de partida do CER, durante a energização do transformador de acoplamento, bem como a apresentação de uma simulação correspondente a essa situação;
- e. em caso de existência de outros compensadores na vizinhança elétrica as simulações documentadas deverão comprovar que os controles dos dois CER atuarão de forma coordenada. Caso não seja possível representar o CER vizinho como o seu próprio modelo (disponibilizado pelo proprietário ou pelo ONS caso disponha) considerar seu próprio controle duplicado;
- f. certificação de que não se trata de um modelo genérico, mas de um modelo específico para o CER que consta deste empreendimento.
- g. casos base .acp e .atp para utilização e reprodução por parte do ONS.

Todos os ajustes serão objeto dos estudos pré-operacionais bem como detalhamentos adicionais necessários a modelagem.

4.2.18.4. Diretrizes para Elaboração de Estudos de Dimensionamento de Filtros do CER

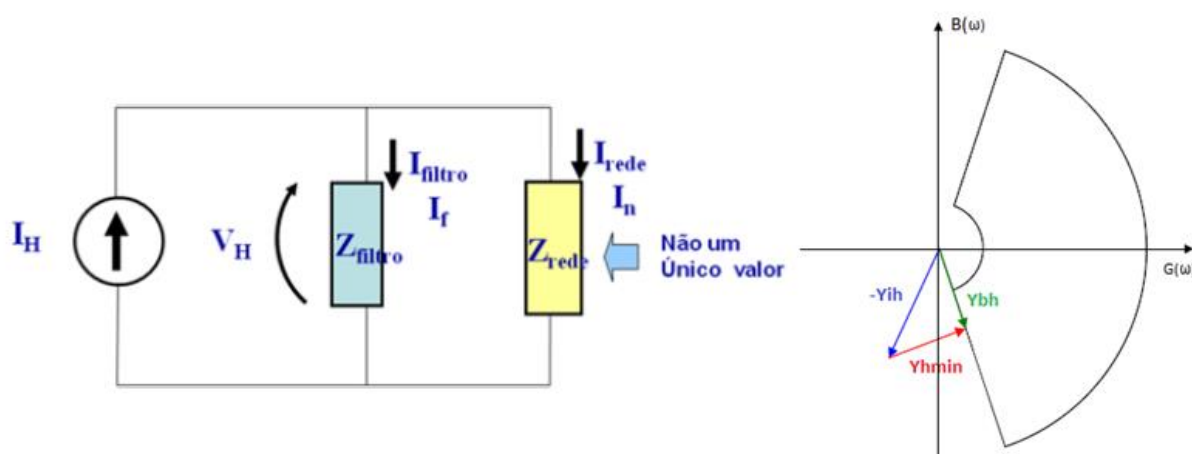
Os filtros do CER têm por finalidade evitar que os harmônicos gerados pelo Reator Controlado a Tiristores sejam injetados na rede, no ponto de acoplamento comum (PCC), em um valor acima da contribuição individual máxima estabelecida nos Procedimentos de Rede. Estes estudos são subdivididos em dois grupos: **Performance** (desempenho) e **Rating** (capacidade) e são normalmente incluídos dentro do documento denominado “Basic Design”.

Os estudos do primeiro grupo aferem a qualidade da onda de tensão no ponto de conexão. Os estudos de capacidade partem do pressuposto que esses filtros devem ser dimensionados para suportar as solicitações advindas da interação com a rede elétrica. Estas avaliações de capacidade devem, por premissa, considerar os harmônicos pré-existentes (background) no ponto de sua instalação.

O fornecedor do CER deve considerar no cálculo do rating que o seu equipamento pode ficar exposto a harmônicos pré-existentes até o limite global mínimo estabelecido nos Procedimentos de Rede. Nesses estudos deve ser representada a rede interna ao CER, composta pelos componentes do lado de baixa tensão, os filtros, TSCs, TCRs, a transformação de acoplamento e a rede externa vista do ponto de acoplamento comum.

A Figura 4.16 ilustra o circuito equivalente, onde a fonte I_H representa o elemento gerador de harmônicos (reator controlado a tiristores).

Figura 4.16 Circuito equivalente para estudos de filtros do CER



Como se pode ver, a rede externa é representada **obrigatoriamente por um setor anular circular**. Nesse setor, devem estar contidos todos os pontos representativos das diferentes topologias da rede, em situações de rede completa e degradada (N-1), para os anos do horizonte do ONS e para os anos

do horizonte do planejamento, além de topologias em uso durante as diversas condições de carregamento da rede. A máxima distorção ocorre no ponto em que $(Y_{HMIN} \cdot I_{TCR})$ é máximo para cada harmônica.

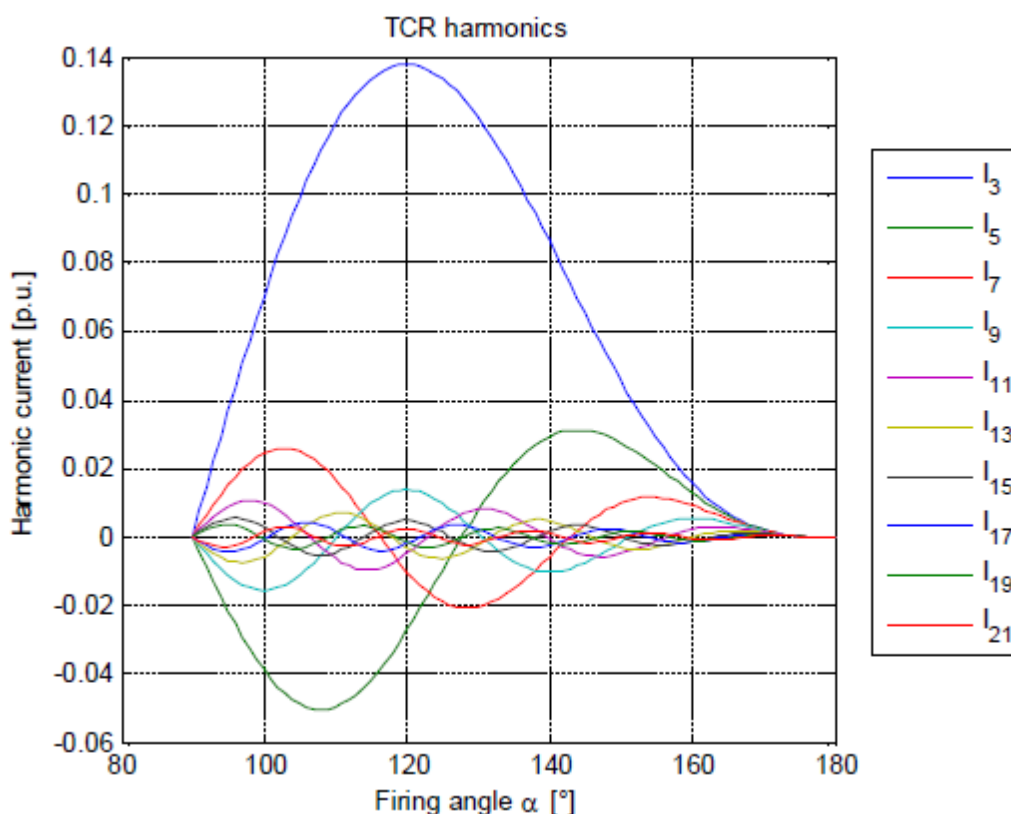
Do ponto de vista da metodologia, essa maximização do produto que representa a distorção, não necessita ser consistente. Utilizar-se-á sempre a máxima corrente que maximiza o harmônico. Por exemplo para o 3º harmônico, 120 graus (vide figura), mesmo que o ponto de operação que maximiza a admitância Y_{HMIN} não corresponda a esse ângulo, mas a outro ponto com corrente menor.

O setor anular circular é definido por um raio mínimo, um raio máximo, um ângulo mínimo e um ângulo máximo e engloba obrigatoriamente todos os pontos das topologias supramencionadas.

Não são admitidos outros tipos de setores, regiões poligonais simples ou múltiplas, ou que quaisquer pontos da nuvem obtida pelas simulações sejam excluídos da área prevista para o setor.

A metodologia aceita no Brasil estabelece que a Transmissora deve garantir, ao longo de todo o período de concessão, que atende ao desempenho harmônico estabelecido nos Procedimentos de Rede, considerando as condições de máxima dessintonia dos filtros e às condições mais severas de geração de correntes harmônicas pelos TCRs, para cada uma das harmônicas, condições estas ilustradas na figura a seguir, Figura 4.17:

Figura 4.17 correntes harmônicas pelos TCRs



Quanto ao rating, as interações entre o CER e o sistema ocorrem em regime permanente (rating permanente) e durante manobras em equipamentos adjacentes (rating transitório), sendo normalmente abordados em estudos que são denominados pelos fornecedores como TOV (Transient Overvoltages) e/ou Energização de Transformadores. Esses estudos devem ser desenvolvidos pelos fornecedores do CER, uma vez que afetam a integridade, a eficiência e a vida útil de seus elementos.

4.2.18.5. Relatórios a serem disponibilizados pelo fornecedor do CER

Devem ser disponibilizados ao projeto básico os seguintes relatórios:

a) **Main Component Design Report:**

Esse relatório apresenta as premissas do projeto incluindo:

- ✓ Condições sistêmicas de corrente, tensão, frequência, sequência negativa, níveis de curto-circuito, dentre outras;
- ✓ As premissas de desempenho dinâmico (tempo de subida, overshoot e settling time) que devem ser compatíveis com o Anexo Técnico;
- ✓ Diagrama unifilar da rede interna do CER;
- ✓ Dados do SVC e seus componentes, com respectivas capacidades e características;
- ✓ Memória de cálculo dos pontos limites da curva de operação do CER, comprovando o atendimento a faixa de operação (Mvar x Tensão) e da curva de sobrecarga indutiva sem a atuação de limitadores;
- ✓ Memória de cálculo dos valores máximos de tensão secundária (lado de baixa do transformador de acoplamento) em regime e corrente máxima do reator controlado a tiristores;
- ✓ Metodologia e cálculo do rating de regime permanente dos componentes do CER: transformador, TSC, TCR, Componentes dos Filtros e apresenta também o cálculo das solicitações de curto-circuito;
- ✓ Sumário das capacidades em regime e transitórias dos elementos que compõem o CER;
- ✓ Cálculo da performance do CER, informando os valores de THD (Total Harmonic Distortion) e as contribuições individuais para cada harmônico (n=2 até 50) no ponto de acoplamento comum;
- ✓ Descrição das tolerâncias consideradas na fabricação dos elementos, das variações esperadas de parâmetros com a temperatura (capacitâncias por exemplo), perdas de elementos até o nível de alarme todas elas levadas em conta na avaliação das dissintonias dos filtros;
- ✓ Costuma-se também apresentar em Anexo ao Main Design:

- os lugares geométricos adotados para o cálculo do *rating* e da *performance*, que obrigatoriamente devem ser os mesmos determinados pelos estudos de HIS (*Harmonic Impedance Scan*);
- resultados de estudos complementares que auxiliam na determinação do *rating* transitório como estudos de TOV/energização de transformadores

Alguns fabricantes costumam incluir neste documento (Main Design) uma descrição simplificada do controle, entretanto, o mais comum é fazer referência a documentos específicos que tratam deste assunto.

O relatório de Main Design também é o local onde se definem os “modos degradados” de operação, quando disponíveis. Estes modos são caracterizados pela ausência de elementos do CER, tais como, TCRs, TSCs e filtro(s).

Nessas condições, a ausência desses componentes deve ser prevista em projeto, pois caso não o seja, pode acarretar solicitações acima da suportabilidade para elementos remanescentes, o que deve ser evitado. Normalmente esses modos degradados resultam em operação com redução da faixa de controle de tensão original.

Para que esses modos de operação sejam aceitos, o fornecedor deve primeiro comprovar que o *rating* dos elementos não é excedido e que a *performance* do CER não excede os limites de poluição harmônica estabelecidos nos Procedimentos de Rede. Ou seja, os estudos de *performance* e de *rating*, quando contidos no Main Design devem contemplar esses casos. Cabe ressaltar que a operação em modo degradado não é um requisito estabelecido em edital.

É importante que a Transmissora realize uma análise da documentação produzida pelo fornecedor, se certificando da completude das informações a serem incluídas no Projeto Básico. Nessa avaliação, cabe verificar se a metodologia de projeto dos filtros adotada pelo fornecedor segue o estabelecido no anexo técnico, se certificar de que há compatibilidade de informações relativas ao CER, seus componentes e a representação da rede, entre os diversos documentos do projeto do CER.

Os estudos de *rating* (capacidade), que fazem parte deste documento de Main Design, devem comprovar que, em caso de perda de um dos filtros durante a operação do CER (quando houver mais de um filtro), o filtro remanescente não será desconectado pela proteção de *overrating*. Ou seja, cada um dos filtros (quando forem dois de mesma sintonia ou de diferentes sintonias), deve ser projetado para que a sua capacidade não seja excedida pela ausência do outro.

Não se trata, neste caso, de modo degradado e essa situação é prevista no Anexo Técnico. Será admissível para a operação continuar utilizando o CER nesta situação, mesmo com os limites de *performance* não sendo atendidos, pelo período de tempo suficiente para que se possa encontrar uma solução de operação para a perda do CER. É necessário, entretanto, identificar no relatório as

violações resultantes desse tipo de operação, de tal sorte que o operador possa ter uma noção do impacto possível nas cargas vizinhas.

b) *Determinação dos Lugares Geométricos (HIS)*

Esse relatório deve apresentar a elaboração dos lugares geométricos que servirão de insumo para o relatório de Main Design, que apresenta o dimensionamento dos filtros. Deve-se seguir a metodologia estabelecida no Anexo Técnico e nos Procedimentos de Rede.

Devem ser considerados os anos dentro do horizonte do ONS (PAR-PEL) e aqueles disponíveis no planejamento, válidos na época do leilão.

Deve-se obedecer a metodologia estabelecida e detalhada no Anexo Técnico que prevê a adoção de setores anulares circulares para cada ordem harmônica, caracterizados pelos ângulos máximo e mínimo e impedância/admitância máxima e mínima.

O programa mais utilizado nesta etapa costuma ser o HarmZs do CEPEL. Atenção especial deve ser dada à representação das cargas. Preferencialmente e por conservadorismo, não se deve representá-las, ao menos na vizinhança do CER. Entretanto, é aceitável a representação das mesmas mediante a representação típica de alimentadores por nível de tensão (disponível no HarmZs).

Cargas especiais que comprovadamente estejam nas vizinhanças, caso sejam representadas, devem merecer atenção especial, sendo representadas especificamente. Neste caso deve ser comprovada a adequação desta modelagem.

Esse relatório deve, obrigatoriamente ser submetido à aprovação do ONS antes do início da construção dos filtros do CER.

c) *Insulation Coordination Design*

Define os níveis de isolamento dos diversos componentes do CER.

d) *Energização de Transformadores*

A energização do transformador de acoplamento do CER é caracterizada pela ocorrência de harmônicos na faixa de 120 a 800-900 Hz. É necessário representar a rede externa com a qualidade necessária para capturar alta incidência de harmônicos durante a manobra, resultante da corrente de inrush e da resposta do sistema nessa faixa de frequência.

Os projetos de CER usualmente não contemplam a utilização de disjuntores do lado de baixa tensão. Dessa forma, o transformador é energizado a partir da alta tensão com a presença dos filtros, sendo os mais comuns os de 5ª e 7ª ordem. Esses filtros apresentam baixa impedância aos harmônicos resultantes da manobra do transformador, de forma que há correntes de alta magnitude

aplicadas aos elementos componentes dos filtros (resistências, reatâncias e capacitâncias) por tempos não necessariamente desprezíveis, que dependem do grau de amortecimento da corrente de inrush.

Portanto, esses estudos objetivam também identificar os valores de corrente e de tensão aplicados a todos os elementos dos filtros e aos demais componentes da rede interna do CER. Para que esses estudos sejam válidos, eles devem ser baseados nos dados mais precisos disponíveis do compensador e seus componentes, tais como: características da transformação e suas curvas de saturação, dos filtros, etc.

Os resultados dos estudos de energização dos transformadores devem ser contemplados pelo Main Design no sentido de que se verifique se a suportabilidade dos componentes dos filtros é adequada ou se deve ser modificada. Pelas consequências possíveis para o projeto, é recomendável que esse tipo de estudo seja realizado ou diretamente pelo fornecedor ou, caso seja executado por um consultor, ele tenha o respaldo do fabricante, que deve cancelar os resultados do mesmo.

Os fornecedores usualmente realizam, quando do projeto do CER, avaliações de energização com base numa representação do sistema por um equivalente Thévenin, ajustado para a potência de curto-circuito no ponto de conexão. Essas avaliações costumam ser realizadas no PSCAD e ou RTDS.

Entretanto, é importante ressaltar que esses estudos, no projeto básico devem ser realizados no ATP, e considerar adequadamente a interação entre a rede externa e o CER, daí a necessidade de uma representação adequada da rede e do CER propriamente dito, contemplando a rede até a segunda vizinhança.

Nesse tipo de simulação é usual compensar o montante de MVar dos filtros mediante a adoção de um ângulo de disparo fixo no RCT (reator controlado a tiristores), com o controle bloqueado por um período de tempo, tendo em vista o alto grau de distorção na tensão durante a manobra.

Esse controle costuma ser liberado após um determinado tempo de delay informado pelo fabricante. Normalmente esse assunto é revisitado quando dos testes no RTDS, mais próximos da entrada em operação, quando os dados dos componentes já fabricados estão disponíveis mediante resultados de ensaios.

O estudo de energização de transformadores possui, portanto, dois enfoques: o primeiro de identificação dos valores das correntes máximas aplicadas aos componentes dos filtros e o segundo que trata do efeito da manobra na transformação e acoplamento e na rede à qual o CER está se conectando.

e) **Control Strategy Report**

Este relatório tem por finalidade descrever as principais malhas de controle disponíveis no CER para controle de potência reativa, àquelas relativas à proteção do SVC, bem como àquelas disponíveis na interface homem máquina.

Via de regra, o documento deve descrever a hierarquia do controle bem como a sua estruturação.

Relaciona-se a seguir alguns tópicos principais:

- ✓ Estrutura do controle

- ✓ Modos de operação

Os modos definidos como degradados, citados neste documento, devem ter a sua viabilidade demonstrada no documento Main Component Design.

- ✓ POD (Power Oscillation Damping)

Normalmente é viabilizado pela modulação da tensão de referência em função da potência ativa ou da variação de frequência. A escolha depende das condições do sistema adjacente ao CER.

- ✓ Chaveamento do TSC

Pode haver, para um mesmo nível de fluxo de reativos, pontos de operação diferentes: por exemplo, TSC compensado pelo TCR operando pleno e Mvar gerado perto de zero, o que pode ocorrer sem o TSC conectado e o TCR próximo do zero. Para evitar instabilidades durante a operação é necessária a adoção de uma histerese.

- ✓ Supervisão de Ganho

Necessário para um controle de longo termo da variação da potência de curto-circuito da rede. Os diagramas devem demonstrar o seu funcionamento.

- ✓ Otimização de Ganho

Necessário para controlar instabilidades em função de um ganho elevado, atua no sentido de reduzir o ganho. Os diagramas devem demonstrar o seu funcionamento.

- ✓ Estratégia de Subtensão

Deve ser demonstrado, a partir dos diagramas de controle, que a medição de tensão por sequência e por fase estão disponíveis e os níveis de ativação e reset são ajustáveis.

Devem ser também abordadas as principais funções protetivas do controle:

- ✓ Estratégia de Sobretensão

Os diagramas devem demonstrar o atendimento à curva de sobrecarga indutiva estabelecida no Anexo Técnico e descrever como funciona a malha de controle que trata das sobretensões.

✓ Limitação da corrente capacitiva primária

Esses valores são determinados pelo documento Main Component Design e constam da curva de operação do CER, deve ser apresentada na malha de controle.

✓ Limitação da tensão secundária

Também por finalidade evitar que as válvulas do TSC e os capacitores sejam sobrecarregados. Os valores da limitação estão definidos no Main Component Design Report.

✓ Limitação de corrente no TCR

Esta malha de controle deve existir para proteger os reatores e válvulas do RCT de sobrecorrentes. Os valores desses limitadores são definidos no documento Main Component Design Report. Os memoriais de cálculo do TCR devem endereçar esse assunto e tratar do caso de “trapped charge” no RCT.

✓ Limitação de corrente e de tensão no TSC

Sobrecorrente:

Tem por finalidade prevenir bloqueio de tiristores após um surto de corrente, causado por “misfiring” dos tiristores. Os valores desses limitadores são definidos no documento Main Component Design Report. Os memoriais de cálculo do TSC devem endereçar esse assunto e tratar do caso de misfiring.

Sobretensão:

Tem por finalidade proteger o capacitor e a válvula do TSC de sobretensões excessivas. O controle descrito por este relatório deve ser aquele a ser implementado no modelo do ANATEM (para desempenho dinâmico) e do ATP (para desempenho transitório).

Todas as faixas de variação dos parâmetros reguláveis devem ser fornecidas no referido relatório. Os ajustes finais se darão por época dos estudos de RTDS.

f) Harmonic Performance Study

Quando não estiver incluído no documento Main Component Design, deverá constar de um relatório separado.

Este relatório deve comprovar, baseado nos envelopes de impedância determinados pelo HIS (Harmonic Impedance Scan), que os limites de contribuição individual do CER no ponto de

acoplamento comum são atendidos para todas as harmônicas. Para este cálculo devem ser utilizados os valores máximos das harmônicas geradas pelo(s) RCT(s) para cada uma delas.

g) Memória de Cálculo do TCR

Trata da identificação das piores solicitações ao TCR, o que envolve por exemplo, a avaliação de “Trapped Charge”(carga retida).

Não se trata de um documento a ser avaliado pelo ONS no Processo de Projeto Básico, mas faz parte do projeto básico de um CER e deveria ser avaliado pela engenharia da Transmissora, no seu próprio interesse.

h) Memória de Cálculo do TSC (se houver TSC)

Trata da identificação das piores solicitações ao TSC, o que envolve por exemplo, a avaliação das consequências de um “Misfiring”.

Não se trata de um documento a ser avaliado pelo ONS no Processo de Projeto Básico, mas faz parte do projeto básico de um CER e deveria ser avaliado pela engenharia da Transmissora, no seu próprio interesse.

i) Cálculo de Perdas

Quando não estiver incluído no documento Main Component Design, deverá constar de um relatório separado, comprovando o atendimento ao estabelecido no Anexo Técnico.

4.2.18.6. O Processo de Acompanhamento da Qualidade (QEE)

A idéia do sistema de qualidade implementado no SIN, com limites globais e individuais a serem respeitados no ponto de acoplamento comum é garantir o bom desempenho do conjunto mediante bons projetos, que se baseiem na metodologia estabelecida no Anexo Técnico dos editais de leilão, que é conservadora. Entretanto, entre a concepção de um projeto e a sua execução real, com a fabricação de componentes adequados, existe uma distância grande, que se procura cobrir mediante estimativas, ainda na fase do projeto, de tolerâncias de fabricação dos elementos dos filtros e da consideração de diversos outros fatores que ocasionam dissintonias nos filtros projetados.

Quando esse sistema foi concebido, o principal foco eram Compensadores Estáticos, Back-to-Backs e HVDCs. No entanto, ocorreu um grande aumento no número de usinas eólicas, que se valem de conversores CA-CC e também geram harmônicas que necessitam de filtragem. Muitas dessas eólicas se conectam inclusive por meio de linhas de média tensão a transformadores localizados em subestações da Rede Básica, onde se situam os seus pontos de acoplamento comum.

Lembramos aqui, que as metodologias para o projeto dos filtros aplicadas a HVDCs e Compensadores Estáticos não são as mesmas. Esse tem sido um erro comum de projetos encaminhados para a análise.

Os lugares geométricos admitidos para HVDCs e Estáticos são setores anulares circulares, enquanto os setores admitidos no caso das eólicas incluem também, além dos setores anulares, setores poligonais (n lados). A forma de representação das cargas, nessas situações, também não é necessariamente a mesma, o que impacta a formação dos setores.

A entrada em operação de todos esses elementos que produzem harmônicas, se sujeita a medições a serem executadas antes e após a sua entrada em operação.

Essas campanhas têm duração de 1 semana, de forma a percorrerem todo o espectro de variação semanal das cargas.

A declaração de conformidade do projeto básico e a finalização com sucesso dos estudos pré-operacionais não exime a Transmissora da necessidade de realizar essas medições, a serem executadas no ponto de acoplamento comum, na barra da subestação.

Os documentos associados ao Processo de Qualidade de Energia, para a Integração de Instalações encontram-se, atualmente, no portal do ONS: SINTEGRE, no link abaixo:

<https://sintegre.ons.org.br/Paginas/servicos/conheca-os-macroprocessos.aspx>

Os conteúdos de interesse referente a qualidade de energia estão descritos em:

- Macroprocesso: Integração de Instalações
 - **Gestão da Integração**
 - ✓ Lista de Equipamentos Certificados para uma Campanha de Medições de Harmônicos
 - ✓ ONS RE 2.1- 028/2005 – REV.4 - Definição das Metodologias e Procedimentos necessários às Campanhas de Medição dos Indicadores de Desempenho
 - ✓ Parecer técnico de análise de qualidade de energia com as correntes medidas
 - ✓ Planilha de resultados (modelo) para as campanhas de medição
- Macroprocesso: Metodologias, requisitos e critérios: Integração de Instalações
 - **Integração de Novas Instalações**
 - ✓ Caderno de Ensaios para Certificação de Instrumento de Medição para as Campanhas de Medição de QEE (para permitir a classificação como Classe A)
 - ✓ ONS NT 009/2016 – Instruções para realização de estudos e medições de QEE relacionados aos acessos à Rede Básica ou nos Barramentos de fronteira com a Rede Básica para **Parques Eólicos**, solares, Consumidores Livres e Distribuidoras (Março/2018) - Revisão 02
 - ✓ ONS RE 2.1 057/2008 - rev.03 – Instruções para realização de estudos e medições de QEE relacionados (**Compensador e HVDC**)
- E-mail para contato com o setor de qualidade: qualidade_energia@ons.org.br

4.2.19. Estudos Associados à Compensação Série

Os estudos, associados à compensação série, devem ser desenvolvidos em duas etapas. Na primeira delas pela Transmissora, com o objetivo de estabelecer os requisitos de cunho sistêmico necessários à sua especificação e à efetiva tomada de preços. Na segunda etapa, os estudos serão realizados pelo fabricante, visando ao seu dimensionamento e ao atendimento dos requisitos estabelecidos em sua especificação de compra.

4.2.19.1. Corrente Nominal, Sobrecarga e Coordenação do Isolamento

A corrente nominal dos BCS, nos casos de leilão, é estabelecida pelo Anexo Técnico.

Deve-se especificar também o ciclo de sobrecarga ao qual o dimensionamento do BCS e de seus componentes deve se adequar. De acordo com a norma IEC de 2017, deve-se considerar correntes de 110% da nominal por 8 horas e 135% da corrente nominal por 30 minutos. Atualmente, a menos de especificação em contrário, essas sobrecargas estão limitadas a 300 vezes ao longo da vida útil.

Os estudos de fluxo de potência devem calcular as tensões nas extremidades dos bancos série para as 3 condições discriminadas abaixo, considerando-se que o terminal da linha onde o fluxo se origina se encontra operando na máxima tensão operativa:

- ✓ 100% da corrente nominal (nos dois sentidos)
- ✓ 110% da corrente nominal (nos dois sentidos)
- ✓ 135% da corrente nominal (nos dois sentidos)

Os isoladores de pedestal da plataforma do banco série devem ser dimensionados para a maior tensão encontrada, dentre as avaliadas.

Deve-se checar também se a tensão nos reatores de linha excede o seu valor admissível, por exemplo, numa rede de 500 kV, o valor de 600 kV (1,20 pu).

A coordenação do isolamento à frequência industrial (considerada a presença de vento) da linha onde se encontra o BCS deve ser verificada para as condições de tensão oriundas das correntes supramencionadas. Caso necessário as distâncias condutor-mísula devem ser adequadas nas torres mais próximas ao BCS.

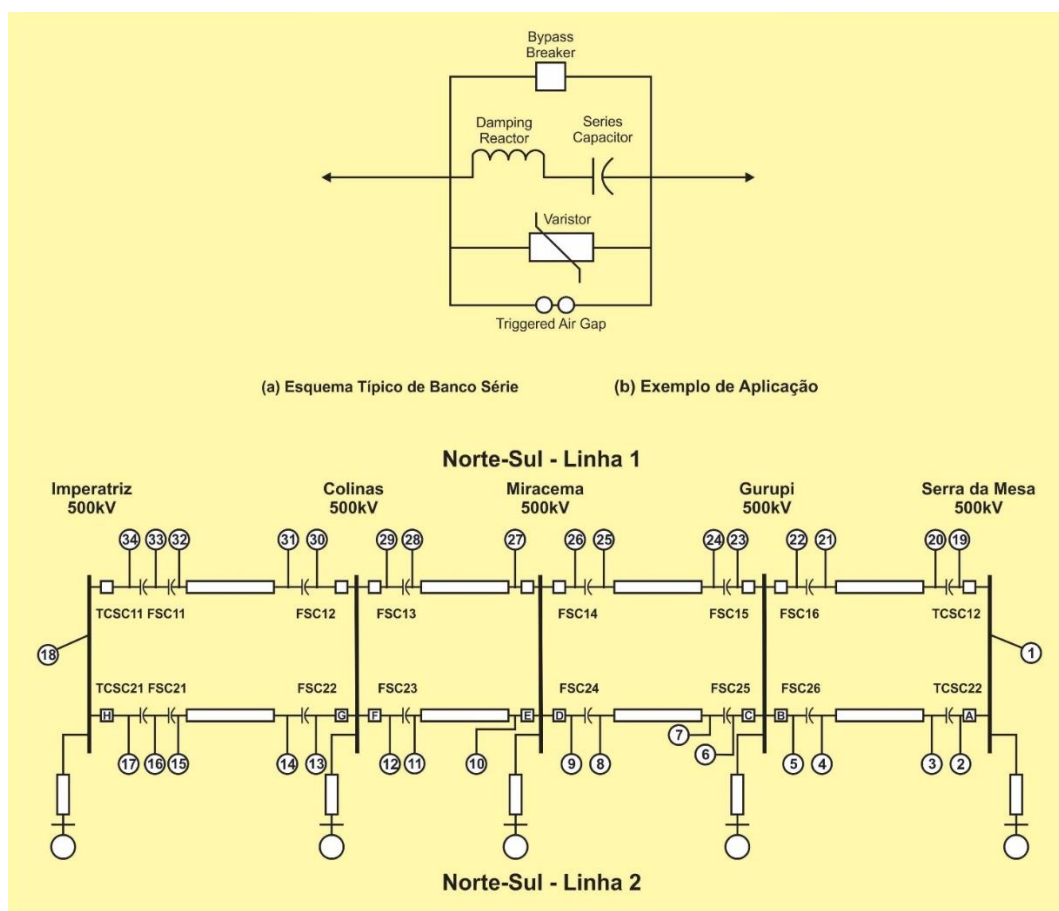
4.2.19.2. Filosofia Básica

A reatância capacitiva total do banco, vista como elemento único, deve ser calculada com base no percentual de compensação da linha estabelecido no anexo técnico do edital e com base no comprimento da linha, resultante de seu projeto básico.

Entretanto, como estas linhas são por premissa longas ao dimensionar os bancos série (em Ω , parâmetros concentrados), há que primeiro se efetuar a correção hiperbólica dos parâmetros da linha calculando o seu valor total em ohms, e somente então aplicar o nível % de compensação da linha, para que se possa atingir o nível de compensação estabelecido no Anexo Técnico.

Cabe ainda deixar claro que a documentação e o próprio modelo devem estar baseados no diagrama unifilar do BCS constante no Projeto Básico. A figura a seguir ilustra, Figura 4.18, de forma simplificada, um esquema de aplicação de bancos de capacitores série, em duas linhas em paralelo.

Figura 4.18 Banco Série - Esquema Típico. Exemplo de Bancos Série em Circuitos Paralelos.



Um esquema típico de um banco série, ilustrado na Figura 4.18, é composto pelo capacitor série propriamente dito, por uma indutância — que tem por finalidade amortecer a descarga dos capacitores (“damping reactor”) — e por um varistor em paralelo (MOV) com o conjunto capacitor/reator. Esse varistor tem por finalidade garantir que a tensão aplicada a este conjunto não exceda à capacidade especificada.

Em paralelo ao MOV, existe um GAP que pode ou não ser encapsulado e tem por finalidade proteger o varistor contra um excesso de absorção de energia, agindo no sentido de curto-circuitar o banco série “imediatamente”, caso necessário.

Em tese, o MOV começa a conduzir quando a tensão aplicada ao conjunto do banco série — a qual é função direta da corrente que por ele circula — atinge o patamar especificado para o nível protetivo dos varistores.

O circuito de by-pass deve ser dimensionado para suportar a descarga dos capacitores. O reator de amortecimento precisa ser dimensionado de tal forma que não ocorram ressonâncias entre ele e banco de capacitores para as frequências harmônicas mais usuais.

Alguns dos esquemas adotados preveem a adoção de resistores em série com um pequeno gap e este conjunto em paralelo com o reator de amortecimento. Este gap é projetado para suportar a tensão gerada para a operação em regime permanente e durante a operação em sobrecarga. Nos casos em que ocorrer o by-pass, por meio da atuação do gap principal, o resistor é inserido no circuito, garantindo o amortecimento.

Todos estes esquemas devem ser dimensionados considerando-se a possibilidade do religamento monopolar.

4.2.19.3. Aspectos Sistêmicos

Sob o ponto de vista da interação com o sistema elétrico, um aspecto relevante a ser considerado para os capacitores série se refere ao seu dimensionamento, de maneira a permanecerem em operação sem que haja absorção de energia por parte de seus MOVs durante oscilações de potência, em particular com relação às que ocorrem na primeira oscilação, “swing”, após a aplicação de uma perturbação na rede.

Neste sentido, na primeira etapa dos estudos a ser encaminhados ao fabricante como subsídio para o dimensionamento da compensação série, é necessário identificar, por meio de simulação com o programa de transitórios eletromecânicos ANATEM, as correntes de “swing” máximas às quais ficam sujeitos os bancos de capacitores série.

Para a obtenção das correntes de “swing” máximas, o caso do ANATEM precisa ajustar-se à condição de máxima transferência de potência entre as subestações envolvidas.

Devem ser simuladas condições com o sistema íntegro e degradado, sob abertura intempestiva sem aplicação de faltas e sob aplicação de defeito monofásico nas barras do capacitor série, no lado da linha e no lado da barra. É necessário considerar a configuração do sistema para o ano da entrada em operação do empreendimento e para horizontes de planejamento futuro PDE-EPE.

Tais informações permitirão a escolha adequada do nível de proteção a ser adotado para os MOVs, valores tipicamente situados entre 2,2 e 2,4 pu.

4.2.19.4. Os Ajustes Protetivos

Deve-se também fornecer ao fabricante o nível de curto-circuito, trifásico e monofásico, previsto para as barras terminais do banco série, no ano de entrada em operação e no ano horizonte de planejamento.

Caso o Anexo Técnico defina um valor máximo de curto-circuito, este valor deverá ser considerado para efeito do dimensionamento a esforços eletromecânicos de cada um dos elementos que constam do banco, tais como chaves seccionadoras, TCs, capacitores, indutores etc.

Os valores de curto-circuito irão constar da especificação de compra, pela Transmissora, do banco série. O fabricante deve se comprometer a atender ao requisito estabelecido.

Ressaltamos que um dos erros mais comuns nos projetos analisados nos últimos anos, foi a falta da adoção, pela Transmissora, de uma margem de potência de curto-circuito, suficiente para garantir a operação do BCS pelo período de concessão, ou seja, 25 anos.

A base de curto-circuito disponibilizada pela EPE abrange no máximo 10 anos e o período de concessão é de 25 anos. Sugere-se, por segurança, definir uma margem de segurança, assumindo-se por exemplo a potência de curto ao final do horizonte mais o valor da margem, para a definição dos MOVs.

As seguintes definições se fazem necessárias:

- Falta Interna: ocorre na própria linha onde se localiza o banco série;
- Falta Externa: ocorre em local externo à linha onde o banco série está situado. Falta no barramento é uma falta externa.

O anexo técnico estabelece que os circuitos de by-pass não devem jamais ser acionados para faltas externas, devendo o banco — leia-se MOV — suportar inclusive uma tentativa de religamento monopolar (tempo morto de 500 ms). Neste contexto, é necessário respeitar os tempos de eliminação de defeito estabelecidos nos Procedimentos de Rede.

A Figura 4.18 (b) ilustra uma aplicação de bancos série em circuitos paralelos. Embora a Figura mostre equivalentes de curto-circuito adjacentes às barras de estudo, é preferível afastar os equivalentes, para representar melhor a interação da rede com os bancos série, bem como a influência de frequências diferentes da fundamental.

Naquela Figura, em caso de operação com um trecho de linha em paralelo fora de operação, a corrente no trecho remanescente dobra, o que torna o caso mais severo. Isto ilustra como as topologias atual e futura influenciarão as análises.

Este tipo de avaliação deve ser feito pelo fabricante. Por meio de simulações no programa ATP, caberá a ele determinar:

- Eext: Máxima energia a ser dissipada pelo MOV para faltas externas, nos casos em que o by-pass não é permitido;
- Eint: Máxima energia a ser dissipada pelo MOV para faltas internas;
- Eset: Ajuste adotado para ativação do gap, por energia;
- Iset: Ajuste adotado para ativação do gap, por corrente;
- Threshold Margin: Diferença entre o valor de energia máximo e o ajuste adotado (Eset-Eext)
- Reservas instaladas não contabilizadas no rating do MOV
- Capacidade de dissipação de energia total do MOV a ser instalado.

A capacidade instalada do MOV deverá levar em conta a especificação de compra da Transmissora, a qual poderá definir, por exemplo, uma margem de segurança mínima, a ser somada a Eext.

A questão térmica deve ser levada em conta no dimensionamento. Dissipação de energia corresponde a aquecimento. Por isso, redundância é importante. Folga é importante. O resfriamento para a temperatura pré-evento pode demandar bastante tempo. Deve-se neste ponto ressaltar o seguinte: eventos repetitivos ao longo do dia que não ocasionem individualmente a atuação dos ajustes de Eset e Iset não devem acarretar indisponibilidade do banco série por horas a fio (aplicação de parcela variável), caso sejam os últimos de uma sequência separada por diversas horas. Trata-se de um risco da Transmissora e deve ser levado em conta na especificação e aquisição do equipamento.

Na segunda etapa dos estudos, a ser desenvolvida e apresentada pelo fabricante, relacionam-se os seguintes itens:

- Memória de cálculo do dimensionamento dos diversos componentes do “Main Circuit”;
- Descrição do comportamento térmico do banco após aplicação de uma sequência de faltas e da atuação do by-pass, incluindo a curva de aquecimento/resfriamento do banco;
- Estudo de dimensionamento do MOV do banco série e da definição dos ajustes de by-pass por corrente ou energia, a ser realizado com o programa ATP;
- Modelos de transitórios eletromagnéticos para a representação do banco série no programa ATP, em meio digital, e com a documentação necessária.

4.2.19.5. Ressonância Subsíncrona Associada à Compensação Série

Esses estudos serão efetuados sempre que existam bancos de capacitores série eletricamente próximos a usinas térmicas, tendo por objetivo principal investigar os fenômenos de auto-excitação (efeito gerador de indução e interação torcional) e de torques transitórios nos eixos do conjunto turbina-gerador.

No caso de existência de equipamentos com controladores de ação rápida como CERs nas vizinhanças das usinas térmicas, deve também ser investigada a possibilidade de a interação desse controle vir a amplificar os modos de oscilação do eixo do conjunto turbina-gerador.

Tais fenômenos deverão ser investigados por meio de ferramentas de simulação de transitórios eletromagnéticos (ATP), considerando a representação completa da máquina, com o eixo do conjunto turbina-gerador representado por um sistema multimassa mola.

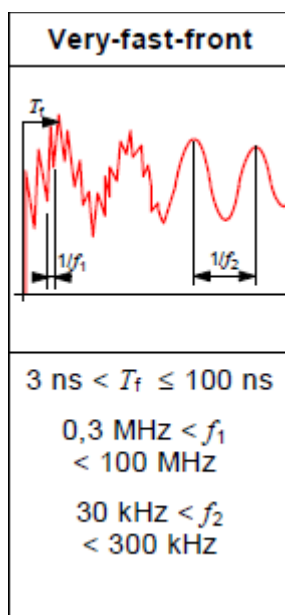
Alternativamente, havendo dificuldade na obtenção dos dados para as modelagens do sistema multimassa mola, do eixo do conjunto turbina-gerador das usinas térmicas na área de abrangência deste empreendimento, deverá ser obtida, através de simulações com programa ATP, a característica de resposta em frequência da rede frente a condições propícias para caracterização da autoexcitação, visando a identificar, por meio de consulta aos fabricantes dos geradores, a possibilidade de os torques transitórios ocasionarem danos aos eixos do conjunto turbina gerador daquelas usinas.

4.2.20. Estudos relacionados a GIS (Gas Insulated Substation) - Sobretensões de Frequência Elevada

Para empreendimentos que contenham subestações isoladas à gás (GIS – Gas insulated Substation) ou híbridas (parte isolada a ar e parte GIS), para qualquer nível de tensão, deverão ser fornecidos estudos de transitórios eletromagnéticos para surtos de frequência muito elevada (VFTO – Very Fast Transient Overvoltages) com o objetivo de identificar as solicitações de tensão e corrente resultantes da manobra de chaves seccionadoras internas a GIS que cheguem aos transformadores. No caso de transformadores dotados de buchas com isolamento em papel e óleo, estas também deverão ser contempladas nas análises.

Cabe ressaltar que, mesmo nos casos em que se verifiquem pequenas amplitudes de sobretensão, as elevadas frequências características de VFTO podem estimular ressonâncias internas aos enrolamentos dos transformadores e submetê-los a danos severos. À título ilustrativo, na figura a seguir, Figura 4.19, apresenta-se uma forma de onda característica de surto de VFTO, relacionada à frequência f_1 , que por sua vez corresponde à componente mais rápida presente na sobretensão.

Figura 4.19 Caracterização ilustrativa de onda de VFTO.



Diante do exposto, a elaboração de estudos de VFTO visa complementar a adequada especificação dos equipamentos envolvidos, sobretudo transformadores de potência, de forma a se operar os ativos de forma segura durante todo o período de concessão.

Essas avaliações devem ser realizadas para todas as transformações existentes na subestação, mesmo que não façam parte do empreendimento em análise, uma vez que a integração de um novo módulo GIS pode trazer impactos a vida útil de equipamentos pré-existent na subestação.

A modelagem da subestação GIS deverá corresponder aos dados de projeto uma vez que as reflexões de onda e, por consequência, as amplitudes e frequências naturais de oscilação das VFTOs são influenciadas sobremaneira pelas dimensões físicas e propriedades magnéticas e elétricas dos diversos componentes envolvidos. Desta forma, a subestação GIS não deverá ser representada de forma simplificada com utilização de parâmetros típicos.

De forma análoga, e caso disponível, a modelagem dos transformadores deverá considerar dados de resposta em frequência do projeto inicial. Conforme o documento JWG A2/C4-3 do Cigré [5.20], que trata da interação entre transformadores e sistemas de potência, sugere-se utilizar a resposta em frequência teórica, vista pelo terminal em análise do transformador a ser adquirido, cobrindo-se as frequências de interesse (na ordem de MHz à dezenas de MHz). A partir desta resposta, é possível se obter um circuito equivalente RLC para modelagem no ATP. O circuito equivalente pode ser tanto fornecido diretamente pelo fabricante quanto obtido por síntese de circuitos utilizando-se, por exemplo, a rotina "*Vector Fitting*" [5.21]. Alternativamente, ainda com base na resposta em frequência teórica vista pelo terminal avaliado do transformador, a representação do transformador pode ser realizada de forma simplificada através de uma capacitância concentrada, calculada para a faixa de frequência de interesse. Tal simplificação, também citada em [6.20] e de simples implementação, resulta em premissa mais conservadora quando comparada à metodologia utilizando-se síntese de circuitos pois desprezam-se as resistências dos circuitos RLC, reduzindo-se, assim, os amortecimentos dos surtos de tensão. Por fim, com relação à modelagem dos transformadores, A TRANSMISSORA poderá propor representações alternativas para os transformadores desde que, tecnicamente comprovadas, resultem em solicitações conservadoras de modo a se incorporar margens de segurança adequadas aos estudos.

A TRANSMISSORA poderá, ainda, optar por fazer uso de um processo iterativo em conjunto com o fabricante denominado "*Design Review*", onde, partindo-se de estudos com o transformador modelado com dados iniciais de projeto, o fabricante avalia as solicitações terminais e internas ao transformador. Identificada eventual necessidade de alteração do projeto inicial do isolamento dielétrico, o modelo do transformador é atualizado e realimenta a revisão dos estudos, que por sua vez subsidia novas análises de suportabilidade até que se encontre a solução de projeto ideal em termos de custo e confiabilidade.

Os disjuntores deverão ser modelados com suas capacitâncias inerentes e respeitando-se a quantidade de câmaras e seus capacitores de gradação (capacitâncias dos capacitores de equalização). Alternativamente, poderão ser utilizados valores comprovadamente conservadores de modo a se maximizar a transferência dos surtos de VFTOs aos transformadores.

Os para-raios do transformador deverão ser representados com parâmetros dependentes da frequência uma vez que a simples representação típica com pontos de tensão residual versus corrente de descarga do tipo 8/20 μ s não é adequada para a faixa de frequência em questão.

As análises deverão cobrir, para a mesma manobra de uma determinada chave seccionadora, as solicitações impostas aos transformadores previamente energizados e ao transformador desenergizado, este último com os respectivos disjuntores abertos e cujas chaves seccionadoras mais próximas deverão ser manobradas. Também deverão ser contempladas, nos arranjos eletromecânicos pertinentes, as configurações de transição para operação do transformador pelo disjuntor de transferência. Para fins de análises de resultados, as amplitudes máximas absolutas bem como as componentes (amplitudes pico a pico) associadas às frequências mais elevada dos pulsos de VFTO impostos aos transformadores deverão ser registradas, bem como as respectivas formas de onda.

Esses estudos devem ser realizados na ferramenta ATP. Devem ser fornecidos ao ONS:

- ✓ Características técnicas de cada um dos módulos de SF-6, incluindo suportabilidade e capacidade de corrente nominal e de curto-circuito;
- ✓ Representação para surtos de alta frequência de cada um dos módulos (chaves, disjuntores etc.);
- ✓ Capacidade dos barramentos, nominal e de curto;
- ✓ Diagramas unifilares e trifilares, que contenham todas as distâncias envolvidas na implementação do SF-6;
- ✓ Caso base de ATP com a representação de todos os módulos;
- ✓ Casos no ATP identificados como críticos no relatório de VFTO;
- ✓ Arquivo executável recompilado do ATP, com dimensões apropriadas para pronta simulação ("GigaATP.exe").

A Transmissora deve demonstrar, com o aval dos seus fornecedores, a adequação do projeto dos seus transformadores de potência frente a estes surtos, resultantes de manobras de chaves seccionadoras internas à GIS.

Nos casos de transformações existentes, os resultados dos estudos devem ser encaminhados aos proprietários dos ativos afetados devendo-se, onde couber, identificar as medidas necessárias para mitigação de riscos.

4.3. Estudos Relacionados a Projetos HVDC

4.3.1. Aspectos Gerais

Apesar da complexidade desse tipo de projeto, com inúmeros componentes, subsistemas e sistemas, sua função básica é levar potência de um ponto a outro do sistema elétrico, interligando áreas com disponibilidade de geração a áreas de carga ou ainda para controle ou otimização de fluxo, quer seja de natureza sistêmica ou comercial.

Os estudos englobam avaliações tanto de desempenho como de dimensionamento de componentes e sistemas, voltadas para os lados de corrente alternada e corrente contínua.

Em geral, o documento de outorga irá definir como esses estudos estarão distribuídos ao longo do tempo e suas respectivas numerações e conteúdo. Além disso, existirão documentos voltados para a concepção do projeto e definição de características, outros voltados para o seu desempenho, outros voltados para a comprovação das premissas assumidas, estudos clássicos já mencionados anteriormente comuns a qualquer empreendimento, quer seja CA ou CC, e finalmente medições durante as etapas de montagem e ao longo do comissionamento das instalações.

4.3.2. Estudos para Concepção do Projeto e Definição de Características

Essa parte constitui-se na parte inicial e fundamental de um projeto HVDC, caracterizando-se pela obtenção dos dados dos elementos principais do projeto e seu controle, que servirão de base para as especificações de todos os componentes.

4.3.2.1. Definição do Circuito Principal

Este estudo tem por finalidade determinar os parâmetros dos equipamentos do circuito principal para atingir, em regime permanente, os valores de potência definidos para o projeto, desde a potência mínima até a potência máxima, incluindo as sobrecargas de curta e longa duração, para as condições de frequência e de tensão CA definidas para ambas as estações conversoras, dentro das faixas operativas da Rede Básica, com a potência de curto-circuito nas estações terminais dentro da faixa especificada, mantendo a tensão nominal CC dentro da tolerância prevista. Esta demonstração compreende a operação em todos os modos operativos definidos para o projeto. Entende-se por circuito principal os equipamentos compreendidos entre os transformadores conversores de cada lado da transmissão.

Este estudo utiliza equações clássicas que podem ser combinadas em um programa digital de maneira a visualizar e processar várias condições operativas repetidamente.

Algumas dessas equações podem ser visualizadas abaixo, conforme [6.19]. Deve ser observado que existem várias formas de escrever essas equações e o que está mostrado abaixo é apenas uma dessas formas.

$$\frac{U_{dR}}{n} = U_{dioR} \cdot \left(\cos \alpha - (d_{xR} + d_{rR}) \cdot \frac{I_d}{I_{dN}} \cdot \frac{U_{dioNR}}{U_{dioR}} \right) - U_T$$

$$U_{dR} = U_{dLR} + (R_{eR} + R_{gR}) \cdot I_d$$

$$\frac{U_{dI}}{n} = U_{dioI} \cdot \left(\cos \gamma - (d_{xI} - d_{rI}) \cdot \frac{I_d}{I_{dN}} \cdot \frac{U_{dioNI}}{U_{dioI}} \right) + U_T$$

$$d_{xN} = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{X_t \cdot I_{dN}}{U_{dioN}}$$

$$d_r = \frac{P_{cu}}{U_{dioN} \cdot I_{dN}} + \frac{2 \cdot R_{th} \cdot I_{dN}}{U_{dioN}}$$

$$\cos(\alpha + u_R) = \cos \alpha - 2 \cdot d_{xNR} \cdot \frac{I_d}{I_{dN}} \cdot \frac{U_{dioNR}}{U_{dioR}}$$

$$\cos(\gamma + u_I) = \cos \gamma - 2 \cdot d_{xNI} \cdot \frac{I_d}{I_{dN}} \cdot \frac{U_{dioNI}}{U_{dioI}}$$

$$Q_d = 2 \cdot \chi \cdot I_d \cdot U_{dio}$$

$$\chi = \frac{1}{4} \cdot \frac{2 \cdot u + \sin 2\alpha - \sin 2(\alpha + u)}{\cos \alpha - \cos(\alpha + u)}$$

$$U_v = \frac{U_{dio}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\pi}{3}$$

$$I_{vN} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_{dN}$$

onde,

| | |
|--------------|--|
| I_d | Corrente contínua |
| I_{dmax} | Corrente contínua utilizada para o cálculo do U_{d0} , U_{d0G} , U_{d0L} e $U_{d0absmax}$ máximos. |
| U_{dR} | Tensão contínua pelo conversor no retificador |
| $U_{dL,R}$ | Tensão contínua de polo a terra no retificador |
| $U_{dL,I}$ | Tensão contínua de polo a terra no inversor |
| P_d | Potência medida no lado de CC |
| n | Número de conversores de 6 pulso por polo |
| U_{d0} | Tensão contínua ideal sem carga por conversor de 6 pulsos |
| P | Potência ativa |
| Q | Potência reativa |
| X_t | Reatância de comutação em ohms |
| u_k | Reatância do transformador em % |
| P_{cu} | Perdas resistivas no transformador conversor mais as perdas do reator de alisamento, referido a um conversor de 6 pulsos |
| α | Ângulo de disparo |
| γ | Ângulo de extinção |
| u | Ângulo de superposição (overlap) |
| d_v | Queda da tensão contínua relativa indutiva |
| d_r | Queda da tensão contínua relativa resistiva |
| η | Relação dos transformadores conversores, normalizada de maneira que $\eta = 1,0$ corresponda a U_{IN}/U_{VN} |
| $\Delta\eta$ | Um tap de OLTC |
| R_b | Resistência total da linha no nível do polo |
| R_{eR} | Resistência do cabo/linha do eletrodo do retificador |
| R_{gR} | Resistência do eletrodo do retificador |
| R_{eI} | Resistência do cabo/linha do eletrodo do inversor |
| R_{gI} | Resistência do eletrodo do inversor |
| R_d | Resistência CC total do circuito de CC ($R_b + R_{eR} + R_{gR} + R_{eI} + R_{gI}$) |
| U_T | Queda constante de tensão em um conversor de 6 pulsos |
| R_v | Resistência equivalente em uma válvula tiristora |
| U_v | Tensão entre fases no lado válvula do transformador conversor |
| U_l | Tensão entre fases no lado linha do transformador conversor |
| I_v | Corrente contínua no lado válvula do transformador conversor |
| I_l | Corrente contínua no lado linha do transformador conversor |
| Q_{conv} | Consumo de potência reativa do conversor |
| TC | Posição do comutador de taps |
| TS | Especificações técnicas dos clientes |
| OLTC | Comutador de taps sob carga |
| S_N | Potência nominal |
| N | Indica valores nominais |
| R | Indica o retificador |
| I | Indica o inversor |
| v | Indica o lado válvula dos transformadores conversores |
| l | Indica o lado linha do transformador conversor |
| máx | Indica o máximo |
| mín | Indica o mínimo |
| ol | Indica a sobrecarga |
| L | Indica o lado linha do lado de CC |
| 3w | Transformador conversor monofásico com três enrolamentos |
| 2w | Transformador conversor monofásico com dois enrolamentos |

Podem ser destacados os seguintes parâmetros obtidos com esse estudo:

- Reatância de curto-circuito dos transformadores conversores
- Potência nominal, tensões e correntes dos transformadores conversores
- Faixa de operação e limites de tensão do comutador sob carga dos transformadores conversores
- Ângulos de disparo e extinção
- Características de operação durante condições de regime permanente

- Características das válvulas
- Bases para a estratégia de controle
- Etc.

Este estudo deverá necessariamente utilizar nos cálculos as variações possíveis de seus parâmetros e dados de entrada, advindos de tolerâncias de fabricação e erros/tolerâncias de medição, dentre outros. Como exemplo, temos:

- A resistência total da linha CC. Sua resistência deverá ser corrigida pela Transmissora para a temperatura de operação do elo CC (nominal, mínima e máxima). O mesmo deverá ser aplicado às resistências da linha do eletrodo e do eletrodo propriamente dito, em cada uma das estações terminais, retificadora ou inversora. Além da correção com a temperatura de operação, os comprimentos das linhas deverão embutir um percentual de $\pm 10\%$, para possibilitar cobrir eventuais alterações durante as suas implantações. Esse percentual deverá ser aumentado, notadamente para a linha do eletrodo, diante de possíveis incertezas na definição do local exato de instalação dos eletrodos de terra.
- Tolerância de fabricação da reatância de comutação (Δdx em %). Caso haja a necessidade de utilização de filtros Power Line Carrier – PLC, sua aplicação também deverá ser considerada no valor da reatância de comutação (dxn).
- Tolerância na medição de tensão U_d e da corrente I_d .
- Erros de medição do ângulo de disparo α (graus elétricos), o erro de medição do ângulo de extinção γ (graus elétricos) e da tensão U_{dio} devido ao transformador de potencial na barra CA (% de U_{dioN}).
- Dependendo do tipo de controle a ser usado, deverá também levado em consideração as faixas de variação do ângulo de disparo α (graus elétricos) e do ângulo de extinção γ (graus elétricos).

Devem ser apresentadas tabelas, que deverão conter as seguintes informações, para variações de potência, no retificador (P_{dR}), em degraus de 10%:

- Corrente CC (I_d - A)
- Tensão CC no retificador (U_{dR} - kV)
- Tensão CC no inversor (U_{dI} - kV)
- Tensão em vazio ideal no retificador por ponte de seis pulsos (U_{di0R} - kV)
- Tensão em vazio ideal no inversor por ponte de seis pulsos (U_{di0I} - kV)
- Potência CC no retificador (P_{dR} - MW)
- Ângulo de disparo (α - grau)
- Ângulo de extinção (γ - grau)

- Ângulo de comutação no retificador (μR - graus)
- Ângulo de comutação no inversor (μI - graus)
- Potência CC no inversor (PdI - MW)
- Consumo de reativos no retificador (QR - Mvar)
- Consumo de reativos no inversor (QI - Mvar)
- Tapes dos transformadores conversores no retificador (TCR)
- Tapes dos transformadores conversores no inversor (TCI).

Segue modelo referencial abaixo, retirado de [6.19].

| Power (p.u.) | Current (A) | UdR (kV) | Udi0R (kV) | PdR (MW) | α (°) | TCR | μR (°) | QconvR (Mvar) | UdI (kV) | Udi0I (kV) | PdI (MW) | γ (°) | TCI | μI (°) | QconvI (Mvar) |
|-----------------|----------------|-------------|---------------|-------------|-----------------|-----|----------------|------------------|-------------|---------------|-------------|-----------------|-----|----------------|------------------|
|-----------------|----------------|-------------|---------------|-------------|-----------------|-----|----------------|------------------|-------------|---------------|-------------|-----------------|-----|----------------|------------------|

4.3.2.2. Estudo de Compensação Reativa – Balanço de Potência Reativa

Este estudo tem por finalidade determinar o montante de compensação de potência reativa necessária para ambas as estações conversoras diante dos requisitos relativos à geração/absorção da potência reativa das estações conversoras e o intercâmbio entre as conversoras e a rede CA.

Os principais pontos a serem analisados neste estudo estão descritos abaixo:

- Cálculo do consumo da potência reativa das conversoras
- Composição total e modularização dos elementos de compensação de potência reativa
- Estimativa da variação de tensão no chaveamento dos elementos de compensação de potência reativa
- Requisitos de balanço da potência reativa
- Estratégia de controle dos elementos de compensação de potência reativa, incluindo seus pontos de chaveamento e limites
- Balanço da potência reativa para os diferentes modos de operação

Os cálculos deverão considerar:

- A operação em toda a faixa de potência operativa (incluindo sobrecarga de qualquer natureza, se houver e se for assim definido);
- Todos os modos de operação estabelecidos;
- A ausência de variações de tensão no sistema CA acima do valor estabelecido, dentro da faixa de níveis de curto-circuito atuais ou futuros, como consequências dos chaveamentos de elementos de compensação reativa. Deverão também ser avaliadas que as variações de tensão no sistema CA no

caso da perda intempestiva do maior banco de elementos de compensação reativa não causarão falha de comutação;

- Não é recomendada a utilização da geração de potência reativa dos filtros PLC nos cálculos, se existirem. A absorção de potência reativa pelos filtros PLC deverá ser considerada no valor máximo e mínimo de dx;
- Não deverá ser considerada a possibilidade de utilização, no caso de operação bipolar, para despachos mínimos, ou mesmo no desbloqueio das conversoras, a utilização de controle de tensão CA do lado da válvula, no secundário do transformador conversor, ou ainda a utilização de compensadores síncronos, se disponíveis, para controle do balanço de reativos;
- A ausência de um ou mais elementos de compensação reativa de acordo com o Anexo Técnico do empreendimento;
- Os limites de intercâmbio com o sistema CA para ambas as estações conversoras.

Este estudo utiliza equações clássicas que podem ser combinadas em um programa digital de maneira a visualizar e processar várias condições operativas repetidamente, conforme apresentado no item 4.3.2.1.

O relatório desse estudo deverá apresentar os resultados sob a forma de curvas e tabelas. Os resultados a serem informados são, pelo menos, para ambas as estações conversoras:

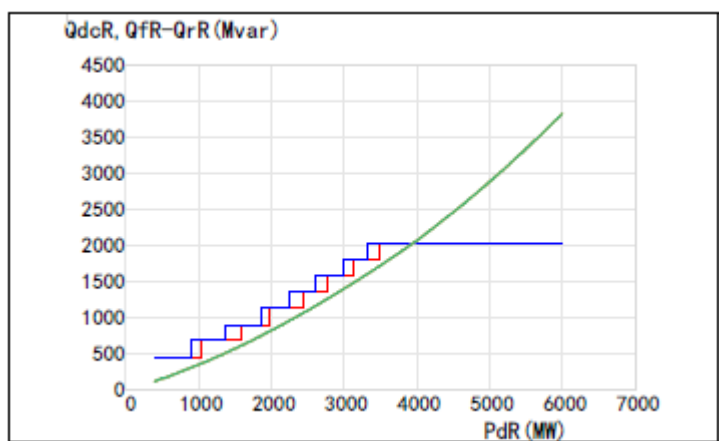
- Pd (potência ativa transmitida) em MW e em pu, em passos de 10% da potência nominal da estação conversora funcionando como retificadora
- Ud (tensão contínua)
- Id (corrente contínua)
- Qconv (consumo de potência reativa da conversora em Mvar)
- Qf (potência reativa fornecida pelos filtros)
- Qac (intercâmbio de potência reativa com o sistema CA)
- Número de elementos de compensação reativa conectados
- Rampeamento para tomada de carga e com conseqüente redução de potência

Os cálculos deverão ser feitos levando-se em conta, não só as tolerâncias e erros descritos em 4.3.2.1, bem como as seguintes considerações e combinações:

- Todos as configurações de operação previstas (bipolar, monopolar com retorno pela terra, monopolar com retorno metálico, etc) com transmissão em ambos os sentidos retificador-inversor e inversor-retificador, caso especificado;
- Todos os modos de operação previstos (tensão contínua nominal, tensão contínua reduzida);
- As tensões CA máximas, mínimas e nominais onde ambas as estações conversoras estão conectadas;
- As resistências máximas, mínimas e nominais da linha de corrente contínua, das linhas do eletrodo e dos próprios eletrodos;
- As frequências máximas, mínimas e nominais dos sistemas CA onde ambas as estações conversoras estão conectadas.

Seguem exemplos retirados de [6.19]:

- Curva



- Tabela

| Power (p.u.) | Current (A) | UdR (kV) | PdR (MW) | QconvR (Mvar) | Nf -up | Qf-up (Mvar) | Qac-up (Mvar) | Nf -down | Qf-down (Mvar) | Qac-down (Mvar) |
|--------------|-------------|----------|----------|---------------|--------|--------------|---------------|----------|----------------|-----------------|
| | | | | | | | | | | |

4.3.2.3. Estudo de Sobrecorrentes Transitórias

Este estudo tem por finalidade determinar as máximas correntes de curto-circuito que os componentes do elo CC deverão suportar diante de solicitações transitórias advindas de curtos-circuitos aplicados em qualquer localização dentro das estações conversoras, pelo tempo máximo necessário a eliminação do mesmo, como, por exemplo, pela abertura do disjuntor dos transformadores conversores.

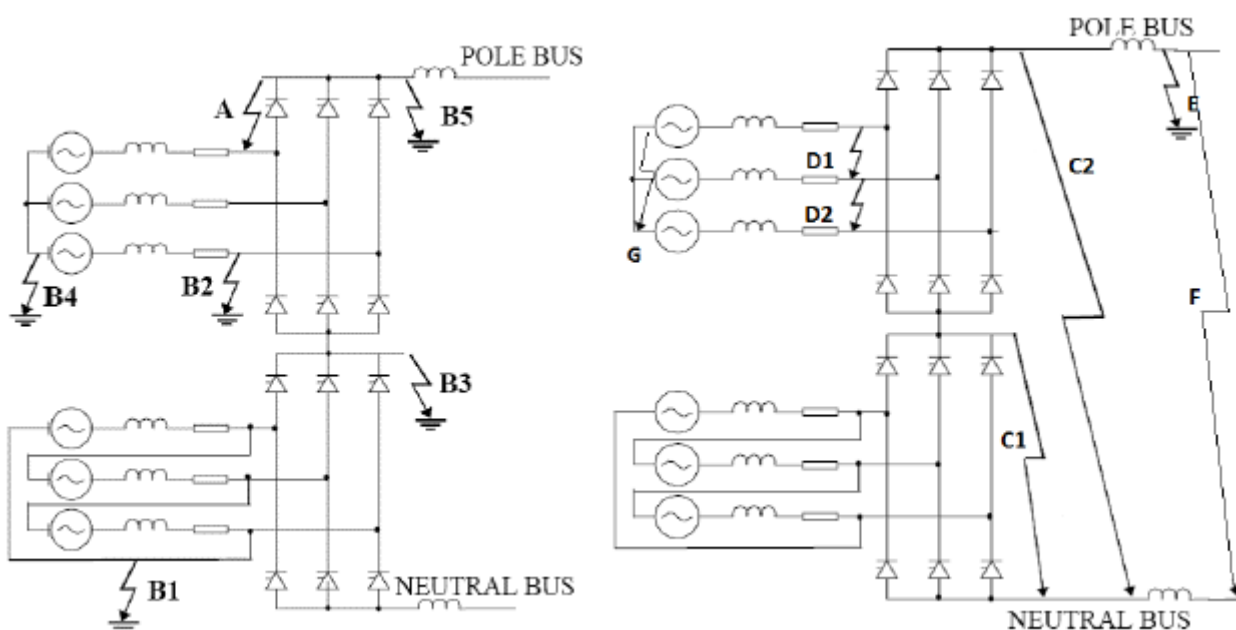
O relatório desse estudo deverá abranger as solicitações impostas aos equipamentos em geral das estações conversoras, com exceção dos filtros CA e CC, que são objetos de estudos específicos.

Os cálculos deverão ser feitos levando-se em conta as variações dos seguintes dados:

- Potência de curto-circuito máxima nas barras das estações conversoras. Deve ser utilizado o valor definido para a corrente máxima simétrica dos disjuntores do pátio CA;
- Os dados do Circuito Principal calculados em 4.3.2.1. Deve ser observado que a reatância dos transformadores conversores, a tensão contínua e a corrente contínua possuem extrema relevância nos cálculos;

O estudo pode ser efetuado tanto por fórmulas teóricas como por simulação digital. Observa-se que a formulação teórica proporciona resultados mais conservadores, já que na simulação digital as condições extremas não podem ser representadas com a atuação adequada do sistema de controle e proteção normalmente considerados no modelo de simulação.

Devem ser apresentadas a avaliação dos seguintes tipos de falta, de acordo com as figuras abaixo, retiradas de [6.19].



- Localização A: Curto-circuito na válvula;
- Localização B1: Falta para terra na fase CA do lado da válvula na ponte Δ;
- Localização B2: Falta para terra na fase CA do lado da válvula na ponte Y;
- Localização B3: Falta para terra na barra entre as pontes de 6 pulsos;
- Localização B4: Falta para terra no ponto de neutro do transformador Y no lado da válvula;
- Localização B5: Falta para terra na conexão ao polo.
- Localização C1: Curto-circuito através da ponte de 6 pulsos;
- Localização C2: Curto-circuito através da ponte de 12 pulsos;

- Localização D1: Curto-circuito bifásico, entre o transformador conversor e a válvula, na ponte Y;
- Localização D2: Curto-circuito trifásico, entre o transformador conversor e a válvula, na ponte Y;
- Localização E: Curto-circuito para a terra no polo após o reator de alisamento;
- Localização F: Curto-circuito polo neutro após reator de alisamento;
- Localização G: Curto-circuito trifásico no lado da rede do transformador conversor na ponte Y.

Deverão ser apresentados os resultados por tipo de falta e o valor que será utilizado para o dimensionamento dos componentes de uma maneira geral.

4.3.2.4. Estudo de Coordenação do Isolamento

Este estudo tem por finalidade estabelecer as bases para definição dos níveis de isolamento das estações conversoras, tanto para o pátio CC, como para o pátio CA, a partir dos maiores valores esperados de sobretensão. A coordenação do isolamento para filtros CA e CC está fora do escopo desse estudo e deverá ser apresentada em documentos específicos.

Atualmente, os elementos não-lineares responsáveis por garantir os valores máximos esperados de sobretensão são os para-raios ZNO devido à sua confiabilidade e previsibilidade.

Sobretensões nas estações conversoras são causadas por fontes externas e internas. Geralmente eventos externos não causam trip do elo CC, enquanto eventos internos sim. Os principais eventos a serem avaliados são: operações de manobra, aplicação e eliminação de faltas para terra, curtos-circuitos, descargas atmosféricas, rejeição de carga e falhas de controle dentro do elo CC.

Não há uma orientação sobre qual é a melhor maneira ou solução para proteger os diversos equipamentos dentro de uma estação conversora. Isso depende da experiência e metodologia de cada fornecedor de projetos. Normalmente, os fornecedores escolhem as opções avaliadas e disponíveis na publicação IEC 60071-5: Insulation Co-ordination - Part 5: Procedures for HVDC Converter Stations. A regra geralmente empregada é que cada equipamento principal ou barramento sejam protegidos por para-raios em paralelo ou por um ou mais para-raios nas proximidades.

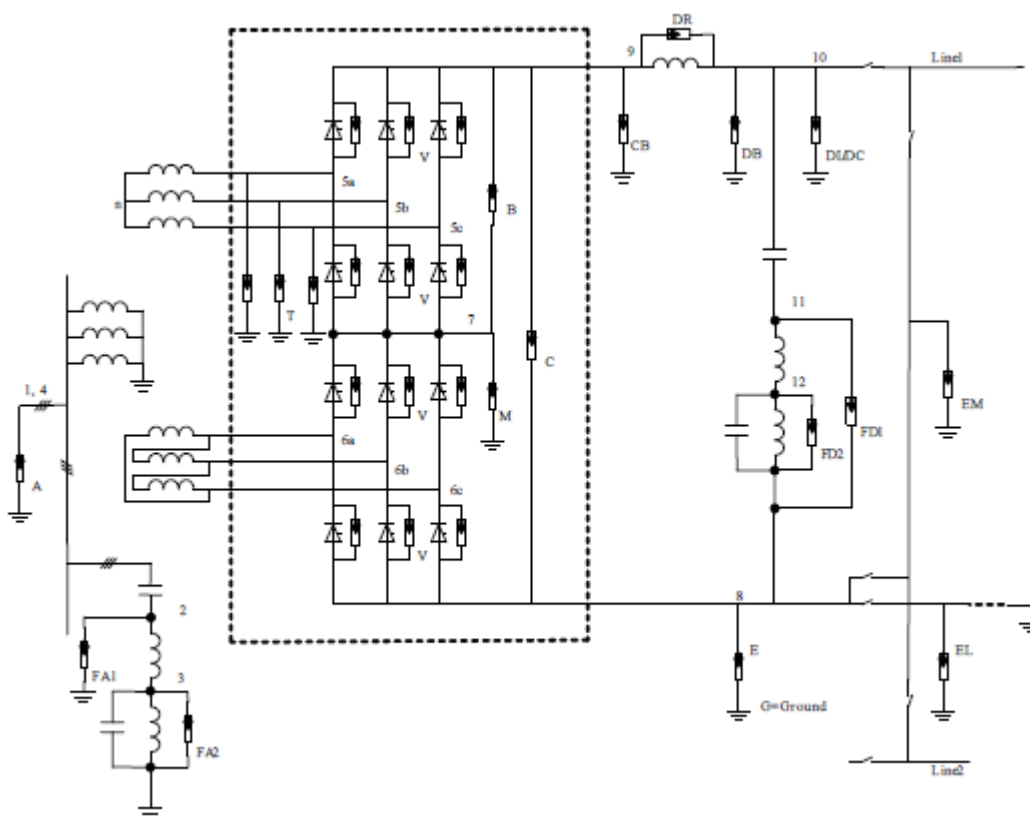
Esse estudo apresenta duas etapas:

- Etapa inicial: o fornecedor, com base na sua experiência e projetos passados, estima valores limite de corrente de coordenação e tensão máximas esperadas nos para-raios, estabelecendo assim os níveis de coordenação do isolamento, incluindo as margens definidas para o projeto.
- Etapa final: a partir das avaliações obtidas nos estudos de 4.3.2.9 e 4.3.2.10, o fornecedor poderá revisar para cima ou para baixo os valores pré-definidos, finalizando a coordenação do isolamento da estação conversora.

O relatório desse estudo deverá conter:

- O esquema de proteção por para-raios proposto
- As características definidas para cada para-raios (curvas de descarga máxima e mínima: 8x20 μ s, 30x60 μ s, frente íngreme, etc.), suas quantidades, incluindo valores de capacidade de dissipação de energia e número estimado de colunas
- Os valores estimados para as máximas correntes de coordenação e as correspondentes tensões (SIPL, LIPL e STIPL)
- A filosofia de proteção de cada equipamento principal e barramento
- A lista de casos típicos que podem impor solicitações nos para-raios e que serão posteriormente avaliados
- Tabela com as margens de proteção utilizadas para a coordenação do isolamento em cada tipo e localização de equipamento na estação conversora
- Os valores definidos para a coordenação do isolamento (SIWV, LIWV e STIWV). No caso específico das válvulas, de maneira que o processo fique claro, deverá ser informado também o valor utilizado para o disparo protetivo e como ele está coordenado com os respectivos para-raios de válvula
- As tensões para a obtenção dos valores de air clearances
- As tensões para a obtenção dos valores de creepage distances
- Requisitos para proteção contra descargas atmosféricas

Como exemplo, segue esquema típico de proteção por para-raios da referida IEC.



| | |
|---------------------------------------|-------------------------------|
| A: AC bus arrester | EM: Metallic return arrester |
| M: Mid-point bridge arrester | EL: Electrode line arrester |
| E: DC neutral bus arrester | B: Bridge arrester (8-pulse) |
| V: Valve arrester | C: Converter unit arrester |
| T: Transformer valve winding arrester | DB: DC bus arrester |
| DR: Smoothing reactor arrester | DC: DC cable arrester |
| DL: DC line arrester | FD1, FD2: DC filter arresters |
| FA1, FA2: AC filter arresters | |

4.3.2.5. Estudo de Desempenho dos Filtros em Corrente Alternada

Este estudo tem por finalidade estabelecer as bases para a escolha dos componentes dos filtros CA, caso necessário, a partir da definição das necessidades de compensação reativa descritas no item 4.3.2.2, tomando como referência os limites de distorção harmônica nas barras CA das estações conversoras definidos nos instrumentos técnicos de outorga, e na ausência deles, nos limites estabelecidos no Submódulo 9.7, reduzindo, conseqüentemente, as correntes harmônicas fluindo para dentro do sistema CA.

As principais grandezas a serem avaliadas são:

- Distorção de Tensão Harmônica Individual – DTHI

Corresponde ao valor obtido da relação percentual entre a tensão harmônica de ordem h , V_h , e a tensão à frequência fundamental, V_1 , ambas medidas em Volts, conforme expressão abaixo.

$$DTHI_h = 100 \frac{V_h}{V_1} \text{ (em \%)}$$

- Distorção de Tensão Harmônica Total – DTHT

Corresponde ao valor obtido da raiz quadrada do somatório quadrático das DTHI de ordens 2 a 50, conforme expressão abaixo.

$$DTHT = \sqrt{\sum DTHI_n^2} \text{ (em \%)}$$

Além das grandezas acima, deverão ser avaliados e informados os valores máximos dos indicadores TIF e produto IT resultantes do projeto de filtros, considerando as configurações de operação e os modos de operação previstos para as conversoras. Deve ser observado que esses resultados deverão tomar por base a publicação CIGRE 14.03: Filtering and Reactive Compensation for HVDC.

- Produto IT

$$IT = \sqrt{\sum_{n=1}^{50} (I_n W_n)^2}$$

- Indicador TIF

$$TIF = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{50} (U_n W_n)^2}}{U_1}$$

Sendo

- V1 ou U1 a tensão de frequência fundamental
- Vn ou Un tensão harmônica da ordem n
- In é corrente rms de frequência simples na ordem harmônica n
- Wn é o fator ponderado de frequência simples na ordem harmônica n, obtido de CIGRE report No. 139: Guide to the specification and design evaluation of AC filters for HVDC systems.

Os cálculos deverão ser feitos levando-se em conta as variações e combinações dos seguintes dados e premissas:

- Modos de operação e configurações de operação definidos no instrumento técnico de outorga;
- Correntes determinadas para as harmônicas de 2ª ordem até 50ª ordem
- Correntes harmônicas características calculadas com base nos seguintes parâmetros principais:

. Uac - tensão do sistema CA

- . Ud - tensão CC
- . dx - queda de tensão contínua relativa indutiva nominal dos transformadores conversores
- . α - ângulo de disparo
- . γ - ângulo de extinção
- . Id - corrente CC

- Correntes harmônicas características não-canceladas calculados com base nos seguintes parâmetros principais:

- . Máximas diferenças entre os ângulos de disparo e extinção entre pontes de 6-pulsos ($\Delta\alpha/\Delta\gamma$)
- . Máxima diferença entre as quedas de tensão contínua relativa indutiva nominal dos transformadores conversores entre pontes de 6-pulsos (dx)

- Correntes harmônicas não-características calculadas com base nos seguintes parâmetros:

- . Esses harmônicos, amplitude e fase, estão relacionados às condições de desbalanço na fabricação e operação das conversoras, e possuem uma distribuição estatística conhecida. Assim, aplica-se uma abordagem estatística de algumas variáveis.

- Tensão CA

- . Além das variações nominais máximas da tensão, deverá ser considerado um desbalanço de tensão do sistema CA considerando a componente de sequência negativa, conforme estabelecido no instrumento técnico de outorga. Em caso de ausência dessa informação, utilizar o valor de 1%.

- Dissintonia dos filtros

- . Deverão ser aplicadas variações nos componentes dos filtros devido principalmente às tolerâncias de fabricação, temperatura, danos, envelhecimento dos componentes, etc. Não será permitido a aplicação do método de desvio de frequência equivalente.

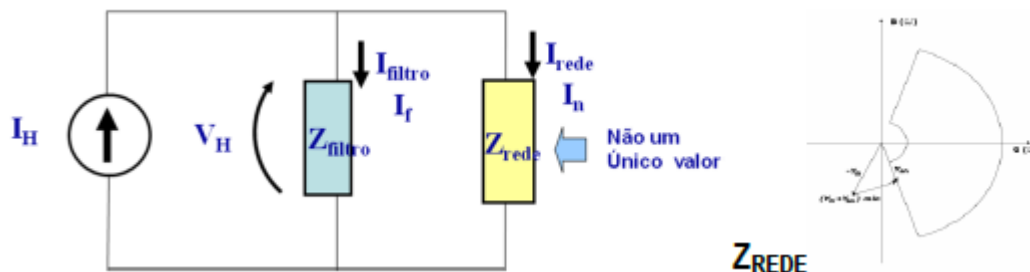
- Frequência CA.

- . Deverão ser aplicadas as variações nominais de excursão das frequências em cada estação conversora.

- O modelo de cálculo de desempenho deverá seguir a metodologia com a instalação conversora representada através do seu equivalente Norton, isto é, uma injeção de conjuntos consistentes de correntes harmônicas com a impedância dos filtros em paralelo, em paralelo com a rede externa representada por envelopes de impedância, na forma de setor circular, ZMAX, ZMIN, AngMAX e

AngMIN, conforme figura abaixo, Figura 4.20. Outras metodologias poderão ser propostas, desde que apresentem comprovadamente resultados mais conservadores.

Figura 4.20 Modelo de equivalente dos filtros em paralelo



A utilização da metodologia “Cross-modulation” não poderá ser utilizada, a menos que respeite as condições acima.

- Havendo requisito nesse sentido, os cálculos deverão ser feitos considerando a indisponibilidade de qualquer elemento, especificamente de sub-bancos, se essa for a menor unidade da solução adotada.

Especial atenção deverá ser dada ao levantamento da impedância da rede CA, normalmente utilizando-se o programa HarmZs do CEPEL, notadamente, caso não disponível no documento técnico de outorga:

- Impedâncias determinadas para as harmônicas de 2ª ordem até 50ª ordem. Essas impedâncias serão calculadas para cada ordem harmônica (h), em múltiplos da frequência fundamental, e conjuntos de ordens harmônicas vizinhas (no mínimo h-1 e h+1). Complementarmente, a frequência a ser usada nesse dimensionamento deverá ser $60 \pm 0,2$ Hz.

- Mais de um valor para a frequência fundamental, se aplicável

- Configuração de rede completa (N) e N-1

- Condição de carga leve, média e pesada

- Representação das cargas através de ramais típicos nas proximidades das estações conversoras. Essa escolha deve ser feita com muito critério, já que esse levantamento requer um estudo minucioso das distribuidoras envolvidas e muito tempo de observabilidade, É necessário um afastamento das barras onde as conversoras serão instaladas, Por fim, por poder introduzir erros consideráveis pelos motivos anteriormente citados, recomenda-se, por conservadorismo, a não representação de cargas nesses estudos.

- Agrupamento das nuvens de pontos para a definição dos lugares geométricos das impedâncias para $h \pm 1$. Por exemplo, o envelope para o 11º harmônico inclui os pontos calculados para o 10º, 11º e 12º harmônicos, observando ainda as variações da frequência fundamental também, conforme informado

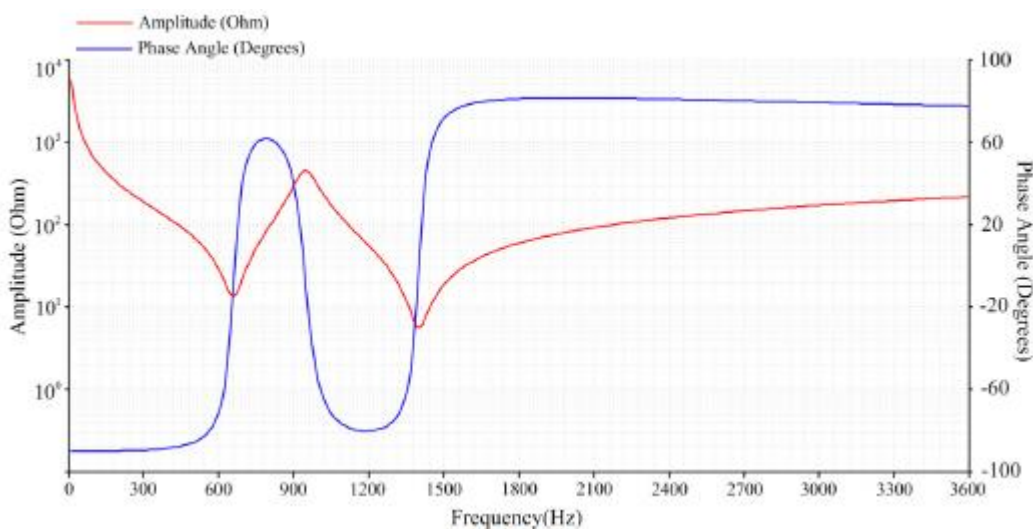
acima, proporcionando um conjunto de 9 valores a serem utilizados para a definição dos valores correspondente de ZMAX, ZMIN, AngMAX e AngMIN para cada harmônica (h). Teremos então 2 etapas:

- Uma ou 3 tabelas com os dados brutos no formato $h-0,2 \text{ Hz} / h / h+0,2 \text{ Hz}$
- Uma tabela final de agrupamento composta com os extremos para cada valor de h:
 - $(h-1)-0,2 \text{ Hz} / (h-1) / (h-1)+0,2 \text{ Hz}$
 - $h-0,2 \text{ Hz} / h / h+0,2 \text{ Hz}$
 - $(h+1)-0,2 \text{ Hz} / (h+1) / (h+1)+0,2 \text{ Hz}$

Assim, o relatório desse estudo deverá conter as seguintes informações:

- Os modos de operação e configurações de operação utilizadas
- As premissas utilizadas no cálculo das correntes harmônicas
- As premissas de como essas correntes foram combinadas para se chegar ao maior valor utilizado
- As premissas e cálculos das impedâncias harmônicas e como elas foram agrupadas
- A solução final dos filtros, com identificação dos seus elementos C, L e R, potência reativa gerada e as respectivas curvas de amplitude e ângulo
- Os valores das grandezas calculadas (DTHI, DTHT, TIF e IT)
- As sequências de chaveamento dos filtros para se atingir os limites do item anterior.

Segue exemplo de curva de resposta de um filtro dupla sintonia DT 12/24, conforme [6.19].



4.3.2.6. Estudo de Rating dos Filtros em Corrente Alternada

Este estudo tem por finalidade estabelecer as solicitações que serão impostas aos componentes dos filtros CA e capacitores em derivação, tanto em regime permanente, como em regime transitório, após a consolidação da escolha dos filtros CA que atendem os critérios, conforme estabelecidos em 4.3.2.5. Os cálculos transitórios deverão incluir a seleção adequada dos para-raios, as correntes transitórias e os níveis de isolamento de todos os componentes.

a) Regime permanente

De forma geral, as principais grandezas a serem avaliadas são:

- Tensão máxima rms incluindo harmônicos

$$U_{\max} = \sum_{n=1}^{n=50} U_n$$

Onde, U_n = tensão harmônica de ordem n aplicada ao elemento.

- Corrente máxima rms

$$I_{th} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=50} I_n^2}$$

Onde, I_n = corrente harmônica de ordem n através do elemento

- Tensão máxima para determinação da distância de escoamento

$$U_{creep} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=50} U_n^2}$$

Onde, U_n = tensão harmônica de ordem n aplicada ao elemento.

Os cálculos deverão ser feitos levando-se em conta as variações e combinações dos seguintes dados e premissas:

- Regra geral: os filtros deverão ser dimensionados de maneira que não haja desligamentos por sobrecarga, mesmo em caso de operação com indisponibilidade de qualquer um dos elementos, especificamente de sub-bancos, se essa for a menor unidade da solução adotada.

- Apesar das correntes harmônicas já terem sido uma vez calculadas em 4.3.2.5, elas precisam ser refeitas, ampliando-se, quando possível:

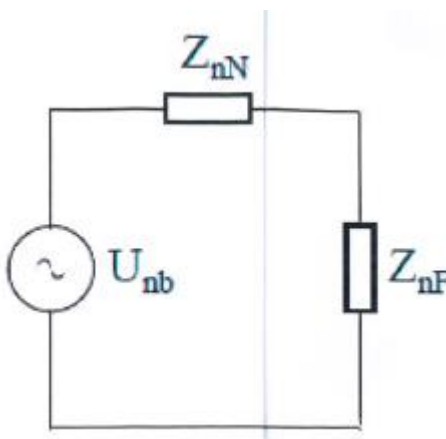
- . Todos os modos de operação e configurações de operação definidos no instrumento técnico de outorga, incluindo sobrecarga, se definido para o empreendimento.

. Além das variações extremas da tensão, deverá ser considerado um desbalanço de tensão do sistema CA considerando a componente de sequência negativa superior ao valor estabelecido para o cálculo de desempenho dos filtros, conforme estabelecido no instrumento técnico de outorga. Em caso de ausência dessa informação, utilizar o valor de 2%.

. Deverão ser aplicadas as variações extremas de excursão das frequências em cada estação conversora.

- O modelo apresentado em 4.3.2.5 deverá ser novamente utilizado, com as correntes obtidas do tópico anterior logo acima.

- Além da contribuição das conversoras, solicitações deverão ser calculadas tomando por base contribuições da rede externa (background). O modelo para esses cálculos está apresentado abaixo, conforme [6.19].



As premissas para a definição da fonte U_{nb} segue a seguinte orientação:

. Em cada elemento de filtro, especificamente de sub-bancos, se essa for a menor unidade da solução adotada, será aplicada uma fonte de tensão cujas amplitudes serão formadas pela contribuição dos limites globais inferiores de cada frequência de sintonia do filtro, acrescida pela contribuição das frequências anteriores e posteriores dessas frequências.

. Acrescentar ao conjunto de fontes de tensão acima as contribuições de outras frequências ainda não consideradas, no intervalo $n=2$ até $n=50$ até que a soma quadrática total das fontes harmônicas alcance ou ultrapasse o limite total global inferior (filtros com sintonias $h>10$) ou global superior (filtros com sintonias $h\leq 10$).

. Esses limites deverão ser obtidos do item 3.4.4.2 de [6.25].

. Apenas estes harmônicos serão utilizados na definição do rating de cada componente, sendo as outras contribuições harmônicas restantes descartadas.

Como exemplo dessa definição das tensões harmônicas de background, é apresentada a seguir uma tabela para um filtro de tripla sintonia 13/24/36.

| Harm | Value |
|------|-------|
| 3 | 1.8% |
| 12 | 0.5% |
| 13 | 1.5% |
| 14 | 0.5% |
| 23 | 1.0% |
| 24 | 0.5% |
| 25 | 1.0% |
| 35 | 0.5% |
| 36 | 0.5% |
| 37 | 0.5% |
| THD | 3.0% |

Deverão ser investigadas duas situações de aplicação dessas fontes harmônicas e escolhida aquela que apresentar os maiores resultados:

. $Z_n =$ impedância em série com a fonte harmônica deve ser escolhida para formar uma ressonância série com a impedância do filtro na frequência da fonte harmônica, maximizando a corrente no filtro.

. $Z_n =$ zero. Neste caso a fonte harmônica é aplicada diretamente nos terminais do filtro.

De posse dos resultados das solicitações obtidas pelas correntes harmônicas geradas pelas conversoras e fundamental e pelas tensões de background, o valor final de tensão e corrente para cada componente será uma composição da raiz quadrada da soma dos quadrados dos fatores (módulo). Adicionalmente, poderá ser escolhida uma outra composição, conforme mostrado abaixo.

$$I_n = (I_{n1}^2 + I_{n2}^2 + k I_{n1}I_{n2})^{1/2}$$

$$U_n = (U_{n1}^2 + U_{n2}^2 + k U_{n1}U_{n2})^{1/2}$$

Onde, 1 seria a contribuição das correntes harmônicas geradas pelas conversoras e fundamental e 2 seria a contribuição geradas pelas tensões de background. O fator k, normalmente aplicado para harmônicos de menor ordem, fica a critério da Transmissora, com base na sua experiência.

Assim, o relatório desse estudo deverá conter as seguintes informações:

- Os modos de operação e configurações de operação utilizadas
- As premissas utilizadas no cálculo das correntes harmônicas
- As premissas de como essas correntes foram combinadas para se chegar ao maior valor utilizado
- As premissas utilizadas no cálculo das tensões harmônicas de background
- Os valores das grandezas calculadas de tensão e corrente em cada componente, bem como os valores de tensão de escoamento
- As sequências de chaveamento dos filtros para se atingir os valores do item anterior.

b) Regime transitório

De forma geral, as principais grandezas a serem avaliadas são:

- Tensões e correntes nos elementos C, L e R

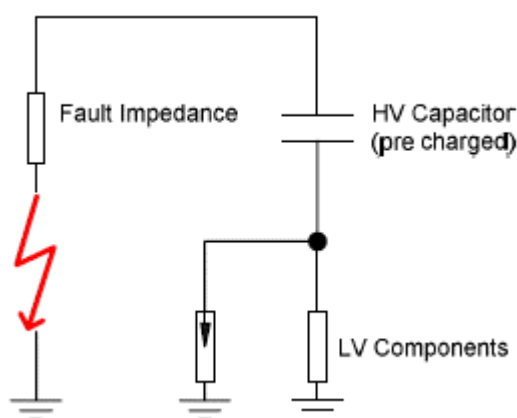
- Energia nos elementos R
- Tensões, correntes e energia nos para-raios

Os cálculos deverão ser feitos levando-se em conta as variações e combinações dos seguintes dados e premissas:

b.1) Falta monofásica na barra da estação conversora

Aplicar falta monofásica na barra CA próxima ao capacitor de alta tensão, com esse capacitor sendo carregado até o nível de proteção associado ao para-raios desta barra. Poderá ser incluída uma impedância de falta para representar a falta propriamente dita acrescida das indutâncias do barramento até a falta e da indutância do próprio capacitor.

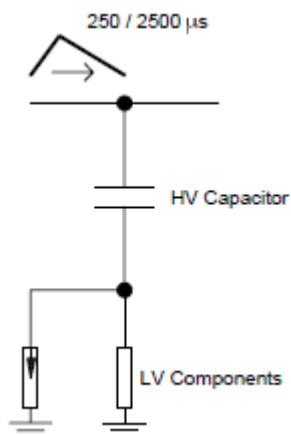
O modelo normalmente empregado nesse tipo de estudo está mostrado abaixo. Normalmente utiliza-se modelos de alta frequência para os componentes simulados, incluindo barramentos, conforme figura abaixo, extraída de [6.19].



b.2) Surtos de manobra na barra da estação conversora

Aplicar uma onda padrão de 250/2500 μ s com uma amplitude definida pelo nível de proteção associado ao para-raios desta barra na extremidade do filtro.

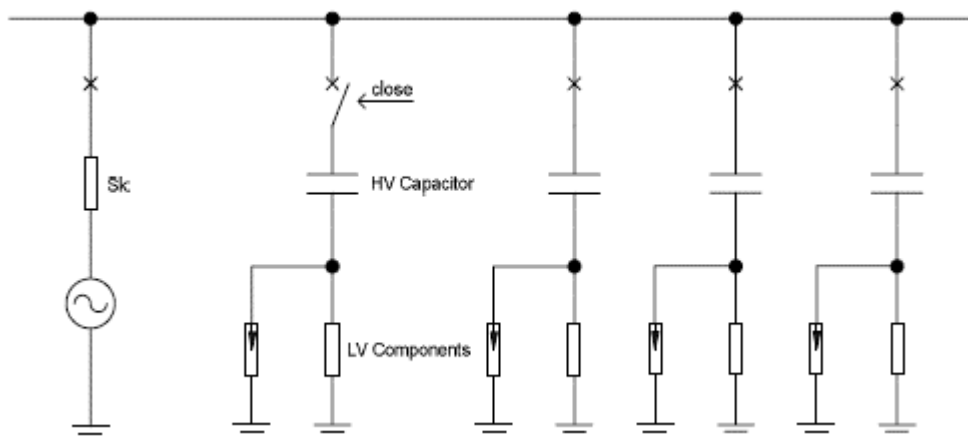
O modelo normalmente empregado nesse tipo de estudo está mostrado na figura abaixo, extraída de [6.19].



b.3) Energização dos filtros

Energizar o filtro assumindo que a tensão na barra se encontra no valor máximo operativo. O sistema CA pode ser representado por equivalente Thevenin, com a impedância série representada pelo maior valor da potência de curto-circuito vista pela barra CA.

O modelo normalmente empregado nesse tipo de estudo está mostrado na figura abaixo, extraída de [6.19].



b.4) Energização dos transformadores conversores

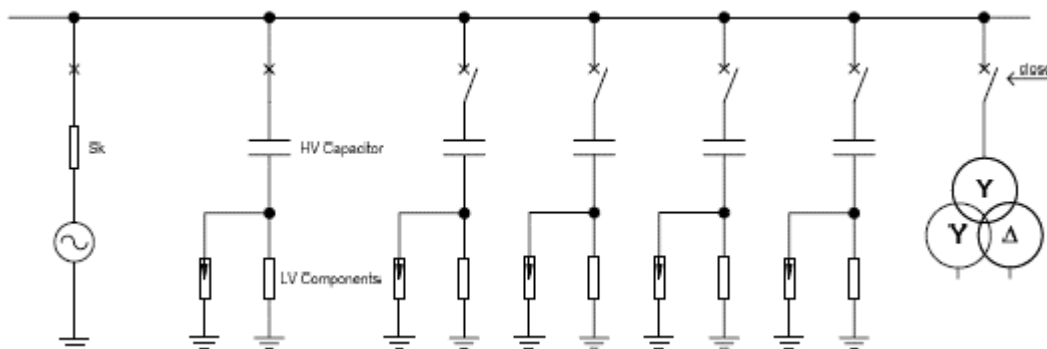
Quando os transformadores conversores são energizados, devido à geração de harmônicos pelo efeito de saturação desses elementos, os filtros CA sofrem solicitações que devem ser analisadas.

Essa avaliação consiste na energização de transformadores conversores próprios ou de terceiros diante de possíveis configurações de filtros conectados. Hipóteses: primeira energização; energização de um polo com o outro já energizado; e finalmente a energização de um polo de um empreendimento vizinho com o bipolo do empreendimento em análise em operação bipolar devem ser avaliadas.

O sistema CA pode ser modelado através de um equivalente Thevenin com a impedância em série representada pela potência de curto-circuito variando desde a potência de curto-circuito mínima até a máxima. Recomenda-se, por outro lado, a representação da rede CA de uma forma mais detalhada, conforme descrito no item 4.3.2.17.

Outros fatores importantes são o fluxo residual e a tensão da barra CA antes da energização.

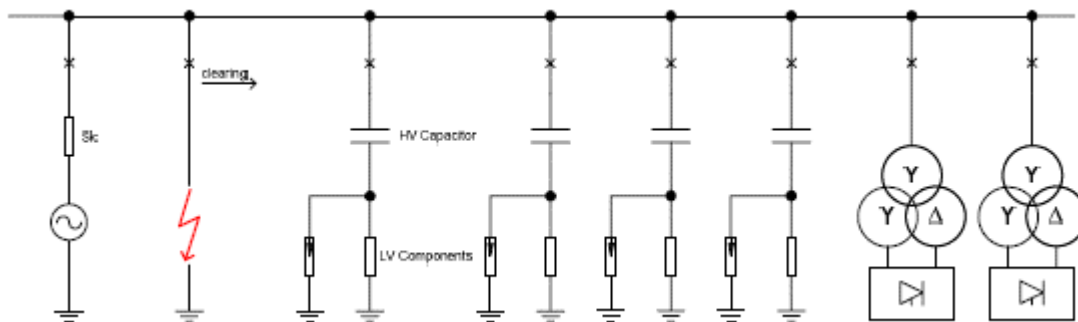
O modelo normalmente empregado nesse tipo de estudo está mostrado na figura abaixo extraída de [6.19].



b.5) Aplicação e limpeza de faltas na barra da estação conversora

Esse item está descrito adequadamente no item 4.3.2.10.

O modelo normalmente empregado nesse tipo de estudo está mostrado na figura abaixo extraída de [6.19].



O relatório desse estudo deverá conter as seguintes informações:

- Tensões e correntes nos elementos C, L e R
- Energia nos elementos R
- Tensões, correntes e energia nos para-raios
- Níveis de proteção e isolamento dos filtros

4.3.2.7. Estudo de Desempenho dos Filtros em Corrente Contínua

Este estudo tem por finalidade estabelecer as bases para a escolha dos componentes dos filtros CC, caso necessário, tomando como referência que as correntes harmônicas nas linhas CC e linhas de eletrodo não devam produzir interferências, em linhas de telecomunicação em operação na data de comissionamento do elo CC, acima dos limites estabelecidos nas normas correspondentes.

Uma das maneiras possíveis de atingir esses limites é realizar um estudo de coordenação indutiva ao longo da rota de implantação da linha CC de maneira a verificar todos os circuitos telefônicos que possam apresentar interferências superiores às permitidas. Tal procedimento necessita de um conhecimento bastante detalhado dos circuitos telefônicos ao longo da linha CC, como seu tipo, comprimento, ângulo de alinhamento com a linha CC, bem como do próprio traçado final da linha CC, etc, para compor uma base de informações para a produção do diagnóstico de possíveis interferência ou não. Para tais circuitos com interferência, a Transmissora será responsável, junto às concessionárias que operam tais linhas de comunicação, por implantar os meios necessários para mitigar os efeitos dessas interferências.

O método acima, por apresentar um tempo longo para a sua execução, bem como das dificuldades inerentes para a obtenção de todas as informações necessárias para a sua adequada conclusão, pode apresentar um elevado grau de complexidade e incerteza.

Uma outra maneira de atingir esses limites é utilizar o conceito de corrente equivalente de distúrbio, que consiste em se calcular uma corrente equivalente circulando ao longo de toda linha CC que não poderá ser superior a limites previamente definidos, que não deverão causar interferências acima de normas.

Caso não haja nada especificado para essa corrente no instrumento técnico de outorga, a Transmissora deverá considerar que, em operação bipolar, com todos os filtros presentes, essa corrente não poderá exceder 500 mA, enquanto que em operação monopolar com retorno pelo solo ou metálico, com todos os filtros presentes, tal valor não poderá exceder 1000 mA. Ainda em operação bipolar em condição (n-1) de filtros CC, os valores de correntes harmônicas nas linhas CC e nas linhas dos eletrodos não devem exceder a 1000 mA. Caberá a Transmissora definir o critério a ser adotado em operação monopolar em condição (n-1) de filtros. Estas correntes equivalentes deverão ser calculadas segundo os procedimentos estabelecidos na IEC60919-1.

As principais grandezas a serem avaliadas são:

- Corrente equivalente de distúrbio

$$I_{eq}(x) = \sqrt{I_e(x)_R^2 + I_e(x)_I^2}$$

Onde,

. $I_{eq}(x)$ = corrente de equivalente de distúrbio a 800 Hz em miliamperes psfometricamente ponderados (mAp) em qualquer ponto ao longo do corredor de transmissão

. $I_e(x)_R$ e $I_e(x)_I$ = magnitude da corrente RSS equivalente de distúrbio devido às fontes de tensão harmônica no retificador e inversor, respectivamente

. x = indica o local relativo ao longo dos corredores de transmissão.

A corrente equivalente de distúrbio, em qualquer ponto ao longo do corredor da linha CC, devido a harmônicos de qualquer uma das estações conversoras, é calculada como:

$$I_e(x) = \sqrt{\sum_{n=1}^{50} [I_r(n, x) \cdot P(n) \cdot H_f]^2}$$

Onde,

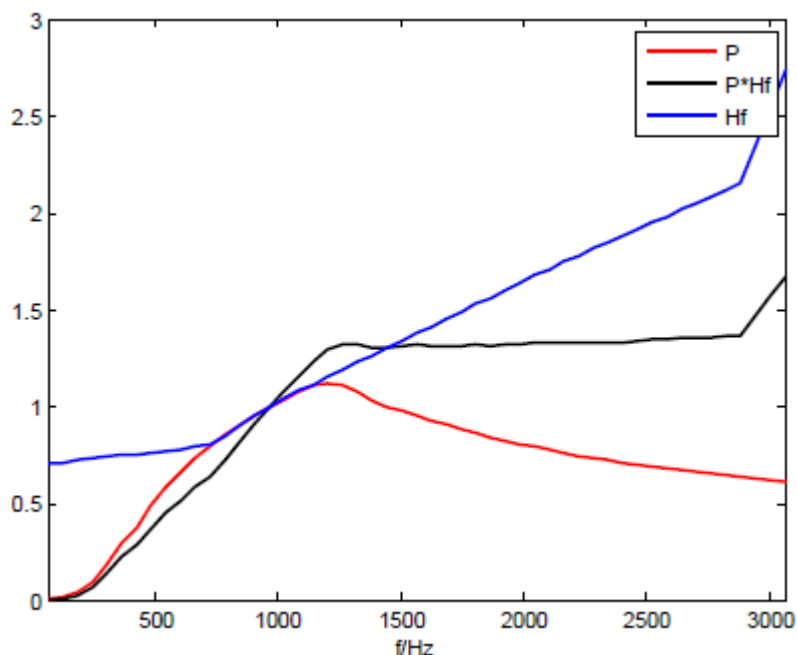
. $I_r(n, x)$ = magnitude da corrente rms residual em cada ordem harmônica "n" no local "x" ao longo do corredor da linha CC

. $P(n)$ = valor psfometricamente ponderado no harmônico "n". Ver figura abaixo

. n = número do harmônico (normalmente até 50)

. H_f = fator de acoplamento que representa os efeitos dependentes de frequência normalizada de impedância típica de acoplamento para circuitos de condutor aberto na figura abaixo.

Figura 4.21 Psophometric weight factor (P) and Coupling fator (Hf)



Os cálculos deverão ser feitos levando-se em conta as variações e combinações dos seguintes dados e premissas:

- Modos de operação e configurações de operação definidos no instrumento técnico de outorga;
- Modelo de ponte conversora de 12-pulsos representada por quatro fontes de 3-pulsos com suas reatâncias de comutação e capacitâncias parasitas
- Modelo do sistema CC completo, incluindo reator de alisamento e todos os componentes do filtro CC estimado com o capacitor da barra de neutro e possível filtro de bloqueio de 60 Hz
- Modelo da linha CC e da linha do eletrodo através de representação completa por parâmetros distribuídos e com seus comprimentos variando entre os valores mínimos e máximos
- Tensões harmônicas calculadas com base nos seguintes parâmetros principais:
 - a) Harmônicos característicos de 3-pulsos
 - b) Harmônicos não-característicos de 12-pulsos.

As tensões harmônicas finais serão compostas pela combinação das tensões acima calculadas separadamente. De maneira a obter resultados mais pessimistas, os cálculos das tensões a) e b) acima deverão utilizar o conceito de “Pior Conjunto de Tensões Harmônicas Não-Consistentes”, que consiste na utilização do resultado mais severo que cada avaliação a partir das variações dos parâmetros de estudo de cada estado para formar os piores resultados. Na realidade, todos os harmônicos não atingirão simultaneamente os valores máximos em nenhum estado operacional único dos conversores. Com isso temos resultados mais conservativos.

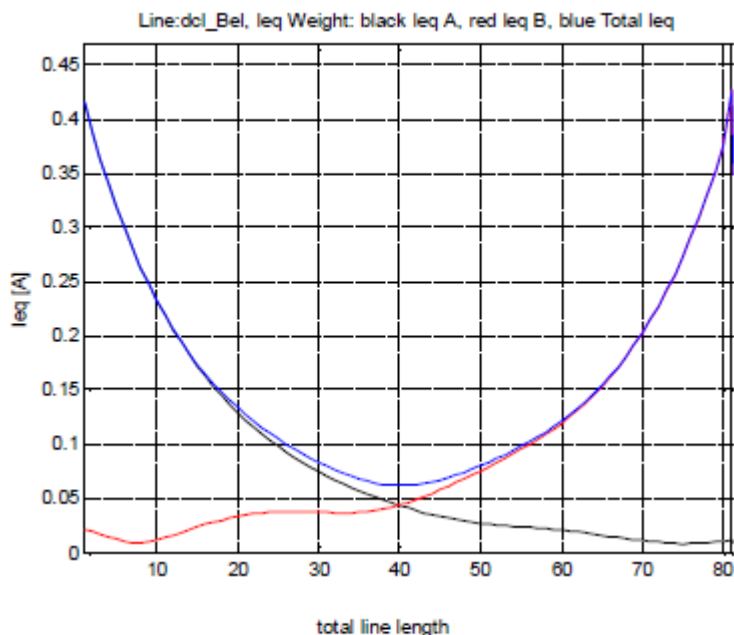
À essas tensões, também deverão ser acrescentadas as contribuições resultantes das distorções harmônicas pré-existentes nos sistemas CA (background) transferidas para o lado CC

- Tensões determinadas para as harmônicas de 2ª ordem até 50ª ordem
- Dissintonia dos filtros e reator de alisamento
 - . Deverão ser aplicadas variações nos componentes dos filtros e reator de alisamento devido principalmente às tolerâncias de fabricação, temperatura, danos, envelhecimento dos componentes, etc. Não será permitido a aplicação do método de desvio de frequência equivalente.
- Frequência CA.
 - . Deverão ser aplicadas as variações nominais de excursão das frequências em cada estação conversora.
- Tensão CA
 - . Além das variações nominais máximas da tensão, deverá ser considerado um desbalanço de tensão do sistema CA considerando a componente de sequência negativa, conforme estabelecido no instrumento técnico de outorga. Em caso de ausência dessa informação, utilizar o valor de 1%.

Assim, o relatório desse estudo deverá conter as seguintes informações:

- Os modos de operação e configurações de operação utilizadas
- As premissas utilizadas no cálculo das tensões harmônicas
- As premissas de como essas tensões foram combinadas para se chegar ao maior valor utilizado
- As premissas do modelo do sistema CC utilizado, apresentando uma figura correspondente
- A solução final dos filtros, com identificação dos seus elementos C, L e R e as respectivas curvas de amplitude e ângulo
- As curvas e tabelas das correntes equivalentes de distúrbio calculadas para todos as configurações e modos de operação estudados
- As sequências de chaveamento dos filtros, se houver, para se atingir os limites máximos definidos para o item anterior.

Segue exemplo de curva de cálculo da corrente equivalente de distúrbio na figura abaixo.



4.3.2.8. Estudo de Rating dos Filtros em Corrente Contínua

Este estudo tem por finalidade estabelecer as solicitações que serão impostas aos componentes dos filtros CC, incluindo o capacitor da barra de neutro, tanto em regime permanente, como em regime transitório, após a consolidação da escolha dos filtros CC que atendem os critérios, conforme estabelecidos em 4.3.2.7. Os cálculos transitórios deverão incluir a seleção adequada dos para-raios, as correntes transitórias e os níveis de isolamento de todos os componentes.

a) Regime permanente

De forma geral, as principais grandezas a serem avaliadas são:

- Tensão máxima aplicada ao capacitor de alta tensão

$$U_r = k \cdot U_{dc} + \sqrt{2} \cdot \sum_{n=1}^{50} U_n$$

Onde,

U_{dc} = máxima tensão CC contínua

k = fator de distribuição assimétrica da tensão (usualmente 1,2)

U_n = tensão harmônica de ordem n aplicada ao capacitor

- Tensão máxima rms incluindo harmônicos

$$U_{\max} = \sum_{n=1}^{n=50} U_n$$

Onde, U_n = tensão harmônica de ordem n aplicada ao elemento

- Corrente máxima rms

$$I_{th} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=50} I_n^2}$$

Onde, I_n = corrente harmônica de ordem n através do elemento

- Tensão máxima para determinação da distância de escoamento do capacitor de alta tensão

$$U_{creepage, DC} = \sqrt{U_{DCmax}^2 + \sum_{N=1}^{50} U_N^2}$$

Onde,

U_{DCmax} = máxima tensão CC contínua

U_n = tensão harmônica de ordem n aplicada ao capacitor

- Tensão máxima para determinação da distância de escoamento do capacitor de barra de neutro

$$U_{creepage, DC} = \sqrt{U_{DCneutral,max}^2 + \sum_{N=1}^{50} U_N^2}$$

Onde,

$U_{DCneutral,max}$ = máxima tensão CC contínua na barra de neutro

U_n = tensão harmônica de ordem n aplicada ao capacitor

- Tensão máxima para determinação da distância de escoamento

$$U_{creep} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=50} U_n^2}$$

Os cálculos deverão ser feitos levando-se em conta as variações e combinações dos seguintes dados e premissas:

- Regra geral: os filtros deverão ser dimensionados de maneira que não haja desligamentos por sobrecarga, mesmo em caso de operação com indisponibilidade de qualquer um dos elementos, pertencente a qualquer das estações conversoras.

- Apesar das correntes harmônicas já terem sido uma vez calculadas em 4.3.2.5, elas precisam ser refeitas, ampliando-se, quando possível:

- . Todos os modos de operação e configurações de operação definidos no instrumento técnico de outorga, incluindo sobrecarga, se definido para o empreendimento.

. Além das variações extremas da tensão, deverá ser considerado um desbalanço de tensão do sistema CA considerando a componente de sequência negativa superior ao valor estabelecido para o cálculo de desempenho dos filtros, conforme estabelecido no instrumento técnico de outorga. Em caso de ausência dessa informação, utilizar o valor de 2%.

. Deverão ser aplicadas as variações extremas de excursão das frequências em cada estação conversora.

- O modelo apresentado em 4.3.2.7 deverá ser novamente utilizado, com as correntes obtidas do tópico anterior.

b) Regime transitório

De forma geral, as principais grandezas a serem avaliadas são:

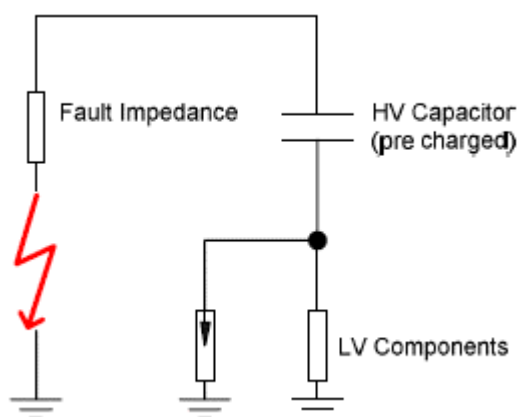
- Tensões e correntes nos elementos C, L e R
- Energia nos elementos R
- Tensões, correntes e energia nos para-raios

Os cálculos deverão ser feitos levando-se em conta as variações e combinações dos seguintes dados e premissas:

b.1) Faltas monofásicas na barra da estação conversora

Aplicar falta monofásica na barra CC próxima ao capacitor de alta tensão, com esse capacitor sendo carregado até o nível de proteção associado ao para-raios desta barra. Poderá ser incluída uma impedância de falta para representar a falta propriamente dita acrescida das indutâncias do barramento até a falta e da indutância do próprio capacitor.

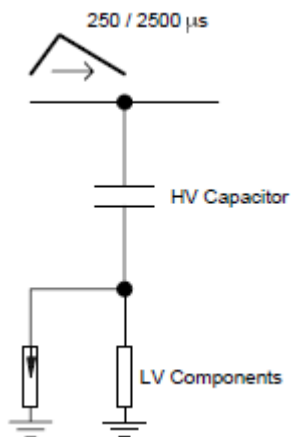
O modelo normalmente empregado nesse tipo de estudo está mostrado na figura abaixo. Normalmente utiliza-se modelos de alta frequência para os componentes simulados, incluindo barramentos.



b.2) Surtos de manobra na barra da estação conversora

Aplicar uma onda padrão de 250/2500 μ s com uma amplitude definida pelo nível de proteção associado ao para-raios desta barra na extremidade do filtro.

O modelo normalmente empregado nesse tipo de estudo está mostrado na figura abaixo.



O relatório desse estudo deverá conter as seguintes informações:

- Tensões e correntes nos elementos C, L e R
- Energia nos elementos R
- Tensões, correntes e energia nos para-raios
- Níveis de proteção e isolamento dos filtros

4.3.2.9. Estudo de Sobretensões Transitórias no Lado de Corrente Contínua

Este estudo tem por finalidade identificar as máximas sobretensões no lado CC da estação conversora e também no lado da válvula do transformador conversor, bem como estabelecer as máximas energias absorvidas pelos para-raios de válvula e pelos demais para-raios, dependendo da escolha do esquema de proteção por para-raios feito no projeto. Os resultados servirão como dados de entrada para a especificação desses para-raios, bem como confirmar os valores pré-definidos nos estudos do relatório 4.3.2.4.

Os principais pontos a serem analisados neste estudo estão descritos abaixo:

- a) Falta para terra entre o transformador conversor Yy e a válvula operando como retificador
- Destaque: para-raios de válvula e para-raios na barra de neutro

O tempo de atuação dos disjuntores CA determinará o patamar de energia nos para-raios.

- b) Falta para terra entre a válvula e o reator de alisamento

Destaque: para-raios na barra de neutro

O tempo de atuação dos disjuntores CA determinará o patamar de energia nos para-raios.

- c) Aplicação e limpeza de faltas trifásicas nas imediações ou mesmo na barra da estação conversora

Destaque: para-raios na barra CC e para-raios na casa de válvula

Os para-raios de válvula já foram avaliados em 4.3.2.10.

- d) Aplicação e limpeza de faltas monofásicas nas imediações ou mesmo na barra da estação conversora

Destaque: para-raios na barra CC, para-raios na casa de válvula e para-raios na barra de neutro

Os para-raios de válvula já foram avaliados em 4.3.2.10.

- e) Falta para terra na linha CC

Destaque: para-raios na barra de neutro e para-raios na barra CC

Observa-se que os para-raios na barra CC a serem analisados são os elementos do polo oposto à falta.

Deverá ser considerado o número de tentativas de restabelecimento da tensão CC no cálculo final da energia.

- f) Descargas atmosféricas atingindo a linha CC ou a linha do eletrodo

Destaque: para-raios na barra CC e para-raios do reator de alisamento ou para-raios na barra de neutro

Observa-se que os para-raios na barra de neutro deverão ser também analisados para a configuração de operação monopolar com retorno metálico, caso disponível.

Além disso, falhas de blindagem deverão ser consideradas e o valor máximo adotado, a partir do qual há o funcionamento da blindagem, deverá ser informado e utilizado na coordenação do isolamento da estação conversora.

- g) Outras análises a serem realizadas

- g.1) Falha de comutação por falta monofásica no inversor

Destaque: para-raios na barra de neutro

- g.2) Perda do caminho de retorno (linha do eletrodo ou linha CC) durante operação monopolar com retorno pela terra ou durante operação monopolar com retorno metálico, respectivamente

Destaque: para-raios na barra de neutro

- g.3) Abertura da última linha CA no inversor

Destaque: para-raios do lado CA, para-raios na barra CC e para-raios na casa de válvula

- g.4) Partida de retificar com o lado inversor aberto

Destaque: para-raios na barra CC e para-raios na casa de válvula

- g.5) Solicitações de frente íngreme nos para-raios de válvula

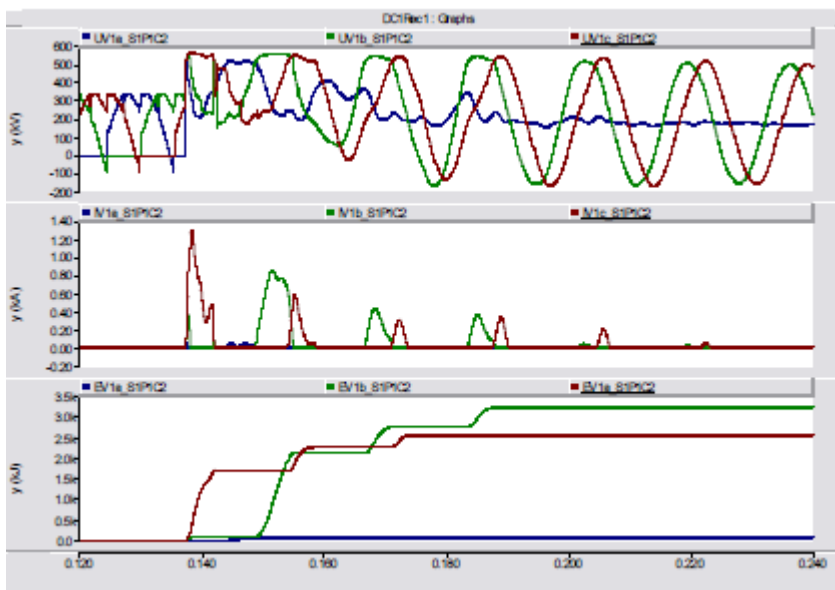
Destaque: para-raios de válvula

Os cálculos deverão considerar, dependendo do tipo de falta aplicada e para-raios sob análise, as combinações das seguintes variáveis:

- Configuração de operação
- Valor da tensão CC
- Valor da corrente CC
- Valor da tensão CA
- Valor da potência de curto-circuito
- Quantidade de filtros CA conectados
- Utilização das máximas faixas dos tapes dos transformadores conversores
- Atuação do controle das conversoras durante a aplicação das faltas
- Normalmente utiliza-se a característica máxima dos para-raios em análise para a determinação do maior valor de sobretensão e depois o pior caso é feito para a obtenção das máximas correntes e energias.

Deve-se utilizar o programa PSCAD para os casos que envolvam os controles das conversoras e os programas PSCAD ou ATP para as simulações de eventos de descargas atmosféricas.

Deverão ser apresentadas tabelas com a lista dos casos simulados e respectivos resultados. Os gráficos representativos dos casos que apresentaram as maiores solicitações deverão ser apresentados. Como exemplo de gráfico, está apresentado na figura abaixo um resultado para uma falta entre o transformador conversor e a válvula no para-raios de válvula, com tensão, corrente e energia.



4.3.2.10. Estudo de Sobretensões Transitórias no Lado de Corrente Alternada

Este estudo tem por finalidade identificar as máximas sobretensões no lado CA da estação conversora e também no lado da válvula do transformador conversor, bem estabelecer as máximas energias absorvidas pelos para-raios do lado CA e para-raios de válvula, principalmente, e pelos demais para-raios existentes conectados no lado da válvula do transformador conversor, dependendo da escolha do esquema de proteção por para-raios feito no projeto. Os resultados servirão como dados de entrada para a especificação desses para-raios, bem como confirmar os valores pré-definidos nos estudos do relatório 4.3.2.4.

Os principais pontos a serem analisados neste estudo estão descritos abaixo:

- Aplicação e limpeza de faltas nas imediações ou mesmo na barra da estação conversora;
- Faltas monofásicas e trifásicas;
- Operação da estação como retificadora ou como inversora.

Os cálculos deverão considerar:

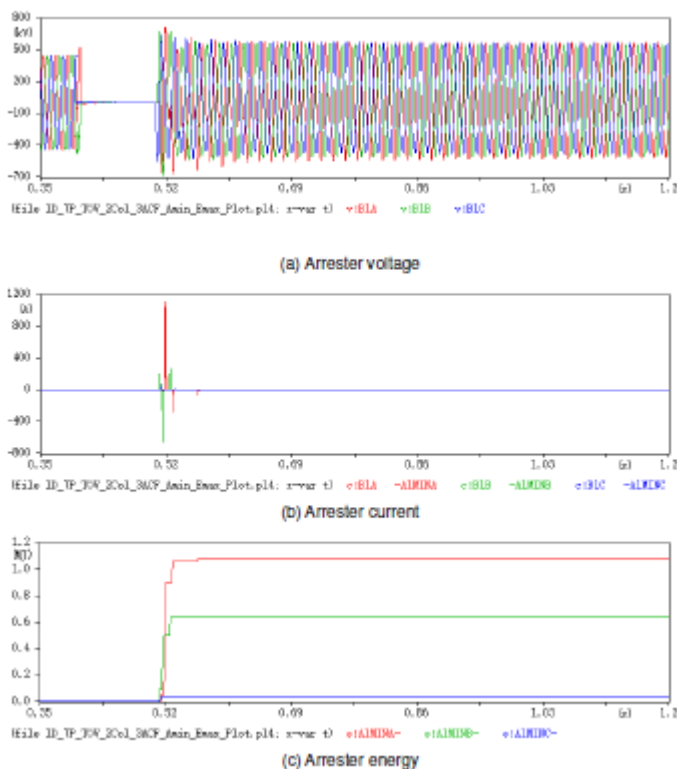
- O elo deverá ser representado em detalhes, considerando os filtros CA, os transformadores conversores, as válvulas e os para-raios A, V e T (se necessário), conforme figura do item 4.3.2.4;
- Os controles do elo deverão ser simplificados, já que serão apenas necessários na inicialização até a aplicação da falta, quando a conversora será bloqueada. Deve ser assumido que haverá uma falha de controle, após a limpeza da falta, sendo enviada uma ordem para o bloqueio da conversora em falta em ambos os polos, operando como retificadora sem o acionamento do by-pass pair ou ainda no inversor com o acionamento do by-pass pair. Em todos os casos, tanto os filtros CA como os transformadores

conversores permanecerão conectados durante toda a simulação. Apesar de ser uma situação conservadora, ela é dimensionante para os para-raios;

- Mínima potência de curto-circuito em ambos os lados das estações conversoras;
- Máxima potência transmitida pelo elo. Normalmente não é necessário dimensionar para a situação de operação com sobrecarga. Entretanto, sugere-se avaliar tal situação e verificar se existe tal requisito nos instrumentos de outorga do projeto;
- Máximo número de filtros conectados;
- Máxima tensão CC;
- Representação da rede CA com detalhes;
- Máxima tensão CA.
- Complementarmente, a posição do tape do transformador conversor deverá ser ajustado para a menor posição (mínimo tape) possível.

É possível utilizar o programa PSCAD. Entretanto, recomenda-se a utilização do programa ATP para as simulações já que, embora haja no PSCAD a opção “Multiple Run”, a opção “Statistical Switch” no ATP permite uma maior flexibilidade para o tipo de evento a ser simulado.

Deverão ser apresentadas tabelas com a lista dos casos simulados e respectivos resultados. Os gráficos representativos dos casos que apresentaram as maiores solicitações deverão ser apresentados. Como exemplo de gráfico, está apresentado na figura abaixo um resultado para uma falta trifásica.



4.3.2.11. Estudo de Perdas – Dimensionamento Preliminar

Este estudo tem por finalidade avaliar a aderência da estimativa das perdas com os limites definidos para cada estação conversora.

Esse estudo apresenta duas fases:

- Fase inicial: o fornecedor do projeto deverá, a partir da metodologia definida pela IEC 61803, calcular os valores máximos de perdas estimados nesta etapa;
- Fase intermediária: o fornecedor, após a concepção do seu projeto e de posse de teste de fábrica dos seus diversos componentes, revalidar a sua estimativa inicial;
- Fase final: o fornecedor, após os seus testes de comissionamento, deverá finalizar o seu levantamento de perdas, incluindo medições de se fizerem necessárias, principalmente validando as perdas envolvidas na alimentação dos serviços auxiliares na potência nominal de cada estação conversora.

O relatório desse estudo deverá conter:

- Planilha de cálculo com o detalhamento das perdas estimadas ou calculadas, dependendo da fase em análise, para cada componente incluído na avaliação.
- Os cálculos deverão tomar por base a temperatura máxima definida pelo Anexo Técnico ou pelo Instrumento Técnico de Outorga. Na falta desta definição, o fornecedor deverá utilizar a temperatura média das máximas anuais da região onde as conversoras serão instaladas obtida por meio de institutos renomados nesta área de pesquisa.

Segue exemplo de tabela para apresentação dos resultados extraída de [6.19].

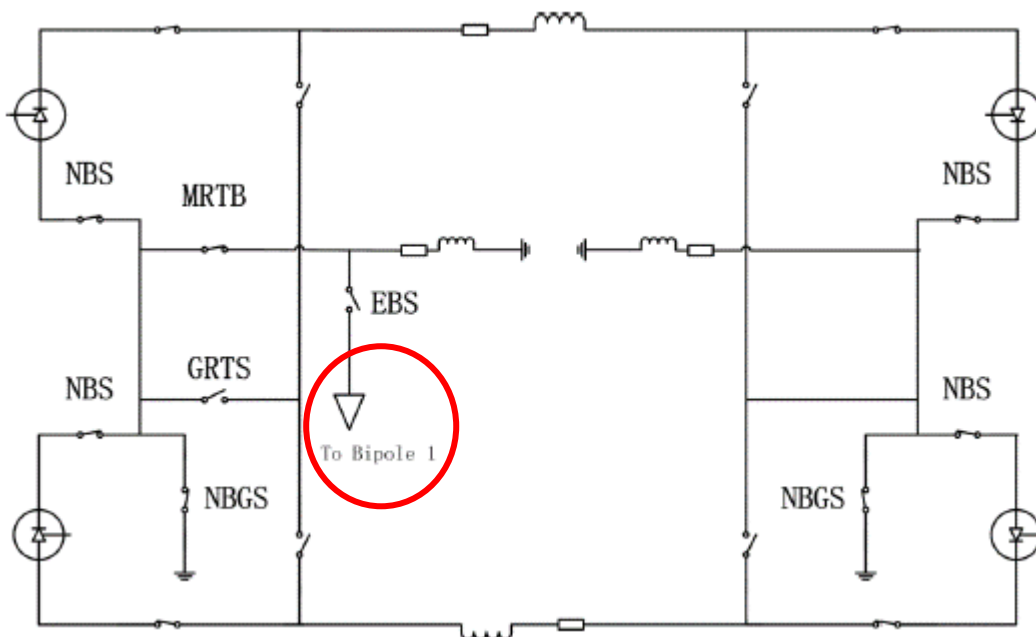
| No-Load and Total Losses | | no-load | 10% | 25% | 50% | 75% | 100% |
|---|-------------|---------|-----|-----|-----|-----|------|
| Valves and Associated Equipment: | | | | | | | |
| Thyristor Valves | [kW] | | | | | | |
| Cooling/Control | [kW] | | | | | | |
| Converter Transformer: | | | | | | | |
| Magnetizing Losses | [kW] | | | | | | |
| Current Losses (incl. harm. loss) | [kW] | | | | | | |
| Auxiliary Losses | [kW] | | | | | | |
| AC Filters: | | | | | | | |
| Fundamental Losses | [kW] | | | | | | |
| Harmonic Losses | [kW] | | | | | | |
| Shunt Capacitors: | | | | | | | |
| Fundamental Losses | [kW] | | | | | | |
| Harmonic Losses | [kW] | | | | | | |
| Shunt Reactors: | | | | | | | |
| Fundamental Losses | [kW] | | | | | | |
| Harmonic Losses | [kW] | | | | | | |
| DC Smoothing Reactors: | | | | | | | |
| Current Losses (incl. harm. loss) | [kW] | | | | | | |
| Auxiliary Losses | [kW] | | | | | | |
| DC Filters: | | | | | | | |
| DC Losses | [kW] | | | | | | |
| Harmonic Losses | [kW] | | | | | | |
| Station Service: | | | | | | | |
| Aux. Transformer Standby Losses | [kW] | | | | | | |
| Aux. Transformer Load Losses | [kW] | | | | | | |
| Air Conditioning | [kW] | | | | | | |
| Other Equipment | [kW] | | | | | | |
| RI / PLC Equipment: | | | | | | | |
| AC PLC Filters | [kW] | | | | | | |
| DC PLC Filters | [kW] | | | | | | |
| | | | | | | | |
| Total (Converter) | [kW] | | | | | | |

4.3.2.12. Dimensionamento das Chaves em Corrente Contínua: MRTB, GRTS, NGBS e NBS

De uma maneira geral, elos de corrente contínua necessitam de chaves para permitir trocas entre configurações de operação, bem como garantir isolamento e continuidade de operação para determinadas situações de perda de elementos.

Deve ser observado que essas chaves são, realidade, disjuntores com elementos em paralelo que produzem circuitos oscilatórios, e elementos de proteção de sobretensões que são para-raios. Elas não interrompem a corrente e sim a comutam para algum outro circuito.

Uma configuração típica de utilização dessas chaves está apresentada na figura abaixo para uma estação conversora operando como retificador, para a situação de existência de uma subestação compartilhando dois bipolos.



Essas chaves são identificadas pelas seguintes descrições:

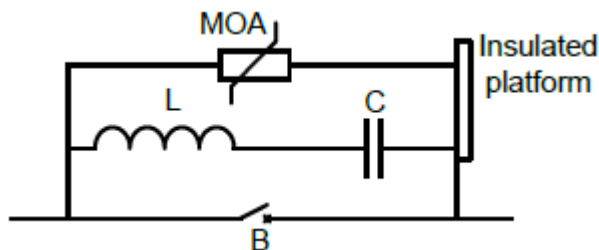
- MRTB: Metallic Return Transfer Breaker
- GRTS: Ground Return Transfer Switch
- NBGS: Neutral Bus Grounding Switch
- NBS: Neutral Bus Switch
- EBS: Electrode Bus Switch

Suas funções são:

- MRTB: instalada em série com a linha do eletrodo, essa chave comuta a corrente contínua circulando pela linha do eletrodo para o retorno metálico (polo disponível da linha de corrente contínua);
- GRTS: instalada entre a linha do eletrodo e a linha de corrente contínua, essa chave comuta a corrente do retorno metálico para a linha do eletrodo;
- NBGS: instalada entre a barra de neutro e a malha de terra, essa chave comuta a corrente de desbalanço, no caso de operação bipolar, para um evento de perda do eletrodo ou da linha do eletrodo, para a malha de terra da estação conversora. Após o retorno do eletrodo ou da linha do eletrodo, essa chave deverá abrir para permitir o retorno do caminho da corrente da malha de terra para o eletrodo/linha do eletrodo;
- NBS: instalada entre a barra de neutro e a válvula, essa chave isola a conversora e também impede que um polo não alimente uma falta para a terra em caso de bloqueio do polo em falta com a utilização de by-pass pair.
- EBS: instalada entre as barras de neutro de dois bipolos que compartilham uma mesma subestação conversora, essa chave permite a utilização comum de linhas do eletrodo, em caso de perda de uma das linhas do eletrodo ou mesmo do eletrodo de um dos bipolos. Pode desconectar o bipolo, em falta, que está momentaneamente usando a linha do eletrodo do bipolo são, mas normalmente não tem

capacidade de abrir para corrente de curto-circuitos. Essa chave não é normalmente solicitada em Anexos Técnicos.

Essas chaves são geralmente definidas pelos seguintes componentes:



onde,

L= representa o reator

C= representa o capacitor

MOA= representa o para-raios ZNO

B= representa o disjuntor específico para corrente alternada, normalmente em SF6

sendo que esses componentes ficam posicionados em uma plataforma elevada.

O relatório deverá apresentar os parâmetros usados na modelagem do elo de corrente contínua, com ênfase na modelagem da linha CC e da linha do eletrodo, descrevendo as configurações possíveis de operação. A operação em sobrecarga deve ser utilizada para saber a corrente máxima passante, mas não deverá ser utilizada para a corrente de comutação já que a troca de configuração com sobrecarga não é normalmente realizada.

Os resultados deverão descrever:

- Os parâmetros L e C obtidos
- O para-raios utilizado
- As correntes e tensões de comutação.

e esses resultados, além de tabelas, deverão ser apresentados também em forma de gráficos.

Um elemento de suma importância na modelagem é a representação do arco, que inicia todo o processo oscilatório, contando com os elementos L e C. Esse modelo deverá ser apresentado no relatório. Entretanto, por ser um equipamento de alta tecnologia, alguns fabricantes, declarando propriedade intelectual, não apresentam tal modelo. Neste caso, tal diretriz deverá estar claramente explicitada no documento.

Recomenda-se a utilização do programa ATP para as simulações.

Como exemplo de gráfico, está apresentado abaixo um resultado para a comutação bem-sucedida de uma configuração de retorno pela terra para retorno metálico.



4.3.2.13. Estudo de Dimensionamento dos Reatores de Alisamento

Este estudo tem por finalidade avaliar um tamanho indicativo do reator de alisamento. Os principais critérios a serem observados são:

- Evitar descontinuidade na corrente CC em baixas correntes
- Minimizar as amplitudes das correntes harmônicas, notadamente de 12º harmônico, geradas pela conversora fluindo pela linha CC
- Evitar ressonâncias na frequência fundamental e também de segundo harmônico (objeto de 4.3.2.14)
- Proporcionar proteção contra descargas atmosféricas provenientes da linha CC (objeto de 4.3.2.9)
- Limitar correntes de descargas da linha CC no caso de curto-circuitos na conversora (objeto de 4.3.2.3)
- Limitar correntes provenientes da conversora no caso de faltas nas proximidades da linha CC (objeto de 4.3.2.3).

Como regra geral, o tamanho final do reator de alisamento faz parte da otimização integrada desse componente com o dimensionamento do filtro CC para atendimento aos critérios de desempenho harmônico aplicado ao lado CC.

Os cálculos deverão ser feitos levando-se em conta as variações e combinações dos seguintes dados e premissas:

- Determinação do valor mínimo da indutância necessária para a obtenção da amplitude da corrente de 12º harmônico correspondente a um percentual de corrente mínima (típico 10%)

$$L_d = \frac{U_{12}}{12 \cdot \omega \cdot I_{12}}$$

- Determinação do valor mínimo da indutância para evitar descontinuidade na corrente CC em baixas correntes

$$L_d = \frac{U_{d0}}{\omega \cdot I_{d \min}} 0.023 \sin \alpha_{\max}$$

ou

$$L_{dR} = \frac{2 \cdot U_{dioNR}}{\omega I_{d \min}} (0.0234 \sin(\alpha))$$

Onde,

U_{d0} é a tensão ideal máxima CC sem queda de tensão causada pela comutação.

U_{di0} é a tensão em vazio ideal no retificador por ponte de seis pulsos

Levando-se em conta que a escolha de um valor elevado para o reator de alisamento proporciona ganhos em termos de minimização de correntes harmônicas e falhas de comutação, por outro lado, valores elevados impactarão em desempenho deteriorado durante recuperação de faltas.

O relatório deverá apresentar todas as considerações acima com a definição preliminar do reator de alisamento.

Assim, após as análises de desempenho dinâmico (4.3.4.1), os valores inicialmente estimados para os reatores de alisamento poderão ser confirmados.

4.3.2.14. Estudo de Ressonâncias CA-CC em Baixa Ordem

Tensões de segundo harmônico aparecerão intrinsecamente no lado CC em sistemas CCAT quando faltas assimétricas são aplicadas no lado CA (caso 1). Tensões de frequência fundamental poderão ser induzidas em sistemas CCAT caso linhas de transmissão em corrente alternada coexistirem em paralelo com as linhas CC (caso 2). Tensões de segundo harmônico existentes no sistema CA (background) poderão se transformar em tensões de frequência fundamental no lado CC (caso 3).

Todos os fenômenos descritos acima, casos 1-3, são danosos para sistemas CCAT, caso haja ressonâncias na frequência fundamental e no segundo harmônico. O primeiro caso, mais crítico, pode trazer sobretensões e atuações indevidas de proteção, entre outros, enquanto que o segundo e terceiro casos podem impactar em corrente contínua circulando pelos enrolamentos do transformador conversor, podendo levar a sua saturação, causando elevação de temperatura, aumento do nível de ruído e outras adversidades.

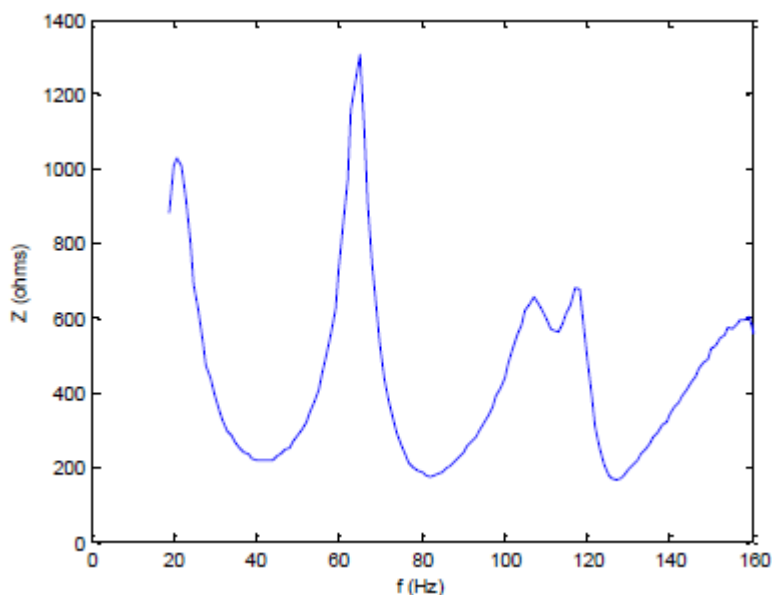
Este estudo tem por finalidade avaliar as respostas em frequência do sistema CCAT, basicamente composto de reator de alisamento e linha CC e posteriormente com a inclusão dos filtros CC, para todas as configurações de operação e variações intrínsecas de parâmetros, de maneira a definir a necessidade ou não da inclusão de filtros CC de segundo harmônico e filtro de bloqueio na barra de neutro.

Os principais pontos a serem analisados neste estudo estão descritos abaixo:

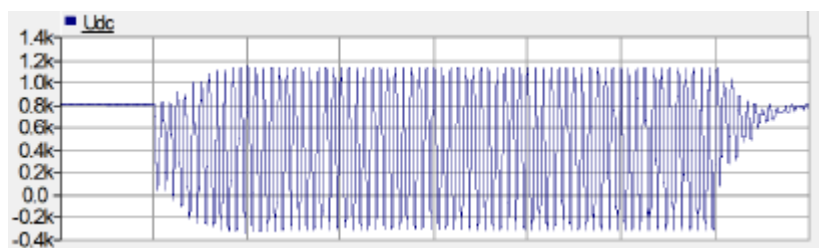
a) Caso 1

- Todas as configurações de operação definidas para o empreendimento
- Variações nos comprimentos da linha CC
- Variações nos comprimentos das linhas do eletrodo
- Variações na potência de curto-circuito dos sistemas CA acoplados
- Variações na quantidade de filtros CA conectados
- Aplicar faltas monofásicas e bifásicas na barra da conversora e nas linhas nas imediações da estação conversora para levantamento das sobretensões associadas no lado CC

Como exemplo de varredura de frequência, é apresentada a curva na figura abaixo.



Como exemplo das possíveis sobretensões no lado CC, é apresentada a curva na figura abaixo, para uma falta bifásica aplicada por 600 ms, durante operação monopolar com retorno pela terra.



O programa PSCAD poderá ser utilizado.

Assim, dependendo da possibilidade de ressonância na frequência de segundo harmônico, aliada às sobretensões decorrentes da aplicação de faltas, haverá a necessidade de colocação de filtros.

b) Caso 2

A partir do valor para o percentual de corrente induzida na linha CC a partir do levantamento das linhas de transmissão correndo em paralelo com a linha CC, formulações algébricas podem ser aplicadas para definir o percentual de corrente contínua no transformador conversor.

Caso esse percentual não esteja compatível com o percentual especificado para o transformador conversor, haverá a necessidade de colocação de um filtro de bloqueio de frequência fundamental.

c) Caso 3

A partir do valor para o percentual da tensão de segundo harmônico (background) estipulada no relatório 4.3.2.5, formulações algébricas podem ser aplicadas para definir o percentual de corrente contínua no transformador conversor.

Caso esse percentual não esteja compatível com o percentual especificado para o transformador conversor, haverá a necessidade de colocação de um filtro de bloqueio de frequência fundamental.

Assim, o relatório deverá apresentar todas as considerações acima, com as curvas obtidas das simulações, bem como das formulações algébricas utilizadas para os cálculos, finalizando com a conclusão sobre a necessidade ou não de inclusão de filtros CC de segundo harmônico e filtros de

bloqueio de frequência fundamental, normalmente localizados na barra de neutro, com a descrição dos seus componentes e sua eficácia quando da instalação no empreendimento.

4.3.2.15. Estudo de Ruído Audível e Interferência em Telecomunicação

O processo de comutação das válvulas, quando a tensão aplicada é abruptamente zerada pelo sistema de disparo, produz ondas que podem ser traduzidas em ruído, tanto conduzido, como irradiado. A blindagem da casa de válvulas normalmente atua de sobremaneira esses ruídos irradiados, mas ruídos conduzidos deverão ser atenuados, já que causarão interferência em sistema de comunicação que utilizam sistemas PLC (Power Line Carrier) e também em sistemas de rádio.

Além disso, o porte das estações conversoras, com transformadores, reatores de alisamento, filtros tanto CA como CC e sistemas de resfriamento é uma fonte expressiva de ruído audível.

O relatório deverá apresentar as premissas, a metodologia de cálculo, os resultados obtidos bem como definir claramente as medidas necessárias no sentido de mitigar os efeitos dessas interferências.

Esse estudo pode ser dividido em duas áreas:

- a) Determinação das interferências produzidas pelo processo de comutação e cálculo de filtros necessários para a redução das interferências em sistemas PLC e rádio;

Essa avaliação deverá ser feita tanto no lado CA como no lado CC das estações conversoras. A apresentação das curvas das fontes de interferências, os resultados das interferências calculadas com e sem os filtros propostos e o rating dos filtros propostos deverão ser apresentados.

Considerações sobre interferências em sistemas de navegação aérea, UHF e VHF incluindo TVI e ondas curtas deverão também ser feitas.

- b) Cálculo do ruído audível provocada pelas estações conversores, utilizando como limites valores apresentados no instrumento técnico de outorga.

Essa avaliação deverá ser feita com os valores de ruído produzidos pelos diversos equipamentos das estações conversoras obtidos de testes de fábrica ou de projetos similares. Nesse último caso, esses valores deverão ser substituídos assim que os testes forem realizados. Não serão aceitos valores obtidos de forma geral na literatura, tipo Cigre ou similar.

Deverão ser providenciadas representações tridimensionais do diagrama unifilar das estações conversoras, com identificação dos componentes e localização geográfica. Deverão ser apresentados os valores obtidos de ruído, dentro e fora das subestações, com a localização explícita da cerca da propriedade.

O relatório deverá apresentar as premissas, a metodologia de cálculo, os resultados obtidos bem como definir claramente as medidas necessárias no sentido de mitigar os efeitos dessas interferências.

4.3.2.16. Estudo de Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) no Pátio em Corrente Alternada

Esse estudo pode ser dividido em duas áreas:

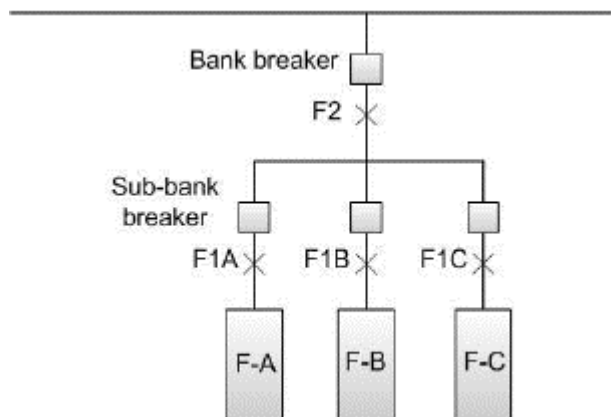
- c) disjuntores no pátio CA

Ver item 4.2.14 para recomendações de ordem geral.

- d) disjuntores dos bancos e sub-bancos de filtros

No caso dos disjuntores dos bancos e sub-bancos de filtros, além das solicitações advindas de faltas, quer sejam internas ou externas, avaliações das correntes de energização também devem ser feitas. A utilização, nesses casos, de elementos sincronizadores, é normalmente necessária.

Para os casos de aplicação e limpeza de faltas internas aos filtros, os locais dessas faltas deverão seguir a recomendação mostrada, como exemplo, na figura abaixo.



Para ambos os equipamentos identificados em a) e b), para os casos de aplicação e limpeza de faltas externas, quer sejam monofásicas ou trifásicas, as premissas para a preparação dos casos deverão seguir as orientações contidas em 4.3.2.10.

4.3.2.17. Estudo de Energização dos Transformadores Conversores

Ver item 4.2.11 para recomendações de ordem geral.

Atenção deverá ser dada a particularidade de energização do primeiro transformador conversor em vazio ou do segundo transformador com o primeiro previamente energizado, levando em conta a representação ou não de elementos limitadores de sobretensão, considerando a presença de fluxo residual em conformidade com o valor informado pelo fabricante do transformador conversor.

Adicionalmente, deverá ser avaliada a condição de energização bipolar dos transformadores conversores durante a limpeza de falta no sistema CA, quando da aplicação de falta monofásica e trifásicas, quando os conversores são mantidos bloqueados, mas os transformadores permanecem conectados ao sistema CA. As sobretensões advindas desse processo de aplicação e limpeza de falta podem produzir consideráveis correntes de inrush nos transformadores.

4.3.2.18. Estudo de Filosofia, Atributos, Sequenciamento e Linhas Gerais de Atuação do Controle dos Conversores

Esse estudo deverá abranger essencialmente a concepção dos controles das estações conversoras.

Deverá considerar os requisitos definidos no instrumento técnico de outorga, bem como a experiência dos fabricantes dessas conversoras.

O processo é bastante interativo com o ONS, em função das características intrínsecas do processo de coordenação de operação do SIN. Assim, alterações e adaptações durante o desenvolvimento da solução são esperadas, bem como ajustes nos parâmetros (valores, ganhos, tempos) que poderão ser alterados em função de resultados de estudos de sistema.

De uma maneira geral, a estrutura para o controle deverá ser analisada e soluções propostas tomando por base preliminarmente, no mínimo, a itemização apresentada a seguir. Alguns nomes de função podem variar de fabricante para fabricante até mesmo a disposição de funções dentro de grupos de controle, mas o conceito da funcionalidade deverá ser observado.

- a) Controle de Bipolo
- Controle de potência do bipolo
 - Distribuição da potência ativa por bipolo ou polo para as configurações e modos de operação aplicáveis, incluindo possíveis modulações e balanço na corrente contínua entre polos
 - Controle de potência reativa
 - Conexão ou remoção de filtros ou bancos de capacitores para controle de balanço de potência reativa; tensão nominal, sobretensão ou subtensão; e desempenho harmônico e rating dos próprios filtros e bancos de capacitores
 - Controle de sequência do bipolo
 - Mudança de configurações de operação
- b) Controle de Polos
- Controle de corrente e potência do polo
 - Controle de sobrecarga
 - Controle de potência reversa
 - Controle de ordem de corrente
 - Controle do tap changer
 - Controle de sequência de partida e parada do polo
- c) Controle de Conversor
- Controle de corrente contínua
 - Controle de tensão contínua
 - Controle de ângulo
 - Controle de bloqueio e desbloqueio
 - Controle dos tiristores

Adicionalmente, nos casos específicos de operação conjunta de bipolos em uma mesma subestação, podendo ou não compartilhar a outra subestação terminal, com ou sem a presença de outros elementos CCAT, poderá ser necessário introduzir o conceito de um controle geral, neste caso comumente chamado de controle mestre. Neste caso, a filosofia de atuação, com seus principais princípios, deverá ser apresentada.

4.3.2.19. Estudo de Filosofia e Linhas Gerais de Dimensionamento dos Eletrodos de Terra

Cada bipolo deverá ser provido de eletrodos de terra para escoamento das correntes de retorno em operação monopolar e das correntes resultantes de condição operativa bipolar desbalanceada. O projeto do eletrodo deverá considerar todas as configurações de operação previstas para o bipolo e também a possibilidade de operação em sobrecarga, caso definido para o empreendimento.

A escolha do local de implantação do eletrodo de terra cabe à Transmissora, respeitando uma distância mínima para as estações conversoras de 15 km.

Além das condições elétricas de segurança previstas em normas aplicáveis para o local de implantação do eletrodo e áreas ao redor sob a sua influência, o projeto deverá observar que:

- A circulação de corrente contínua pelo neutro dos transformadores conversores, ou em transformadores de subestações vizinhas, não deverá provocar a saturação desses equipamentos;
- Existirá a possibilidade de operação em regime anódico ou catódico;
- A máxima densidade de corrente superficial deve ser menor que aquela que provoque migração de água por eletro-osmose;
- Nas condições ambientais e do solo mais desfavoráveis e na circulação de corrente máxima pela linha do eletrodo, no caso de operação monopolar com retorno pela terra, a elevação de temperatura dos eletrodos em relação ao ambiente não pode exceder a 60°C, desde que a temperatura final não seja superior a 100°C;
- Até a presente data, salvo em contrário no instrumento técnico de outorga, a resistência de aterramento deverá ser igual ou inferior a 0,35 Ω , com um subeletrodo fora de serviço.

De acordo com os últimos projetos de HVDC no país, tem-se adotada a seguinte organização geral para a elaboração desse tipo de projeto:

- Seleção do lugar de implantação e desenvolvimento do modelo geoeletrico do solo;
- Projeto básico e detalhado;
- Construção;
- Comissionamento e avaliação das possíveis interferências e ações mitigadoras

Deve ser enfatizado que todo o projeto deverá tomar por base medições locais de resistividade do solo superficial, por método de Wenner, por exemplo, e aferições da estrutura profunda deste mesmo solo por medições magneto-telúricas, tanto na estação seca, bem como na estação chuvosa, para que o modelo geoeletrico tenha consistência com as variações naturais de umidade do solo.

O relatório deverá conter todas as informações colhidas, desde a fase de levantamento de informações para a escolha do lugar de implantação com suas medições e resultados, passando pelo desenvolvimento do modelo geoeletrico, até chegar no projeto básico, com suas especificações, avaliações de influência, possíveis ações mitigadoras e comprovação do atendimento dos critérios durante a fase de projeto básico.

Conforme descrito em 4.3.5.2 e 4.3.6.5, as avaliações acima para atendimento aos requisitos definidos no instrumento técnico de outorga deverão ser comprovadas por meio de cálculos tomando como referência o projeto executivo e medições em campo, respectivamente.

4.3.3. Estudos Convencionais

Os estudos que são regularmente realizados para projetos CA são também realizados para projetos CCAT. Por isso, não há necessidade de reescrever aquilo que já foi apresentado anteriormente. Deve-se observar que, caso haja algum requisito adicional definido no instrumento técnico de outorga, as análises deverão comportar tal orientação. Além disso, devido ao elevado valor de potência transmitida nesses projetos, as análises deverão avaliar ou propor medidas mitigadoras para essas situações.

4.3.3.1. Estudo de Fluxo de Potência e Curto-Circuito na Rede CA

Ver itens 4.1.2 e 4.1.5. Deve ser observado que as análises de curto-circuito podem ser simplificadas, já que os projetos estritamente em corrente contínua não contribuem para uma elevação do nível pré-existente nas subestações terminais.

4.3.3.2. Estudo de Sobretensões e Estabilidade à Frequência Fundamental

Ver item 4.1.7.

4.3.3.3. Estudo de Fluxo de Potência em Barramentos

Ver item 4.1.9.

4.3.3.4. Estudo de Filosofia de Supervisão e Interfaces

Atender aos respectivos itens do Submódulo 2.12 dos Procedimentos de Rede, última revisão. Deve-se observar a existência de requisitos adicionais no instrumento técnico de outorga.

4.3.3.5. Estudo do Sistema de Telecomunicações

Atender aos respectivos itens do Submódulo 2.15 dos Procedimentos de Rede, última revisão. Deve-se observar a existência de requisitos adicionais no instrumento técnico de outorga.

4.3.3.6. Estudo de Filosofia de Controle e Proteção – Diagramas unifilares

Atender aos respectivos itens dos Submódulos 2.11 e 2.12 dos Procedimentos de Rede, última revisão. Deve-se observar a existência de requisitos adicionais no instrumento técnico de outorga.

4.3.3.7. Estudo de Filosofia de Serviços Auxiliares

Atender aos respectivos itens do Submódulo 2.6 dos Procedimentos de Rede, última revisão. Deve-se observar fortemente a existência de requisitos adicionais no instrumento técnico de outorga.

4.3.4. Estudos para Avaliação do Desempenho Dinâmico do Projeto

4.3.4.1. Estudo de Desempenho Dinâmico - DPS

Este estudo tem por finalidade avaliar a aderência do comportamento geral do projeto CCAT aos requisitos definidos no instrumento técnico de outorga, notadamente com foco na estabilidade do regime permanente e nos tempos definidos para recuperação da transmissão, diante de pequenas ou grandes perturbações, obtidos através do controle proposto associado às características dos equipamentos especificados no item 4.3.2.

As avaliações podem ser divididas em duas etapas distintas a saber:

- Etapa inicial: com base na topologia inicialmente definida, inicia-se a estabilidade do regime permanente e aplicam-se as perturbações e os defeitos clássicos. De posse dos tempos de

recuperação, avalia-se o desempenho dinâmico do projeto integrado ao sistema elétrico, com os controles ajustados de forma preliminar, com base na experiência do provedor da solução;

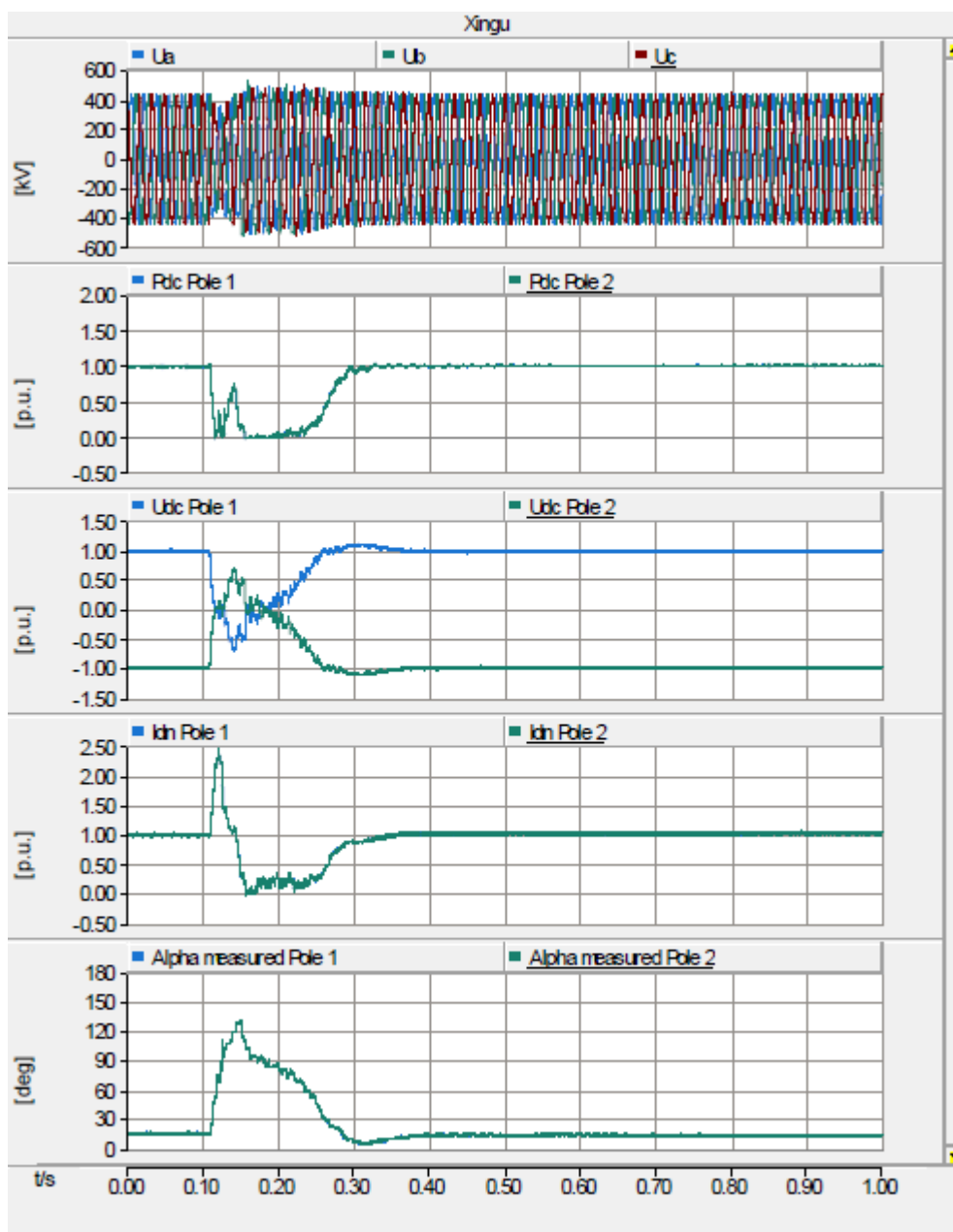
- Etapa final: com base na topologia final, inicia-se a estabilidade do regime permanente e aplicam-se as perturbações e os defeitos clássicos. De posse dos tempos de recuperação, avalia-se o desempenho dinâmico do projeto integrado ao sistema elétrico, completando os controles necessários com os ajustes específicos para o projeto em questão.

Essas avaliações são realizadas através do programa PSCAD e os principais eventos a serem investigados são:

- Todos os cenários disponíveis para o projeto proposto em função do planejamento
- Condições de multi-infeed, se existir
- Diferentes modelos de equivalentes de representação das redes CA em ambos os terminais, se disponíveis
- Degraus nas ordens de: corrente CC, tensão CC, potência CC, ângulo de extinção (γ)
- Aplicação e limpeza de faltas monofásica e trifásica, no lado CA, incluindo linhas e barras, com e sem sucesso no religamento
- Aplicação e limpeza de falta na linha CC
- Chaveamento de bancos de filtros CA
- Perda de polo
- Perda de bipolos operando nas proximidades, se existir
- Falhas de disparo no controle das conversoras
- Todos os modos e configurações de operação planejados para o projeto CCAT

Os resultados deverão ser apresentados em forma de tabelas, com os respectivos gráficos. Uma análise deverá ser feita, com as principais constatações dos casos processados, indicando os desvios em relação às principais orientações do instrumento técnico de outorga. Deverão também ser propostas medidas mitigadoras para satisfazer todas as premissas de projeto.

Segue exemplo de aplicação de falta monofásica no lado da estação inversora de um bipolo na figura abaixo.



4.3.5. Estudos para Comprovação de Premissas do Projeto e Avaliações Adicionais

Essa parte constitui-se na parte posterior à parte voltada para a definição dos componentes do projeto e o seu desempenho dinâmico.

4.3.5.1. Estudo de Oscilações Subsíncronas

Atender ao item 2.5.4.1.14 do Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede, última revisão. Deve-se observar a existência de requisitos adicionais no instrumento técnico de outorga.

4.3.5.2. Estudos de Avaliação das Malhas de Terra das Estações Conversoras e Eletrodos de Terra

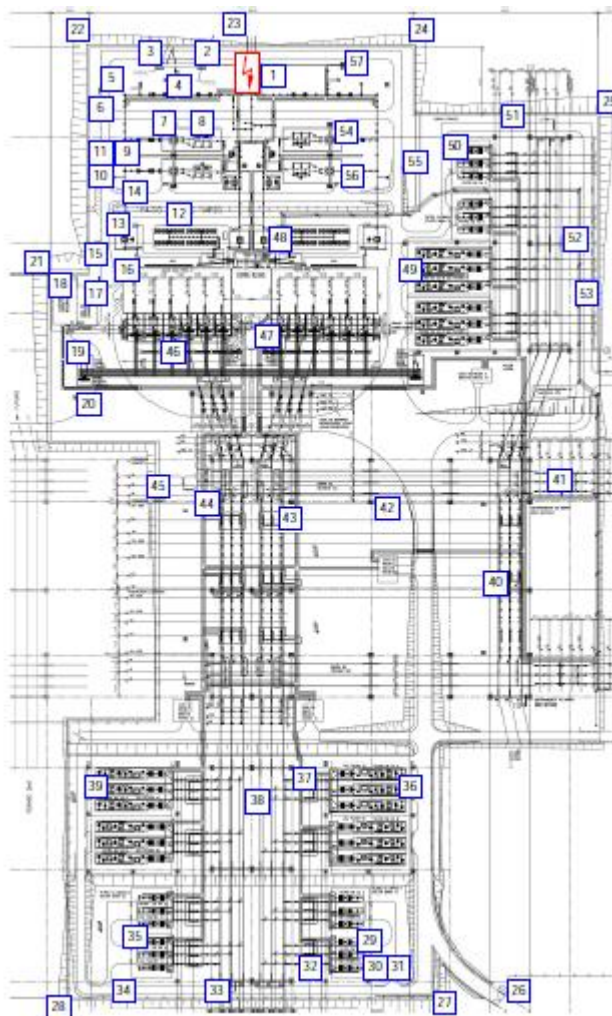
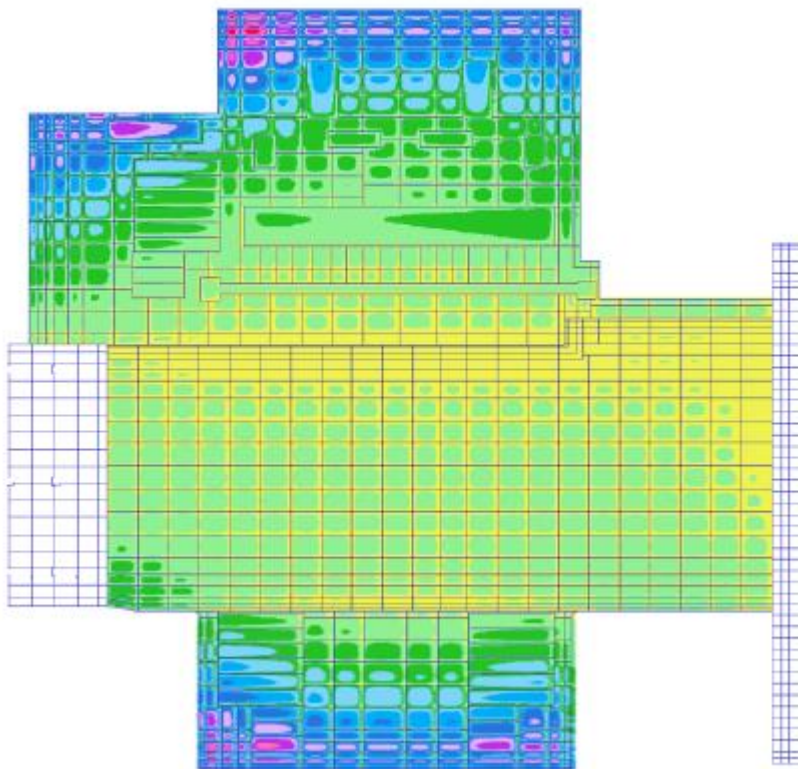
Esses estudos têm por finalidade demonstrar que não existirão problemas de gradientes de potencial, de tensões de passo e de toque, corrosão de estruturas metálicas, oleodutos, ferrovias, etc.

Instalações de alta tensão necessitam de sistemas de aterramento para proteção humana e de equipamentos contra valores excessivos de tensão de passo e de toque. Instalações com eletrodo de terra necessitam de avaliações para proteção humana e equipamentos contra valores excessivos de tensão de passo, para a proteção do próprio eletrodo contra elevação de temperatura no solo, densidade de corrente e tempo de vida útil e também para a proteção de subestações, tubulações e cercas enterradas nas proximidades.

Os estudos deverão levar em consideração, além das correntes de curto-circuito CA, em função dos níveis de curto-circuito definidos no instrumento técnico de outorga, para atendimento dos requisitos previstos nas normas aplicáveis, a injeção para a malha de terra existente nas subestações conversoras da corrente de desbalanço entre os polos para a condição de operação bipolar, no caso da perda da linha do eletrodo ou do eletrodo, já que nesta situação deverá haver a atuação do dispositivo NBGS, conforme descrito em 4.3.2.12. Além disso, correntes de sobrecarga nos eletrodos deverão ser consideradas.

De acordo com normas pertinentes, as avaliações poderão ser feitas via cálculos numéricos ou ainda por medições.

No caso das estações conversoras, as variáveis em estudo deverão ser apresentadas na forma do arranjo da subestação, com coordenadas geográficas e distâncias legíveis, com os valores em forma de distribuição geográficas ou pontos medidos, conforme mostrado nas figuras abaixo.



Modificações poderão ser necessárias nas subestações existentes, caso os valores encontrados excedam valores normatizados.

No caso dos eletrodos, os resultados poderão ser apresentados em forma de tabelas.

4.3.5.3. Estudos de Confiabilidade e Disponibilidade

A Transmissora deverá encaminhar um estudo de confiabilidade e disponibilidade, descrevendo as premissas de cálculo, a metodologia empregada, o programa utilizado e os resultados obtidos.

4.3.5.4. Estudo de Coordenação das Proteções

Tem por finalidade definir a coordenação das proteções CC e CA, bem como identificar as interações com os controles das conversoras.

Essas avaliações são normalmente realizadas durante a fase dos estudos para concepção do projeto e, normalmente, caso não haja alterações posteriores, esse estudo pode ser desconsiderado.

4.3.6. Medições

Essa parte constitui-se na parte de fechamento do projeto, durante a etapa de comissionamento, visando comprovar o atendimento a critérios e premissas utilizados durante as etapas antecedentes. As principais linhas de medição estão apresentadas abaixo, sem maiores detalhamentos, que deverão ser submetidas para aprovação antes do seu início. Caso justificado, algumas medições poderão ser descartadas. Um dos pilares para essas medições é a disponibilização de potência nominal, segundo normas aplicáveis.

4.3.6.1. Medições de Interferência em Sistemas de Comunicação por Onda Portadora (PLC)

4.3.6.2. Medições de Rádio-Interferência (RI) e de Ruído Audível

4.3.6.3. Medições de interferências TVI, microondas, VHF e UHF, incluindo sistemas de navegação aérea na proximidade de aeroportos

4.3.6.4. Medições de perda

Essas medições correspondem à fase final descrita no início do item 4.3.2.11.

4.3.6.5. Medições de eletrodo de terra

Essas medições servem para comprovar o atendimento aos valores máximos para a resistência do eletrodo de terra, conforme requisito estabelecido no instrumento técnico de outorga.

Essas medições deverão avaliar a existência de problemas de gradientes de potencial, de tensões de passo e de toque, corrosão de estruturas metálicas, oleodutos, ferrovias, etc.

Deverão também identificar a possibilidade de existência de corrente contínua circulando pelo neutro dos transformadores conversores ou transformadores de concessionárias. Os estudos decorrentes dessas medições deverão indicar, se for o caso, as soluções necessárias para mitigar este problema, tais como, por exemplo, a necessidade de utilização de isolamento galvânico no neutro do transformador ou mesmo a alteração da execução do eletrodo de terra.

4.3.7. Modelos de HVDC para Estudos Elétricos

Diversos modelos dos elos de corrente contínua podem ser elaborados para atender aos estudos elétricos, onde a rede modelada englobe barras onde elos estão conectados. Esses modelos serão adaptados para os fenômenos envolvidos, onde o fator frequência e tempo de simulação são determinantes.

Fenômenos típicos de 60 Hz possuem, normalmente, uma modelagem tradicional, com filtros sendo representados por simples bancos de capacitores e modelos nativos ou fornecidos pelos próprios fabricantes, normalmente utilizando o programa ANATEM.

Fenômenos que envolvam o comportamento dinâmico do elo possuem modelagem minuciosa e detalhada dos componentes e seus controles, normalmente apresentados em modelos utilizando o programa PSCAD.

No caso de transitórios eletromagnéticos, com fenômenos da ordem de dezenas ou poucas centenas de microssegundos, utilizando-se o programa ATP, com foco na rede CA, a modelagem do elo pode ser simplificada, já que o comportamento da conversora terá poucas alterações significantes para as análises nesse intervalo de tempo.

Nesses casos, sugere-se adotar a estação conversora simulada como uma fonte de corrente, conectada na barra CA, entrando ou saindo, dependendo do tipo de operação, com o número de filtros conectados, de acordo com o despacho utilizado na simulação.

Como são muitas as possibilidades de combinação de despacho e quantidade de filtros conectados, e como há vários projetos atualmente em operação no SIN, demandando uma lista muito grande de situações, solicita-se à Transmissora entrar em contato prévio com o ONS para a obtenção de tais considerações, caso necessário, antes do início dos estudos.

5. Diretrizes para a Especificação da Instalação/Equipamentos

5.1. Aspectos Gerais

Como diretriz principal para a especificação da instalação e dos equipamentos, deve-se considerar que estes serão conectados ao sistema existente; portanto, não devem comprometer ou limitar a operação das subestações nem impor restrições operativas às demais instalações do SIN.

A especificação da instalação e dos equipamentos deve abranger todos os componentes do empreendimento conforme relacionados no anexo técnico do Edital de Leilão ou na Resolução Autorizativa.

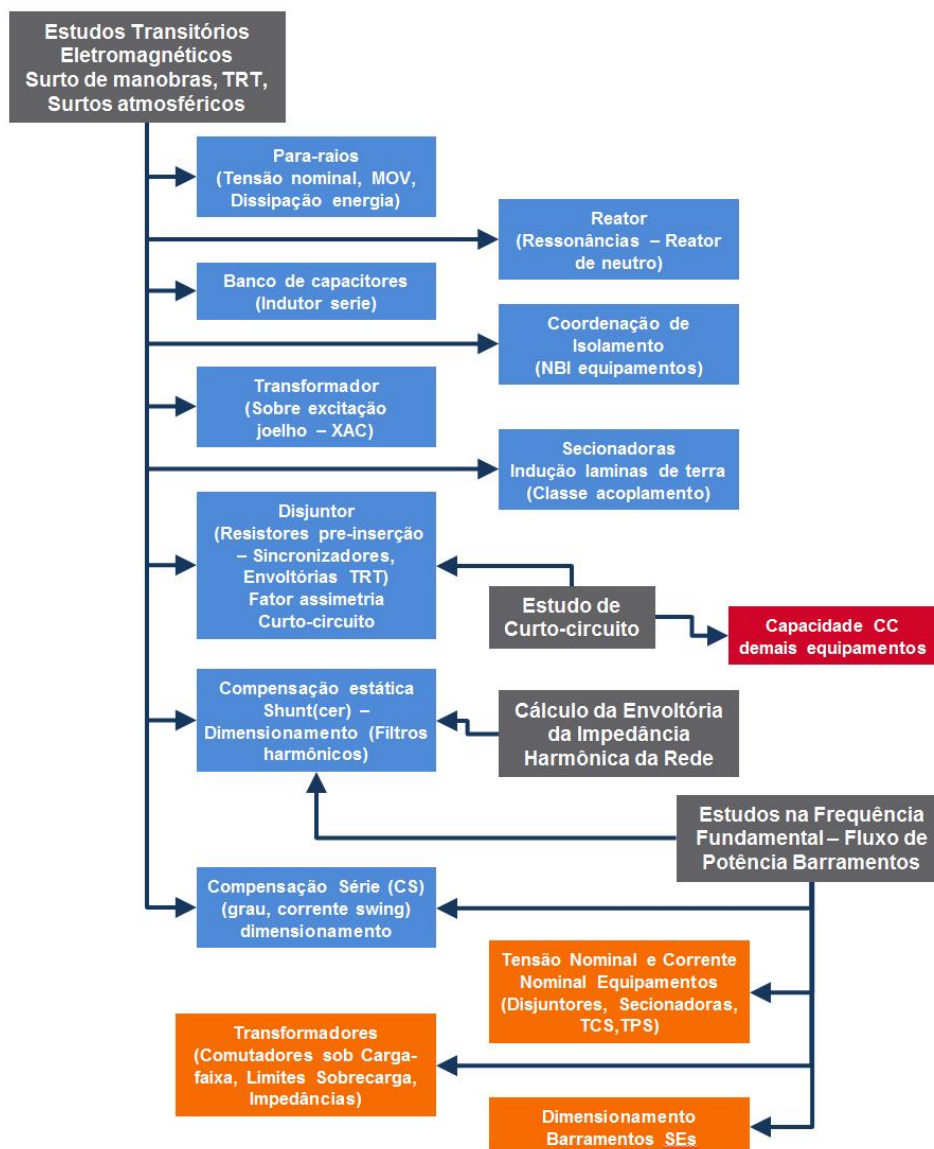
O dimensionamento das instalações e dos equipamentos deve considerar o momento de entrada em operação da instalação, como também as etapas futuras, conforme estabelecido no anexo técnico do Edital de Leilão, além das condições sistêmicas a serem impostas pelas configurações previstas no planejamento da expansão do SIN. Quando se tratar de ampliações em subestações já existentes, as características elétricas básicas dos equipamentos deverão ser similares ou superiores às dos atuais.

Como premissas indispensáveis ao dimensionamento da instalação e dos equipamentos, devem ser consideradas as conclusões e as recomendações dos estudos elétricos do projeto básico do empreendimento, abrangendo-se a frequência fundamental e os transitórios eletromagnéticos, conforme diretrizes apresentadas no item 4 do presente documento.

Para a elaboração da especificação adequada das características básicas das instalações e dos equipamentos, é recomendável haver interação entre os especialistas das áreas de projeto e especificações de equipamentos correspondentes às da área de estudos elétricos de sistema.

A Figura 5.1 apresenta o fluxograma relacionando os tipos de estudos necessários à especificação dos equipamentos.

Figura 5.1 Fluxograma Estudos Elétricos Versus Especificação dos Equipamentos.



A especificação das características básicas das instalações e dos equipamentos deve estar em conformidade com as últimas revisões das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, no que for aplicável. Na falta destas, devem ser adotadas as últimas revisões de normas das respectivas entidades: “International Electrotechnical Commission – IEC”, “American National Standards Institute – ANSI ou “National Electrical Safety Code – NESC”, nesta ordem de preferência, salvo onde expressamente indicado.

A Tabela 5.1 apresenta uma relação das normas ABNT ou IEC, em vigor, usualmente adotadas na especificação de equipamentos.

Tabela 5.1. Normas Aplicáveis à Especificação dos Equipamentos.

| Equipamento | Norma ABNT / IEC |
|--|-----------------------------|
| Disjuntores | ABNT NBR IEC 62271-1:2020 |
| Transformadores de potência | ABNT NBR IEC 5356:2007 |
| Aplicação de cargas em transformadores | ABNT NBR 5356-7:2017 |
| Comutador de derivação em carga de transformadores | IEC 214 |
| Seccionadores e chaves de aterramento | ABNT NBR IEC 62271-102:2006 |
| Para-raios | IEC 60099 |
| Transformadores de corrente | ABNT NBR 6856:2015 |
| Transformador de potencial indutivo | ABNT NBR 6855:2018 |
| Transformador de potencial capacitivo | IEC 60044-5 |
| Especificações comuns para as normas de equipamentos de manobra de alta tensão | ABNT NBR IEC 60694:2006 |
| Níveis de isolamento | ABNT NBR 6939:2018 |
| Bobinas de bloqueio | ABNT NBR 8119:1983 |

Aplicam-se também as diretrizes estabelecidas nos Procedimentos de Rede, com especial atenção ao Submódulo 2.6 - Requisitos mínimos para subestações e seus equipamentos e ao Submódulo 2.3 - Diretrizes e critérios para estudos elétricos.

As características dos equipamentos como efetivamente implantados serão fornecidas ao ONS, na época da entrada em operação, como parte do processo de integração das instalações. Nesta fase, os dados informados devem ser compatíveis com aqueles informados na etapa de projeto básico e estudos pré-operacionais.

A seguir, apresentam-se características gerais a serem observadas na especificação das instalações e equipamentos.

5.1.1. Tensão Nominal e Sobretensão Admissível

Os equipamentos são dimensionados para operar continuamente, sem restrição de tempo, em sua tensão nominal.

A especificação da tensão nominal dos equipamentos deve ser realizada de acordo com a classe de tensão normalizada para os mesmos. Não deve, portanto, ser confundida com a tensão nominal do sistema. Exemplo: para um sistema com tensão nominal de 500 ou 525 kV, os equipamentos correspondem à classe de tensão 550 kV; portanto, a tensão nominal dos equipamentos é de 550 kV.

A Tabela 5.2 apresenta as classes de tensão normalizadas utilizadas para a especificação da tensão nominal dos equipamentos.

Tabela 5.2. Tensão Nominal dos Equipamentos.

| Tensão nominal do sistema(kV) | Tensão nominal dos equipamentos Classe de tensão(kV) |
|-------------------------------|---|
| 13,8 | 15 |
| 34,5 | 38 |
| 69 | 72,5 |
| 88* | 92,4 |
| 138 | 145 |
| 230 | 245 |
| 345 | 362 |
| 440* | 460 |
| 500 ou 525 | 550 |
| 765 | 800 |

(*) valores não padronizados pela ABNT

Equipamentos localizados na extremidade de linhas de transmissão podem ser submetidos, em regime permanente, a valores de tensão mais elevados que a sua classe de tensão de especificação, por conta do efeito capacitivo das linhas. Esta elevação de tensão se agrava com o aumento da classe de tensão. A experiência operativa indica que o período máximo para que o operador manobre todos os elementos necessários ao controle de tensão, durante a recomposição de um sistema, é de até uma hora.

Embora as normas em vigor não especifiquem o dimensionamento dos equipamentos localizados na extremidade de linhas de transmissão, como reatores de linha, seccionadoras e transformadores de potencial, estes devem ser especificados para suportar, por uma hora, as sobretensões à frequência industrial, de acordo com a Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Tensão Eficaz entre Fases Admissível na Extremidade da Linha de Transmissão por 1 Hora após a Manobra. Fonte: Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede.

| Tensão nominal do sistema (kV) | Tensão sustentada | |
|--------------------------------|-------------------|-------|
| | (kV) | (pu) |
| 138 | 152 | 1,10 |
| 230 | 253 | 1,10 |
| 345 | 398 | 1,15 |
| 440 | 506 | 1,15 |
| 500 | 600 | 1,20 |
| 525 | 600 | 1,15 |
| 765 | 800 | 1,046 |

Ressalta-se que, no caso das LTs 765 kV, o valor é limitado apenas a 800 kV, por limitações da única rede existente neste nível de tensão.

5.1.2. Nível de Isolamento dos Equipamentos

O nível de isolamento de um equipamento reflete a sua suportabilidade a surtos de tensão de diversas características de amplitude e duração.

A norma em vigor a ser adotada para a definição nos níveis de isolamento dos equipamentos para efeito da coordenação do isolamento é a ABNT NBR 6939:2000.

As tensões estabelecidas em norma, a serem referenciadas na especificação dos equipamentos, são as seguintes:

Tensão Suportável Nominal a Impulso Atmosférico

- A terra e entre polos (kV, crista);
- Entre contatos abertos.

Tensão Suportável Nominal a Impulso de Manobra, a Seco e Sob Chuva

- A terra e entre polos (kV, crista);
- Entre contatos abertos.

A especificação dos níveis de isolamento dos equipamentos na etapa de projeto básico do empreendimento deve ser estabelecida a partir do estudo da coordenação do isolamento, conforme apresentado no item 4.2.17 do presente documento, no qual são definidos os níveis de isolamento a serem especificados para os equipamentos da subestação, bem como as características nominais dos para-raios e recomendações quanto à localização (distâncias) dos equipamentos na instalação.

5.1.3. Corrente Nominal dos Equipamentos

Para a especificação da corrente nominal dos equipamentos pertencentes à subestação, tais como disjuntores, chaves seccionadoras e transformadores de correntes, deve-se considerar que indisponibilidades de equipamentos — pertencentes ou não ao empreendimento sob análise — podem submeter os remanescentes a valores de correntes mais elevados. Tal questão deve ser tratada no âmbito dos estudos elétricos do projeto básico.

Dentro de um mesmo bay, é necessário buscar compatibilizar os valores de corrente nominal especificada para os equipamentos, tais como disjuntores, chaves e TCs. Já os equipamentos exclusivos das entradas de linhas de transmissão (no arranjo de barramento disjuntor e meio – DJM e anel – ANEL, para a seccionadora da linha e bobinas de bloqueio; no arranjo barra dupla – BD; todas as seccionadoras, disjuntores, TCs e bobinas de bloqueio) devem suportar, no mínimo, as condições de carregamento da linha de transmissão (capacidade de curta duração).

5.1.4. Barramento das Subestações

5.1.4.1. Arranjo de Barras

O arranjo de barras deve seguir as diretrizes estabelecidas no anexo técnico do edital do leilão correspondente ao empreendimento ou resolução autorizativa.

Na falta de informações, deve ser considerado o estabelecido no Submódulo 2.6 dos Procedimentos de Rede, que estabelece o requisito descrito a seguir:

Os arranjos de barramentos para subestações da Rede Básica com isolamento a ar são estabelecidos nos grupos abaixo, diferenciados por classe de tensão:

- Barramentos de tensão igual ou superior a 345 kV: barra dupla com disjuntor e meio;
- Barramentos de 230 kV: barra dupla com disjuntor simples a quatro chaves.

Arranjos de barramento alternativos podem ser propostos, inclusive os de tecnologia compacta, como as soluções com isolamento a gás, desde que comprovado desempenho equivalente ou superior à referência. Ressalta-se que soluções diferentes do escopo do edital devem ser submetidas à aprovação da ANEEL.

5.1.4.2. Capacidade de Corrente

Os barramentos das subestações devem ser dimensionados sob o ponto de vista da capacidade de corrente, considerando as conclusões e recomendações do estudo de fluxo de potência nos barramentos da subestação, conforme apresentado no item 4.1.9 do presente documento.

O estudo de fluxo de potência nos barramentos das subestações deve considerar as situações mais severas de circulação de corrente, levando em conta a possibilidade de indisponibilidade simples de

elementos da subestação e ocorrência de emergência no SIN (n-1), no horizonte de planejamento, conforme item 4.1.9.1.

No caso de subestação existente, se a máxima corrente verificada for inferior à capacidade do barramento, o trecho de barramento associado ao empreendimento deve ser compatível com o existente. Para correntes verificadas no estudo acima da capacidade nominal do barramento existente, o agente acessante deverá informar ao transmissor acessado, com cópia para o ONS, as violações verificadas para que o acessado possa proceder as devidas análises e providências necessárias.

Nas planilhas de especificação de equipamentos do projeto básico, é necessário informar a capacidade de corrente dos barramentos especificadas para todos os níveis, rígidos ou flexíveis, considerando a temperatura de projeto (operação normal e emergência).

Ressalta-se que os barramentos das subestações devem ser dimensionados para operação em até 90°C, evitando pontos quentes nos conectores e transferência de calor para outros equipamentos. Sendo assim, não é recomendável a utilização de condutores termo-resistentes em barramentos.

5.2. Unidades Transformadoras de Potência

Os transformadores de potência devem ser especificados tendo como ponto de partida os requisitos estabelecidos no anexo técnico do edital referente ao empreendimento objeto do leilão, sendo aplicadas as normas em vigor: ABNT NBR 5356:2007, NBR 5416 (aplicação de cargas) e a IEC 214 (comutador de derivação de cargas).

Também devem ser levadas em consideração as recomendações originárias dos estudos elétricos de sistema desenvolvidos no projeto básico para subsidiar a especificação dos equipamentos. Neste ponto destaca-se, para o caso dos transformadores, a avaliação do desempenho dos comutadores de derivação sob carga, desenvolvida nos estudos na frequência fundamental, e os estudos de transitórios eletromagnéticos das manobras de energização do transformador — no qual são estabelecidos os valores mínimos para o joelho da curva de saturação e para a reatância em núcleo de ar (X_{ac}).

A seguir, são apresentados os principais itens a serem observados na especificação de transformadores de potência, com destaque para as interfaces com os estudos elétricos.

- Potência Nominal: devem ser atendidas as orientações do anexo técnico do edital de leilão ou resolução autorizativa, no que se refere ao valor das potências nominais entre enrolamentos, para a operação em qualquer tape especificado.
- As unidades transformadoras devem possuir estágios de refrigeração capazes de atender aos procedimentos para aplicação de cargas estabelecidos na norma ABNT NBR 5416.

- Deve ser observada a adequação da potência nominal especificada para o transformador, em função dos fluxos de potência resultantes no horizonte de planejamento estudado, conforme os estudos na frequência fundamental, item 4.1.2 do presente documento.
- É necessário atender aos requisitos de operação em sobrecarga especificados no anexo técnico do edital de leilão e nos procedimentos de rede.
- Atenção especial deve ser dispensada à especificação da temperatura ambiente.
- Comutação: o comutador de derivação em carga deve ser projetado, fabricado e ensaiado de acordo com a publicação IEC-214 “On Load Tap Changers”.

Também deve ser especificada a faixa de derivações de tape com o número de posições de ajustes (tapes). A faixa especificada deve ser compatível com a estabelecida nos estudos na frequência fundamental, caso esta seja mais abrangente que aquela especificada no anexo técnico do edital de leilão.

- Carregamento: devem ser atendidas as orientações do anexo técnico do edital de leilão, que estabelece as condições de carregamento a serem observadas, como por exemplo: 120% da potência nominal por período de 4 horas, e 140% por período de 30 minutos do seu ciclo de carga, para a expectativa de perda de vida útil normal estabelecida nas normas técnicas de carregamento de transformadores.

O transformador precisa ser capaz de operar nas condições estabelecidas na norma ABNT NBR 5416 e no Módulo 4 – Prestação dos Serviços das Regras dos Serviços de Transmissão estabelecido pela Resolução Normativa ANEEL nº 905 de 8 de dezembro de 2020.

Além disso, os transformadores devem ser capazes de operar com as suas potências nominais, em regime permanente, para toda a faixa operativa de tensão da Rede Básica, tanto no primário quanto no secundário, com ou sem comutadores de derivações, sejam eles em carga ou não.

- Sobreexcitação: a unidade transformadora de potência deve ser especificada para suportar, no mínimo, o perfil de sobreexcitação em vazio a 60Hz estabelecido no anexo técnico do edital, ou, na sua falta, no submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede.

Tabela 5.4. Valores Indicativos de Sobretensões Admissíveis a 60 Hz para Transformadores em Vazio. Fonte: Tabela 5 da Referência [6.1].

| Tensão (pu) | Tempo (s) |
|-------------|-----------|
| 2,0 | 0,1667 |
| 1,82 | 0,3333 |
| 1,50 | 1,667 |
| 1,40 | 3,60 |
| 1,35 | 10 |
| 1,25 | 20 |
| 1,20 | 60 |
| 1,15 | 480 |
| 1,10 | regime |

(*) valores em pu tendo por base a tensão da derivação

(valor eficaz de tensão pelo qual o *tape* é designado na tabela de derivação do transformador).

- Impedâncias: os valores das impedâncias entre o enrolamento primário e secundário devem ser especificados de acordo com as diretrizes do anexo técnico do edital. Valores típicos (X_{ps}) são na faixa de 12% a 14% na base da potência nominal para unidades de médio e baixo porte, e de 10% a 12% para unidades de maior porte. Os Procedimentos de Rede estabelecem apenas valores máximos.

Caso seja necessária a especificação de um enrolamento terciário, seja por solicitação do anexo técnico ou por necessidade da transmissora para alimentação de serviços auxiliares, o valor de X_{ps} em conjunto com as potências de curto-circuito a serem informadas para o fabricante levará em conta a definição dos valores de X_{st} e X_{pt} .

Os estudos de transitórios eletromagnéticos de energização do transformador já deverão considerar os valores desses parâmetros informados pelo fabricante em potencial, mesmo considerando que, numa primeira etapa do projeto do equipamento, as análises sejam preliminares para a relação de tensão e potência especificada.

- Curva de Saturação – Joelho e X_{ac} : no documento de especificação das unidades transformadoras de potência, os parâmetros Joelho (pu) e X_{ac} (%) da curva de magnetização devem ser sempre especificados, tomando como base as conclusões e recomendações dos estudos de transitórios eletromagnéticos da energização dos transformadores.

A Tabela 5.5 foi obtida a partir de consultas a fabricantes e fornece uma faixa orientativa que pode ser levada em conta nos estudos e especificações. Esta discussão deve preceder a compra do equipamento.

Tabela 5.5. Faixas Orientativas de Xac em Função da Relação de Transformação.

Faixa de valores típicos de reatância com núcleo de AR “XAC” em autotransformadores

Para a tabela abaixo foi considerado Impedância do Autotransformador de 13% Núcleo tipo Core Type e arranjos típicos para os enrolamentos.

| Relação | Comutador sob carga | Visto pelo Terminal | Faixa (XAC%) |
|---------|---------------------|---------------------|--------------|
| 500/345 | LV-345 | HV | 120-160 |
| | LV-345 | LV | 115-155 |
| 500/345 | HV-500 | HV | 70-100 |
| | HV-500 | LV | 65-95 |
| 345/230 | LV-230 | HV | 115-155 |
| | LV-230 | LV | 110-150 |
| 345/230 | HV-345 | HV | 65-95 |
| | HV-345 | LV | 60-90 |
| 500/230 | LV-230 | HV | 45-70 |
| | LV-230 | LV | 40-60 |
| 500/230 | HV-500 | HV | 30-50 |
| | HV-500 | LV | 20-40 |
| 500/138 | LV-138 | HV | 30-50 |
| | LV-138 | LV | 20-40 |
| 500/138 | HV-500 | HV | 20-40 |
| | HV-500 | LV | 15-30 |

Salientamos que esses valores não podem ser considerados como valores de garantia, porque os mesmos podem ter alterações significativas em função de atendimentos a características especiais do equipamento, como por exemplo: Impedâncias muito baixas ou altas, Paralelismo comunidades existentes, limitações dimensionais, ..., etc.

- Perdas:

A Tabela 5.6 apresenta as perdas máximas admissíveis entre o enrolamento primário e o secundário a ser observadas no caso de transformadores trifásicos ou monofásicos de potência trifásica superior a 5 MVA e de tensão nominal de alta tensão igual ou superior a 230 kV.

Tabela 5.6. Perdas máximas para Transformadores de potência.

| Perdas em porcentagem da potência nominal* | |
|--|---------------|
| Potência trifásica nominal (Pn)** | Perdas Máxima |
| $5 < P_n < 30$ MVA | 0,70 |
| $30 \leq P_n < 50$ MVA | 0,60 |
| $50 \leq P_n < 100$ MVA | 0,50 |
| $100 \leq P_n < 200$ MVA | 0,40 |
| $P_n \geq 200$ MVA | 0,30 |

(*) perdas totais na tensão nominal e frequência nominal para a operação primário-secundário.

(**) Pn: potência nominal no último estágio de refrigeração.

- Características de Curto-circuito: o dimensionamento das unidades transformadoras deve considerar os requisitos de curto-circuito prescritos na norma ABNT NBR 5356:2007.

Devem ser informados os níveis de curto-circuito máximos, simétricos e assimétricos, obtidos a partir dos estudos de sistema, previstos no horizonte de planejamento para as barras primária, secundária e terciária, caso existente, das unidades transformadoras.

Deve-se considerar também, se for o caso, a necessidade de limitar os níveis de curto-circuito — como, por exemplo, no enrolamento terciário (entre AT-BT e MT-BT), e para qual patamar de potência de curto-circuito (MVA). A necessidade de limitação da potência de curto-circuito afeta o projeto dos enrolamentos do transformador.

- Níveis de Isolamento: a especificação dos níveis de isolamento deve ser em função da tensão máxima padronizada dos enrolamentos das unidades transformadoras, conforme prescritos na norma ABNT NBR 5356:2007.

- Tensão suportável nominal a impulso atmosférico;

- Tensão suportável impulso de manobra.

Os níveis de isolamento especificados devem ser compatíveis com as conclusões e recomendações dos estudos de transitórios eletromagnéticos de coordenação do isolamento.

- Nível de Ruído: O nível de ruído audível emitido pelas unidades transformadoras de potência deve estar em conformidade com a norma ABNT NBR 5356:2007. O nível de limitação de ruído especificado pode ter impacto no joelho da curva de saturação.

As características dos equipamentos já construídos e testados em seu recebimento pela Transmissora serão fornecidas ao ONS, na época da entrada em operação, por meio de um processo denominado “Como Construído”. Nesta fase os valores informados serão comparados àqueles informados na etapa de aprovação do projeto básico.

5.3. Reatores em Derivação

Os reatores em derivação devem ser especificados tendo como ponto de partida os requisitos estabelecidos no anexo técnico do edital referente ao empreendimento objeto do leilão e nos Procedimentos de Rede.

Também precisam ser levadas em consideração as recomendações originárias dos estudos elétricos de sistema desenvolvidos para subsidiar a especificação dos equipamentos. Destacam-se, para o caso dos reatores em derivação, as análises das sobretensões sustentadas e de transitórios eletromagnéticos associados às sobretensões, assim como as condições de ressonância e extinção de arco secundário para a viabilização do religamento monopolar, que poderá inclusive acarretar a necessidade da instalação de reator de neutro, dentre outros aspectos.

No caso de reatores de linha aplicados junto à compensação série, o requisito de tensão nominal poderá ser mais elevado do que a classe de tensão normalizada. Ele será definido em função do resultado dos estudos na frequência fundamental.

A seguir são apresentados os principais itens a observar na especificação dos reatores em derivação.

- Esquema de Aterramento: podem ser considerados os seguintes esquemas de aterramento:
 - Estrela solidamente aterrada;
 - Estrela aterrada através de impedância.

Caso necessário, o uso de impedância de aterramento e o isolamento do neutro do reator devem ser dimensionados considerando esse equipamento.

- Perdas:

A Tabela 5.7 apresenta as perdas totais máximas para reatores em derivação trifásicos ou monofásicos de potência nominal igual ou superior a 5 Mvar e de tensão nominal do enrolamento de alta tensão igual ou superior a 230 kV, à tensão e frequência nominais, em percentagem da potência nominal.

Tabela 5.7. Perdas totais máximas para Reatores.

| Potência Nominal (Pn) | Perdas Totais Máximas |
|-------------------------|-----------------------|
| $5 \leq P_n < 10$ Mvar | 0,70 % de Pn |
| $10 \leq P_n < 15$ Mvar | 0,60 % de Pn |
| $15 \leq P_n < 20$ Mvar | 0,50 % de Pn |
| $20 \leq P_n < 30$ Mvar | 0,40 % de Pn |
| $P_n \geq 30$ Mvar | 0,30 % de Pn |

- Suportabilidade a Sobretensões: o equipamento deve ser capaz de suportar os níveis de sobretensões transitórias e temporárias definidas pelos estudos de sistema.

O dimensionamento dos reatores, em especial os de linha, deve considerar a possibilidade de sobretensões em regime normal de operação, de forma a não serem limitadores da capacidade de transmissão da linha.

Na falta de informação, é necessário utilizar os valores da Tabela 6 do submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS, conforme apresentado na Tabela 5.8 a seguir.

- Característica V x I: deve ser definida de acordo com os estudos de sistema e engenharia.

Deve-se especificar a característica V x I do reator, indicando o valor mínimo para o joelho da característica de magnetização.

E recomendável a especificação do joelho da característica de magnetização em valor superior a 1,40 pu.

- Isolamento do Neutro dos Reatores: em caso da utilização de reator de neutro, será especificado o isolamento do neutro compatível com o definido nos estudos de transitórios eletromagnéticos (religamento monopolar e/ou indução em lâminas de terra de seccionadoras).

Tabela 5.8. Valores Indicativos para Sobretensões a 60 Hz para Reatores em Derivação.

Fonte: Tabela 6 Referência [6.1]

| Tensão (1) (pu) | Tensão (2) (pu) | Tensão (3) (pu) | Tempo (s) |
|--------------------|--------------------|--------------------|-----------|
| 2,0 | 2,0 | 2,10 | 0,1667 |
| 1,82 | 1,82 | 1,91 | 0,3333 |
| 1,50 | 1,50 | 1,57 | 1,667 |
| 1,40 | 1,40 | 1,47 | 3,60 |
| - | 1,15 | 1,20 | 3600 |
| 1,10 | 1,10 | 1,15 | regime |

(1) valores em pu para a tensão base de 230kV

(2) valores em pu para a tensão base de 345kV, 440kV e 525kV

(3) valores em pu para a tensão base de 500kV

- Níveis de Isolamento: a especificação dos níveis de isolamento é função da tensão nominal padronizada para o equipamento. Ela abrange:
 - Tensão suportável nominal a impulso atmosférico;
 - Tensão suportável impulso de manobra.

Os níveis de isolamento adotados devem ser compatíveis com as conclusões e recomendações dos estudos de coordenação do isolamento (transitórios eletromagnéticos).

- Tolerâncias: devem ser especificadas. Usualmente, admite-se para a impedância o valor de 2% por fase em relação ao valor especificado, não devendo afastar-se mais que 1% do valor médio medido das três fases das unidades.

As características dos equipamentos já construídos e testados em seu recebimento pela Transmissora serão fornecidas ao ONS, na época da entrada em operação, por meio de um processo denominado “Como Construído”. Nesta fase os valores informados serão comparados àqueles informados na etapa de aprovação do projeto básico.

5.4. Banco de Capacitores em Derivação

Os bancos de capacitores em derivação devem ser especificados tendo como ponto de partida os requisitos estabelecidos no anexo técnico do edital referente ao empreendimento objeto do leilão e nos Procedimentos de Rede.

Devem-se levar em consideração as recomendações originárias dos estudos elétricos de sistema desenvolvidos para subsidiar a especificação dos equipamentos, destacando-se, neste caso, as avaliações dos transitórios eletromagnéticos de corrente e de tensão, devido a manobras de energização, aplicação e eliminação de defeito associado a banco de capacitores em derivação, conforme apresentado no item 4.2.12 do presente documento.

Caso necessário, em função da conclusão dos mencionados estudos, ou de diretriz estabelecida no anexo técnico do edital, devem ser especificados indutores limitadores de corrente a ser instalados em série com o banco de capacitores, como também ser recomendado que os disjuntores de manobra dos bancos de capacitores sejam equipados com dispositivos sincronizadores ou resistores de pré-inserção.

A seguir são apresentados os principais itens a observar na especificação dos bancos de capacitores em derivação.

- Potência Nominal: as potências nominais dos bancos de capacitores devem ser especificadas de acordo com o estabelecido no anexo técnico do edital, cuja adequação já deve ter sido comprovada por meio dos estudos de sistema.
- Conexão: deve ser especificada a conexão dos bancos de capacitores em derivação, de acordo com o estabelecido no anexo técnico do edital. Convém que cada banco de capacitores deva ser protegido e manobrado independentemente pelo seu disjuntor.
- Esquema de Aterramento: deve ser especificado o esquema de aterramento; usualmente, do tipo estrela solidamente aterrada.
- Tolerâncias: serão admitidas as seguintes tolerâncias:

Capacitância do banco: $\pm 2,0\%$ por fase em relação ao valor especificado; nenhum valor medido de quaisquer das 3 fases deve afastar-se mais de 1% do valor médio medido das três fases.

- Perdas Dielétricas: o valor médio das perdas dielétricas de cada unidade capacitiva à tensão e frequência nominais, com resistor de descargas e a temperatura de 200°C, deverá ser no máximo de 0,12 W/kVAr para capacitores sem fusíveis internos e 0,16 W/kVAr para capacitores com fusíveis internos.
- Capacidade de Curto-circuito: precisa ser especificada para suportar, no mínimo, os níveis de curto-circuito estabelecidos no anexo técnico do edital.
Devem ser consideradas também as análises das manobras de energização do banco de capacitores na subestação sob falta aplicada. Neste caso ocorre a descarga dos capacitores.
- Indutor Limitador de Corrente: quando recomendado pelos estudos transitórios eletromagnéticos da manobra dos bancos, deve ser especificado o indutor limitador de corrente em série. Também

serão especificados os seguintes tópicos: a tensão nominal do indutor, o valor da indutância (em mH ou μ H), a corrente nominal e as correntes de curto-circuito simétrica (kA-eficaz, 1 seg.), assimétrica (kA-pico) e transitória de alta frequência (kA-pico), com a frequência em KHz.

- Níveis de Isolamento: a especificação dos níveis de isolamento deve ser em função da tensão nominal padronizada para o equipamento, abrangendo:
 - Tensão suportável nominal a impulso atmosférico;
 - Tensão suportável impulso de manobra.

Os níveis de isolamento precisam ser compatíveis com as conclusões e recomendações dos estudos de coordenação do isolamento.

As características dos equipamentos já construídos e testados em seu recebimento pela Transmissora serão fornecidas ao ONS, na época da entrada em operação, por meio de um processo denominado “Como Construído”. Nesta fase os valores informados serão comparados àqueles informados na etapa de aprovação do projeto básico.

5.5. Disjuntores

Os disjuntores serão especificados tendo como ponto de partida os requisitos estabelecidos no anexo técnico do edital referente ao empreendimento objeto do leilão e nos Procedimentos de Rede, adotando como referência a norma em vigor: IEC 62271 – 100.

Também devem ser levadas em consideração as recomendações originárias dos estudos elétricos de sistema desenvolvidos para subsidiar a especificação dos equipamentos, sendo de maior relevância para o caso dos disjuntores, os estudos de curto-circuito (simétrico e assimétrico) que também identificam a relação X/R (constante de tempo), os de fluxo de potência de barramento (corrente nominal), os relativos às tensões de restabelecimento transitórias (fator de 1º polo e envoltórias de TRT), bem como os de energização/religamento de linhas e energização de transformadores (resistores de pré-inserção e mecanismos de manobra controlada como o sincronizador).

A seguir são apresentados os principais itens a observar na especificação de disjuntores, sendo destacadas as interfaces com os estudos elétricos.

Corrente Nominal: a corrente nominal do disjuntor precisa ser compatível com a máxima corrente possível na indisponibilidade de outros componentes na subestação.

Levem-se em consideração as capacidades de curta duração de linhas de transmissão conectadas, as indisponibilidades externas em função das análises efetuadas nos estudos na frequência fundamental e o fluxo de potência nos barramentos da subestação, conforme apresentado nos itens 4.1.2 e 4.1.9 do presente documento.

Deve-se também levar em conta a capacidade de interrupção do disjuntor. Esta característica já possui, como “dote”, um valor mínimo associado de corrente nominal, consequência do dimensionamento dos contatos do disjuntor para atendimento a solicitação de curto-circuito. Por exemplo: um disjuntor de 40 kA deve ser especificado com uma corrente nominal não inferior a 3150 A.

É necessário haver coerência entre as correntes nominais estabelecidas pelo anexo técnico e as conclusões dos estudos, de tal forma que se evitem superações desnecessárias e previsíveis.

É desejável a compatibilização dos valores de corrente nominal entre disjuntores, chaves seccionadoras e para transformadores de corrente localizados no mesmo vão.

Capacidade de Curto-circuito: os disjuntores devem ser dimensionados respeitando os valores de corrente de curto-circuito nominal (corrente simétrica de curto-circuito) e de crista da corrente de estabelecimento nominal em curto-circuito (corrente assimétrica de curto-circuito), definidas no anexo técnico do edital.

A relação mínima de assimetria definida no anexo técnico é de 2,6 e corresponde a uma relação de X/R de 17 (constante de tempo de 45 ms). Entretanto, os fatores de assimetria precisam ser especificados em função dos resultados do cálculo da assimetria da corrente de curto-circuito, conforme apresentado no item 4.2.15 do presente documento, e podem ser maiores que os estabelecidos no anexo técnico.

Os disjuntores devem ser especificados para abertura de corrente de curto-circuito nas condições mais severas de X/R no ponto de conexão do disjuntor. Em caso de disjuntores localizados nas proximidades de usinas geradoras, especial atenção deve ser dada à relação X/R, que tende a se elevar consideravelmente.

Desta forma, atenção ao definir a capacidade de estabelecimento nominal de curto-circuito. Caso X/R seja maior que 17, o fator de assimetria pode ser maior que 2,6 e elevar o seu valor acima do estabelecido no anexo técnico.

Resistores de Pré-inserção e Dispositivos de Manobra Controlada: os disjuntores devem ser especificados com resistores de pré-inserção ou com mecanismos de fechamento ou abertura controlada, quando necessário, em função dos resultados dos estudos de transitórios eletromagnéticos, conforme apresentado nos itens 4.2.7 – estudo de energização de linhas de transmissão, 4.2.8– estudo de religamento tripolar de linha de transmissão e 4.2.11 – estudo de energização de transformadores.

Dispositivos de manobra controlada implicam a necessidade de precisão nos momentos de fechamento. Os disjuntores devem ser especificados de forma a acompanhar as necessidades da manobra. Nestes casos, a imprecisão no fechamento de um polo deve ser de no máximo 1 ms.

Para os resistores de pré-inserção (RPI), devem ser definidos o valor ôhmico e o tempo de sua inserção. O valor de 400 ohms é usualmente considerado, quando a adoção de RPIs é estudada. Entretanto, os estudos podem indicar a necessidade de valores diferentes.

Solicitações de Manobras: os disjuntores devem ser especificados para operar de acordo com as solicitações de manobra determinadas nos estudos de TRT, conforme apresentado no item 4.2.14 do presente documento (falta terminal, falta quilométrica, abertura em oposição de fases, abertura de linha em vazio), e respeitar as diretrizes estabelecidas na norma IEC 62271 – 100.

O fator de primeiro polo padronizado de acordo com a norma em vigor ABNT NBR IEC 62271 – 100:2006, é igual a 1,3. Caso necessário, em função dos resultados dos estudos de tensão de restabelecimento transitória, ou diretriz estabelecida no anexo técnico do edital, este fator deverá ser especificado como 1,5. Esta alteração aumenta em torno de 15% o valor de TRT máxima suportada pelo disjuntor para faltas terminais.

Em alguns casos, a violação das taxas de crescimento e do valor máximo de TRT é tão grande, que a solução pode ser a recomendação de adoção de um equipamento pertencente a uma classe de tensão imediatamente superior. Exemplo: violação tão severa das envoltórias normalizadas de TRT para disjuntores da classe de tensão 245kV, que só possa ser solucionada por meio da especificação de disjuntor da classe de tensão imediatamente superior (300 kV).

Os disjuntores para manobra de linhas de transmissão ou banco de capacitores em derivação devem ser especificados como de “baixíssima probabilidade de reacendimento de arco”, classe C2, conforme norma IEC 62271 – 100.

Os requisitos advindos dos estudos de abertura em vazio deverão ser considerados na definição da corrente capacitiva máxima a ser interrompida pelo disjuntor. Caso os valores obtidos sejam maiores que os normalizados, eles deverão ser especificados.

São os seguintes os requisitos mínimos definidos em norma (Tabela 5-ABNT-IEC62271-100-2006) para a abertura capacitiva:

- Classe de Tensão 550 kV: 500 A
- Classe de Tensão 362 kV: 315 A
- Classe de Tensão 245 kV: 125 A
- Classe de Tensão 145 kV: 50 A

Caso necessário, os disjuntores devem ser especificados com capacidade de manobrar mais de um tipo de equipamento ou linhas de transmissão existentes na subestação, como é o caso de disjuntor do meio em arranjo do tipo disjuntor e meio.

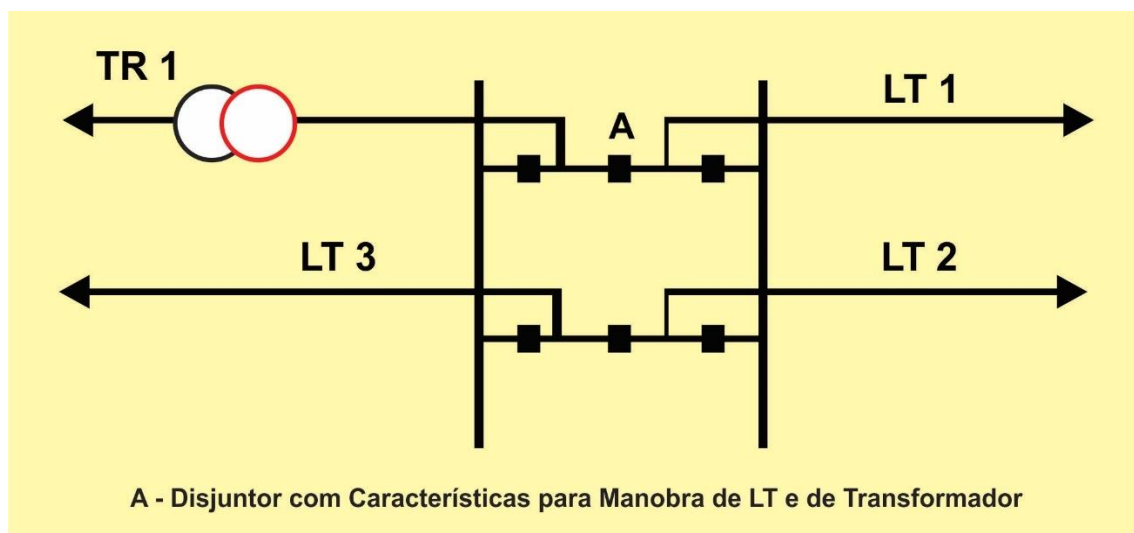
No caso ilustrado na Figura 5.2, o disjuntor A pode manobrar tanto a linha quanto o transformador. Pode ocorrer que o disjuntor específico da linha tenha resistor de pré-inserção, e o do transformador tenha manobra controlada. Nesta situação, os estudos de energização de transformadores devem estudar também o desempenho da manobra com resistores de pré-inserção de mesmo tamanho que o utilizado na linha. Caso eles demonstrem que a manobra do transformador é possível, mesmo com menor eficiência do que quando é utilizado o mecanismo de manobra controlada, o disjuntor do meio deverá ser equipado com o resistor de pré-inserção.

Caso a linha seja curta e o disjuntor da LT não possua nenhum dispositivo de controle de sobretensões, sugere-se adotar o mecanismo de manobra controlada no disjuntor do meio.

Os disjuntores utilizados na manobra de reatores em derivação devem sempre ser especificados com dispositivos de manobra controlada.

Nos casos em que forem utilizados mecanismos de fechamento ou abertura controlados, deve ser especificada a dispersão máxima dos tempos médios de fechamento ou de abertura compatíveis com as necessidades de precisão da manobra controlada. Também devem ser especificados o RDDS, a imprecisão eletrônica máxima e a imprecisão mecânica máxima. Valores típicos restringem a imprecisão total ao valor máximo de $\pm 1,5$ ms.

Figura 5.2 Exemplo de Disjuntor com Características para Manobra de Tipo Diferente de Equipamento (Transformador / Linha) de Transmissão em Arranjo de Barra do Tipo Disjuntor e meio.



Havendo violação das envoltórias normalizadas adotadas como referência para a especificação do disjuntor, identificadas através dos estudos das tensões de restabelecimento transitórias, as mesmas devem ser submetidas ao fabricante, no sentido de obter o parecer sobre a viabilidade da manobra. Neste sentido, é recomendável anexar ao documento de especificação do disjuntor os gráficos de TRT, obtidos a partir dos estudos que excedam os valores normalizados, como forma de subsidiar a análise por parte do fabricante.

Ciclo de Operação, Tempo Máximo de Interrupção e Circuitos de Disparo: o ciclo de operação dos disjuntores deve atender aos requisitos das normas aplicáveis (IEC 62271 – 100).

O tempo máximo de interrupção para disjuntores de classes de tensão acima de 245kV deve ser de 2 ciclos para a frequência de 60 Hz.

O tempo máximo de interrupção para disjuntores de classe de tensão de 245 kV e abaixo deve ser de 3 ciclos para a frequência de 60 Hz.

Os disjuntores devem ter dois circuitos de disparo independentes, lógicas de detecção de discrepância de polos e acionamento monopolar. O ciclo de operação nominal precisa ser compatível com a utilização de esquemas de religamento automático tripolar e monopolar.

Caso o religamento monopolar seja exigido para os disjuntores de 138 kV, estes devem ser especificados com acionamento monopolar, característica esta não normalizada para este nível de tensão.

Níveis de Isolamento: a especificação dos níveis de isolamento é função da tensão nominal padronizada para o equipamento, abrangendo:

- Tensão suportável nominal a impulso atmosférico;
- Tensão suportável impulso de manobra.

Os níveis de isolamento serão compatíveis com as conclusões e recomendações dos estudos de coordenação do isolamento.

Outras Características: a utilização de valores de curto-circuito elevados para níveis de tensão de operação baixos pode resultar em equipamentos de dimensões físicas maiores do que as habituais, fato a ser levado em consideração na elaboração do arranjo físico da subestação. Exemplo: disjuntores de tensão nominal 138 kV com corrente de curto-circuito simétrica de 63 kA.

As características dos equipamentos já construídos e testados em seu recebimento pela Transmissora serão fornecidas ao ONS, na época da entrada em operação, por meio de um processo denominado “Como Construído”. Nesta fase os valores informados serão comparados àqueles informados na etapa de aprovação do projeto básico.

5.6. Secionadoras, Lâminas de Terra e Chaves de Aterramento

As secionadoras, lâminas de terra e chaves de aterramento serão especificadas tendo como ponto de partida os requisitos estabelecidos no anexo técnico do edital referente ao empreendimento objeto do leilão e nos Procedimentos de Rede, adotando como referência a norma em vigor: IEC 62271 – 102.

Também devem ser levadas em consideração as recomendações originárias dos estudos elétricos de sistema desenvolvidos para subsidiar a especificação dos equipamentos: o estudo na frequência fundamental para a especificação dos valores nominais da chave e o estudo transitório eletromagnético das tensões e correntes induzidas por acoplamento eletromagnético e eletrostático existente entre circuitos em paralelo, conforme abordado no item 4.2.16 do presente documento.

A seguir são apresentados os principais itens a observar na especificação das seccionadoras, lâminas de terra e chaves de aterramento, sendo destacadas as interfaces com os estudos elétricos.

Corrente Nominal: a corrente nominal das seccionadoras deve ser compatível com a máxima corrente possível na indisponibilidade de outros componentes na subestação, como também levar em consideração as capacidades de curta duração de linhas de transmissão conectadas, e as indisponibilidades externas em função das análises efetuadas nos estudos na frequência fundamental e de fluxo de potência nos barramentos da subestação, conforme apresentado nos itens 4.1.2 e 4.1.9 do presente documento.

Deve haver coerência com as correntes nominais especificadas para os disjuntores e transformadores de corrente localizados no mesmo vão.

Capacidade de Curto-circuito: as seccionadoras precisam ser dimensionadas respeitando o valor da corrente de curto-circuito nominal (corrente simétrica de curto-circuito) e o valor de crista nominal da corrente suportável (corrente assimétrica de curto-circuito), definidos no anexo técnico do edital.

A relação mínima de assimetria definida no anexo técnico é de 2,6 e corresponde a uma relação de X/R de 17 (constante de tempo de 45 ms). Entretanto, os fatores de assimetria devem ser especificados em função dos resultados do cálculo da assimetria da corrente de curto-circuito, conforme apresentado no item 4.2.15 do presente documento, e podem ser maiores que os estabelecidos no anexo técnico.

Desta forma, atenção ao definir o valor de crista nominal da corrente suportável. Caso X/R seja maior que 17, o fator de assimetria pode ser maior que 2,6, elevando o seu valor acima daquele estabelecido no anexo técnico.

Capacidade de Interrupção de Correntes Induzidas das Lâminas de Terra: esta característica deve ser sempre especificada para chaves seccionadoras com lâminas de terra. Existem duas classes de acoplamento A e B (baixa e alta). A omissão de sua especificação não implica necessariamente que a chave seja tipo A ou tipo B. Posteriormente, com a evolução topológica da rede, a avaliação de sua superação depende do conhecimento de sua capacidade.

As lâminas de terra e chaves de aterramento das linhas de transmissão devem ser dotadas de capacidade de interrupção de correntes induzidas por acoplamento eletromagnético e eletrostático, no caso de existirem circuitos que correm paralelamente a outras linhas de transmissão, de acordo com as

análises a ser efetuadas por meio do estudo das tensões e correntes induzidas em lâminas de terra das seccionadoras, conforme apresentado no item 4.2.16 do presente documento.

Este acoplamento é maior entre circuitos de uma mesma torre de circuito duplo, ou entre circuitos em paralelo, cuja distância centro a centro das torres seja baixa. A prática construtiva e o preço das faixas de passagem têm levado a situações cada vez mais compactas, nas quais o acoplamento se torna mais severo.

A experiência com os projetos recebidos tem mostrado que, em muitos casos, os valores normalizados são excedidos, havendo necessidade de chaves especiais.

A classe de acoplamento para as lâminas de terra ou chaves de aterramento deve ser especificada de acordo com o anexo C da norma IEC 62271 – 102: chaves de aterramento classe A – baixo acoplamento ou linhas paralelas relativamente curtas; chaves de aterramento classe B – alto acoplamento ou linhas paralelas relativamente longas.

Dependendo das solicitações às quais a chave ficará sujeita, poderá ser necessário adotar como solução a recomendação de chave pertencente a uma classe de tensão imediatamente superior. Exemplo: violação dos limites de correntes ou tensões por indução eletrostática ou eletromagnética normalizadas (IEC 62271 – 102– Anexo C) da lâmina de terra de classe de tensão igual a 245 kV, solucionada pela especificação de lâmina de terra da classe de tensão imediatamente superior (300 kV).

Níveis de Isolamento: a especificação dos níveis de isolamento é função da tensão nominal padronizada para o equipamento, abrangendo:

- Tensão suportável nominal a impulso atmosférico;
- Tensão suportável impulso de manobra.

Os níveis de isolamento devem ser compatíveis com as conclusões e recomendações dos estudos de coordenação do isolamento.

As características dos equipamentos já construídos e testados em seu recebimento pela Transmissora serão fornecidas ao ONS, na época da entrada em operação, por meio de um processo denominado “Como Construído”. Nesta fase os valores informados serão comparados àqueles informados na etapa de aprovação do projeto básico.

5.7. Para-raios

Os para-raios devem ser instalados nas entradas de linhas de transmissão, nas conexões de unidades transformadoras de potência, de reatores em derivação e de bancos de capacitores não autoprotetidos. Os para-raios devem, de forma geral, ser do tipo estação, de óxido de zinco (ZnO), adequados à instalação externa. Devem ser observados os requisitos estabelecidos no anexo técnico do edital

referente ao empreendimento objeto do leilão e nos Procedimentos de Rede, adotando-se como referência a norma em vigor: IEC 60099.

Também devem ser levadas em consideração as recomendações dos estudos elétricos de sistema: estudos de transitórios eletromagnéticos, em especial os relacionados com as manobras de energização e religamento de linhas de transmissão, de manobra de energização de transformadores e de coordenação do isolamento, nos quais são analisadas e efetuadas as recomendações quanto às características de tensão nominal e dissipação de energia nos para-raios e da distância de instalação em relação aos equipamentos.

A especificação de para-raios com curva de descarga para surtos de manobra (30/60 μ s) muito mais baixa do que a considerada nos estudos de manobras pode levar a níveis de dissipação de energia superiores aos encontrados nas simulações. Neste caso, poderá tornar-se necessária, eventualmente, a aquisição de para-raios com colunas adicionais.

Em contrapartida, a adoção de para-raios com tensão nominal superior ao utilizado no estudo pode levar à exposição dos equipamentos a valores superiores à sua suportabilidade.

Desta forma, convém respeitar as características recomendadas pelos estudos de manobra (tensão nominal, capacidade de dissipação de energia e curva de descarga surto de manobra).

A seguir, são apresentados os principais itens a observar na especificação dos para-raios, sendo destacadas as interfaces com os estudos elétricos.

Tensão Nominal (U_r): deve ser especificada a tensão nominal do para-raios (kV, eficaz – fase terra), em função da tensão nominal do sistema, da tensão máxima de operação contínua e da característica de aterramento do sistema, de acordo com os resultados dos estudos elétricos de sistema e diretrizes estabelecidas no anexo técnico do edital.

Máxima Tensão Contínua de Operação (MCOV): deve ser especificada a máxima tensão contínua de operação (MCOV) (kV, eficaz), conforme diretriz estabelecida no anexo técnico do edital.

Capacidade de Dissipação de Energia: os para-raios devem ser especificados com uma capacidade de dissipação de energia (KJ/kV – curva de descarga 30/60 μ s) suficiente para fazer frente a todas as solicitações identificadas nos estudos de transitórios eletromagnéticos. Deve também ser indicada a classe (IEC) de capacidade de absorção de energia.

Tensões Residuais: devem ser emitidas orientações para a aquisição do para-raios com característica da tensão residual compatível com as consideradas nos estudos transitórios eletromagnéticos (coordenação do isolamento 8 x 20 μ s (KV, crista) e surto de manobra 30/60 μ s (KV, crista)).

Níveis de Isolamento: a especificação dos níveis de isolamento é função da tensão nominal padronizada para o equipamento. Ela abrange:

- Tensão suportável nominal a impulso atmosférico;
- Tensão suportável impulso de manobra.

Os níveis de isolamento precisam ser compatíveis com as conclusões e recomendações dos estudos de coordenação do isolamento.

A Figura 5.3 ilustra o conteúdo de um catálogo padrão de para-raios.

Figura 5.3 Exemplo de Catálogo de Para-raios

| Maximum Values | | | | |
|---|--------|-----|-------|-------|
| Nominal system voltage U_n | kV | 345 | 500 | 765 |
| Highest voltage for equipment U_m | kV | 362 | 550 | 800 |
| Maximum rated voltage U_r | kV | 288 | 468 | 612 |
| Maximum nominal discharge current I_n | kA | 10 | 20 | 20 |
| Maximum line discharge class | | 3 | 5 | 5 |
| Maximum energy absorption capability | kJ/kVr | 8 | 13 | 25 |
| Maximum long duration current impulse | A | 850 | 1.600 | 5.500 |
| Rated short-circuit current | kA | 65 | 65 | 100 |
| Maximum permissible service load | kNm | 4.5 | 12.5 | 34 |

| Highest voltage for equipment | Standard lightning impulse with stand voltage | Rated voltage | Continuous operating voltage | Line discharge class | Long durations current 2 ms | Maximum values of the residual voltages at discharge currents of the following impulses | | | | | |
|----------------------------------|---|---------------|------------------------------|----------------------|-----------------------------|---|------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
| | | | | | | 8/20 μ s 5kA (kV) | 8/20 μ s 10kA (kV) | 8/20 μ s 20kA (kV) | 30/60 μ s 0,5kA (kV) | 30/60 μ s 1kA (kV) | 30/60 μ s 2kA (kV) |
| 550 with solidly earthed neutral | 1.425 | 396 | 316 | 4 | 1.200 | 875 | 931 | 1.024 | 754 | 773 | 810 |
| | 1.300 | 396 | 316 | 5 | 1.600 | 865 | 911 | 993 | 747 | 774 | 802 |
| | 1.300 | 396 | 316 | 5 | 2.100 | 839 | 883 | 954 | 742 | 759 | 786 |
| | 1.425 | 399 | 319 | 4 | 1.200 | 882 | 938 | 1.032 | 760 | 779 | 816 |
| | 1.300 | 399 | 319 | 5 | 1.600 | 872 | 918 | 1.001 | 753 | 780 | 808 |
| | 1.300 | 399 | 319 | 5 | 2.100 | 846 | 890 | 961 | 748 | 765 | 792 |
| | 1.425 | 420 | 336 | 4 | 1.200 | 928 | 987 | 1.086 | 799 | 819 | 859 |
| | 1.425 | 420 | 336 | 5 | 1.600 | 918 | 966 | 1.053 | 792 | 821 | 850 |
| | 1.425 | 420 | 336 | 5 | 2.100 | 890 | 937 | 0.012 | 787 | 806 | 934 |
| | 1.550 | 444 | 355 | 5 | 1.600 | 970 | 1.021 | 1.113 | 837 | 868 | 898 |
| 1.425 | 444 | 355 | 5 | 2.100 | 941 | 990 | 1.069 | 832 | 851 | 881 | |

Como se pode ver, este catálogo contém 3 pontos de cada uma das curvas residuais (surto atmosférico e de manobra): o valor de U_m (550 kV), o valor de U_r (396, 399, 420 ou 444 kV), a classe de descarga (4 ou 5), o valor da tensão de operação contínua COV (316 a 355 kV) e o BIL (1300 a 1550 kV).

O item 9.6 contém a planilha dos dados a ser encaminhados ao ONS como resultado do projeto básico.

As características dos equipamentos já construídos e testados em seu recebimento pela Transmissora serão fornecidas ao ONS, na época da entrada em operação, por meio de um processo denominado “Como Construído”. Nesta fase os valores informados serão comparados àqueles informados na etapa de aprovação do projeto básico.

5.8. Transformadores de Corrente

Os transformadores de corrente devem ser especificados com as suas características nominais, tensão e corrente, de acordo com as diretrizes estabelecidas no anexo técnico do edital e nos Procedimentos de Rede. No tocante à corrente nominal, deve ser mantida a coerência com os critérios adotados na especificação dos correspondentes valores nominais de disjuntores e chaves seccionadoras, com base nas análises, conclusões e recomendações dos estudos na frequência fundamental e de fluxo de potência nos barramentos das subestações.

Precisam ser especificados os enrolamentos secundários em núcleos individuais, tais como número de enrolamentos secundários de medição e proteção, relações de transformação, carga, exatidão, capacidade de curto-circuito simétrica e assimétrica.

A seguir, são apresentados os principais itens a observar na especificação dos transformadores de corrente, sendo destacadas as interfaces com os estudos elétricos.

Tensão Nominal: deve ser especificada a tensão nominal do transformador de corrente (kV, eficaz – fase terra), em função da tensão nominal do sistema e da tensão máxima de operação contínua, de acordo com os resultados dos estudos elétricos de sistema e as diretrizes estabelecidas no anexo técnico do edital.

Tensão Máxima por até 1 Hora: é necessário especificar a tensão máxima (kV, eficaz), sob condições de emergência, correspondente à tensão a que os equipamentos terminais situados nas extremidades das linhas de transmissão possam submeter-se por até uma hora, conforme diretriz estabelecida no anexo técnico do edital.

Corrente Nominal e Fator Térmico: a corrente nominal dos transformadores de corrente deve ser compatível com a máxima corrente possível, na indisponibilidade de outros componentes na subestação. Deve também levar em consideração as capacidades de curta duração de linhas de transmissão conectadas, e as indisponibilidades externas em função das análises efetuadas nos estudos na frequência fundamental e de fluxo de potência nos barramentos da subestação, conforme apresentado nos itens 4.1.2 e 4.1.9 do presente documento.

Deve haver coerência com as correntes nominais especificadas para os disjuntores e chaves seccionadoras, localizados no mesmo vão.

Deve ser especificado o fator térmico para os transformadores de corrente.

Capacidade de Curto-circuito: os transformadores de corrente devem ser dimensionados respeitando os valores mínimos de corrente suportável nominal de curta duração (corrente de curto-circuito simétrica) e o valor de crista da corrente suportável nominal (corrente de curto-circuito assimétrica), conforme definido no anexo técnico do edital. Os fatores de assimetria precisam ser especificados em função dos resultados do cálculo da assimetria da corrente de curto-circuito, conforme abordado no item 4.2.15 do presente documento.

Enrolamentos Secundários, Relações de Transformação, Carga e Exatidão: essas características devem ser especificadas em função das necessidades dos sistemas de proteção e de medição das grandezas elétricas e medição de faturamento, quando aplicável. Deve ser explicitado o número de enrolamentos secundários destinados à proteção e à medição.

Os núcleos de proteção dos transformadores de corrente devem possuir classe de desempenho TPY ou TPZ, conforme estabelecido na Norma IEC 60.044-6 1992 (“Instrument transformers - part 6: Requirements for protective current transformers for transient performance”), considerando a constante de tempo primária (relação X/R) do ponto de instalação e o ciclo de religamento previsto, para que esses núcleos não saturem durante curtos-circuitos e religamentos rápidos.

Níveis de Isolamento: a especificação dos níveis de isolamento é função da tensão nominal padronizada para o equipamento. Ela abrange:

- Tensão suportável nominal a impulso atmosférico;
- Tensão suportável impulso de manobra.

Os níveis de isolamento devem ser compatíveis com as conclusões e recomendações dos estudos de transitórios eletromagnéticos e a coordenação do isolamento.

As características dos equipamentos já construídos e testados em seu recebimento pela Transmissora serão fornecidas ao ONS, na época da entrada em operação, por meio de um processo denominado “Como Construído”. Nesta fase os valores informados serão comparados àqueles informados na etapa de aprovação do projeto básico.

5.9. Transformadores de Potencial

Os transformadores de potencial serão especificados de acordo com as diretrizes estabelecidas no anexo técnico do edital, nos Procedimentos de Rede e nas normas em vigor aplicáveis (IEC 60044-5 e ABNT NBR 6855:2009).

A seguir, são apresentados os principais itens a observar na especificação dos transformadores de potencial, sendo destacadas as interfaces com os estudos elétricos.

Tensão Nominal: deve ser especificada a tensão nominal do transformador de potencial (kV, eficaz – fase terra), em função da tensão nominal do sistema e da tensão máxima de operação contínua, de acordo com os resultados dos estudos elétricos de sistema e as diretrizes estabelecidas no anexo técnico do edital.

Tensão Máxima por até 1 Hora: deve ser especificada a tensão máxima (kV, eficaz), sob condições de emergência, correspondente à tensão a que os equipamentos terminais situados nas extremidades das linhas de transmissão possam submeter-se por até uma hora, conforme diretriz estabelecida no anexo técnico do edital.

Enrolamentos Secundários, Relações de Transformação, Carga e Exatidão: essas características devem ser especificadas em função das necessidades dos sistemas de proteção e de medição das grandezas elétricas e medição de faturamento, quando aplicável.

Deve ser explicitado o número de enrolamentos secundários destinados à proteção e à medição.

Níveis de Isolamento: a especificação dos níveis de isolamento é função da tensão nominal padronizada para o equipamento. Ela abrange:

- Tensão suportável nominal a impulso atmosférico;
- Tensão suportável impulso de manobra.

Os níveis de isolamento devem ser compatíveis com as conclusões e recomendações dos estudos de coordenação do isolamento.

As características dos equipamentos já construídos e testados em seu recebimento pela Transmissora serão fornecidas ao ONS, na época da entrada em operação, por meio de um processo denominado “Como Construído”. Nesta fase os valores informados serão comparados àqueles informados na etapa de aprovação do projeto básico.

5.10. Compensação Estática Shunt (CER)

A compensação estática shunt — ou compensador estático de reativos (CER) — deve ser especificada e dimensionada tendo como diretriz o atendimento aos requisitos estabelecidos no anexo técnico do edital referente ao empreendimento objeto do leilão, nos Procedimentos de Rede e também com base no estabelecimento das condições de contorno sistêmicas a partir dos estudos na frequência fundamental, transitórios eletromagnéticos e do estudo da determinação das características de impedância harmônica, vista do ponto de acoplamento comum (PAC) da Rede Básica, conforme apresentado no item 4.2.18 do presente documento.

Caberá ao fabricante apresentar o dimensionamento do CER a partir das características de contorno fornecidas pelo cliente. O fabricante deve fornecer os modelos computacionais do CER, com base nas características e parâmetros finais do equipamento, a ser utilizados em futuros estudos de sistema, com as ferramentas para estudos de fluxo de potência, de transitórios eletromecânicos e transitórios eletromagnéticos.

A seguir, são apresentados os principais itens a observar na especificação do CER.

- **Condições Gerais**

- O sistema de controle do compensador estático não pode comprometer o desempenho do SIN, tanto em operação normal como sob contingências, emergências e operação degradada, para os regimes permanente e transitório;
- O compensador estático não deve propiciar o surgimento de condições de ferrorressonância, nem de saturação assimétrica de núcleos de transformadores;
- Para qualquer cálculo de harmônicos e filtros, devem ser consideradas as tolerâncias de fabricação das impedâncias dos transformadores elevadores do CER, incluindo as diferenças entre fases, bem como os valores especificados de tensão de sequência negativa da rede e da faixa de variação da frequência fundamental;
- O controle do CER precisa ser concebido de forma a evitar “hunting” com controles de outros CERs eletricamente próximos. As operações do sistema de controle de elementos manobráveis e/ou comutadores automáticos de transformadores (do compensador estático ou externos) não devem dar origem a oscilações intermitentes “huntings” entre estes elementos, nem entre nenhum deles e o controle do compensador;
- O controle do compensador estático será concebido de forma a contribuir para minimizar as perturbações no sistema elétrico, durante uma falta. O controle deve ser dimensionado considerando a necessidade de atuação do esquema de religamento monopolar;

- O controle do CER deve permitir a entrada de sinais de grandezas elétricas adicionais (fluxo de potência ativa, frequência, etc.), com o objetivo de modular, se necessário, a potência reativa do CER no sentido de amortecer oscilações de tensão, oscilações de potência na rede elétrica e ressonâncias subsíncronas;
- O controle do CER será projetado de forma a não comprometer a estabilidade de tensão da rede elétrica. Para tanto, deve identificar a sensibilidade da tensão da rede elétrica à variação da susceptância do CER, e adotar medidas corretivas no sentido de evitar condições de instabilidade;
- O sistema de controle deverá dispor:
 - ✓ de uma malha de otimização (ganho adaptativo) de ganho do CER (controlador proporcional-integral) de forma a garantir que o ganho esteja adequado ao nível de curto-circuito do ponto de conexão. Esta malha deverá definir um novo ganho com frequência de atualização ajustável (por exemplo, a cada 30 minutos ou uma hora) e após contingências no SIN que afetem o CER;
 - ✓ de uma malha de controle da estabilidade (controlador de estabilidade) do CER por meio de um redutor de ganho do controlador PI de forma a permitir que o CER se adeque aos novos pontos de operação do sistema após uma perturbação, onde a potência de curto-circuito do ponto de conexão tenha sido reduzida. Deve ser demonstrado o desempenho do compensador estático para a operação em condições nominais e degradadas por meio de estudos, com programas de transitórios eletromagnéticos e de estabilidade transitória e dinâmica, a serem elaborados pelo agente transmissor;
- Todos os equipamentos integrantes do CER serão dimensionados para suportar solicitações de curto-circuito na barra de conexão da Rede Básica, considerando os níveis de curto-circuito simétrico e assimétrico estabelecidos no anexo técnico do edital;
- Deve ser possível ajustar a inclinação da rampa do controle do CER de forma contínua dentro da faixa de tensão operativa em regime permanente, conforme definida no anexo técnico do edital;
- O ciclo de sobrecarga indutiva do CER deve ser especificado tomando como base os estudos de sistema, sobretensões transitórias e temporárias.
- **Tensão Nominal e Limites de Potência Reativa:** a tensão nominal do CER (kV), a faixa de tensão operativa em regime permanente (kV) e a capacidade nominal contínua em MVar, para tensão nominal, devem ser especificadas conforme diretriz estabelecida no anexo técnico do edital, e confirmadas pelos estudos elétricos de sistema.

- **Desempenho Harmônico**

- A avaliação do desempenho harmônico deve tomar como referência o envelope de impedância harmônica da rede CA externa ao CER, conforme abordado no item 4.2.18.4 do presente documento, considerando os diversos cenários de evolução da rede ao longo do período de concessão, nos patamares de carga leve, média e pesada, além das configurações de rede completa e degradada (n-1), e das configurações operativas do equipamento;
- O desempenho harmônico precisa atender aos limites estabelecidos no submódulo 2.9 dos Procedimentos de Rede do ONS, considerando as condições de máxima dessintonia dos filtros e as condições mais severas de geração de correntes harmônicas pelos TCRs e TSCs;
- Considere-se a possibilidade de operação da rede CA com desbalanço máximo de sequência negativa de 2,0%. Nos casos de filtros ativos ou passivos de sintonia automática, devem ser considerados os erros de controle;
- O desempenho harmônico, na perspectiva da distorção harmônica no ponto de acoplamento comum (PAC) com a Rede Básica, deve ser demonstrado por meio de estudos e de medições nos barramentos CA da Rede Básica conectados à subestação conversora, conforme estabelecido no submódulo 2.9 dos Procedimentos de Rede;
- Não permitir que as correntes harmônicas nas linhas CA conectadas ao CER produzam interferências em linhas telefônicas em operação, na data de comissionamento do CER, acima dos limites das normas correspondentes. Devem ser estabelecido os limites para os indicadores TIF (“Telephone Interference Factor”) e do produto IT do lado CA, visando a atingir tal requisito.
- **“Rating” dos Filtros Harmônicos:** para definição do “rating” dos elementos dos filtros, deve-se avaliar as harmônicas externas ao CER, considerando os valores limites estabelecidos em Tabelas publicadas no submódulo 2.9 dos Procedimentos de Rede do ONS, correspondentes aos limites globais e individuais.
- **Perdas Máximas:** as perdas máximas totais do CER, incluindo a potência de serviços auxiliares para refrigeração das válvulas e do transformador, serão especificadas de acordo com as diretrizes estabelecidas no anexo técnico do edital.
- **Modelos para Programas Computacionais:** deve fazer parte da especificação do CER a solicitação do fornecimento, por parte do fabricante, dos modelos para os programas computacionais conforme a seguir:

Tabela 5.9: Modelos Computacionais para Estudos de Sistema.

| Aplicação | Programa Computacional | Observação |
|--|--------------------------------------|---|
| Estudos de Fluxo de potência | Anarede | |
| Estudos de transitórios eletromecânicos | Anatem | |
| Estudos de transitórios eletromagnéticos | ATP – Alternative Transients Program | O grau de detalhamento do modelo deve ser definido pelo fabricante, de modo a permitir a análise do desempenho do CER frente a surtos de manobra. |

- **Níveis de Isolamento:** a especificação dos níveis de isolamento será em função da tensão nominal padronizada para os componentes do CER. Ela abrange:
 - Tensão suportável nominal a impulso atmosférico;
 - Tensão suportável impulso de manobra.

Os níveis de isolamento devem ser compatíveis com as conclusões e recomendações dos estudos de transitórios eletromagnéticos, e com a coordenação do isolamento.

5.11. Compensação Série (CS)

A compensação série deve ser especificada e dimensionada tendo como diretriz os requisitos estabelecidos no anexo técnico do edital referente ao empreendimento objeto do leilão, nos Procedimentos de Rede e também com base no estabelecimento das condições de contorno sistêmicas a partir dos estudos de sistema, dentre elas o valor das correntes de “swing” máximas — às quais ficam sujeitos os bancos de capacitores série, conforme abordado no item 4.2.19 do presente documento.

Caberá ao fabricante apresentar o dimensionamento da compensação série, a partir das características de contorno sistêmicas fornecidas pelo cliente.

O fabricante deve fornecer a memória de cálculo com o dimensionamento dos diversos componentes da compensação série.

A seguir, são apresentados os principais itens a observar na especificação da compensação série (CS).

- **Condições Gerais**

- A reatância capacitiva total do banco deve ser calculada e especificada com base no percentual de compensação da linha estabelecido neste anexo técnico do edital, assim como em seu comprimento, em função do projeto da linha de transmissão;
- A corrente de swing adotada no projeto do banco série deve ser a obtida por meio das simulações dinâmicas desenvolvidas na etapa dos estudos de sistema, conforme apresentado no item 4.2.19 do presente documento;

- A capacidade de sobrecarga deve atender à norma ou a valores superiores, quando os estudos de sistema assim o indicarem;
- A compensação série e seu esquema de proteção devem ser dimensionados considerando não apenas o ano de entrada em operação, mas também o ano horizonte de planejamento, tomando como referência os estudos de sistema realizados e os dados disponibilizados pela EPE e pelo ONS;
- As tolerâncias admitidas com relação à capacitância dos bancos de capacitores série são as seguintes: $\pm 2,0\%$ por fase em relação ao valor especificado. Nenhum valor medido de quaisquer das três fases deve afastar-se mais de 1% do valor médio medido das três fases;
- O valor médio das perdas dielétricas de cada unidade capacitiva à tensão e frequência nominais, com resistor de descargas e à temperatura de 20°C, deve ser de, no máximo, 0,12 W/kvar para capacitores sem fusíveis internos, e 0,16 W/kvar para capacitores com fusíveis internos;
- O banco de capacitores série fixo não deve provocar o surgimento de fenômeno de ressonância subsíncrona na região onde será instalado, devendo ser estudada a possibilidade da sua ocorrência, quando justificado, conforme diretriz apresentada no item 4.2.19.5 do presente documento;
- Nos casos em que o banco de capacitores série estiver conectado à subestação terminal de linha de transmissão, os equipamentos conectados ao terminal do banco no lado da LT — como reatores em derivação, transformadores de potencial, para-raios, equipamentos de onda portadora, etc. — deverão ser especificados para operar continuamente com a máxima tensão possível em regime permanente, a qual pode ser superior àquela indicada na Tabela 4 do submódulo 2.3. A tensão do lado de linha do terminal do banco de capacitores deve ser calculada considerando a máxima tensão operativa no barramento da subestação terminal e a máxima corrente especificada para a operação do referido banco.
- Devem ser previstos, nas estruturas que sustentam o banco série, o espaço e a capacidade mecânica de suportar uma futura ampliação da capacidade nominal do banco, conforme geralmente recomendado no anexo técnico do edital.
- **Características Específicas:** as características específicas, como a corrente nominal e a capacidade de suportar sobrecarga, devem atender aos requisitos estabelecidos no anexo técnico do edital, sendo compatíveis com as capacidades de longa e curta duração da linha de transmissão. Aplicam-se também com referência aos limites da norma IEC60143-1“Series capacitors for power systems”, e o disposto no item 2.2.4.3 do submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS.

- **Requisitos dos Varistores dos Equipamentos de Compensação Reativa Série:** os varistores dos equipamentos de compensação reativa série deverão ser definidos levando em consideração todos os cenários e intercâmbios previstos, da configuração inicial ao ano horizonte de planejamento, bem como todos os tipos de falta.

Os requisitos de energia dos varistores serão definidos para condição de falta externa mais crítica, inclusive para a condição de linha paralela, quando existir, fora de serviço.

Não será permitida a atuação de dispositivos de proteção dos varistores para faltas externas ao banco série, à exceção dos seguintes casos específicos:

- Faltas externas eliminadas em tempo superior ao tempo máximo de eliminação de defeito em milissegundos – t_m (100 ms para $V_N > 345$ kV e 150 ms para $V_N < 345$ kV). Neste caso, o dispositivo de proteção dos varistores só poderá atuar t_m milissegundos, após a detecção da falta. O banco de capacitores série deve ser reinserido em até 300 ms após a eliminação da falta.
- Faltas externas trifásicas eliminadas em até t_m milissegundos, com religamento malsucedido após 500 ms de tempo morto. Neste caso, o dispositivo de proteção dos varistores só poderá atuar após t_m milissegundos da tentativa mal sucedida de religamento.

Documentação Exigida: deve ser apresentada pelo fabricante a seguinte documentação:

- Memória de cálculo do dimensionamento dos diversos componentes do “Main Circuit”;
 - Descrição do comportamento térmico do banco após aplicação de uma sequência de faltas e da atuação do by-pass, incluindo a curva de aquecimento/resfriamento do banco;
 - Estudo de dimensionamento do MOV do banco série e da definição dos ajustes de by-pass por corrente ou energia, a ser realizado no programa ATP (Alternative Transients Program);
 - Modelos de transitórios eletromagnéticos para a representação do banco série no programa ATP, em meio digital, e com a documentação correspondente.
- **Níveis de Isolamento:** a especificação dos níveis de isolamento será em função da tensão nominal padronizada para os componentes da CS. Ela abrange:
 - Tensão suportável nominal a impulso atmosférico;
 - Tensão suportável impulso de manobra.

Os níveis de isolamento devem ser compatíveis com as conclusões e recomendações dos estudos de transitórios eletromagnéticos e de coordenação do isolamento.

6.Referências para Estudos e Equipamentos

- [6.1] Procedimentos de Rede - Submódulo 2.3 Diretrizes e Critérios Para Estudos Elétricos;
- [6.2] D'Ajuz, Ary. e outros "Equipamentos Elétricos - Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão". Rio de Janeiro, Furnas, 1985;
- [6.3] D'Ajuz, Ary. e outros "Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – aplicação em sistemas de potência da alta tensão", Rio de Janeiro, – Universidade Federal Fluminense /EDUFF – 1987,Niteroi;
- [6.4] Antônio Carlos C. de Carvalho et.all, Disjuntores e Chaves - aplicação em sistemas de potência,– Universidade Federal Fluminense /EDUFF – 1985,Niteroi;
- [6.5] Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers – Guide for Applications: Lines, Reactors, Capacitors, Transformers (1st Part, 2nd Part)", publicados na Revista ELECTRA do Cigré, N° 183/85, April/August 1999;
- [6.6] Alternative Transients Program (ATP) Rule Book, Leuven - Bélgica, 1987;
- [6.7] IEEE Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers – IEEE Std C37.011;
- [6.8] Cigré-Brasil - CE A3 - Workshop Superação de Disjuntores por Tensão de Restabelecimento Transitória – Rio de Janeiro 03 a 04/08/2011;
- [6.9] XVII SNPTEE – Aplicação da Rotina Models e da Interface ATPDraw do Programa ATP/EMTP para o Cálculo dos Valores de Pico, dos Instantes de tempo correspondentes e da Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) em Disjuntores, bem como a impressão de Envoltórias de referência normalizadas –19 a 24 outubro 2003 – Uberlândia – MG;
- [6.10] The usage of ATP-TACS Subrotine in Calculation of Transient Recovery Voltage for Circuit Breakers: Direct Computation of Peak Values, Corresponding Times and Rate-of-Rise and Generation of Reference Envelopes – Jorge Amon Filho – Furnas Centrais Elétricas S.A - Brasil;
- [6.11] Critérios para Análise de Superação de Equipamentos de Alta Tensão: Disjuntores, Secionadoras, TC e Bobina de Bloqueio – Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS;
- [6.12] ABNT NBR IEC 62271-100 – Equipamentos de alta-tensão Parte 100: Disjuntores de alta-tensão de corrente alternada;
- [6.13] ABNT NBR IEC 62271-102:2006 - Equipamentos de alta-tensão Parte 102: Secionadores e chaves de aterramento;
- [6.14] Cigre WG 33.02 - Guidelines for Representation of Network Elements when Calculating Transients; CIGRE Technical Brochure 39, 1990.

- [6.15] IEC 60071-2, Insulation Coordination – Part 2: Application Guide, 3a. Edição, 1996.
- [6.16] IEEE lightning and Insulator Subcommittee of the T&D Committee, Parameters of Lightning Strokes: A Review, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, N° 1, páginas. 346 a 358, 2005.
- [6.17] CIGRE Study Committee 33, “Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines”, CIGRE Technical Brochure 63, 1991.
- [6.18] F. Heidler and C. Hopf, “Measurement results of the electric fields in cloud-toground lightning in nearby Munich, Germany,” IEEE Trans.On Electromagnetics Compatibility, Vol. 40, No. 4, 1998.
- [6.19] Relatórios de Projeto Básico dos projetos de transmissão em corrente contínua do Madeira e Belo Monte.
- [6.20] Interação entre Transformadores e o Sistema Elétrico com foco nos Transitórios Eletromagnéticos de Alta Frequência; Grupo de Trabalho JWG A2/C4-3 BT012, Cigré, Maio de 2011.
- [6.21] B. Gustavsen, A. Semlyen, Rational Approximation of Frequency Domain Responses by Vector Fitting, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, Iss.3, pp. 1052-1061, July 1999.
- [6.22] HYSTERESIS HEVIA: a new routine to generate input data for inductors with hysteresis; Orlando P, Hevia, EEUG News, Feb-May 2000
- [6.23] IEEE Working Group 15.08.09, Modeling and Analysis of System Transients Using Digital Program,Piscataway: IEEE PES Special Publication, 1998.
- [6.24] Electrical Power Systems Quality, Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso and H. Wayne Beaty, 2004.
- [6.25] Procedimentos de Rede do ONS - submódulo 2.9 Requisitos mínimos de qualidade de energia elétrica para acesso ou integração à Rede Básica, revisão 2022.10;
- [6.26] Steurer, M., Fröhlich, K. The Impact of Inrush Currents on the Mechanical Stress of High Voltage Power Transformer Coils – IEEE Transactions on power delivery, Vol. 17, N. 1, January 2002;
- [6.27] ONS DPL-NT-0147/2018 Revisão 1 - Religamento Monopolar - Extinção de Arco - Modelagem e Efeitos de Estruturas de SIL Elevado – dezembro de 2019;
- [6.28] Pinceti, P., Giannettoni, M., A simplified model for zinc oxide surge arresters – IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 14, No 2, April 1999;
- [6.29] ONS DPL-NT-0098/2020 Revisão 0 - Compensação Reativa Manobrável e Controlável - Aspectos Operacionais, Especificação de Equipamentos e Estudos de Desenergização de Reatores – setembro de 2020.

7. Diretrizes e Critérios para Linha de Transmissão

A principal diretriz para o projeto de novas linhas de transmissão é considerar que serão integradas ao sistema existente e a ele deverão adaptar-se, sem comprometer ou limitar a sua operação, nem impor restrições operativas às demais instalações do SIN.

É importante ressaltar que o projeto básico de linhas de transmissão deve observar os requisitos definidos no Submódulo 2.7 dos Procedimentos de Rede, “Requisitos Mínimos para Linhas de Transmissão”. Além destes, precisam ser observados os requisitos definidos nos instrumentos de outorga da linha em questão, que, em caso de leilão da transmissão, são os Anexos Técnicos do Edital da Transmissão.

A seguir, são detalhados os pontos mais relevantes para constar de projetos básicos de linhas de transmissão, tendo em vista o processo de verificação da conformidade do projeto em relação aos requisitos dos Procedimentos de Rede e dos instrumentos técnicos de outorga.

7.1. Definição do Traçado Preliminar

Contribuem para a elaboração de um projeto básico robusto a análise das alternativas das possíveis rotas para a linha de transmissão e a escolha de um traçado preliminar — o mais próximo daquele a ser implantado na fase do projeto executivo da linha.

Durante a definição do traçado da linha, mesmo que preliminar, devem-se evitar interferências que possam prejudicar a construção, manutenção e operação da linha.

Alguns aspectos relacionados à escolha do traçado favorecem a implantação e manutenção da linha: a existência, na região, de infraestrutura para deslocamento de pessoal e transporte de materiais e equipamentos, tais como, rodovias, estradas e rios navegáveis, além da possibilidade de implantação de vias de acesso até a faixa de passagem; e a existência de terrenos planos ou pouco acidentados ao longo do traçado da linha.

No passado, o estudo do traçado preliminar da linha considerava as informações advindas das cartas topográficas do IBGE, da Diretoria do Serviço Geográfico do Ministério do Exército. Atualmente, são utilizados mapas gerados por ferramentas computacionais georeferenciadas, tais como a plataforma do Google Maps, bem como informações obtidas a partir do conhecimento prévio das peculiaridades da região, adquirido no campo.

A planta do traçado da linha deve conter, ao menos, a tabela de vértices com suas respectivas coordenadas geográficas ou projeções cartográficas, o “datum” ou centróide de referência e a zona da projeção UTM (se for adotado o sistema de projeção). Além disso, caso a linha em projeto cruze com outras linhas da Rede Básica, devem constar as informações das linhas cruzadas, conforme lista específica indicada nos Anexos Técnicos (AT) [8.1] ou no item 3.9 do submódulo 2.7 dos Procedimentos

de Rede (SM 2.7) [8.2]. Cruzamentos entre LT que colocam em risco a operação do SIN podem ser questionados durante a análise do projeto básico ou ao longo do processo de implantação do empreendimento, cabendo ao agente de transmissão estabelecer medidas mitigadoras de risco de desligamento envolvendo mais de um circuito no vão de cruzamento.

A tabela de vértices precisa conter a cota de cada vértice e as distâncias horizontais entre vértices (distância parcial ao vértice anterior e distância acumulada ao vértice de origem da linha).

Outras informações relativas ao traçado da linha poderão constar do projeto básico, tais como as relacionadas com: impacto ao meio ambiente (por exemplo: uso de estruturas mais elevadas para a transposição de áreas onde haja restrição à supressão de vegetação protegida por lei); proximidade a aeroportos ou aeroclubes; transposição de grandes rios, etc.

7.2. Levantamento dos Parâmetros Meteorológicos e Ambientais

Os parâmetros meteorológicos, necessários às avaliações elétricas e mecânicas do projeto básico, devem ser determinados, preferencialmente, com base nas informações oriundas das estações meteorológicas disponíveis na área de implantação do empreendimento.

Quando não houver medição disponível nas proximidades do empreendimento, os parâmetros meteorológicos poderão ser estimados com base nos dados das estações meteorológicas mais próximas ao empreendimento, ajustados em função da qualidade do dado ou das distâncias da linha às estações selecionadas.

As séries históricas de velocidade e direção do vento, temperatura ambiente, pressão atmosférica e umidade do ar são confeccionadas a partir dos registros oriundos das estações meteorológicas, coletados ao longo dos anos.

A frequência das descargas atmosféricas nuvem-solo pode ser obtida dos mapas de densidade (Ng) ou a partir dos registros de descargas capturados pelas redes de sensores de solo.

Dos AT [8.1] consta o seguinte requisito: “É de responsabilidade da TRANSMISSORA obter os dados, inclusive os descritivos das condições ambientais e geomorfológicas da região de implantação, a ser adotados na elaboração do projeto básico, bem como nas fases de construção, manutenção e operação das instalações”. Logo, cabe à TRANSMISSORA perseguir os dados mais representativos da região de implantação do empreendimento.

O projeto básico deve informar todos os dados meteorológicos e ambientais necessários às avaliações elétricas e mecânicas da linha.

7.2.1. Temperatura Ambiente

Os dados de temperatura ambiente são utilizados, por exemplo, nas avaliações de capacidade de corrente do condutor e no cálculo mecânico dos cabos.

As temperaturas ambientes mais utilizadas nas avaliações do projeto básico são: mínima absoluta; média das mínimas diárias; média; média das máximas diárias e máxima absoluta. Dependendo da avaliação a ser feita no projeto básico, adota-se uma ou mais temperaturas ambientes. Por exemplo: na avaliação da capacidade corrente do condutor, é comum adotar a média das máximas diárias, enquanto que no cálculo mecânico dos cabos normalmente se utilizam as temperaturas mínima absoluta (tração máxima sem vento), média das mínimas diárias (tração máxima para o vento máximo) e média (tração de partida na condição mais frequente – EDS). Os valores de temperatura podem ser anuais ou relacionados a um período mais crítico do ano.

O INMET – Instituto Nacional de Meteorologia disponibiliza dados históricos de temperatura ambiente para a quase totalidade do país.

Uma forma de determinar as temperaturas ambientes de projeto é descrita a seguir.

Selecionam-se as estações meteorológicas mais próximas do empreendimento, e, a partir das séries históricas dessas estações, levantam-se os perfis de temperatura ambiente ao longo da linha de transmissão por interpolação numérica. Com base nos perfis de temperatura levantados, são atribuídos valores para as temperaturas ambientes de interesse do projeto.

Outra forma, menos precisa, para estimar as temperaturas ambientes é por meio dos mapas de isotermas constantes do Anexo da NBR 5422 [8.5], Figuras 23 a 27.

Figura 7.1 Mapa do Brasil de Temperatura Mínima. Fonte: INMET.

Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990
Temperatura mínima (°C)

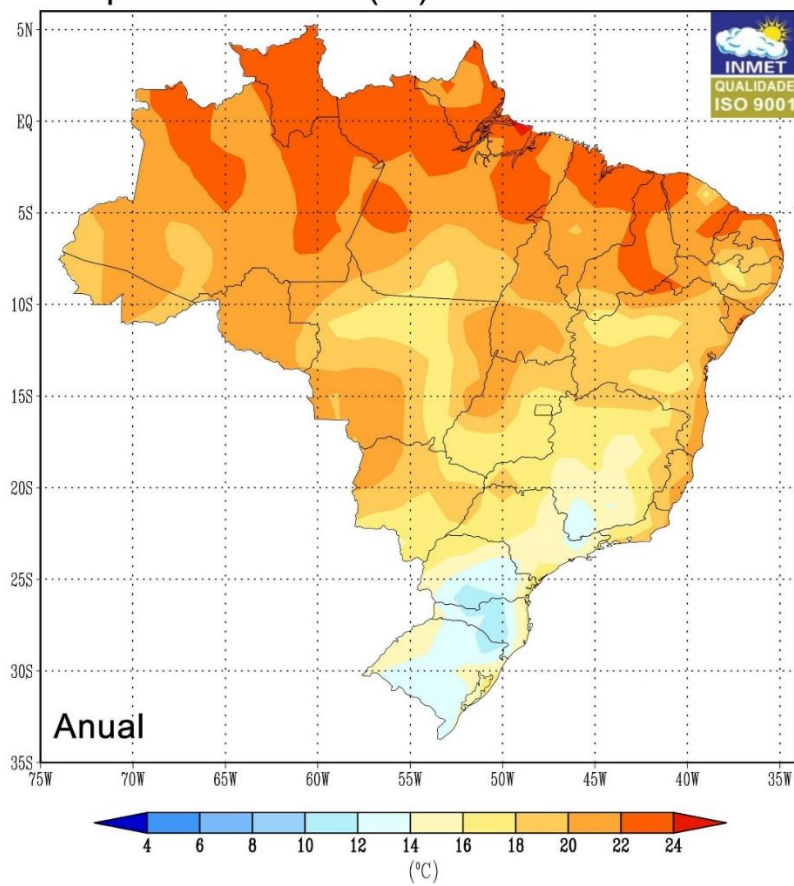
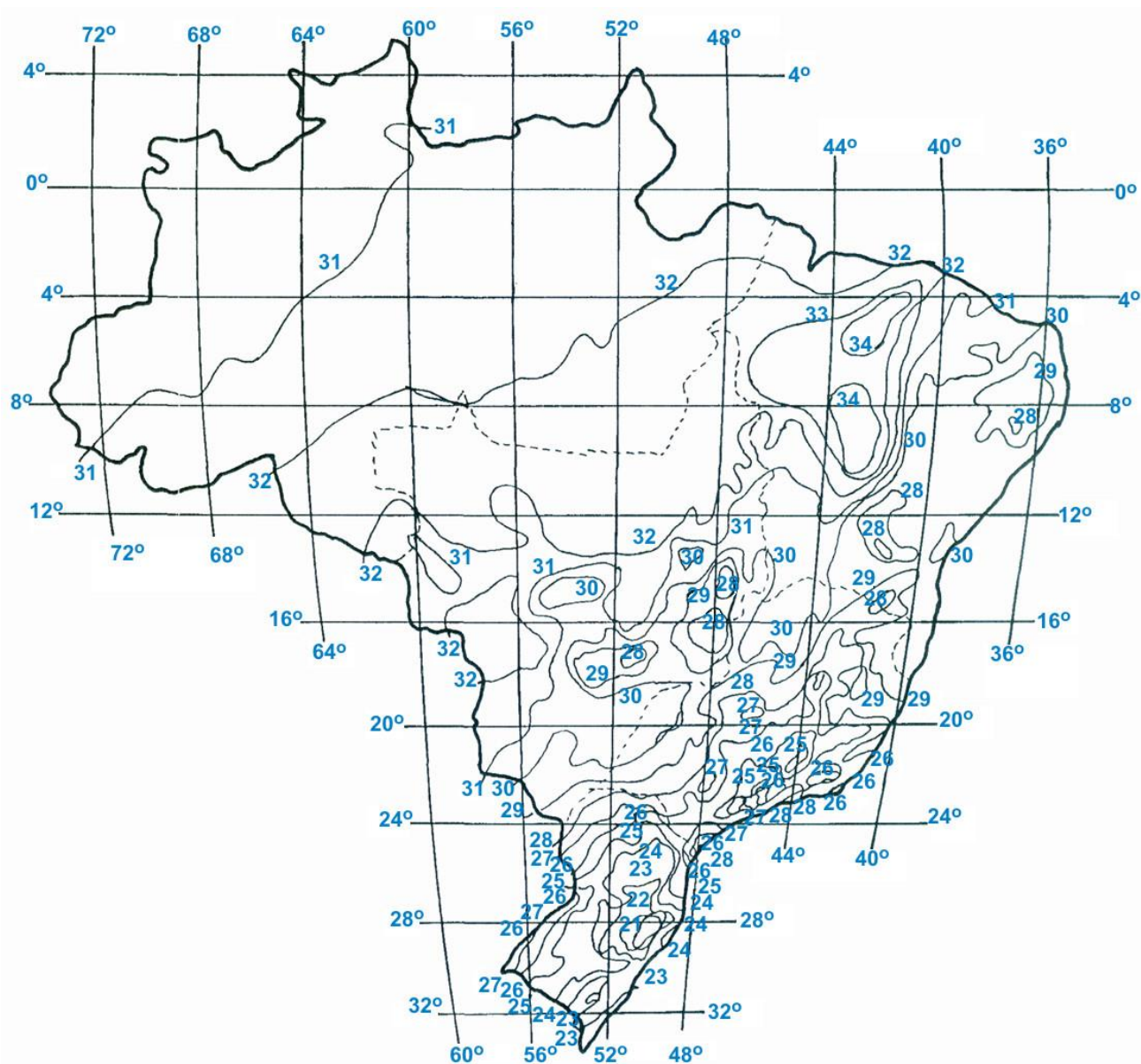


Figura 7.2 Mapa do Brasil com Isotermas para a Temperatura Máxima Média. Fonte NBR 5422[8.5].



7.2.2. Velocidade de Vento

Os dados de velocidade de vento, parametrizados em diferentes formas, são utilizados em várias análises do projeto básico, tais como: na avaliação da capacidade de corrente em regime permanente do condutor; no estudo de coordenação do isolamento das estruturas; na definição da largura da faixa de segurança; no cálculo mecânico dos cabos condutor e para-raios; e no dimensionamento mecânico das estruturas.

Algumas instituições de serviço público ou de pesquisa, em nível nacional, tais como o DECEA – Ministério da Aeronáutica, INMET – Instituto Nacional de Meteorologia, INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e o Climatempo, sob consulta, disponibilizam dados históricos de vento. Outras instituições com atuação regional também coletam dados de vento, como centros de pesquisas em agronomia ou agropecuária, defesa civil e empresas proprietárias de parques eólicos.

Tanto os AT [8.1] quanto o SM 2.7 [8.2] informam que o cálculo das velocidades e pressões de vento, para o projeto mecânico da linha de transmissão, deve ser desenvolvido segundo a IEC 60.826 [8.4]. Além disso, consta também que “para o projeto mecânico de uma linha de transmissão, os carregamentos oriundos da ação do vento nos componentes físicos da linha de transmissão devem ser estabelecidos a partir da caracterização probabilística das velocidades de vento da região, com tratamento para fenômenos meteorológicos severos, tais como, sistemas frontais, tempestades, tornados, furacões, etc”.

Nas regiões do Brasil onde há registros de fenômenos meteorológicos severos, tais como a região oeste do Paraná e litorânea dos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, por exemplo, a estimativa das velocidades de vento de projeto deve ser mais criteriosa e munida de fatores de segurança robustos, dada a particularidade do fenômeno, principalmente quando se trata de ventos de alta intensidade como tornados.

Tratamento dos dados de vento – No tratamento dos dados de vento, geralmente se aplicam: o conceito da distribuição estatística de extremos de Gumbel no cálculo da intensidade do vento para um período de retorno correspondente, e para ajustar os valores espacialmente; e o método dos mínimos quadrados, que geralmente é mais conservador quando comparado ao método dos momentos ou da máxima verossimilhança.

Para cada estação meteorológica de interesse do projeto, são levantados o número de anos de coleta de dados e a série das velocidades máximas anuais a partir dos registros contidos nos históricos de velocidade de vento. Em seguida, são calculados o valor médio das velocidades máximas anuais e o respectivo coeficiente de variação de cada série. Do histórico de velocidades de vento também podem ser estimados os fatores de rajada do vento para os períodos de integração da média de 3s e 30s referenciados ao período de integração de 10 minutos. Podem ser adotados valores típicos regionais

para o fator de rajada (30 s / 10 min) somente quando não há dado suficiente nos históricos de velocidades para a estimativa desse fator de rajada.

Com os dados de vento das estações anemométricas e uma ferramenta computacional que trate e interpole esses dados, é possível gerar as isotacas da região, no entorno da linha de transmissão, para os períodos de retorno e de integração da média de interesse, que norteiam a estimativa das velocidades de vento de projeto.

Vários valores de velocidade de vento de projeto são extraídos dos estudos de vento. Cada valor de vento de projeto se aplica a uma avaliação específica no projeto básico e está parametrizado na forma abaixo.

$$V_p(T; t; h; cat)$$

Onde:

T - provável período de retorno do vento

t - período de integração da média

h - altura de referência da medição

cat - categoria do terreno (letra que indica o grau de rugosidade do terreno ao longo da linha, conforme Tabela 1 da NBR 5422 [8.5])

No projeto básico, devem indicar-se no mínimo os seguintes ventos de projeto, conforme Tabela 7.1:

Tabela 7.1. Ventos de Projeto Adotados no Projeto Básico.

| Vento de projeto | Período de retorno do vento (anos) | Período de integração da média (min. ou s) | Aplicação |
|-----------------------------------|------------------------------------|--|---|
| Extremo | 150 ou 250 | 10 min. | Cálculo estrutural e mecânico dos cabos |
| Tormentas elétricas | 150 ou 250 | 3 s | Cálculo estrutural |
| Para cálculo do ângulo de balanço | 50 | 30 s | Determinação da largura da faixa de segurança |
| | 30 | 30 s | Estudo de coordenação de isolamento (frequência industrial) |

Os AT [8.1] e o SM 2.7 [8.2] determinam que “o nível de confiabilidade do projeto eletromecânico, expresso pelo período de retorno do vento extremo, deve ser compatível com um nível intermediário entre os níveis 2 e 3 preconizados na IEC 60.826 [8.4]”, vide Tabela 7-2, abaixo.) “Deve ser adotado período de retorno do vento igual ou superior a 150 anos para LT de tensão nominal igual ou inferior a 230 kV e igual ou superior a 250 anos para LT de tensão superior a 230 kV”.

Tabela 7.2. Níveis de Confiabilidade para Linhas de Transmissão.

| Reliability Levels | 1 | 2 | 3 |
|--|----|-----|-----|
| T. return period of climatic limit loads, in years | 50 | 150 | 500 |

7.2.3. Umidade Relativa do Ar e Pressão Atmosférica

A caracterização da média e do desvio padrão da densidade relativa do ar (DRA) e dos fatores de correção atmosféricos (FCAs), para frequência industrial e impulsos, é feita através da medição simultânea a cada hora (séries horárias) da temperatura do ar, umidade relativa do ar e pressão atmosférica, medidas num período mínimo de 10 anos. As séries horárias de dados, para várias localidades do Brasil, encontram-se disponíveis na DECEA e no INMET.

7.2.4. Descargas Atmosféricas

Da NBR 5419[8.6] constam dois mapas cerânicos: um mapa de curvas isocerânicas para todo o Brasil, cujo levantamento é antigo, ou seja, feito no início do século passado; e outro mapa, mais recente, de curvas isocerânicas para a região SUDESTE, elaborado a partir dos registros de contadores de descargas. Esses mapas informam valores de nível cerânico (TD).

O ONS elaborou, em parceria com o INPE, o “Mapa de Densidade de Descargas Atmosféricas – Período de Apuração: 1998 – 2009”, para todo o território nacional, concebido a partir dos registros de descargas atmosféricas capturados do espaço pelo sensor LIS – Lightning Image Sensor a bordo do satélite TRIMM – Tropical Rainfall Measuring Mission. Esse mapa informa valores de densidade de descargas atmosféricas (Ng).

Os dados de descargas atmosféricas são imprescindíveis à avaliação da blindagem dos cabos para-raios sobre os condutores, nas estruturas da linha e na avaliação do desempenho da linha de transmissão para este fenômeno atmosférico. Essas avaliações fazem parte do estudo de coordenação do isolamento das estruturas.

7.3. Escolha do Condutor

No atual modelo de expansão do setor elétrico, o Planejamento — por meio dos relatórios que tratam da análise técnico-econômica das alternativas estudadas (R1) e/ou do detalhamento da alternativa de referência (R2) — indica uma configuração básica para o empreendimento a ser licitado pela ANEEL, com desempenhos mínimos e características especiais. É praxe constar do R2 vários estudos de dimensionamento em regime permanente ou transitório. No caso das linhas de transmissão, um desses estudos é o de otimização do condutor para a configuração básica do empreendimento.

Entretanto, é permitido à TRANSMISSORA propor uma configuração alternativa à básica do empreendimento, desde que os desempenhos elétricos e mecânicos dessa nova configuração sejam

iguais ou superiores aos da configuração básica. Dentro desse enfoque, permite-se ao empreendedor utilizar, na linha de transmissão, um condutor diferente do recomendado na configuração básica. Para tanto, é necessário constar do projeto básico todas as verificações e comprovações atinentes às metas de desempenho elétrico e mecânico do condutor.

Uma das avaliações elétricas do condutor a constar do projeto básico, que diz respeito à emissão eletromagnética, é a de perda por efeito corona. O SM 2.7 [8.2] diz que “ nas condições atmosféricas predominantes na região atravessada, uma LTA-CA ou LTA-CC, inclusive cabos, acessórios e ferragens das cadeias de isoladores, não deve apresentar corona visual à tensão máxima operativa em 90% do tempo”. Nesta avaliação, é necessário o conhecimento das condições meteorológicas, em especial a densidade do ar, bem como a geometria do condutor na estrutura.

Também deverá constar do projeto básico o cálculo do valor da resistência de sequência positiva da linha, por unidade de comprimento, na temperatura de referência. O valor calculado dessa resistência deverá ser igual ou menor que o valor de referência para a configuração básica, conforme indicado no AT [8.1]. Nesta comprovação, devem-se adotar a geometria da estrutura mais recorrente ou típica da linha, os dados dimensionais e elétricos do condutor, os cabos para-raios e a resistividade média do solo. Preferencialmente, deve-se utilizar a rotina “Line Constants” do ATP – “Alternative Transients Program” no cálculo da resistência de sequência positiva da linha.

7.4. Cálculo das Capacidades Operativas

A Tabela 1 do Módulo 1 – Glossário das Regras dos Serviços de Transmissão [8.9] define três capacidades operativas distintas para a linha de transmissão: a de longa duração, a de curta duração e a sazonal. No momento atual, as linhas de transmissão da Rede Básica são concebidas pelo Planejamento para operar nos regimes de longa e curta duração. Entretanto, consta dos AT [8.1] um requisito que diz respeito à LT operar com carregamento superior às capacidades de longa e curta duração, em condições climáticas comprovadamente mais favoráveis do que as estabelecidas no cálculo dessas capacidades, desde que as distâncias de segurança sejam respeitadas.

No regime de longa duração, entende-se que a linha opera, continuamente, em condições normais, preservando as distâncias de segurança do condutor ao solo e aos obstáculos, como definidas no item 10.3 da NBR 5422 [8.5]. Já no regime de curta duração, a linha opera em condições de emergência por período de tempo limitado e as distâncias de segurança do condutor ao solo e obstáculos são reduzidas, quando comparadas com essas distâncias para a longa duração. A NBR 5422 [8.5], no seu item 10.4, indica o método de cálculo das distâncias de segurança em condições de emergência para linhas de transmissão com tensão nominal de até 230 kV. Para níveis de tensão acima de 230 kV, não há um método previsto em norma brasileira. Para cobrir esta lacuna, os AT [8.1] determinam que, em tal

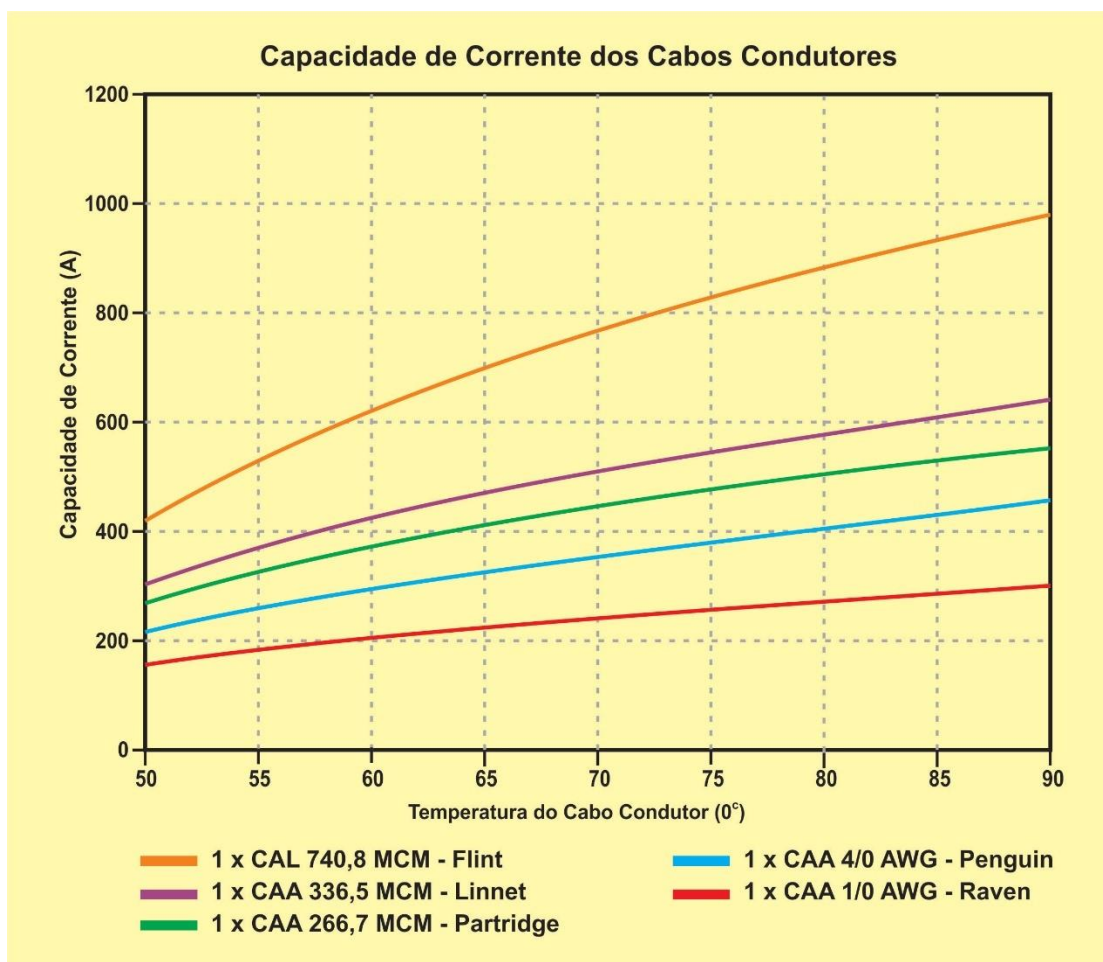
condição operativa, as distâncias de segurança sejam calculadas conforme prescrição contida no NESC [8.8].

A verificação da capacidade de corrente de uma linha é feita, na maior parte dos casos, com base na equação de balanço térmico, em regime permanente ou estacionário, e considera a seguinte premissa: todo calor gerado internamente ao condutor e absorvido pelo do sol (ganho de calor) é trocado com o ambiente (perda de calor).

As parcelas que compõem o ganho de calor são aquelas devidas à passagem da corrente no condutor (efeito Joule) e à absorção da energia proveniente do sol. Já as parcelas que compõem a perda de calor para o ambiente são devidas à convecção e irradiação. A parcela de troca de calor por condução é, normalmente, considerada desprezível em relação às demais perdas.

Um método de cálculo da capacidade de corrente em regime permanente de condutores nus está descrito nas recomendações do WG 22-12 do CIGRÉ, publicadas na revista ELECTRA n° 144 de outubro de 1992.

Figura 7.3 Gráfico com Valores Típicos de Capacidade de Corrente de Condutores.



Os valores de referência das capacidades operativas de longa e de curta duração das linhas de transmissão a ser licitadas estão indicados nos AT [8.1]. Esses valores de referência definem as capacidades de corrente de projeto mínimas da linha em cada regime operativo, para fins de dimensionamento do condutor, por exemplo, e estão baseados nos resultados dos estudos desenvolvidos pelo Planejamento para o empreendimento, assim como no que determina o Módulo 4 – Prestação dos Serviços das Regras dos Serviços de Transmissão [8.9]. Neste Módulo consta uma tabela com os fatores majorantes, utilizados no cálculo da capacidade operativa de curta duração de uma linha existente – cujo projeto tenha considerado apenas o regime normal de operação – a partir do valor da capacidade operativa de longa duração e da temperatura de projeto (longa duração). A Tabela 7.3 reproduz os valores dos fatores majorantes indicados no Módulo 4 – Prestação dos Serviços das Regras dos Serviços de Transmissão [8.9].

Tabela 7.3. Fator para o Cálculo da Capacidade Operativa de Curta Duração..

| Temperatura de Projeto (Graus Celsius) | | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 50 | 55 | 60 | 64 | 65 | 70 | 75 | 80 | 90 |
| Fator | 1.42 | 1.33 | 1.26 | 1.24 | 1.23 | 1.19 | 1.17 | 1.15 | 1.12 |

O cálculo das capacidades de corrente de projeto de longa e curta duração da linha, a constar no projeto básico, deve considerar a ocorrência simultânea das condições climáticas abaixo relacionadas:

- Temperatura máxima média;
- Radiação solar máxima;
- Brisa mínima, desde que não superior a um metro por segundo.

Os valores das capacidades de projeto, informadas no projeto básico, não podem ser inferiores aos valores de referência indicados no AT [8.1]. No projeto básico também devem ser informadas as temperaturas máximas do condutor para os dois regimes operativos.

7.5. Cálculo da Capacidade de Corrente dos Cabos Para-raios e Definição dos Pontos de Troca de Bitola

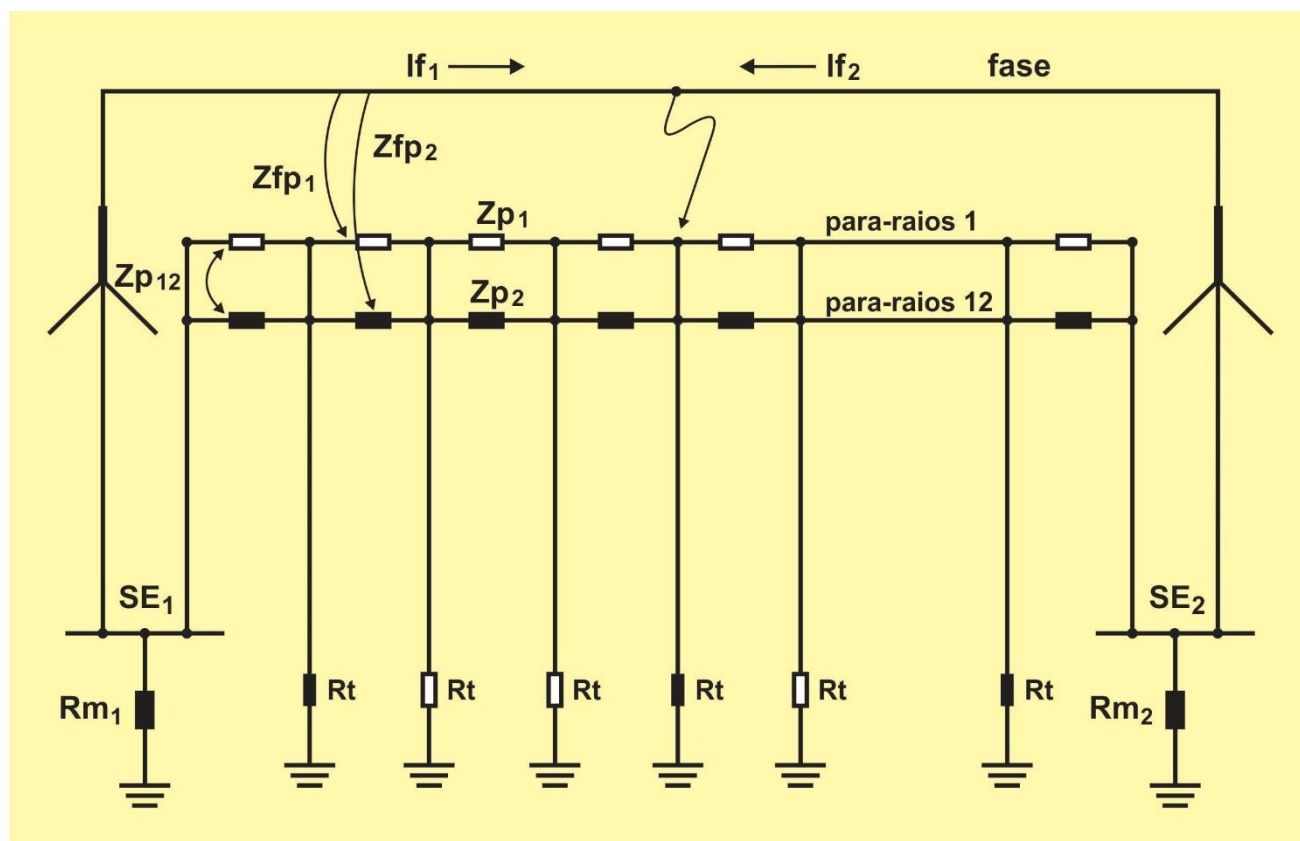
As correntes que circulam nos cabos para-raios e nas resistências de aterramento das estruturas podem ser determinadas, quando da ocorrência de um curto-circuito fase-terra na linha de transmissão, por simulação computacional. Essa simulação pode ser feita por meio do programa ATP – “Alternative Transients Program”, por programação em linguagem científica ou mesmo planilha eletrônica. Para tanto, é necessário definir um modelo com o circuito-terra da linha, as impedâncias e fontes equivalentes nos terminais da linha.

Os parâmetros do circuito-terra vão a vão podem ser calculados, conhecendo-se: os parâmetros elétricos dos cabos para-raios, próprios e mútuos, contidos na matriz longitudinal de fase da linha; as resistências de aterramento das estruturas; e os comprimentos dos vãos. Além disso, é necessário calcular as contribuições de corrente de curto-circuito, fase-terra, vindas das SE terminais, no ponto de falta, com base nos equivalentes de Thevenin nas barras das SE e impedâncias das fases.

A Figura 7.4 mostra um exemplo de circuito-terra para o cálculo das correntes circulantes nos cabos para-raios, quando da ocorrência de curto-circuito fase-terra num ponto da linha.

Como não se conhece a distribuição dos valores de resistências de aterramento das estruturas ao longo da linha, é comum adotar valores tais, para esse parâmetro, que ocasionem as maiores correntes circulantes nos cabos para-raios, para fins de dimensionamento.

Figura 7.4 Circuito Equivalente para Cálculo das Correntes Circulantes nos Cabos Para-raios.



Onde:

I_{f1} e I_{f2} - Contribuições das correntes de curto-circuito no ponto de falta considerado

Z_{p1} e Z_{p2} - Impedâncias próprias dos cabos para-raios nos vãos

R_{m1} e R_{m2} - Resistências das malhas de terra das subestações

R_t - resistências de aterramento das estruturas

Zfp1 e Zfp2 - impedâncias mútuas entre a fase em falta e os cabos para-raios nos vãos

Zp12 - Impedância mútua entre os cabos para-raios no vão

Devido aos elevados níveis de curto-circuito fase-terra nas barras das subestações, são especificados cabos de maior capacidade de corrente nos trechos de linha próximos às subestações terminais. Já no trecho intermediário da linha são especificados cabos para-raios de menor capacidade de corrente.

Cabe ao projeto definir os pontos de transição de tipo ou bitola, ao longo da linha, entre os cabos para-raios de diferentes capacidades (pontos de troca), com base nas correntes de curto-circuito circulantes.

Para o dimensionamento dos cabos para-raios ao longo da linha, é necessário conhecer os seguintes parâmetros:

- Correntes de curto-circuito, fase-terra, nas barras das subestações terminais da linha (valores normalmente informados nos AT [8.1]);
- Tempo de atuação da proteção de retaguarda (valor típico: 0,5 s);
- Temperatura máxima dos cabos para-raios. Essa temperatura varia em função do tipo de cabo para-raios utilizado.

Constam da NBR 8449 [8.7] ábacos que informam a máxima corrente circulante nos cabos para-raios mais usuais em linhas de transmissão — em função do tempo de atuação da proteção de retaguarda — e as temperaturas inicial e final do condutor.

Na maior parte dos projetos, considera-se que os cabos para-raios são aterrados em todas as estruturas da linha e conectados nas malhas das subestações terminais.

7.5.1. Cálculo da Capacidade de Corrente dos Cabos Para-raios de Nova Linha de Transmissão

A avaliação da capacidade de corrente dos cabos para-raios deve ser feita nas duas extremidades da linha, exceto se houver simetria no circuito e das contribuições de curto-circuito. A avaliação deve conter as seguintes verificações:

Verificação das capacidades de corrente dos cabos para-raios nas proximidades das subestações terminais da linha: para um arranjo de cabos para-raios preconcebido, simula-se um curto-circuito fase-terra na primeira estrutura a partir da subestação terminal, quantificando as contribuições de corrente vindas das SE e a sua distribuição nos cabos para-raios e nas resistências de aterramento das estruturas. Em seguida, verifica-se o arranjo de cabos para-raios preconcebido, no vão crítico, em termos de capacidade de corrente. Caso se constate superação de um ou mais cabos para-raios do arranjo, cabos de maior capacidade de corrente deverão ser utilizados no trecho, por certa extensão, a

partir da qual se faz a troca por cabos de menor capacidade, até que a instalação esteja adequada no que diz respeito à capacidade de corrente.

Verificação das capacidades de corrente dos cabos para-raios nas proximidades do ponto de troca de cabo para-raios: simula-se um novo curto-circuito fase-terra com a respectiva quantificação das contribuições de corrente oriundas das SE, na primeira estrutura após o ponto de troca inicialmente arbitrado, no trecho com cabos para-raios de menor capacidade de corrente. Com base na distribuição da corrente de curto-circuito entre os cabos para-raios e as resistências de aterramento das estruturas, é feita a verificação de capacidade de corrente dos cabos. O ponto de troca de bitolas ideal deve ser estabelecido de forma a garantir que, na ocorrência de uma falta nos cabos de menor condutividade, as máximas correntes circulantes nesses cabos de menor condutividade sejam inferiores à capacidade de corrente dos referidos cabos.

Os cálculos da corrente de curto-circuito fase-terra e suas contribuições, assim como os relativos à distribuição da corrente de falta nos cabos para-raios e estruturas, devem adotar as premissas que acarretem as situações mais desfavoráveis à verificação da capacidade de corrente — seja devido ao valor das impedâncias de sequência zero da linha e do sistema, seja devido aos acoplamentos da fase em falta com os cabos para-raios.

7.5.2. Verificação das Capacidades de Corrente dos Cabos Para-raios Existentes de Linha de Transmissão Seccionada

Nos casos de seccionamento de linha de transmissão existente, os cabos para-raios dos trechos de linha entre o ponto de seccionamento e a nova subestação devem ser dimensionados de forma idêntica aos de uma nova linha de transmissão. Já os cabos para-raios existentes de linha seccionada devem ser avaliados, em termos de capacidade de corrente, nas imediações do ponto de seccionamento, com base no nível de curto-circuito fase-terra na barra da nova subestação. Essa avaliação deverá ser feita, em duas etapas, conforme abaixo descrito:

Primeira etapa: verificação dos cabos para-raios existentes nas imediações do ponto de seccionamento, com base no nível de curto-circuito estimado para um horizonte de médio prazo. A verificação dos cabos para-raios existentes de linha a ser seccionada deve ser feita, numa primeira etapa, considerando-se a corrente de curto-circuito fase-terra, na barra da subestação a ser implantada, indicada no AT [8.1], na tabela de correntes de curto-circuito, coluna “Verificação”. O valor dessa corrente é calculado com base no nível de curto-circuito, nesse ponto da rede, indicado no horizonte dos estudos do PAR – Plano de Ampliações e Reforços do ONS, vigente na época do Leilão. Caso essa verificação conclua que haverá superação dos cabos para-raios existentes, deve ser feito novo dimensionamento, conforme descrito no item abaixo, segunda etapa. Caso contrário, a configuração de cabos para-raios existentes da linha a ser seccionada poderá ser mantida e a segunda etapa da avaliação dispensada.

Segunda etapa: dimensionamento dos cabos para-raios existentes nas imediações do ponto de seccionamento, com base na corrente suportável nominal de curta duração dos disjuntores de linha. A segunda etapa da avaliação consiste no dimensionamento dos cabos para-raios existentes na linha a ser seccionada, em termos de capacidade de corrente (caso a primeira etapa conclua pela superação dos cabos), considerando uma corrente de curto-circuito fase-terra, na barra da subestação a ser implantada, cujo valor está indicado no AT [8.1], tabela de correntes de curto-circuito, coluna “dimensionamento”; esse valor corresponde à corrente nominal de curta duração dos disjuntores da saída de linha. Neste caso, deverá constar do projeto básico a proposição de um novo arranjo de cabos para-raios da linha existente, nas proximidades do ponto de seccionamento, que suporte, sem danos, a circulação da corrente quando da ocorrência de curto-circuito, de forma a garantir, ao menos, o seu desempenho original.

Quando solicitado expressamente no AT [8.1], deverá ser feita a verificação e/ou o dimensionamento dos cabos para-raios da LT seccionada nas proximidades da(s) SE(s) existente(s). Nesses casos, a(s) corrente(s) de curto-circuito fase-terra, na(s) barra(s) da(s) subestação(ões) existente(s), também estará(ão) indicada(s) no AT [8.1].

7.6. Avaliação das Perdas de Potência Ativa no Condutor e nos Cabos Para-raios

7.6.1. Perda de Potência Ativa no Condutor

Os estudos do Planejamento indicam uma configuração básica, norteadada pela solução mais econômica para a expansão do sistema. Com base nessa configuração, os AT [8.1] determinam um valor máximo para a resistência de sequência positiva por unidade de comprimento da linha de transmissão, na frequência nominal de 60 Hz e na temperatura de referência. No projeto básico, o valor da resistência de sequência positiva deverá ser comprovado por meio da simulação dos parâmetros elétricos da linha para a temperatura de referência indicada no AT [8.1].

7.6.2. Perda de Potência Ativa nos Cabos Para-raios

O item 3.4 do SM 2.7 [8.2] determina que a perda de potência ativa nos cabos para-raios seja de, no máximo, 5% do valor da perda de potência ativa nos condutores, em qualquer modo de operação.

Essa demonstração deverá ser feita por meio de cálculo ou simulação computacional, considerando a disposição dos cabos condutores e para-raios na estrutura típica e arranjo de cabos para-raios, conforme definido no estudo de capacidade de corrente dos cabos para-raios.

7.7. Avaliação dos Desequilíbrios de Tensão e Transposição das Fases

Os AT [8.1] determinam que as linhas de transmissão de comprimento igual ou superior a 100 km devem ser transpostas com um ciclo completo de transposição, de preferência com trechos de 1/6, 1/3, 1/3 e 1/6 do comprimento total. Além disso, consta também que deve ser avaliada e justificada no projeto básico pela TRANSMISSORA a forma adequada de transposição de um dos circuitos em relação ao outro, no sentido de não inviabilizar os religamentos monopolar e tripolar dessas linhas.

Devem ser verificados os desequilíbrios de tensão nas linhas de transmissão com comprimento inferior a 100 km e não transpostas. Esses desequilíbrios, para a linha a vazio e a plena carga, não podem ser superiores a 1,5%. As avaliações de desequilíbrio precisam ser justificadas por cálculo ou simulação.

Linhas de transmissão em paralelo, na mesma faixa de passagem ou em faixas contíguas ou linhas de circuito duplo, que porventura necessitem ser transpostas, devem ter os ciclos de transposição com sentidos opostos.

Nos casos de seccionamento de linha de transmissão existente, devem ser verificados os desequilíbrios de tensão na barra da nova subestação com a mesma tensão da linha, considerando o ciclo de transposição da linha existente, se implantado. Caso sejam constatados desequilíbrios de tensão acima de 1,5% na barra da nova subestação, para linha a vazio ou a plena carga, o projeto básico deverá propor uma solução que adeque a instalação em termos desse indicador de qualidade.

7.8. Estudo de Coordenação do Isolamento e Definição dos Espaçamentos Fase-terra e entre Fases no Topo da Estrutura

O isolamento de uma linha de transmissão se faz por meio das cadeias de isoladores e dos espaçamentos fase-terra e fase-fase, em ar. O projeto básico deve conter o estudo de coordenação do isolamento das estruturas, o qual normalmente se divide em três partes distintas e relacionadas com o tipo de solicitação elétrica, a saber: solicitação por tensão em regime permanente à frequência nominal; solicitações por manobras de energização e religamento da linha; solicitação devido à incidência de descargas atmosféricas na linha.

Para cada tipo de solicitação elétrica, considera-se um ângulo de balanço máximo da cadeia de isoladores, devido à ação do vento no condutor e uma deflexão máxima da linha na estrutura. Para cada tipo de solicitação elétrica, espera-se um desempenho mínimo da linha de transmissão.

7.8.1. Determinação do Ângulo de Balanço da Cadeia de Isoladores

A determinação do ângulo de balanço da cadeia de isoladores — para avaliação dos espaçamentos fase-terra, em regime permanente à frequência nominal — deve ser feita segundo a metodologia constante do item 10 da NBR 5422 [8.5], ressaltando-se o seguinte aspecto: o item 10.1.4.1 da referida norma determina que, nesse tipo de avaliação, o período de retorno do vento seja de, no mínimo, 10 anos. Já os AT [8.1] e o SM 2.7 [8.2] recomendam um valor mais elevado para o período de retorno do

vento, ou seja, 30 anos, no mínimo, visando a proporcionar maior segurança à instalação contra desligamentos por perda de isolamento devido à ação do vento no condutor.

Nas avaliações em regime transitório (manobras e descargas atmosféricas) não há um requisito que defina o período de retorno mínimo do vento a ser considerado no cálculo dos ângulos de balanço da cadeia de isoladores. Os projetos, em geral, adotam valores reduzidos de vento (vento frequente) nas avaliações de desempenho frente às manobras de energização e religamento e sem vento (cadeia em repouso) nas avaliações de desempenho frente à incidência de descargas atmosféricas.

7.8.2. Desempenho da LT à Tensão na Frequência Nominal do Sistema

O desempenho da linha de transmissão à frequência nominal (frequência industrial) deverá ser calculado com base na tensão máxima operativa, no comprimento da penca de isoladores e ângulo de balanço máximo da cadeia de isoladores.

O número de isoladores da cadeia, em função do tipo (normal ou antipoluição), deve ser selecionado com base nas recomendações da IEC 60.815 [8.3], para o nível médio de poluição da região de implantação da linha, e a distância de escoamento mínima a ser adotada deverá ser de 14 mm/kV eficaz fase-fase, conforme prescrito no AT [8.1] e no SM 2.7 [8.2].

A probabilidade de perda do isolamento (escorvamento) de um “gap” de ar à frequência industrial é, em geral, representada por uma distribuição normal, com média [U50%] e desvio-padrão [σ] conhecidos.

Para um bom desempenho da linha, recomenda-se que os espaçamentos, em ar, na estrutura, suportem tensões correspondentes a dois ou três desvios padrões abaixo da tensão crítica de escorvamento, ou seja:

$$US = U50\%(1 - n * \sigma)$$

Onde:

US – tensão suportável do isolamento em ar [kVp fase-terra]

U50% – tensão crítica de escorvamento [kVp fase-terra]

σ – desvio padrão

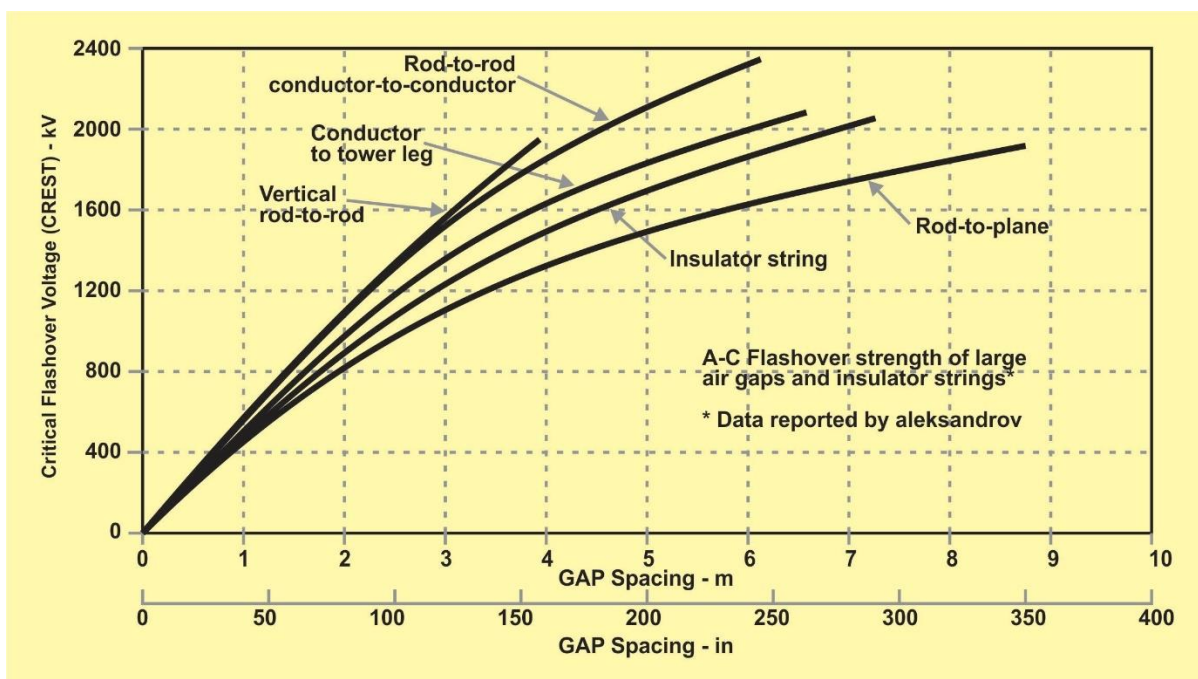
n – número de desvios padrões adotados na análise (2 ou 3, a critério do projeto)

O cálculo da tensão crítica de escorvamento, nas condições atmosféricas padrão, parte da premissa de que a tensão suportável do isolamento em ar seja numericamente igual à tensão máxima operativa do sistema, em valores fase-terra.

A tensão crítica de escorvamento, para as condições atmosféricas reais da linha, deve ser corrigida com base no fator de correção atmosférico da região da linha (FCA). A partir daí, é possível determinar as distâncias mínimas fase-terra em função dos tipos de “gap” de ar encontrados no topo da estrutura.

As distâncias de isolamento à frequência nominal do sistema podem ser determinadas com base na tensão crítica de escorvamento, a partir da figura abaixo, extraída do livro “Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above”.

Figura 7.5 Tensão Crítica de Escorvamento em Função do Comprimento do “Gap”. Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above.



7.8.3. Desempenho da LT às Sobretensões de Manobra

O dimensionamento dos espaçamentos condutor-estrutura e a análise de risco de falha da linha, por solicitações elétricas devidas às manobras de energização e religamento, devem ser efetuados com base nas distribuições estatísticas das sobretensões e na distribuição de probabilidade de escorvamento dos “gaps” em ar fase-terra.

Os AT [8.1] determinam que “a sobretensão máxima adotada no dimensionamento dos espaçamentos elétricos das estruturas deverá ser, no mínimo, igual à maior das sobretensões indicadas nos estudos de transitórios eletromagnéticos”. Além disso, os riscos de falha da linha não deverão ser superiores aos valores indicados no item “isolamento para manobras” dos AT [8.1] e reproduzidos na Tabela 7.4, abaixo.

Tabela 7.4: Risco Máximo de Falha, por Circuito, em Manobras de Energização e Religamento.

| Manobra | Risco de Falha (adimensional) | |
|-------------|-------------------------------|-----------|
| | Fase-Terra | Fase-Fase |
| Energização | 10^{-3} | 10^{-4} |
| Religamento | 10^{-2} | 10^{-3} |

No projeto básico, é necessário informar as sobretensões máximas adotadas nos cálculos, a identificação dos casos dos estudos de transitórios eletromagnéticos que levam às sobretensões máximas, os métodos de cálculo adotados na determinação dos espaçamentos e das análises de risco, bem como os resultados das simulações.

7.8.4. Desempenho da LT às Descargas Atmosféricas

O desempenho da linha devido às descargas atmosféricas precisa ser determinado com base nos seguintes parâmetros: densidade de descargas atmosféricas da região; tipo de solo da região; geometria dos cabos condutores e para-raios para a estrutura típica; e distribuição de probabilidade de escorvamento da linha para esse tipo de fenômeno.

Devem ser determinados, separadamente, os desempenhos da linha por falha da blindagem (número de desligamentos da linha por descargas diretas no condutor) e por “backflashover” (número de desligamentos da linha associados à incidência de descargas na estrutura ou nos cabos para-raios).

A densidade de descargas atmosféricas da região de implantação da linha de transmissão deve estar referenciada a uma fonte de dados confiável e atual. É aconselhável fazer uma investigação geológica para identificar o solo típico da região, a fim de ser estimado um valor consistente de resistividade média do solo, para que a resistência de aterramento adotada nas simulações de desempenho esteja compatível com o sistema de aterramento previsto para as estruturas.

Os AT [8.1] determinam que o número total de desligamentos por descargas atmosféricas deve ser de, no máximo, um desligamento por 100 km por ano, para linhas com tensão nominal igual ou superior a 345 kV, e de dois desligamentos por 100 km por ano, para linhas com tensão nominal igual a 230 kV. O número de desligamentos da linha por falha de blindagem deverá ser de no máximo 0,01 desligamentos por 100 km por ano, independentemente do nível de tensão.

Como dado de entrada, devem constar da documentação do projeto básico — referente à comprovação do desempenho da instalação frente às descargas atmosféricas — as coordenadas dos condutores e cabos para-raios (silhueta da estrutura típica), a densidade de descargas atmosféricas da região, a distância de interrupção (strike distance) mínima ou a tensão crítica de escorvamento do isolamento e a

resistência de aterramento das estruturas (valor médio ou a distribuição dos valores). Além disso, devem constar as premissas assumidas, o método de cálculo, a análise da blindagem dos cabos para-raios sobre os condutores e os resultados dos desempenhos encontrados.

7.9. Cálculo dos Parâmetros Elétricos

Os parâmetros elétricos da linha são de suma importância na fase do projeto básico da linha e nos estudos de sistema (fluxo de potência e curto-circuito), assim como, posteriormente, nas análises desenvolvidas na etapa pré-operacional do empreendimento.

Preferencialmente, os parâmetros elétricos devem ser calculados por meio da rotina “Line Constants” do ATP – “Alternative Transients Program”. Devem ser adotadas, na simulação dos parâmetros elétricos, a geometria da estrutura típica da linha e a altura média dos cabos. Além disso, o valor da resistência do cabo condutor, como dado de entrada, deverá estar corrigido para a temperatura de referência, indicada no AT [8.1]. O tipo de conexão dos cabos para-raios nas estruturas (se isolado ou solidamente aterrado) também precisa ser considerado na simulação.

Da listagem com os dados de saída da simulação devem constar, na forma matricial, por circuito da linha, todos os parâmetros longitudinais e transversais de fase (com e sem cabos para-raios eliminados) e os parâmetros de sequência.

No caso de linha de transmissão de circuito duplo ou de linhas em paralelo, mesmo que em tensões diferentes, a simulação dos parâmetros elétricos irá considerar os circuitos mais acoplados. Devem estar identificados nas listagens todos os parâmetros próprios e mútuos, inclusive aqueles entre circuitos.

7.10. Determinação da Largura da Faixa de Passagem

A largura da faixa de passagem de uma LT será dimensionada de forma a atender aos seguintes critérios:

- Manter distância segura entre os condutores das fases externas da linha e o limite da faixa de passagem ou das fases de outro circuito em paralelo, na condição de balanço máximo dos cabos, devido à ação do vento, de modo a evitar desligamentos por perda do isolamento à máxima tensão operativa;
- Garantir que os níveis de campo elétrico e campo magnético, dentro e fora da faixa, atendam ao que está estabelecido na REN 915 [8.10];
- Manter os níveis de rádio interferência e ruído audível, no limite da faixa de passagem, dentro de valores limites especificados no AT [8.1] e no SM 2.7 [8.2].

No caso do balanço máximo do condutor, em virtude da ação do vento, serão consideradas as seguintes condições nos cálculos: pressão de vento com período de retorno de, no mínimo, 50 anos, na altura

média da fase mais alta ou outra posição mais severa; vão típico; e relação vão de peso por vão de vento mais desfavorável. Nos grandes vãos da linha (por ex: grandes travessias), a largura da faixa deve ser reavaliada de forma a garantir o isolamento, na condição de balanço máximo do condutor.

Admitindo-se que o projeto básico da linha irá adotar, na avaliação dos campos elétrico e magnético, os níveis de referência indicados no Quadro 1 da REN 915 [8.10], o cálculo desses campos precisa considerar as seguintes premissas, conforme parágrafo 1º do Artigo 6º da referida resolução:

- Tensão nominal da linha;
- Temperatura máxima do condutor admissível de projeto (entende-se que seja aquela associada à capacidade de curta duração da linha);
- Carregamento máximo do condutor para os regimes de operação e emergência;
- Distância mínima do condutor ao solo (entende-se que seja a altura do condutor ao solo, na temperatura máxima e a linha em regime de curta duração);
- Configuração típica dos circuitos e sequência de fases associadas;
- 1,5 m de altura do nível do solo para a população em geral.

Nessas condições, os níveis de campo elétrico e magnético deverão ser iguais ou inferiores aos níveis de referência estabelecidos na REN 915 [8.10].

Nas avaliações de rádio interferência e ruído audível, deve ser adotada a máxima tensão operativa.

7.11. Cálculo das Distâncias de Segurança Condutor ao Solo e Condutor aos Obstáculos

O cálculo das distâncias mínimas do condutor ao solo ou aos obstáculos, em condições normais de operação, deve ser feito como determina o item 10.3 da NBR 5422 [8.5] para a linha operando com máxima tensão operativa.

O cálculo das distâncias mínimas do condutor ao solo ou aos obstáculos, em condições de emergência, deve ser feito como determina o item 10.4 da NBR 5422[8.5], para linhas com tensão máxima operativa igual ou menor a 242 kV. Para linhas com tensão máxima operativa superior a 242 kV, serão adotadas as prescrições contidas no NESC [8.8].

No caso de travessias sobre rodovias, precisam ser consideradas, adicionalmente, as recomendações do DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

No caso de travessias sobre rios navegáveis, devem ser consideradas, adicionalmente, as recomendações da Capitania dos Portos do estado onde se encontra a travessia. A altura do maior

mastro de embarcação a ser considerado no projeto da travessia é definida pela autoridade da capitania dos Portos.

No caso de travessias sobre matas ciliares e de preservação permanente, é necessário manter uma distância mínima de segurança, conforme prescrito no item 13.2 da NBR 5422 [8.5].

7.12. Cálculo Mecânico dos Cabos

O cálculo mecânico dos cabos deverá ser feito para o condutor e cabos para-raios da linha de transmissão, de forma a avaliar o comportamento mecânico desses componentes quando submetidos à ação do vento e à variação de temperatura.

São utilizados os seguintes parâmetros meteorológicos, no cálculo mecânico:

7.12.1. Temperaturas Ambientais Adotadas nas Avaliações de Desempenho Mecânico

As temperaturas ambientais utilizadas nas avaliações de desempenho mecânico dos cabos são: a mínima absoluta; a média das mínimas diárias (temperatura coincidente com o vento máximo); e a média anual ou mais frequente ou EDS (“every day stress”).

Na condição de partida do cálculo mecânico dos cabos, é praxe assumir a temperatura ambiente igual à média anual. Já na avaliação dos esforços mecânicos máximos nos cabos, são adotadas duas temperaturas ambientais distintas: a mínima absoluta e a média das mínimas diárias (nas condições de vento extremo e vento máximo). Normalmente é assumido que não há ação de vento sobre os cabos na condição de partida e na avaliação de esforço máximo à temperatura mínima.

7.12.2. Velocidades de Vento de Projeto

Os tipos de vento adotados no cálculo mecânico dos cabos são denominados por vento extremo e vento máximo para o cálculo do balanço dos cabos.

No caso do vento extremo, o período de retorno a ser considerado é de 250 anos para linhas com tensão nominal superior a 230 kV e de 150 anos para linhas com tensão nominal igual ou inferior a 230 kV. O período de integração da média padronizado para esse tipo de vento é de 10 minutos.

No caso do vento máximo para o cálculo do balanço dos cabos, o período de retorno a ser considerado é de 50 anos.

Os AT [8.1] estipulam como limites de tração nos cabos, na ocorrência dos ventos extremo e máximo para cálculo do balanço dos cabos, os percentuais de 70% e 50% da carga de ruptura do cabo, respectivamente.

7.12.3. Condições de Governo dos Cabos

As condições de tracionamento do condutor, normalmente utilizadas no cálculo mecânico, são as indicadas na tabela a seguir:

| Condição de tracionamento | Tração máxima admissível (% CR) | Temperatura ambiente (0°C) | Vento atuante | Curva tensão x deformação |
|--|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Temperatura média ou EDS (condição de partida) | (1) | Média | Sem vento | Final com "creep" |
| Temperatura mínima | 33 | Mínima abs. | Sem vento | Inicial |
| Vento máx. para balanço | 50 | Coincidente com o vento máximo | Máx. balanço ⁽²⁾ | Final com "creep" |
| Vento extremo | 70 | Coincidente com o vento máximo | Extremo ⁽³⁾ | Final com "creep" |

(1) Valor estipulado pelo projeto com base no tipo de cabo e no número de subcondutores por fase. Valor vinculado ao estudo de vibrações eólicas.

(2) V (50 anos, 10 min., h_{cabo} , cat.).

(3) 230 kV → V(150 anos, 10 min., h_{cabo} , cat.); >230 kV → V(250 anos, 10 min., h_{cabo} , cat.).

No tracionamento dos cabos para-raios, deve-se levar em consideração o posicionamento adequado desses cabos sobre os condutores, de forma a evitar o desligamento da linha por falha da blindagem no meio do vão.

7.13. Definição da Série de Estruturas, Hipóteses de Carregamento e Árvores de Carga

É preciso constar dos relatórios que tratam do cálculo mecânico das estruturas os principais dados utilizados na determinação dos esforços atuantes sobre as estruturas, tais como: pressões de vento extremo e de alta intensidade; dados dimensionais do condutor e dos cabos para-raios; trações horizontais no condutor e nos cabos para-raios, em função tipo de carregamento (vento extremo, vento de alta intensidade, sem vento e na temperatura mínima e na temperatura média); coeficientes de sobrecarga; deflexão máxima; vão médio; etc.

Para cada tipo de estrutura da família, constará uma tabela com, ao menos, as seguintes informações: aplicação (suspensão leve, ancoragem, terminal, transposição, etc); tipo (estaiada ou autoportante); vão de vento; deflexão máxima; vãos de peso mínimo e máximo; e alturas mínima e máxima da estrutura.

Para cada tipo de estrutura da família, devem ser adotadas, ao menos, as seguintes hipóteses de carregamento: vento extremo transversal; vento extremo longitudinal; vento extremo a 45°; vento de alta intensidade transversal; vento de alta intensidade longitudinal; vento de alta intensidade a 45°; rompimento de condutor; rompimento de cabo para-raios; construção; e contenção de cascata (estrutura de suspensão).

Nas árvores de carregamento de cada estrutura da série, para cada hipótese de carregamento, constarão as cargas atuantes sobre a estrutura, com os coeficientes de sobrecarga já incorporados, nos pontos de aplicação dos condutores e cabos para-raios, em suas componentes transversal, vertical e longitudinal — além do peso próprio da estrutura.

Os esforços sobre os cabos e estruturas precisam ser calculados segundo a IEC 60.826 [8.4].

7.14. Definição do Sistema de Aterramento das Estruturas

Os sistemas de aterramento das estruturas de linhas rurais são, em geral, constituídos por um conjunto de fases de aterramento, com quatro ou seis “pernas” (cabos contrapesos) dispostas radialmente em relação ao centro da estrutura, sendo que cada fase possui um comprimento pré-estabelecido para as “pernas”. A seleção da fase de aterramento a ser implantada em cada estrutura da linha de transmissão depende do valor da resistividade aparente do solo e é feita na fase do projeto executivo. Para cada etapa de aterramento, é informado um valor máximo de resistividade aparente do solo aplicável.

A seleção da fase de aterramento a ser aplicada em cada estrutura da linha deve ser feita a partir da medição de resistividade do solo no local de implantação da estrutura e deve possibilitar que o valor médio da resistência de aterramento das estruturas, ao longo da linha, à frequência industrial, seja igual ou menor que um valor de referência (em geral não superior a 20 Ω), informado no projeto.

Não é recomendada a utilização de cabos contrapesos muito longos, ou de cabos contrapesos contínuos, se houver a possibilidade de prejuízo do desempenho da linha às descargas atmosféricas.

7.15. Definição das Fundações Típicas

Devem constar, do relatório de fundações, a descrição, as propriedades e os parâmetros dos solos e rochas típicos, necessários ao dimensionamento das fundações.

As cargas atuantes no topo das fundações (tração, compressão e cisalhamento) serão determinadas com base nas hipóteses de carregamento das estruturas e considerar a ação do vento sobre estas.

Os AT [8.1] determinam que “no projeto das fundações, para atender o critério de coordenação de falha, as solicitações transmitidas pela estrutura às fundações devem ser majoradas pelo fator mínimo 1,10. Essas solicitações, calculadas a partir das cargas de projeto da estrutura, considerando suas condições particulares de aplicação – vão gravante, vão de vento, ângulo de deflexão, fim de linha e altura da estrutura – passam a ser consideradas cargas de projeto das fundações”.

Do projeto básico deve constar uma descrição das fundações típicas recomendadas para a linha, considerando-se todos os tipos de estruturas, e um detalhamento mínimo de projeto, seja por meio de desenho ou de croquis.

8.Referências para Linhas de Transmissão

- [8.1] Anexos Técnicos dos Editais de Leilão de Transmissão da ANEEL;
- [8.2] Submódulo 2.7 dos Procedimentos de Rede, revisão 2020.12;
- [8.3] Norma IEC 60.815/2014 – Guide for the selection of insulator in respect of polluted conditions;
- [8.4] Norma IEC 60.826/2017 – Design criteria of overhead transmission lines;
- [8.5] Norma ABNT NBR 5422/1985 – Projetos de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica;
- [8.6] Norma ABNT NBR 5419/2015 – Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas;
- [8.7] Norma ABNT NBR 8449/1984 – Dimensionamento de cabos para-raios para linhas aéreas de transmissão de energia elétrica;
- [8.8] NESC – National Electrical Safety Code – C2-2017;
- [8.9] Regras dos Serviços de Transmissão – Resolução Normativa da ANEEL n° 905 de 8 de dezembro de 2020;
- [8.10] Resolução Normativa da ANEEL n° 915 de 23 de fevereiro de 2021.

9. Padronização de Relatórios de Estudos

A seguir, são apresentadas sugestões de modelos para os relatórios de estudos elétricos de projeto básico, visando à padronização deste tipo de documento e à agilização do processo de análise de conformidade do mesmo. Cada um dos subitens corresponde a um tipo específico de relatório para apresentação dos resultados dos estudos elétricos.

Visando-se agilizar o processo de análise de eventuais revisões e dar celeridade ao processo de aprovação do projeto básico, as alterações de conteúdo ao longo dos relatórios, resultantes das solicitações dos pareceres de conformidade, devem ser destacadas nos respectivos relatórios com cores distintas do texto original. Esta solicitação é válida também para todas as eventuais revisões sucessivas, sendo que, para cada uma delas (Rev01, Rev02 e..etc), deverão ser utilizadas cores distintas.

9.1. Frequência Fundamental

1. Introdução e Objetivo

Apresentar um breve resumo dos aspectos associados à integração do empreendimento à Rede Básica do SIN - Sistema Interligado Nacional, cobrindo a motivação da implantação do empreendimento com os benefícios esperados, relacionando as instalações, linhas de transmissão e equipamentos vinculados ao empreendimento, assim como a sua localização física e o ano previsto para a sua entrada em operação.

Relacionar os estudos na frequência fundamental que fazem parte do documento, justificando, caso ocorra, o motivo da não apresentação de algum tipo de estudo solicitado.

2. Conclusões e Recomendações

Devem ser destacadas as conclusões referentes a cada tipo de análise efetuada (Regime Normal e de Emergência, Energização, Rejeição de Carga e Desempenho Dinâmico).

Observa-se que o foco das conclusões e recomendações, neste contexto, deve obrigatoriamente cobrir os aspectos de projeto básico da instalação e seus equipamentos; cita-se como exemplo: a conclusão quanto à adequação ou não das tensões sustentadas de regime permanente e dinâmico na extremidade das linhas de transmissão, impostas aos equipamentos terminais, e a comprovação da conformidade da comutação sob carga proposta para os transformadores.

3. Critérios

Deste item devem constar os critérios adotados, tendo como referência as diretrizes estabelecidas no anexo técnico do edital da Aneel e no submódulo 2.3 do Procedimentos de Rede do ONS.

É imprescindível apresentar: os limites considerados para as tensões nas barras do sistema para as condições operativas normal e de emergência; os limites das tensões sustentadas de regime permanente e dinâmico na extremidade das linhas de transmissão, a ser observados nas manobras de energização e rejeição de carga; as capacidades de corrente das linhas de transmissão e de equipamentos.

4. Metodologia Adotada

Neste tópico, o intuito é apresentar a metodologia empregada nas simulações e análises, citando as sequências das manobras realizadas e a condição de operação (em operação ou não) dos equipamentos de controle da tensão (banco de capacitores, reatores, compensadores estáticos, compensadores síncronos e comutação sob carga de transformadores).

No desenvolvimento dos estudos, também deve ser informada a metodologia utilizada na representação de sistemas de controle de unidades geradoras, os compensadores síncronos e os estáticos, caso existentes.

5. Dados Utilizados

É indispensável, para a análise do documento e emissão do parecer por parte da Aneel, a apresentação das seguintes informações e dados utilizados nos estudos na frequência fundamental:

5.1. Configuração da rede estudada

Esta configuração deve ser apresentada por meio de diagrama unifilar, para possibilitar a visualização da configuração da rede em correspondência aos anos estudados: ano de entrada em operação do empreendimento e configuração futura, no horizonte do plano Decenal da EPE.

5.2. Dados dos Componentes

Serão apresentados em forma de tabelas os dados de linhas de transmissão, transformadores, reatores, banco de capacitores, compensadores estáticos, compensação série e demais equipamentos relacionados no anexo técnico do edital e considerados nos estudos da frequência fundamental.

As Tabelas 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6, a seguir, apresentam sugestões para apresentação dos dados dos componentes da rede.

Tabela 5.1. Dados das Linhas de Transmissão.

| LT (Descrição) | Comp. | Impedâncias -%(Base 100MVA) | | | Capacidade (MVA) | |
|-----------------------|-------|-----------------------------|-------|----------|------------------|--------|
| | | R1(%) | X1(%) | B1(MVAR) | Normal | Emerg. |
| Cabo n x -- MCM CD/CS | Km | | | | | |
| LT SE A – SE BkV | | | | | | |
| | | | | | | |

Tabela 5.2. Dados dos Transformadores.

| Subestação | Potência (MVA) | Relação de Tensões (KV) | Ligações | Impedâncias (%) Base 100 MVA | | Limites de Carregamento (MVA) | |
|--|----------------|-------------------------|----------|---------------------------------|-----|-------------------------------|---------------|
| | | | | 1. | Xps | Longa Duração | Curta Duração |
| | | | | | | | |
| Dados da Comutação | | | | | | | |
| Informar dados dos comutadores de derivação em carga, lado instalação, barra controlada, faixa de derivações com o número de posições de ajustes (<i>tapes</i>). | | | | | | | |

Tabela 5.3. Dados dos Reatores de LTS:Fixo (F) e Manobráveis (M).

| Barra de | Barra para | Local do Reator / Tipo: (F) ou (M) | Circuito | Tensão (kV) | Potência (MVar) |
|----------|------------|---------------------------------------|----------|-------------|-----------------|
| | | | | | |
| | | | | | |

Tabela 5.4. Dados dos Reatores e Banco de Capacitores de Barra Manobráveis.

| Barra | Tensão (kV) | Potência (MVar) |
|-------|-------------|-----------------|
| | | |
| | | |

Tabela 5.5. Dados dos Compensadores Estáticos e Compensadores Síncronos.

| Barra | Tensão (kV) | Potência (+/- MVar) | Inclinação(Slope) CER (%) |
|-------|-------------|---------------------|------------------------------|
| | | | |
| | | | |

Tabela 5.6. Dados da Compensação Série das Linhas de Transmissão.

| Subestação | LT | Reatância (%) - Base 100MVA | Capacidade (MVA) | |
|------------|----|-----------------------------|------------------|--------|
| | | | Normal | Emerg. |
| | | | | |
| | | | | |

6. Informações sobre os Casos Base

Serão apresentadas as informações sobre os casos bases utilizados nos estudos de fluxo de carga, energização e rejeição de carga, devendo destacar-se: o horizonte de referência (ONS-PAR ou EPE-PDE), as condições de carga estudadas, as condições de intercâmbios e os despachos de geração mais relevantes associados à análise do empreendimento.

Justificar as razões que resultaram na escolha das condições de carga, intercâmbios e despachos de geração associadas aos estudos apresentados. Deve ser levada em consideração, sob o enfoque do

projeto básico, a necessidade da imposição de condições extremas de carregamentos e de limites de tensão visando ao dimensionamento das instalações.

7. Desenvolvimento do Estudo

Será apresentado, para cada tipo de estudo realizado, um item específico contemplando as análises dos casos simulados e as principais constatações, conforme a seguir:

7.1. Estudo de Fluxo de Carga

Apresentar nesse item o desenvolvimento do estudo de fluxo de carga levando em conta todos os aspectos aplicáveis e considerando o sistema operando tanto sob condição normal, como sob emergência - (n-1).

Deve ser apresentada, em forma de tabela, a relação de todas as emergências estudadas, Tabela 7.1.

Tabela 7.1. Emergências Estudadas.

| Nro | Descrição da Emergência |
|-----|-------------------------|
| | |
| | |

Os resultados das simulações de fluxo de carga para a rede na condição normal de operação e sob emergência, e nas condições de carga e de intercâmbios estudados, serão apresentados em anexo ao relatório dos estudos elétricos na frequência fundamental — seja em tabelas ou diagramas de plotagem do fluxo de carga, dos quais devem constar as tensões nas barras e os carregamentos (fluxo de carga) nos componentes da rede, incluindo os componentes do empreendimento objeto do leilão e do sistema elétrico em sua área de abrangência.

No item 9 - Anexos, como forma de exemplificar os anexos ao relatório de estudos elétricos na frequência fundamental, relativos ao estudo de fluxo de carga, são apresentados, como sugestão, modelos de tabelas e de diagrama da plotagem do fluxo de carga.

É necessário relacionar, no item do desenvolvimento do estudo de fluxo de carga, as principais constatações observadas nas simulações, abrangendo o sistema operando na condição normal e sob emergência (n-1), para as condições de carga e de intercâmbios estabelecidos em correspondência aos horizontes estudados.

7.2. Estudo de Rejeição de Carga

Deve ser apresentado o desenvolvimento do estudo de rejeição de carga, verificando o atendimento aos critérios das tensões sustentadas de regime permanente e dinâmico na extremidade aberta da linha de transmissão e nas barras das subestações, após a manobra. Serão consideradas e informadas no relatório as condições operativas dos equipamentos de controle de tensão (reatores fixos da linha de

transmissão, reatores manobráveis das barras, compensadores estáticos shunt ou compensadores síncronos existentes).

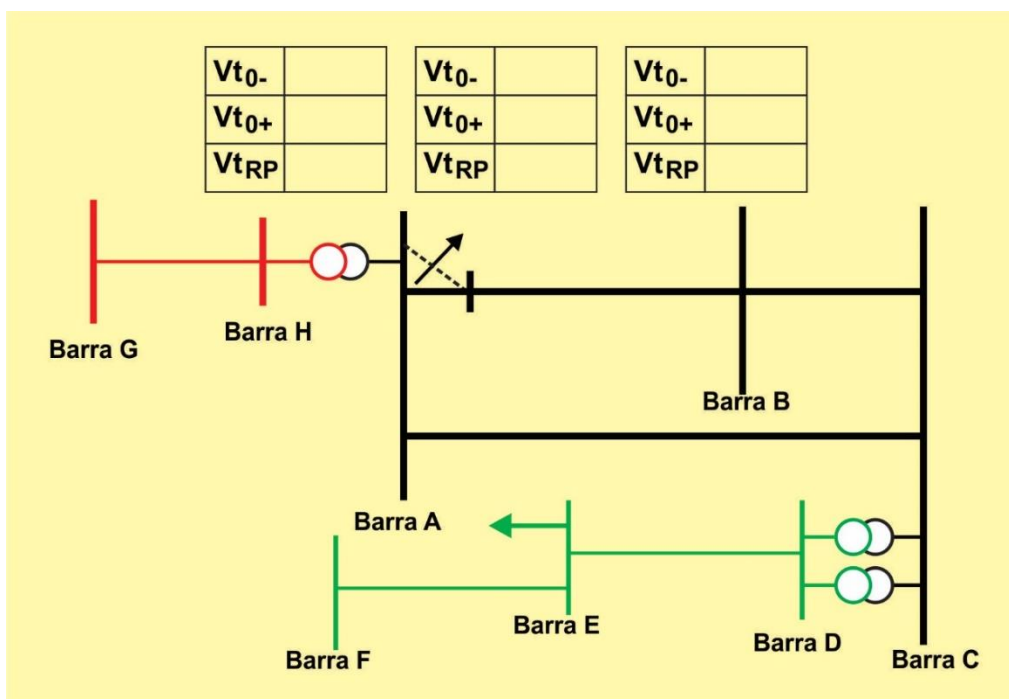
O resultado do estudo de rejeição de carga será apresentado em forma de tabelas ou por meio de diagramas unifilares, constando a barra da extremidade terminal da linha de transmissão e as barras das subestações com as indicações das tensões nos instantes: antes da manobra (V_{t0-}); imediatamente após a manobra (V_{t0+}) e em regime permanente (V_{tRP}), correspondente à tensão sustentada. A Tabela 7.2 e a Figura 9.1 apresentam, respectivamente, a sugestão de apresentação dos resultados em tabela ou diagrama unifilar.

Após a apresentação dos resultados da simulação da rejeição de carga em forma de tabela ou diagrama unifilar, devem-se relacionar as principais constatações sobre a manobra.

Tabela 7.2. Resultado do Estudo de Rejeição de Carga.

| Barra de | | Barra para | | Fluxo de Carga(MVA) | | | | | | | | | | | |
|----------|------|------------|------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Nº | Nome | Nº | Nome | Nº Circuito | Carreg. Longa Duração (MVA) | Carreg. Curta Duração (MVA) | Emergência 01 | Emergência 02 | Emergência 03 | Emergência 04 | Emergência 05 | Emergência 06 | Emergência 07 | Emergência 08 | Emergência 09 |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |

Figura 9.1 Resultado do Estudo de Rejeição de Carga



7.3. Estudo de Energização de Linha de Transmissão

Deve ser apresentado o desenvolvimento do estudo de energização de linha de transmissão, verificando o atendimento aos critérios das tensões sustentadas de regime permanente e dinâmico na extremidade aberta da linha de transmissão, assim como nas barras das subestações após a manobra. Serão consideradas e informadas no relatório as condições operativas dos equipamentos de controle de tensão (reatores fixos da linha de transmissão, reatores manobráveis das barras, compensadores estáticos shunt ou compensadores síncronos existentes).

O resultado do estudo de energização de linha de transmissão deve ser apresentado em forma de tabela ou de diagrama unifilar, constando a barra da extremidade terminal da linha de transmissão e as barras das subestações com as indicações das tensões nos instantes: antes da manobra (V_{t0-}); imediatamente após a manobra (V_{t0+}) e em regime permanente (V_{tRP}), correspondente à tensão sustentada. A Tabela 7.3 e a

Figura 9.2 mostram a sugestão de apresentação dos resultados em forma de tabela ou de diagrama unifilar.

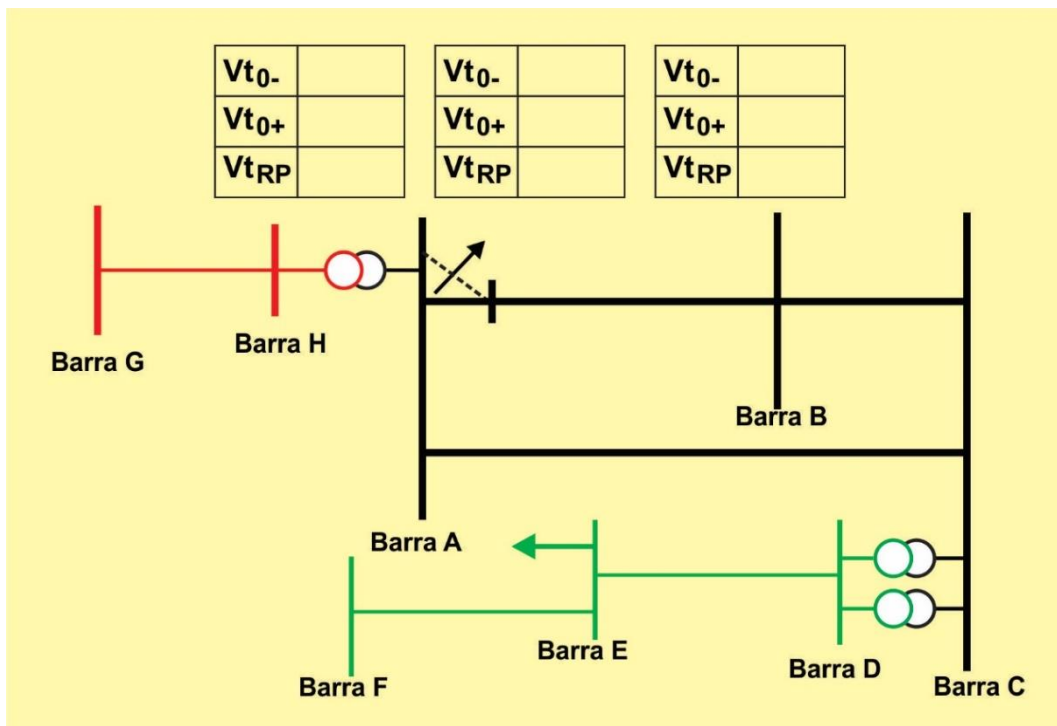
Após a apresentação dos resultados da simulação da energização da linha de transmissão, em tabelas ou diagramas unificares, como se disse acima, é necessário relacionar as principais constatações sobre a manobra.

Tabela 7.3. Resultado do Estudo de Energização de Linha de Transmissão

| Subestação onde Ocorreu a Manobra | Tensões (pu) | | | | | | |
|-----------------------------------|---------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
| | Tensão Pré-Manobra (Vt0-) | Terminal Aberto | | Barra SE Manobra | | Barra SE Oposta | |
| | | Tensão Dinâmica (Vt0+) | Tensão Sustentada (VtRP) | Tensão Dinâmica (Vt0+) | Tensão Sustentada (VtRP) | Tensão Dinâmica (Vt0+) | Tensão Sustentada (VtRP) |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

- (1) No caso de LT circuito duplo - CD, informar a condição dos circuitos, p.ex: manobra de C1 c/ C2 ligado ou desligado.
- (2) Informar estado (ligado ou desligado) dos reatores, compensador estático shunt ou de compensadores síncronos

Figura 9.2 Resultado do Estudo de Energização



7.4. Estudo Dinâmico

Será apresentado o desenvolvimento dos estudos dinâmicos necessários ao projeto básico do empreendimento.

Do desenvolvimento do estudo deve constar a relação das emergências estudadas, devendo ser indicados o tipo e o local da aplicação do defeito com os tempos da atuação da proteção e da abertura dos disjuntores. Os tempos da atuação da proteção corresponderão aos padronizados no submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS, em função do nível da tensão.

Também deve ser informado o caso base de fluxo de carga e a base de dados com os modelos dos sistemas de controle adotados nas simulações feitas pelo programa de estabilidade.

Também serão apresentadas as modelagens que, caso necessário, tenham sido desenvolvidas para os sistemas de controle, por meio de modelos típicos ou definitivos associados aos equipamentos do empreendimento (unidades geradoras, compensadores estáticos, compensadores síncronos). Conforme exigência do anexo técnico do edital, é necessário obter junto ao fabricante do equipamento o modelo final para simulação dinâmica com o programa ANATEM, encaminhando o mesmo ao ONS.

Devem-se apresentar em anexo ao relatório de estudos elétricos na frequência fundamental as curvas de estabilidade obtidas por meio das simulações, atestando ou não o seu desempenho frente aos eventos estudados.

No item 9 – Anexos, como forma de exemplificar os anexos ao relatório de estudos elétricos na frequência fundamental, relativo aos estudos dinâmicos, é apresentado um exemplo de diagrama em blocos típicos de um sistema de controle e de curvas de estabilidade, mostrando o seu comportamento dinâmico.

8. Referências

Apresentar, neste item, todos os documentos utilizados com referência para o desenvolvimento dos estudos elétricos na frequência fundamental.

9. Anexos

Tabela 9.1. Resultado Estudo de Fluxo de Carga – Tensão nas Barras.

| Identificação da Barra | | Tensão nas barras (pu) | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|------|------------------------|-----|--------------|------------|----|----|----|----|----|----|----|----|--|
| | | Faixa | | Cond. Normal | Emergência | | | | | | | | | |
| | | Max | Min | | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | |
| Nro | Nome | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |

Tabela 9.2. Resultado Estudo de Fluxo de Carga – Fluxo de Carga.

| Barra de | | Barra para | | Fluxo de Carga(MVA) | | | | | | | | | | |
|----------|------|------------|------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | | | | Nº Circuito | Carreg. Longa Duração (MVA) | Carreg. Curta Duração (MVA) | Emergência 01 | Emergência 02 | Emergência 03 | Emergência 04 | Emergência 05 | Emergência 06 | Emergência 07 | Emergência 08 |
| Nº | Nome | Nº | Nome | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |

Figura 9.3 Diagrama de Plotagem do Fluxo de Carga.

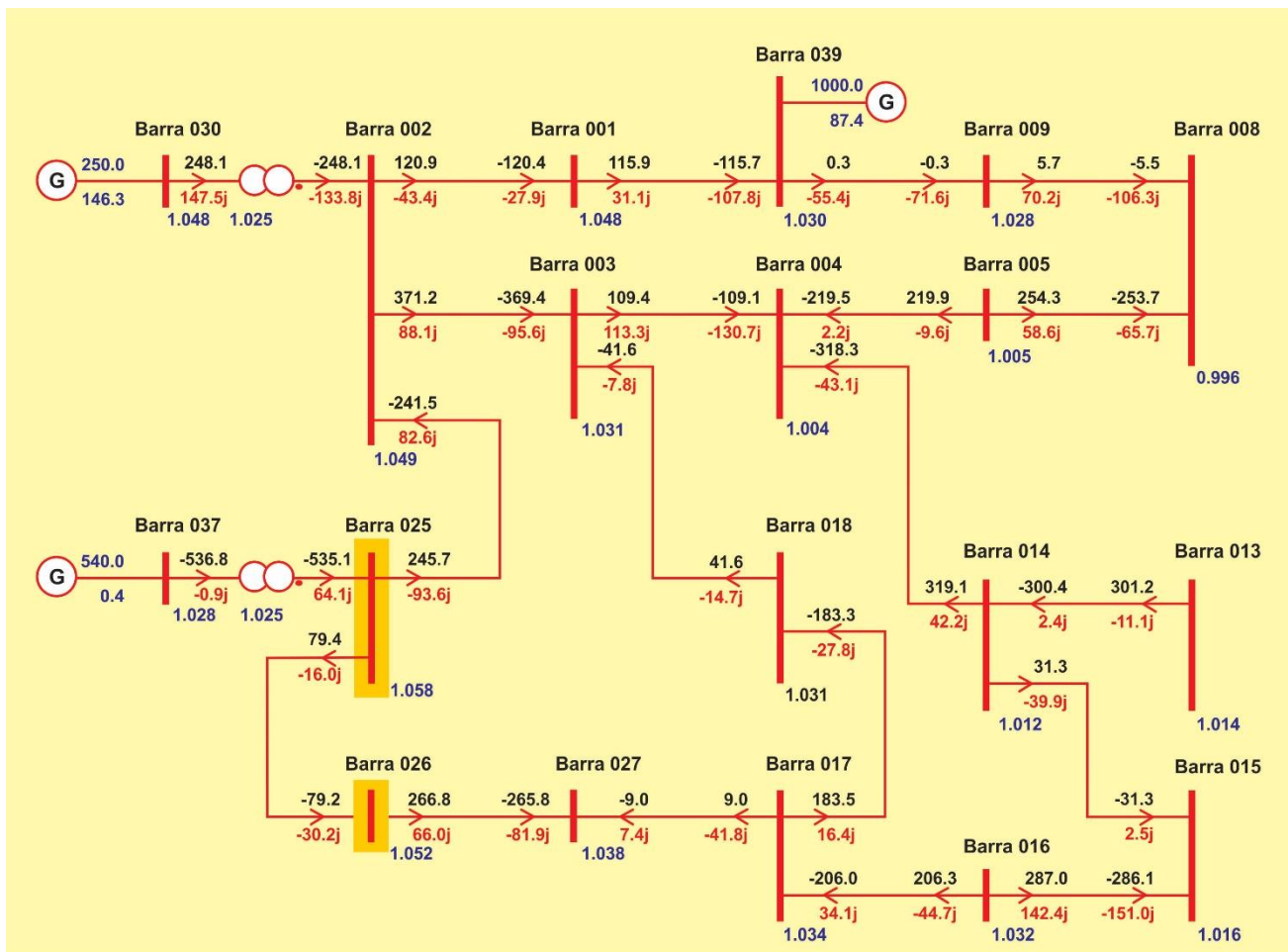


Figura 9.4 Diagrama Analógico do Sistema de Controle do Compensador Estático da SE A.

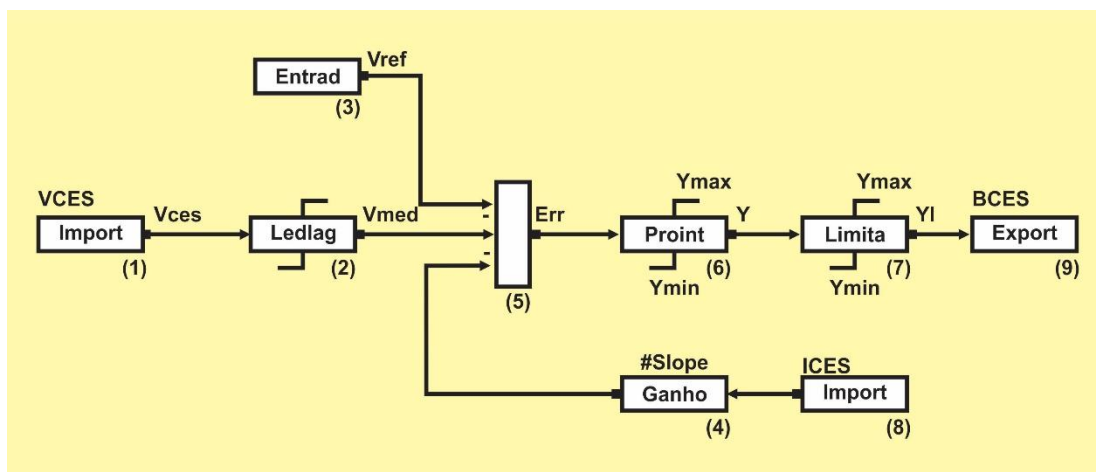
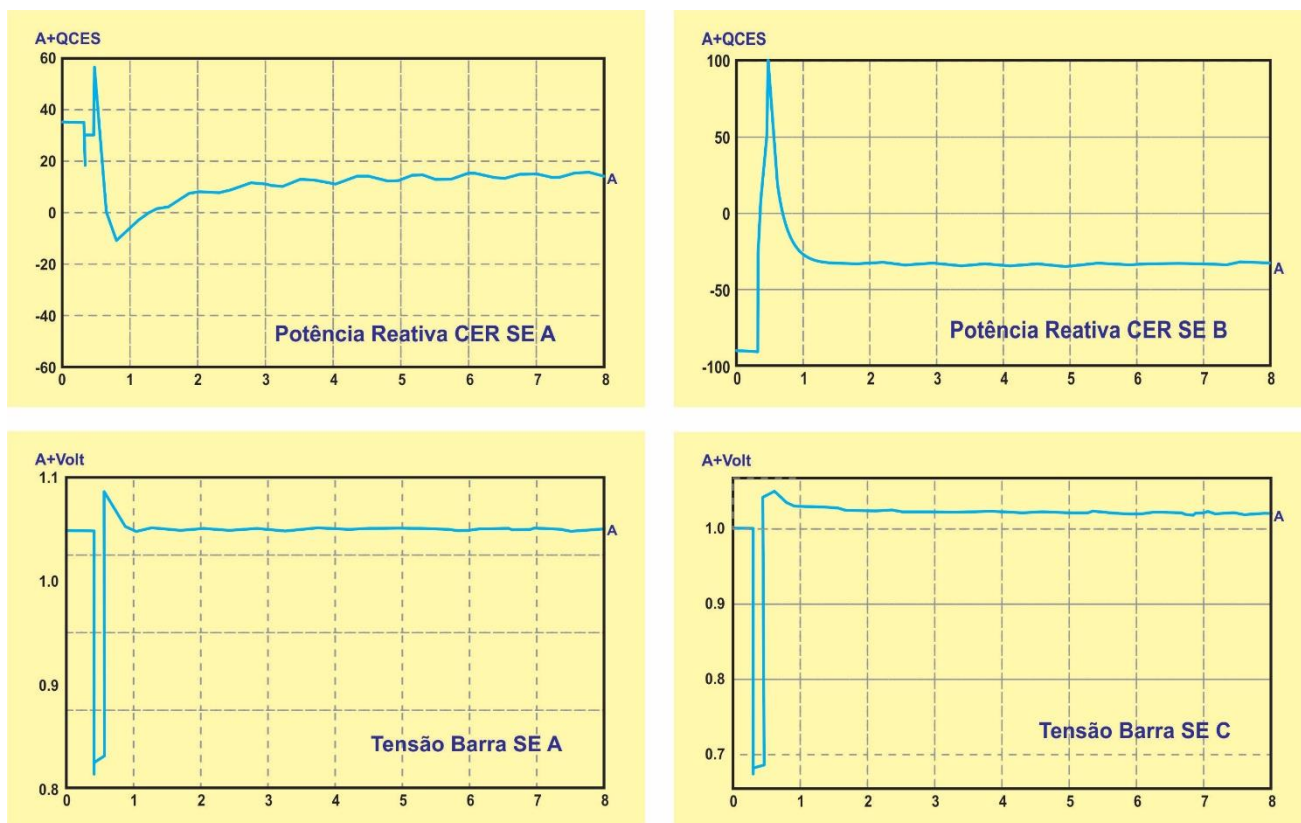


Figura 9.5 Plotagem das Curvas do Comportamento Dinâmico do Compensador Estático das SES: A e B – Emergência 01



9.2. Fluxo de Potência em Barramentos

1. Introdução e Objetivo

Apresentar um breve resumo dos aspectos associados à configuração de barramento da(s) subestações e a integração do empreendimento à Rede Básica do SIN - Sistema Interligado Nacional.

Devem-se relacionar instalações, linhas de transmissão e equipamentos vinculados ao empreendimento, a sua localização física e o ano previsto para a sua entrada em operação.

2. Conclusões

Apresentar os valores das correntes que circulam nos barramentos e nos vãos de conexão a ser considerados nos respectivos dimensionamentos, para cada carregamento / configuração estudada.

3. Premissas

Relacionar os anos estudados, bem como as condições gerais do sistema adotados. Informar os carregamentos e limites considerados.

4. Dados Utilizados

Deve(m) ser apresentado(s) o(s) diagrama(s) unifilar(es) da subestação relativa a cada configuração que está sendo estudada, constando da(s) mesma(s), claramente, a identificação de cada seção de barramento (trechos entre conexões adjacentes);

5. Desenvolvimento do Estudo

Apresentar a sequência do estudo iniciando com a seleção das contingências a ser consideradas para cada condição de carga/configuração de pátio estudado.

Em seguida, precisam ser apresentados os resultados dos processamentos dos casos de fluxo de potência, por meio de tabelas — sendo uma tabela por condição de carga/configuração de pátio estudado. Delas deve constar, por contingência, o carregamento resultante em cada seção de barramento (em Amperes).

9.3. Cálculo de Parâmetros de LT

9.3.1. Rotina Line Constants - ATP - Representação para Matriz de Transformação Modal

Obtenção dos Parâmetros da LT 230kV SEA – SEB - CD- Rotina Line Constant - ATP - Matriz de Transformação Modal.

```

C **** UNTRANSPOSED K.C. Lee line calculated at 6.000E+01 HZ. ****
C LINE CONSTANTS
C $ERASE
C BRANCH SASB1ASBSA1ASASB1BSBSA1BSASB1CSBSA1CSASB2ASBSA2ASASB2BSBSA2BSASB2CSBSA
C METRIC
C C SKIN RESISTE REACTAN DIAMETR HORIZON ALTURA VMID SEPAR ALPHA NAME
C C -----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
C C 345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678
C C 1 2 3 4 5 6 7
C1 0.08160 2 1.0729 2.700 -9.2 15.8 15.8 123.0 90.
C2 0.08160 2 1.0729 2.700 -4.2 15.8 15.8 123.0 90.
C3 0.08160 2 1.0729 2.700 -4.2 23.5 23.5 123.0 90.
C4 0.08160 2 1.0729 2.700 9.2 15.8 15.8 123.0 90.
C5 0.08160 2 1.0729 2.700 4.2 15.8 15.8 123.0 90.
C6 0.08160 2 1.0729 2.700 4.2 23.5 23.5 123.0 90.
C0 0.81300 2 0.42 1.340 6.9 29.60 29.60 0.0 0.0
C0 4.86640 2 1.2E-6 0.952 -6.9 29.60 29.60 0.0 0.0
C C
C BLANK CARD ENDING CONDUCTOR CARDS
C 1.E3 60. 000001 001000 0 277.00 1
C The transformation matrix was calculated at 6.00000000E+01 Hz.
$VINTAGE, 1
-1SASB1ASBSA1A 7.31718E-01 1.01063E+03 1.83181E+05-2.77000E+02 16
-2SASB1BSBSA1B 4.22706E-02 3.46419E+02 2.91042E+05-2.77000E+02 16
-3SASB1CSBSA1C 4.37633E-02 2.76826E+02 2.91542E+05-2.77000E+02 16
-4SASB2ASBSA2A 4.06033E-02 2.14496E+02 2.94832E+05-2.77000E+02 16
-5SASB2BSBSA2B 4.08314E-02 2.27892E+02 2.95065E+05-2.77000E+02 16
-6SASB2CSBSA2C 4.15032E-02 2.38422E+02 2.94641E+05-2.77000E+02 16
$VINTAGE, 0
0.47369023 -0.51934988 -0.35622108 -0.36953542 -0.487524360.22022064
0.000000000.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.36423328 -0.30784286 -0.340629750.60263926 0.49685834 0.02803665
0.000000000.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.40043594 -0.313358240.62860028 -0.05266622 -0.03022726 -0.60212899
0.000000000.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.461796450.60563968 -0.19905599 0.35849068 -0.50730020 -0.22594786
0.000000000.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.359501090.37555147 -0.21467944 -0.60413776 0.50655557 -0.12876301
0.000000000.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.374307020.17168796 0.52557498 0.06322789 0.02420872 0.72147429
0.000000000.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
    
```

Base Dados ATP – Modelagem da LT 230KVSA – SB - CD – Através da Matriz de Transformação Modal.
 Transposição: C1:ABC-C2:CBA, (em trechos de 1/6, 1/3,1/3 e 1/6 do comprimento total).

```

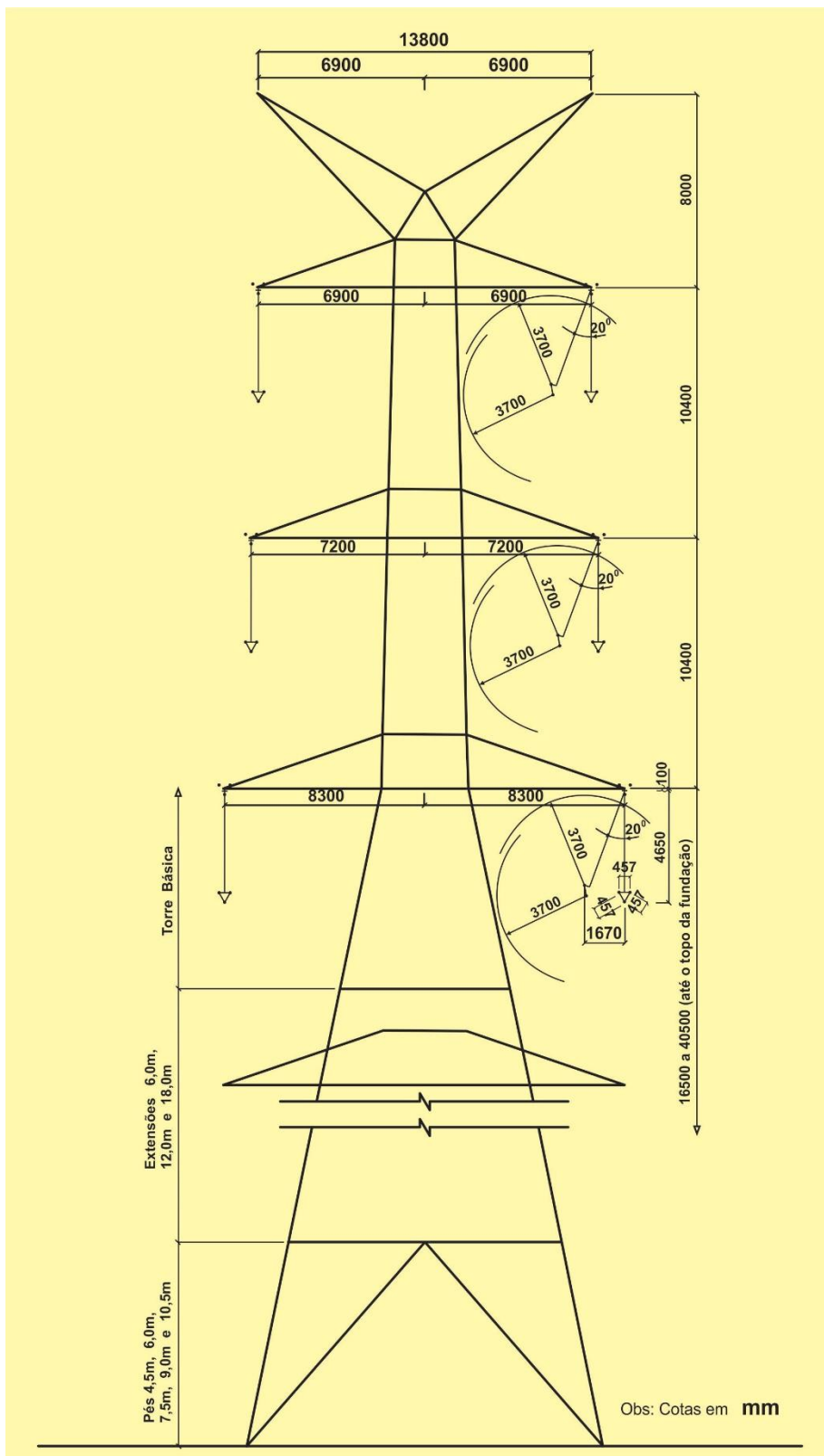
C *****
C * LT 230KV SUBEST A - SUBEST-B 2X795MCM-TERN *
C *****
C
C TRECHO #1 (1/6 TOTAL - 46,16KM)
$VINTAGE, 1
-1SASB1ATRAX1A          7.31718E-01 1.01063E+03 1.83181E+05-0.46160E+02 16
-2SASB1BTRAX1B          4.22706E-02 3.46419E+02 2.91042E+05-0.46160E+02 16
-3SASB1CTRAX1C          4.37633E-02 2.76826E+02 2.91542E+05-0.46160E+02 16
-4SASB2CTRAX2C          4.06033E-02 2.14496E+02 2.94832E+05-0.46160E+02 16
-5SASB2BTRAX2B          4.08314E-02 2.27892E+02 2.95065E+05-0.46160E+02 16
-6SASB2ATRAX2A          4.15032E-02 2.38422E+02 2.94641E+05-0.46160E+02 16
$VINTAGE, 0
0.47369023 -0.51934988 -0.35622108 -0.36953542 -0.487524360.22022064
0.000000000.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.36423328 -0.30784286 -0.340629750.60263926 0.49685834 0.02803665
0.000000000.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.40043594 -0.313358240.62860028 -0.05266622 -0.03022726 -0.60212899
0.000000000.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.461796450.60563968 -0.19905599 0.35849068 -0.50730020 -0.22594786
0.000000000.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.359501090.37555147 -0.21467944 -0.60413776 0.50655557 -0.12876301
0.000000000.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.374307020.17168796 0.52557498 0.06322789 0.02420872 0.72147429
0.000000000.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
C
C TRECHO #2 (1/3 TOTAL - 92,33KM)
$VINTAGE, 1
-1TRAX1BTRAY1B          7.31718E-01 1.01063E+03 1.83181E+05-0.92330E+02 16
-2TRAX1CTRAY1C          4.22706E-02 3.46419E+02 2.91042E+05-0.92330E+02 16
-3TRAX1ATRAX1A          4.37633E-02 2.76826E+02 2.91542E+05-0.92330E+02 16
-4TRAX2ATRAX2A          4.06033E-02 2.14496E+02 2.94832E+05-0.92330E+02 16
-5TRAX2CTRAX2C          4.08314E-02 2.27892E+02 2.95065E+05-0.92330E+02 16
-6TRAX2BTRAY2B          4.15032E-02 2.38422E+02 2.94641E+05-0.92330E+02 16
$VINTAGE, 0
0.47369023 -0.51934988 -0.35622108 -0.36953542 -0.487524360.22022064
0.000000000.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.36423328 -0.30784286 -0.340629750.60263926 0.49685834 0.02803665
0.000000000.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.40043594 -0.313358240.62860028 -0.05266622 -0.03022726 -0.60212899
0.000000000.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.461796450.60563968 -0.19905599 0.35849068 -0.50730020 -0.22594786
0.000000000.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.359501090.37555147 -0.21467944 -0.60413776 0.50655557 -0.12876301
0.000000000.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.374307020.17168796 0.52557498 0.06322789 0.02420872 0.72147429
0.000000000.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
C
C TRECHO #3 (1/3 TOTAL - 92,33KM)
$VINTAGE, 1
-1TRAY1CTRAX1C          7.31718E-01 1.01063E+03 1.83181E+05-0.92330E+02 16
-2TRAY1ATRAX1A          4.22706E-02 3.46419E+02 2.91042E+05-0.92330E+02 16
-3TRAY1BTRAX1B          4.37633E-02 2.76826E+02 2.91542E+05-0.92330E+02 16
-4TRAY2BTRAX2B          4.06033E-02 2.14496E+02 2.94832E+05-0.92330E+02 16
-5TRAY2ATRAX2A          4.08314E-02 2.27892E+02 2.95065E+05-0.92330E+02 16
-6TRAY2CTRAX2C          4.15032E-02 2.38422E+02 2.94641E+05-0.92330E+02 16
$VINTAGE, 0
0.47369023 -0.51934988 -0.35622108 -0.36953542 -0.487524360.22022064
0.000000000.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.36423328 -0.30784286 -0.340629750.60263926 0.49685834 0.02803665
0.000000000.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.40043594 -0.313358240.62860028 -0.05266622 -0.03022726 -0.60212899
0.000000000.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.461796450.60563968 -0.19905599 0.35849068 -0.50730020 -0.22594786
0.000000000.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.359501090.37555147 -0.21467944 -0.60413776 0.50655557 -0.12876301
0.000000000.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.374307020.17168796 0.52557498 0.06322789 0.02420872 0.72147429
0.000000000.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
C
C TRECHO #4 (1/6 TOTAL - 46,16KM)
$VINTAGE, 1
-1SBSA1ATRAX1A          7.31718E-01 1.01063E+03 1.83181E+05-0.46160E+02 16
-2SBSA1BTRAX1B          4.22706E-02 3.46419E+02 2.91042E+05-0.46160E+02 16
-3SBSA1CTRAX1C          4.37633E-02 2.76826E+02 2.91542E+05-0.46160E+02 16
    
```

```

-4SBSA2CTRAZ2C          4.06033E-02  2.14496E+02  2.94832E+05-0.46160E+02  16
-5SBSA2BTRAZ2B          4.08314E-02  2.27892E+02  2.95065E+05-0.46160E+02  16
-6SBSA2ATRAZ2A          4.15032E-02  2.38422E+02  2.94641E+05-0.46160E+02  16
$VINTAGE, 0
  0.47369023 -0.51934988 -0.35622108 -0.36953542 -0.487524360.22022064
  0.000000000.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
  0.36423328 -0.30784286 -0.340629750.60263926 0.49685834 0.02803665
  0.000000000.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
  0.40043594 -0.313358240.62860028 -0.05266622 -0.03022726 -0.60212899
  0.000000000.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
  0.461796450.60563968 -0.19905599 0.35849068 -0.50730020 -0.22594786
  0.000000000.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
  0.359501090.37555147 -0.21467944 -0.60413776 0.50655557 -0.12876301
  0.000000000.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
  0.374307020.17168796 0.52557498 0.06322789 0.02420872 0.72147429
  0.000000000.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
C
C REATORES FIXOS 22 MVAR -230KV DA LT SUBEST_A - SUBEST_B C1 E C2
C TERMINAL SUBEST_ A
00SASB1A                8.0002404.0
00SASB1B                8.0002404.0
00SASB1C                8.0002404.0
00SASB2A                8.0002404.0
00SASB2B                8.0002404.0
00SASB2C                8.0002404.0
C TERMINAL SUBEST_B
00SBSA1A                8.0002404.0
00SBSA1B                8.0002404.0
00SBSA1C                8.0002404.0
00SBSA2A                8.0002404.0
00SBSA2B                8.0002404.0
00SBSA2C                8.0002404.0

```

Figura 9.6 Torre Típica.



Modelagem Detalhada dos Circuitos da Linha de Transmissão, Representação de Esquema de Transposição

Figura 9.7 Características da LT – Compensação Shunt.

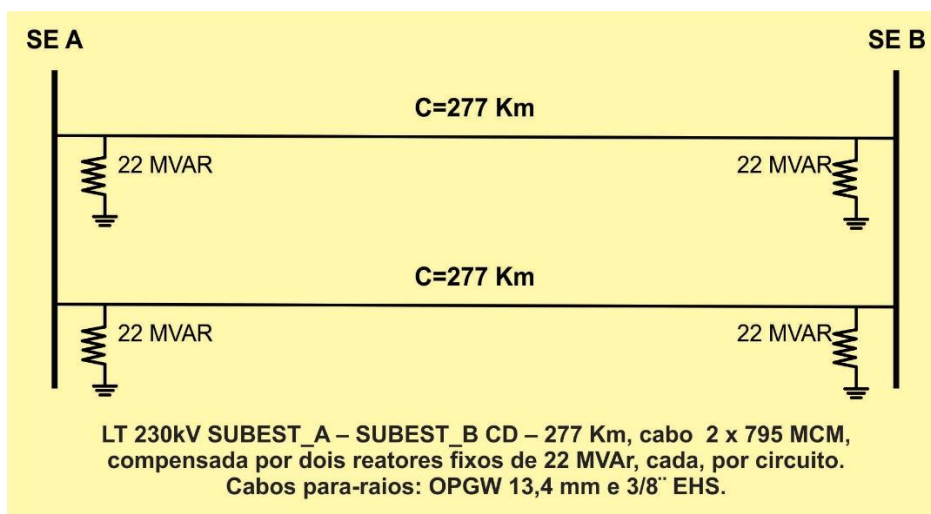
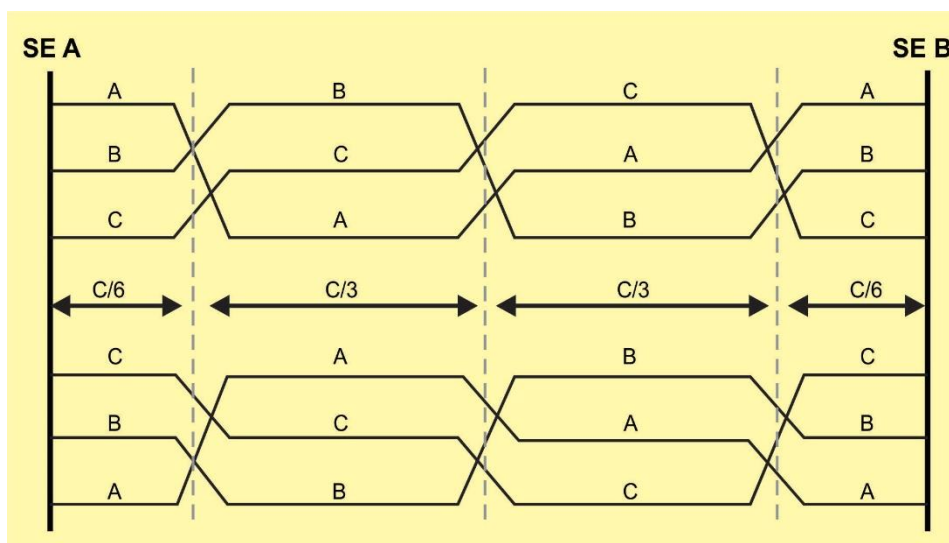


Figura 9.8 Esquema de Transposição da Linha de Transmissão.



9.4. Transitórios Eletromagnéticos de Energização de Linhas, Religamento Tripolar e Rejeição de Carga

1. Introdução e Objetivo

Deve ser apresentado o objetivo do estudo, informando as instalações, as linhas de transmissão e os equipamentos vinculados ao empreendimento, a sua localização física e o ano previsto para a entrada em operação.

Relacionar os estudos de transitórios eletromagnéticos que fazem parte do documento, justificando, caso ocorra, o motivo da não apresentação de algum tipo de estudo solicitado.

2. Conclusões

Devem ser destacadas as conclusões associadas a cada um dos estudos desenvolvidos:

2.1. Conclusões do Estudo de Energização

2.2. Conclusões do Estudo de Religamento Tripolar

2.3. Conclusões do Estudo de Rejeição de Carga

Serão apresentadas, para cada um deles, as máximas sobretensões e energias dissipadas nos para-raios, com os comentários sobre as violações encontradas relativas a cada um dos trechos de linhas de transmissão estudados.

É necessário apresentar a conclusão sobre a integração dos estudos de manobra e a coordenação do isolamento das estruturas das linhas de transmissão.

3. Recomendações

Deve-se recomendar o sentido preferencial da manobra, se houver.

Com o intuito de subsidiar a especificação dos equipamentos, deverão informar-se: as recomendações quanto à tensão nominal e à capacidade de energia (KJ/kV) a ser adotadas para os para-raios; a necessidade da utilização de dispositivos para controle das sobretensões (resistores de pré-inserção – valor em ohms e tempo de inserção), dentre outras.

4. Representação da Rede e Dados Considerados

4.1. Representação da Rede

Será apresentada no corpo do relatório, por meio de diagrama unifilar, a configuração da rede utilizada na realização dos estudos de transitórios eletromagnéticos, devendo ser respeitado o afastamento mínimo de, pelo menos, duas barras atrás do ponto de manobra, com a validação da modelagem por meio da comparação dos níveis de curto-circuito. A Figura 9.9 e a Tabela 4.1 apresentam um exemplo de diagrama unifilar com a validação da modelagem da rede.

É preciso informar o ano horizonte do caso PAR-ONS (ano, condição de carga, despacho de geração, intercâmbios e carregamento da(s) linha(s) foco das manobras), adotado como referência para o ajuste do fluxo de potência do caso ATP, referente a cada uma das simulações, energização, religamento tripolar e rejeição de carga.

Figura 9.9 Configuração da Rede adotada nos Estudos de Transitórios Eletromagnéticos.

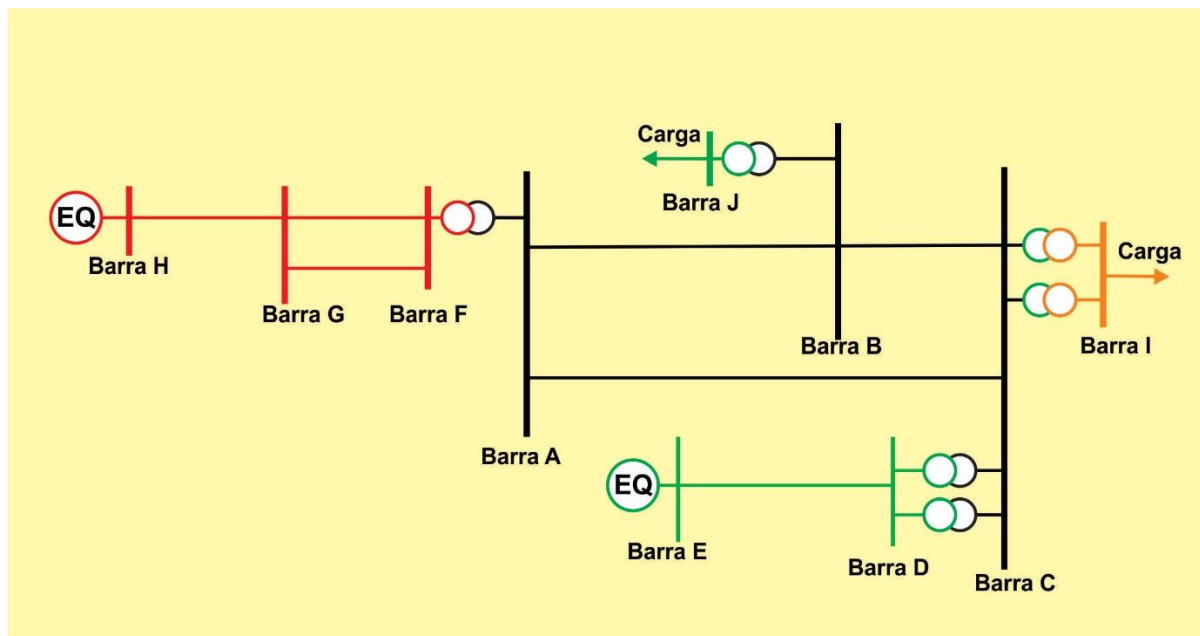


Tabela 4.1. Validação da Modelagem da Rede no ATP - Comparação Níveis de Curto-Circuito.

| Comparação dos Níveis de Curto-Circuito | | | | |
|---|----------------|-----|-----------------|-----|
| Barra | Trifásico (kA) | | Monofásico (kA) | |
| | ANAFAS | ATP | ANAFAS | ATP |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

4.2. Dados Considerados

As tabelas a seguir podem ser consideradas como sugestão para a apresentação dos dados dos componentes da rede que compõem a base de dados do ATP.

4.2.1. Linhas de Transmissão

Tabela 4.2. Dados das Linhas de Transmissão.

| De | Para | Tensão (kV) | L (km) | R1 (ohms/km) | X1 (ohms/km) | Y1 (μ F/km) | R0 (ohms/km) | X0 (ohms/km) | Y0 (μ F/km) |
|----|------|-------------|--------|--------------|--------------|------------------|--------------|--------------|------------------|
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |

Quando se tratar de linha(s) de transmissão que requeiram a modelagem detalhada dos acoplamentos eletrostáticos e eletromagnéticos envolvidos, como é o caso de linhas de circuito duplo ou de linhas que correm em paralelo dividindo a mesma faixa de passagem, deve-se referenciar o tipo de modelagem adotada juntamente com os dados de entrada utilizados no processamento da rotina “Line Constants”, do programa ATP, informando os dados de projeto básico da(s) linha(s), (geometria torre típica, características do cabo fase, cabos para-raios e flechas) e os esquemas de transposição.

4.2.2. Transformadores

Tabela 4.3. Dados dos Transformadores.

| Subestação | Potência (MVA) | Relação de Tensões (kV) | Ligações | Impedância (% base pot. nominal) | | |
|------------|----------------|-------------------------|----------|----------------------------------|-----|-----|
| | | | | Xps | Xpt | Xst |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

Deve também ser informado para quais transformadores foi representada a curva de magnetização.

4.2.3. Reatores

Tabela 4.4. Dados dos Reatores de LT: Fixo (F) e Manobráveis (M).

| Barra de | Barra para | Local | Circuito | Tensão (kV) | Potência (Mvar) |
|----------|------------|-------|----------|-------------|-----------------|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

Tabela 4.5. Dados dos Reatores de Barra - Manobráveis.

| Barra | Tensão (kV) | Capacidade (Mvar) |
|-------|-------------|-------------------|
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |

4.2.4. Equivalentes

Tabela 4.6. Dados dos Equivalentes Próprios.

| Local | R0 (Ω) | X0(Ω) | R1(Ω) | X1(Ω) |
|-------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

Tabela 4.7. Dados das Impedâncias de Transferências

| De | Para | R0 (Ω) | X0(Ω) | R1(Ω) | X1(Ω) |
|----|------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

4.2.5. Unidades Geradoras

Tabela 4.8. Dados das Unidades Geradoras

| Usina | R0 (Ω) | X0(Ω) | R1(Ω) | X1(Ω) |
|-------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

4.2.6. Para-Raios

Tabela 4.9. Dados dos Para-Raios - Característica de Tensão Residual x Corrente de Descarga.

| I (A) | Tensão (V) |
|-------|------------|
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |

Serão informadas a tensão nominal dos para-raios (valor eficaz) e a correspondente capacidade de absorção de energia (kJ/kV) da tensão nominal eficaz.

4.2.7. Compensadores Estáticos

Devem-se informar as indutâncias ou capacitâncias de acordo com o valor de geração de potência reativa ajustada no correspondente caso de fluxo de potência.

5. Metodologia Adotada, Premissas e Critérios

5.1. Metodologia Adotada

Neste item, serão apresentadas de maneira individualizada, por tipo de fenômeno estudado, as metodologias empregadas nas simulações de energização, religamento tripolar e rejeição de carga, cobrindo os aspectos da sequência das manobras, temporizações das proteções, tempos de religamento, modelagem dos disjuntores e parâmetros das simulações.

5.2. Premissas e Critérios

Informar neste item as premissas adotadas quanto aos limites máximos das sobretensões, energia dissipada nos para-raios, utilização de resistores de pré-inserção, dentre outras.

6. Resultados das Simulações

Os resultados das simulações devem ser apresentados por meio de tabelas anexas, informando, quando de energizações estatísticas: a identificação do caso estudado, a configuração do sistema, o local do defeito, quando aplicado, o valor da tensão de pré-manobra (pu), os valores médios (pu), os desvios padrão (pu), os valores máximos (pu) e a energia dissipada nos para-raios, para todos os pontos de interesse investigados.

Também devem ser apresentados, em anexo ao relatório de estudos, os gráficos com as formas de onda das tensões e energias dissipadas nos para-raios, correspondentes aos casos considerados mais críticos.

É preciso igualmente apresentar as principais constatações associadas a cada uma das manobras estudadas (energização, religamento tripolar e rejeição de carga), em referência aos resultados apresentados nas tabelas e gráficos com as formas de onda das sobretensões e energia dissipada nos para-raios.

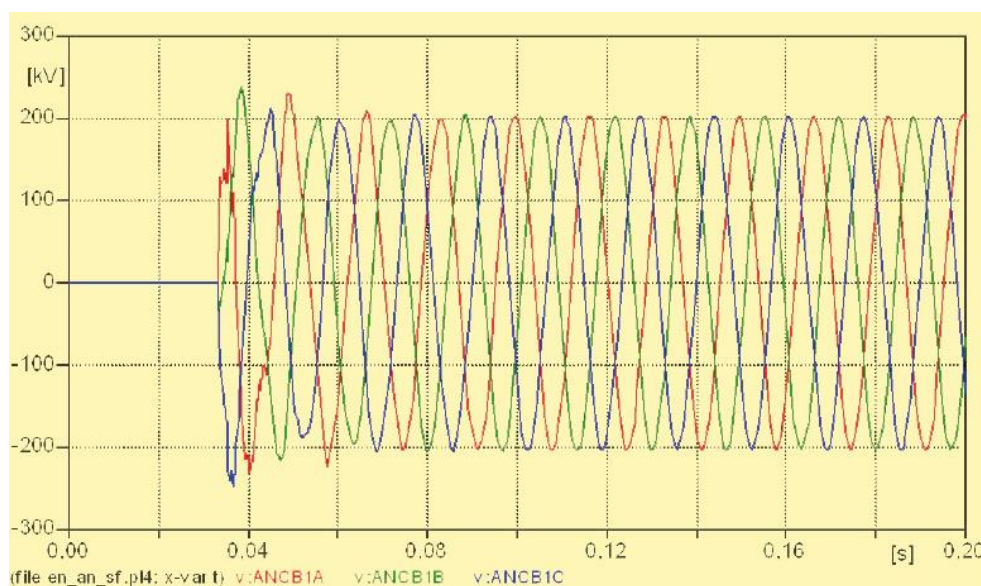
O item 8, a seguir, contém as sugestões de tabelas para a apresentação dos resultados das simulações juntamente com exemplos de gráficos com as formas de onda das tensões e correntes.

8. Anexos

Tabela 8.1. Exemplo de Tabela de Apresentação de Resultado Estatístico de Energização de Linha de Transmissão.

| Ident Caso | Local do Defeito | Terminal SE A | | | | ½ Linha | | | | Terminal SE B | | | | Figura Nº |
|---------------|---------------------|---------------|--------------|-----------|--------------|--------------|-----------|--------------|--------------|---------------|--------------|------------------------|--|--------------|
| | | Vpré (pu) | Vmed (pu) | σ (pu) | Vmax (pu) | Vmed (pu) | σ (pu) | Vmax (pu) | Vmed (pu) | σ (pu) | Vmax (pu) | Pára- Raios (kJ) | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |

Figura 9.10 Exemplo de Gráfico de Sobretensões - Energização de Linha de Transmissão 230kV.



Energização por SE A, sem defeito prévio; Tensões no terminal da SE A.

Figura 9.11 Exemplo Gráfico Energia Dissipada Para-raios - Energização de Linha de Transmissão 230kV.

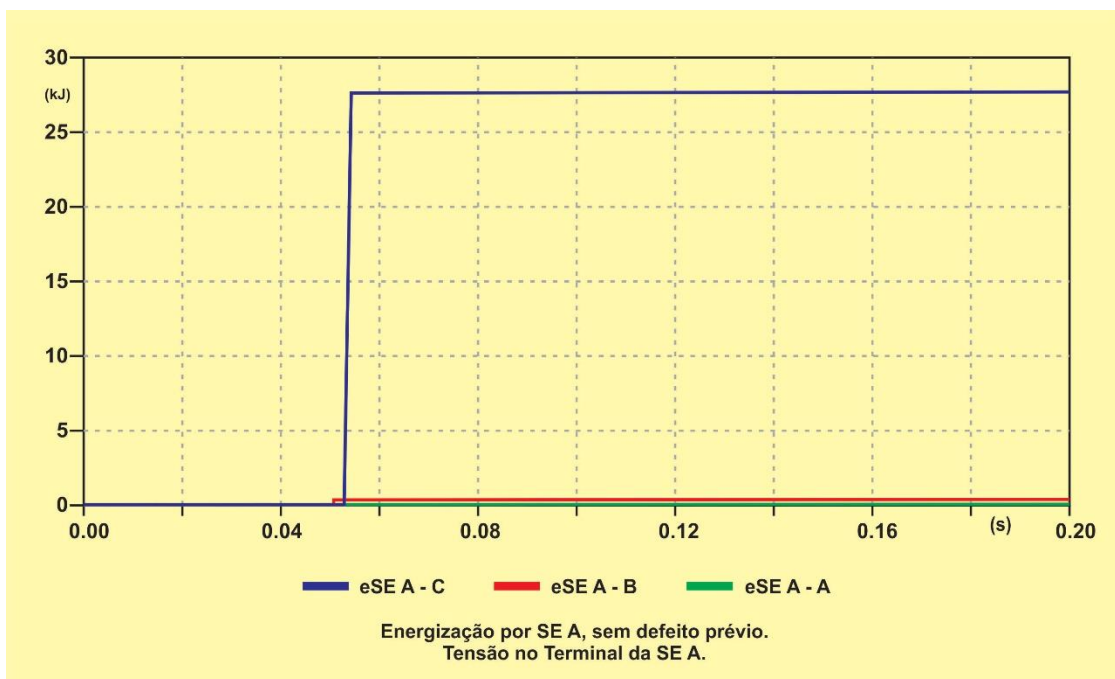
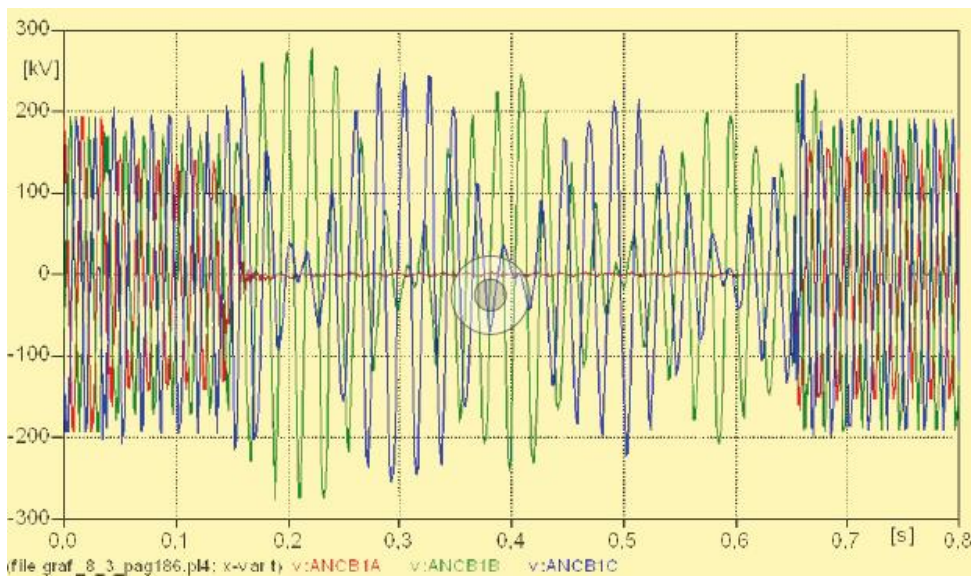


Tabela 8.2. Exemplo Tabela Apresentação Resultado Estatístico de RA Tripolar de Linha de Transmissão.

| Caso | Terminal de RA | Config. Sistema | Local do defeito | Com/Sem Sucesso | Terminal Líder | | | | Terminal Seguidor | | | | Fig. N° |
|------|----------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------|-----------|---------------|-----------|-------------------|---------------|-----------|-----------------------------|---------|
| | | | | | Vpré (pu) | Vméd (pu) | σ (pu) | Vmáx (pu) | Vméd (pu) | σ (pu) | Vmáx (pu) | Energia nos Para-Raios (kJ) | |
| | | | | Com | | | | | | | | | |
| | | | | Sem | | | | | | | | | |
| | | | | Com | | | | | | | | | |
| | | | | Sem | | | | | | | | | |
| | | | | Com | | | | | | | | | |
| | | | | Sem | | | | | | | | | |

Figura 9.12 Exemplo Gráfico Sobretensões RA Tripolar de Linha de Transmissão 230kV Compensada.



Máximo terminal da SE B: Religamento sem sucesso por SE A, com defeito prévio no terminal SE B.

Figura 9.13 Exemplo gráfico energia dissipada para-raios - RA tripolar de linha de transmissão 230kV

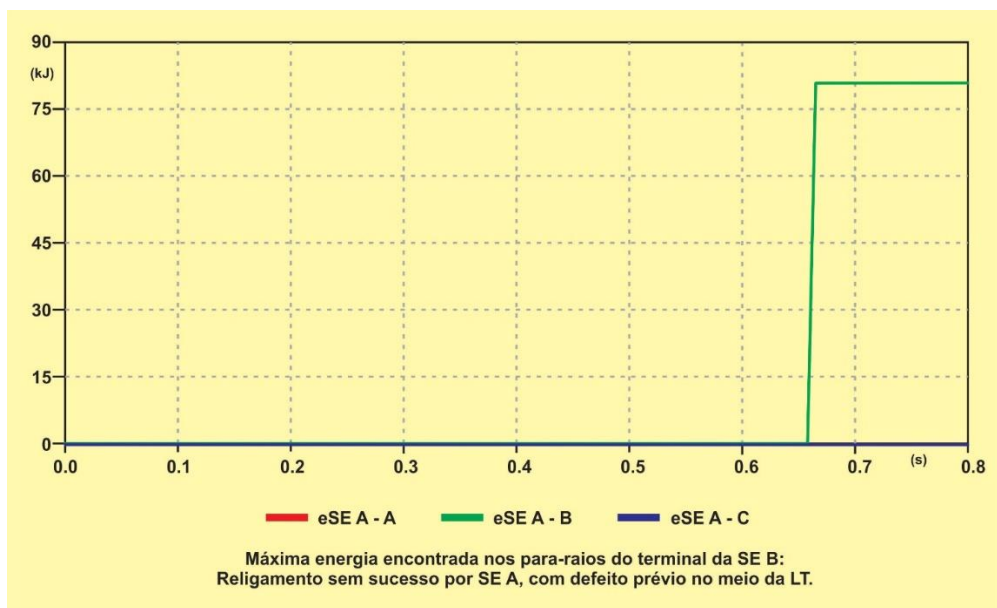


Tabela 8.3. Exemplo de Tabela Apresentação Resultados Simulações da Rejeição de Carga.

| Caso | Local da Rejeição | Tipo de Rejeição | Configuração do Sistema | Defeito | Tensão Pré-Manobra (pu) | Fluxo na LT (MW) | Sobretensão Máxima | | Energia nos Pára-Raios (kJ) | Fig. N° |
|------|-------------------|------------------|-------------------------|---------|-------------------------|------------------|--------------------|---------------|-----------------------------|---------|
| | | | | | | | Terminal SE A | Terminal SE B | | |
| | | | | Sim | | | | | | |
| | | | | Não | | | | | | |
| | | | | Sim | | | | | | |
| | | | | Não | | | | | | |
| | | | | Sim | | | | | | |
| | | | | Não | | | | | | |

Figura 9.14 Exemplo Gráfico Sobretensões Rejeição de Carga Linha de Transmissão 230 kV.

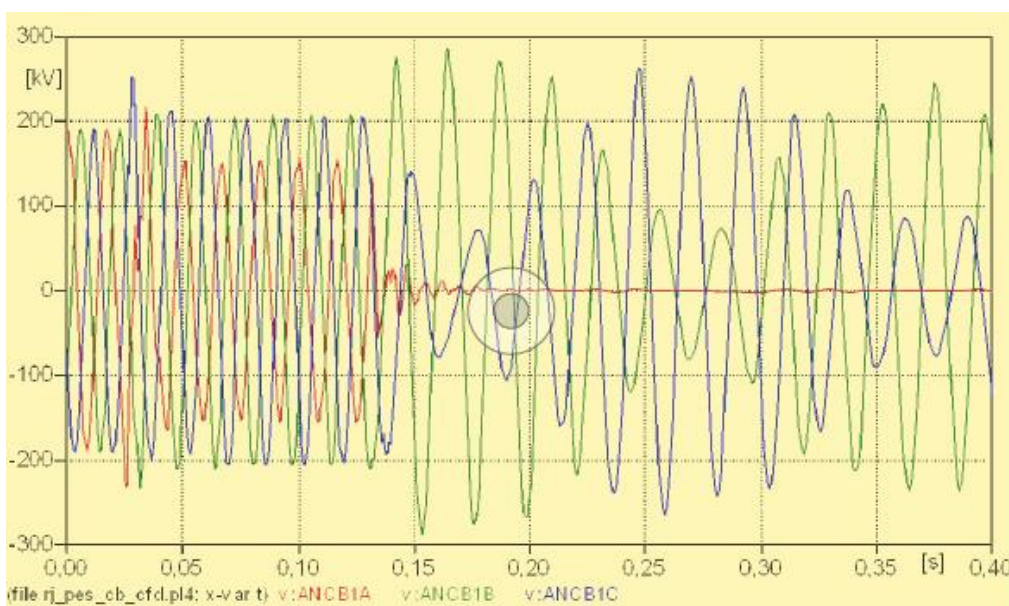
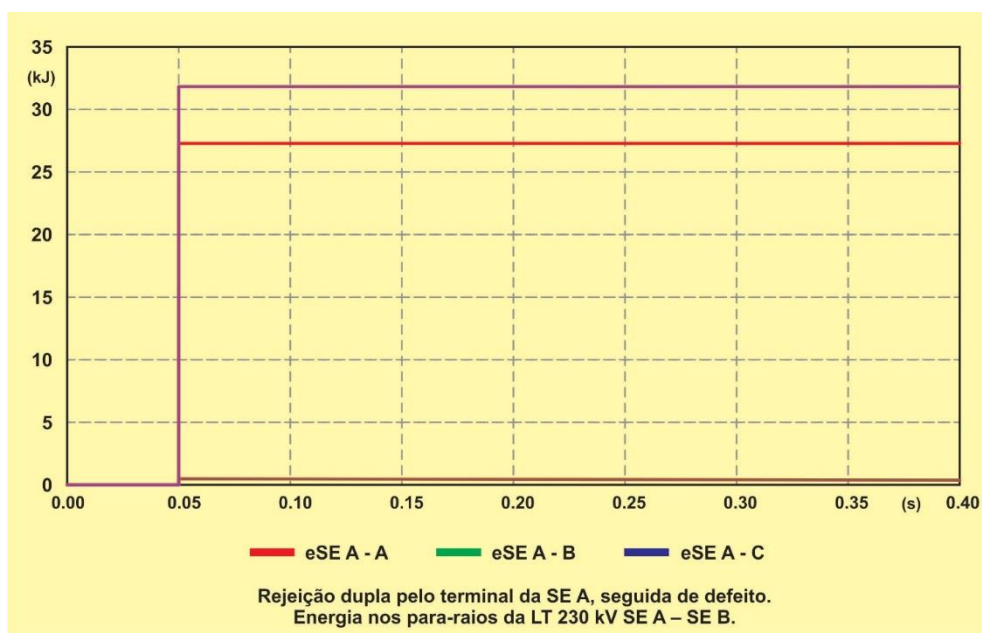


Figura 9.15 Exemplo gráfico energia dissipada para-raios - rejeição de carga linha de transmissão 230kV



9.5. Transitórios Eletromagnéticos de Religamento Monopolar de Linhas de Transmissão.

1. Introdução e Objetivo

Deve ser apresentado o objetivo do estudo, informando as instalações, linhas de transmissão e equipamentos vinculados ao empreendimento, a sua localização física e o ano previsto para a entrada em operação.

Destacar as linhas de transmissão para as quais os estudos de religamento monopolar serão desenvolvidos.

Também devem ser mencionados os tipos de análises a ser efetuadas com o objetivo de viabilizar o religamento monopolar (inclusive as associadas a investigações de condições de ressonância, caso haja necessidade).

2. Conclusões

Devem ser destacadas as conclusões associadas a cada um dos tipos de análise desenvolvida:

2.1. Conclusões do estudo de extinção do arco secundário

Concluir apresentando os valores encontrados para as correntes de arco secundário (A_{eficaz}), primeiro pico da TRT (kV_{pico}) e tensão induzida na fase aberta (kV_{eficaz}). Neste contexto, é necessário destacar as violações, quando ocorrerem, indicando a necessidade de adotar métodos de mitigação ou tempo morto superior a 500ms. No caso do emprego de reatores de neutro, apresentar também conclusão sobre os valores obtidos da tensão no neutro do reator (kV_{eficaz}) e corrente através do reator de neutro (A_{eficaz}).

2.2. Conclusões do estudo das sobretensões de manobra do religamento monopolar

Apresentar as conclusões referentes às sobretensões das manobras do religamento monopolar seguindo as mesmas diretrizes referentes ao modelo de relatório para o religamento tripolar, conforme apresentado no item 8.4.

3. Recomendações

Incluir a recomendação da adoção do religamento monopolar para a linha de transmissão, com o tempo morto a ser adotado. Indicar, caso necessário, o sentido preferencial da manobra ou a existência de restrição para a implantação do religamento a partir de um determinado terminal.

Deve ser recomendada, caso o tempo morto para o religamento monopolar seja superior a 500ms, a realização de estudo dinâmico com o objetivo de verificar que não haverá comprometimento do desempenho dinâmico do sistema.

No caso da necessidade da adoção de reatores de neutro, devem-se incluir os requisitos para sua especificação: reatância em (ohms), corrente de curta duração 1 minuto (amperes), corrente de regime permanente (amperes), potência de regime permanente (KVA_r), para-raios e nível de isolamento do neutro do reator.

4. Representação da Rede e Dados Considerados

Aplicam-se as mesmas diretrizes estabelecidas no item 4 do modelo de relatório para os estudos de transitórios eletromagnéticos de energização de linhas de transmissão, religamento tripolar e rejeição de carga, apresentado no item 8.4 do presente documento

5. Metodologia Adotada, Premissas e Critérios

5.1. Metodologia Adotada

Neste item, devem ser apresentadas as metodologias empregadas no estudo do religamento monopolar, cobrindo os aspectos das sobretensões das manobras de religamento e da extinção do arco secundário.

5.2. Premissas e Critérios

Informar neste item as premissas adotadas quanto aos limites máximos das correntes de arco secundário, primeiro pico da TRT, tensão induzida na fase aberta, limites das sobretensões das manobras, energia dissipada nos para-raios, utilização de reatores de neutro, dentre outras.

6. Resultados das Simulações

Os resultados das simulações devem ser apresentados em tabelas anexas ao relatório, informando:

Os valores de corrente de arco secundário, para defeitos nos terminais da LT, e de tensão induzida na fase aberta, respectivamente, em função da frequência operativa do sistema, obtidos nas simulações de regime permanente. Devem ser incluídos os resultados das análises, quando for o caso, comparando: a condição dos reatores solidamente aterrados versus com reator de neutro;

O par de valores (I_a, V_p), corrente de arco secundário (A_{eficaz}) e primeiro pico da TRT (kVpico);

Os resultados das simulações estatísticas das sobretensões de manobras de religamento monopolar.

Apresentar, em anexo ao relatório de estudos, os gráficos com as formas de onda das correntes de arco secundário, tensões induzidas na fase aberta e primeiro pico da TRT, correspondentes aos casos mais relevantes estudados.

Quando da utilização de reator de neutro, apresentar as suas tensões e as correntes eficazes, tendo em vista o seu dimensionamento.

Apresentar as principais constatações associadas a cada uma das manobras estudadas em referência aos resultados apresentados nas tabelas e nos gráficos, com as formas de onda das tensões e correntes.

O item 8, a seguir(anexos), contém as sugestões de tabelas para a apresentação dos resultados das simulações juntamente com exemplos de gráficos com as formas de onda das tensões e correntes e energia dissipada nos para-raios.

7. Referências

Espaço reservado para as referências relacionadas ao anexo em questão.

8. Anexos

Tabela 8.1. Exemplo de Tabela Apresentação Resultado Corrente de Arco Secundário.

| Freq. (Hz) | Corrente de Arco Secundário (A_{eficaz}) | | | | | | Limite de Corrente (A_{eficaz}) |
|---------------|--|---|---|------------------------|---|---|---|
| | Defeito SE A | | | Defeito SE B | | | |
| | Com neutro aterrado | Com reator de neutro de $XXX\Omega$ | Com reator de neutro de $YYY\Omega$ | Com neutro aterrado | Com reator de neutro de $XXX\Omega$ | Com reator de neutro de $YYY\Omega$ | |
| 56 | | | | | | | |
| 57 | | | | | | | |
| 58 | | | | | | | |
| 59 | | | | | | | |
| 60 | | | | | | | |
| 61 | | | | | | | |
| 62 | | | | | | | |
| 63 | | | | | | | |
| 64 | | | | | | | |
| 65 | | | | | | | |
| 66 | | | | | | | |

Tabela 8.2. Exemplo de Tabela Apresentação Resultado Tensão Induzida Fase Aberta

| Freq (Hz) | Tensão Induzida na Fase Aberta (kV _{eficaz}) | | | | | | | | | | | |
|-----------|--|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------------------------|---------|---------|----------------------------------|---------|---------|
| | Sem Defeito | | | | | | Defeito em SE A, Tensões em SE B | | | Defeito em SE B, Tensões em SE A | | |
| | Com neutro aterrado | | Com RN de XXXΩ | | Com RN de YYYΩ | | Neutro aterrado | RN XXXΩ | RN XXXΩ | Neutro aterrado | RN XXXΩ | RN XXXΩ |
| | Em SEA | Em SEB | Em SEA | Em SEB | Em SEA | Em SEB | | | | | | |
| 56 | | | | | | | | | | | | |
| 57 | | | | | | | | | | | | |
| 58 | | | | | | | | | | | | |
| 59 | | | | | | | | | | | | |
| 60 | | | | | | | | | | | | |
| 61 | | | | | | | | | | | | |
| 62 | | | | | | | | | | | | |
| 63 | | | | | | | | | | | | |
| 64 | | | | | | | | | | | | |
| 65 | | | | | | | | | | | | |
| 66 | | | | | | | | | | | | |

Tabela 8.3. Exemplo de Tabela Apresentação Par de Valores (V_p,I_a).

| Defeito no Terminal | Corrente de Arco Secundário (A _{eficaz}) | Primeiro Pico da TRT (kV _{pico}) | Valor Máximo (Critério) | | Figura Nº |
|---------------------|--|--|---------------------------------|--|-----------|
| | | | Corrente (A _{eficaz}) | Primeiro Pico da TRT (kV _{pico}) | |
| SE A | | | | | |
| SE B | | | | | |

Figura 9.16 Exemplo de Gráfico - Corrente de Arco Secundário e Primeiro Pico da TRT.

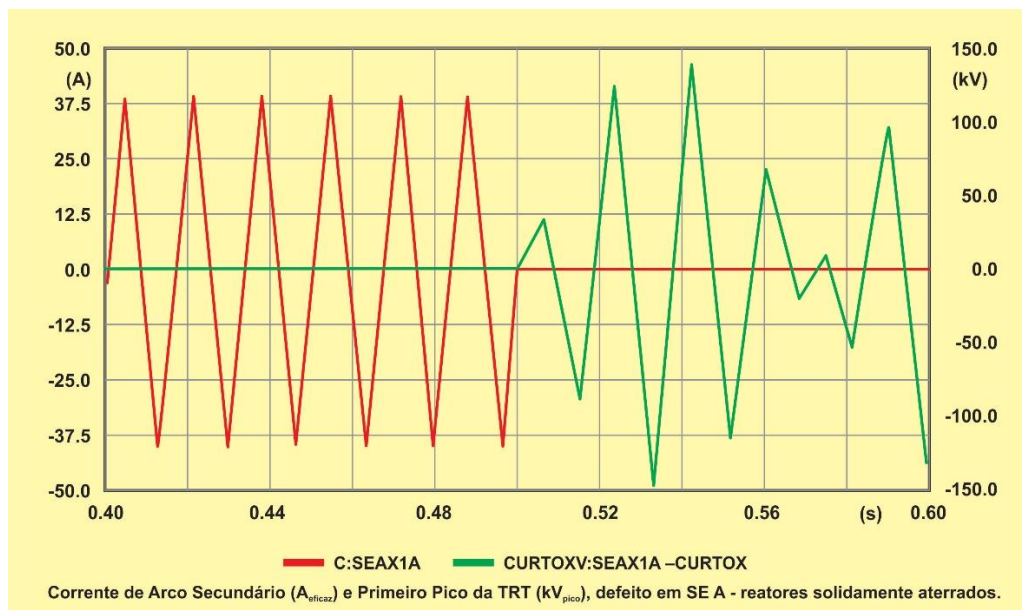


Figura 9.17 Exemplo de Gráfico - Tensão no Reator de Neutro para Faixa Freq. Operativa.

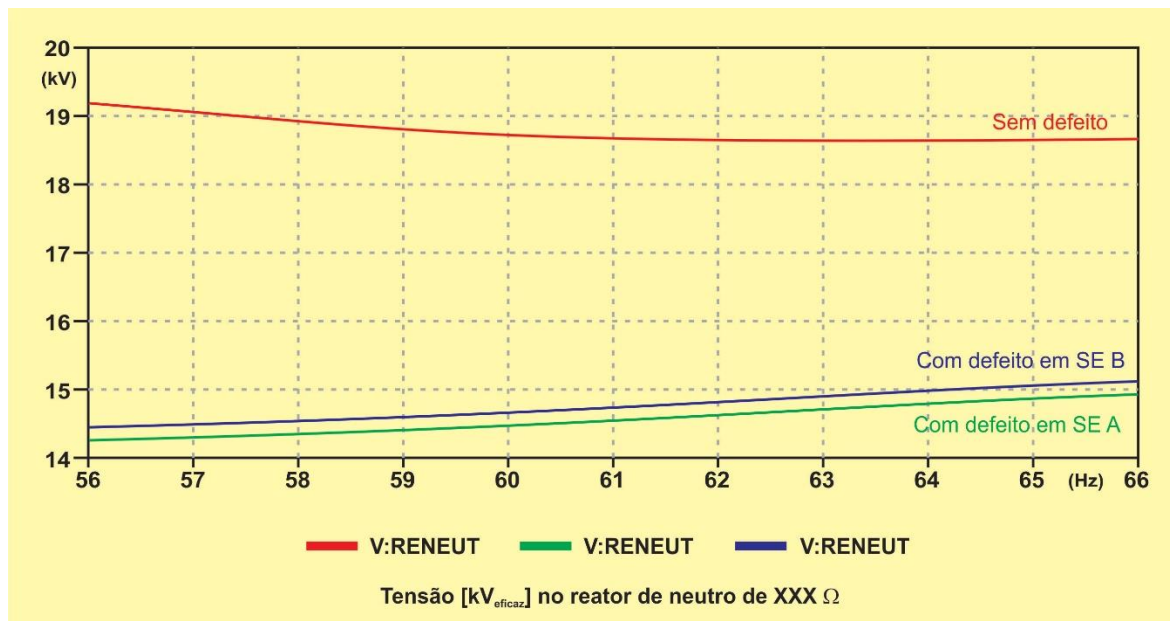


Figura 9.18 Exemplo de Gráfico - Corrente no Reator de Neutro para Faixa Freq. Operativa

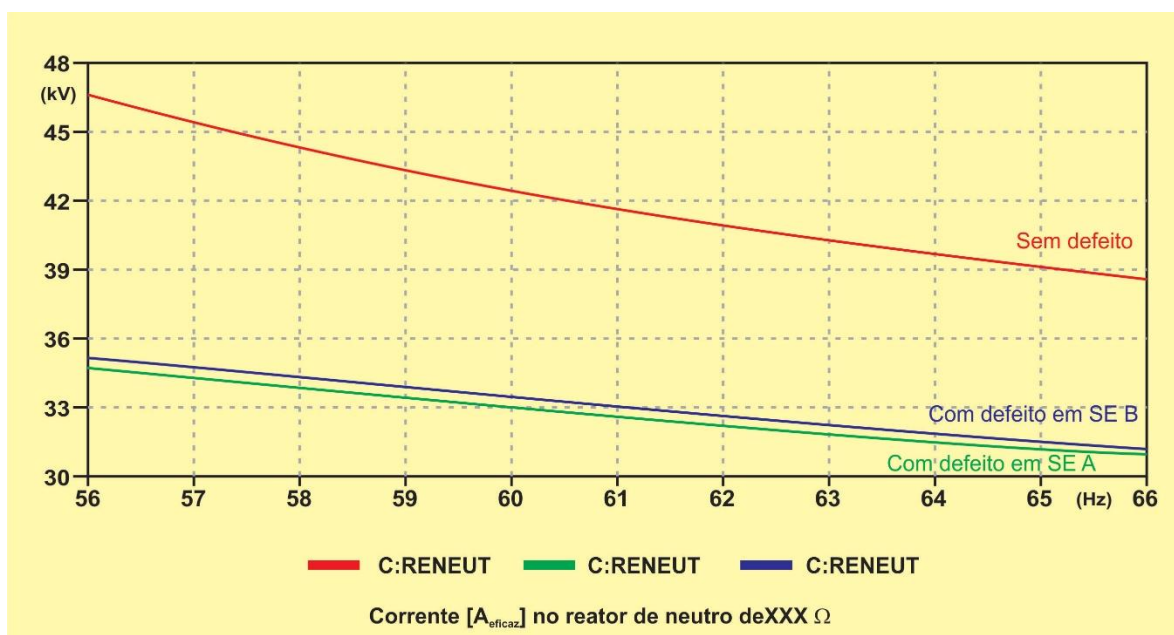
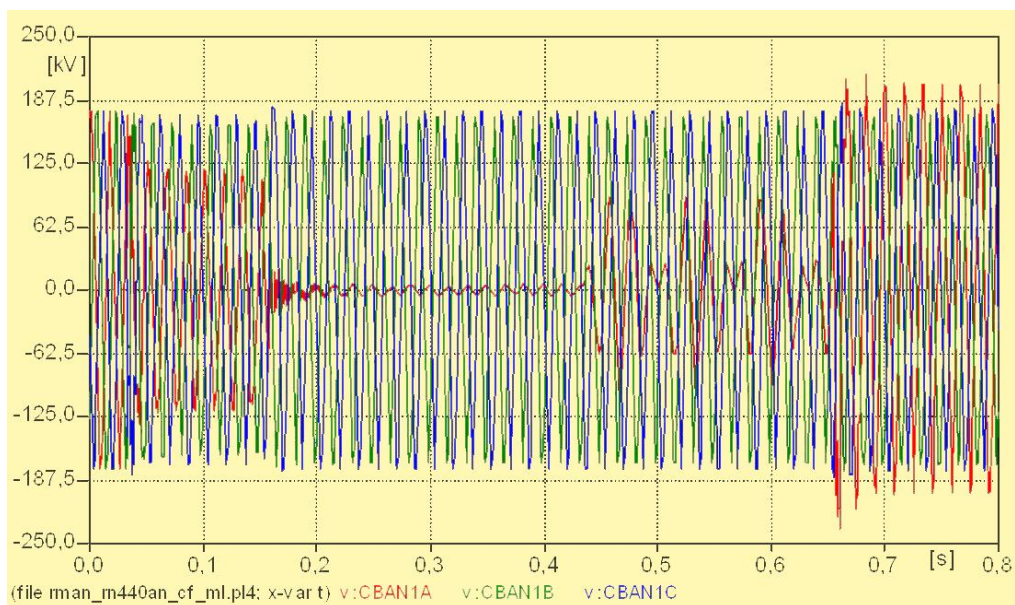


Tabela 8.4. Exemplo de Tabela Apresentação dos Resultados das Manobras Estatísticas do Religamento Monopolar.

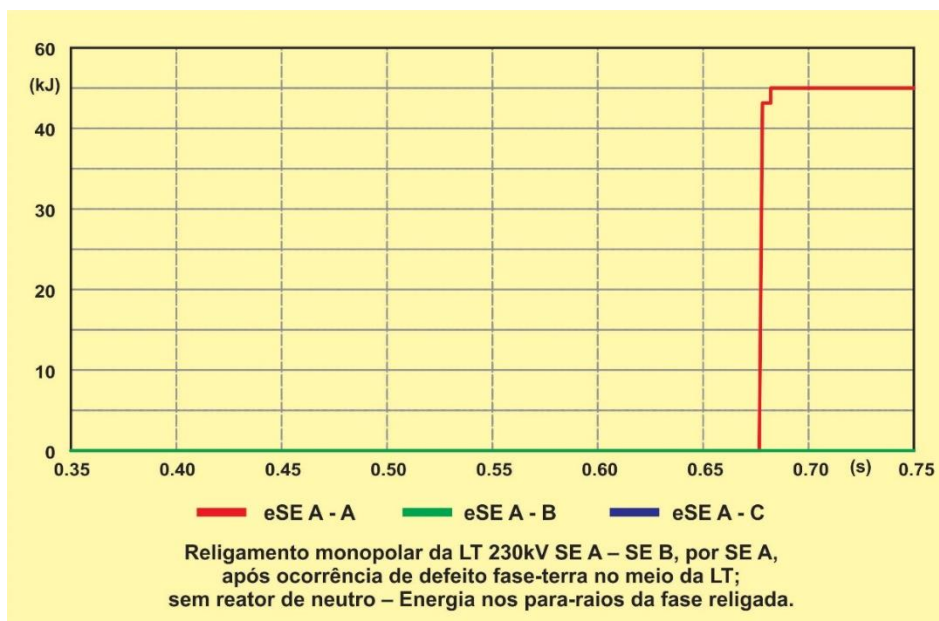
| Ponto de Medição | Grandeza | Sem reator de neutro | | | Com reator de neutro de XXXΩ | | |
|------------------|--------------|----------------------|------------|-------------|------------------------------|------------|-------------|
| | | Máximo (pu) | Média (pu) | Desvio (pu) | Máximo (pu) | Média (pu) | Desvio (pu) |
| Barra SE A | Tensão [pu] | | | | | | |
| Terminal SE A | Tensão [pu] | | | | | | |
| Meio da LT | Tensão [pu] | | | | | | |
| Terminal SE B | Tensão [pu] | | | | | | |
| Barra SE B | Tensão [pu] | | | | | | |
| Pára-raios SE A | Energia [kJ] | | | | | | |
| Pára-raios SE B | Energia [kJ] | | | | | | |

Figura 9.19 Exemplo Gráfico Sobretensões Manobra do Religamento Monopolar de LT 230 kV.



Religamento monopolar da LT 230kV SE A – SE B, por SE A, após ocorrência de defeito fase-terra no meio da LT; sem reator de neutro-Tensões no terminal SE B

Figura 9.20 Exemplo Gráfico Energia Dissipada Para-raios - Manobra do Religamento Monopolar de LT 230 kV.



9.6. Transitórios Eletromagnéticos de Energização de Transformadores

1. Introdução e Objetivo

Deve ser apresentado o objetivo do estudo, informando as instalações, as linhas de transmissão e os equipamentos vinculados ao empreendimento, a sua localização física e o ano previsto para a entrada em operação.

Relacionar as unidades transformadoras (subestação, tensões dos enrolamentos e potência) para as quais os estudos de energização serão desenvolvidos.

Complementar com considerações, caso necessário — como, por exemplo, a justificativa da não realização do estudo da manobra a partir de um determinado terminal do transformador, em função da característica do sistema (radial alimentando cargas).

2. Conclusões

Destacar os valores das correntes de “inrush” máximas observadas, sobretensões, e energia dissipada nos para-raios durante as manobras realizadas, apresentando as restrições, caso existentes.

Relacionar também a conclusão sobre a forma de onda e decaimento das correntes de “inrush” e sobretensões.

Concluir sobre a efetividade e a necessidade da adoção de resistores de pré-inserção e/ou de dispositivos sincronizadores na redução das correntes de “inrush”.

Apresentar conclusão, caso tenha sido efetuada a análise da resposta em frequência da rede nos pontos das manobras.

3. Recomendações

Incluir a recomendação quanto à necessidade da adoção de resistores de pré-inserção e/ou dispositivos sincronizadores como meio de atenuar os impactos das manobras de energização dos transformadores.

No caso de resistores de pré-inserção, deve-se apresentar o valor em (ohms) com o seu tempo de tempo de inserção (ms).

Para conjuntos (disjuntores+sincronizadores), devem-se recomendar os parâmetros de precisão mecânica com relação à operação do pólo do disjuntor(ms), a precisão do dispositivo eletrônico (ms) e a taxa de decaimento da rigidez dielétrica (RDDS) do “gap” entre os contatos durante o fechamento do disjuntor.

Recomendar também os requisitos de tensão e a capacidade de dissipação de energia dos para-raios.

Recomendar a especificação referente aos parâmetros (joelho e X_{ac} mínimos), de acordo com os resultados das análises efetuadas.

4. Representação da Rede e Dados Considerados

Aplicam-se as mesmas diretrizes estabelecidas no item 4 do modelo de relatório para os estudos de transitórios eletromagnéticos de energização de linhas de transmissão, religamento tripolar e rejeição de carga, apresentado no item 8.4 do presente documento

5. Metodologia Adotada, Premissas e Critérios

5.1. Metodologia Adotada

Neste item, devem ser apresentadas as metodologias empregadas no estudo de energização de transformadores.

Devem ser destacados os aspectos das modelagens dos disjuntores, incluindo resistores de pré-inserção ou sincronizadores, quando empregados.

Também precisam ser apresentados os parâmetros das simulações.

5.2. Premissas e Critérios

Informar neste item as premissas adotadas quanto aos limites máximos das correntes de “inrush”, sobretensões máximas admissíveis nos transformadores, tensão de pré-manobra, capacidade de dissipação de energia nos para-raios.

6. Resultados das Simulações

Os resultados das simulações serão apresentados em tabelas anexas, informando, quando de energizações estatísticas: identificação do caso estudado; configuração do sistema; (se completa ou n-1); se houve aplicação de defeito; se a manobra foi com ou sem resistor de pré-inserção ou sincronizador; o valor da tensão de pré-manobra (pu); o valor médio das sobretensões (pu); o correspondente desvio padrão (pu); o valor da sobretensão máxima (pu); a máxima energia dissipada nos para-raios (pu); e o valor máximo da corrente de “inrush” (pu).

Também devem ser apresentados, em anexo ao relatório de estudos, os gráficos com as formas de onda das tensões, correntes de “inrush” e energias dissipadas nos para-raios, correspondentes aos casos considerados mais críticos. No caso da realização da análise da resposta em frequência da rede nos pontos de manobras, serão apresentados os gráficos com os resultados do comportamento da tensão, em função da frequência.

Apresentar as principais constatações associadas a cada uma das manobras estudadas em referência aos resultados apresentados nas tabelas e gráficos, com as formas de onda das sobretensões, correntes de “inrush”, energia dissipada nos para-raios e gráficos com a resposta em frequência da rede.

O item 8, a seguir (anexos), contém as sugestões de tabelas para a apresentação dos resultados das simulações, juntamente com os exemplos de gráficos com as formas de onda das tensões, correntes de “inrush” e curvas de resposta em frequência da rede.

7. Referências

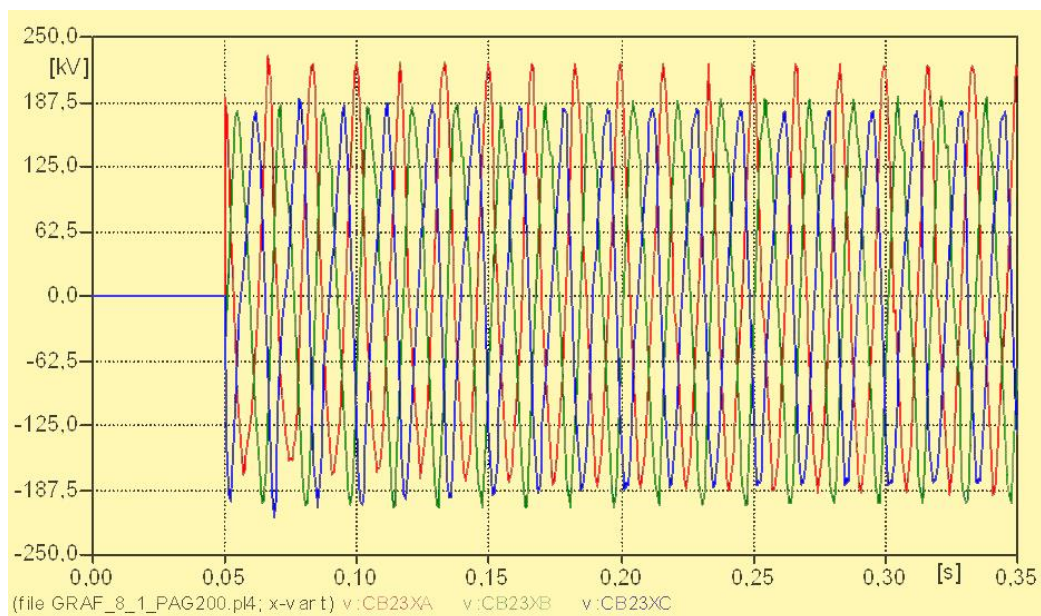
Espaço reservado para as referências relacionadas ao anexo em questão.

8. Anexos

Tabela 8.1. Exemplo de Tabela Apresentação Resultados Estatísticos da Energização de Transformador.

| Caso | Config. Sistema (completa ou n-1) | Defeito (Sim ou Não) | Sincronizador (Sim ou Não) | Identificação do terminal da manobra | | | | | Corrente Inrush (pu) | Figura N° |
|------|-----------------------------------|----------------------|----------------------------|--------------------------------------|-----------|---------------|-----------|-----------------|----------------------|-----------|
| | | | | Vpré (pu) | Vméd (pu) | σ (pu) | Vmáx (pu) | Pára-Raios (kJ) | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |

Figura 9.21 Exemplo Gráfico Sobretensões Manobra de Energização Transformador 230/138/13,8 kV – 100 MVA.



Energização do transformador SE A230/138/13,8KV – 100MVA pelo terminal de 230KV. Sistema íntegro. Sobretensão máxima fase-terra (pu) terminal 230KV da transformação.

Figura 9.22 Exemplo Gráfico Corrente de “Inrush” Manobra de Energização Transformador 230/138/13,8 kV - 100 MVA.

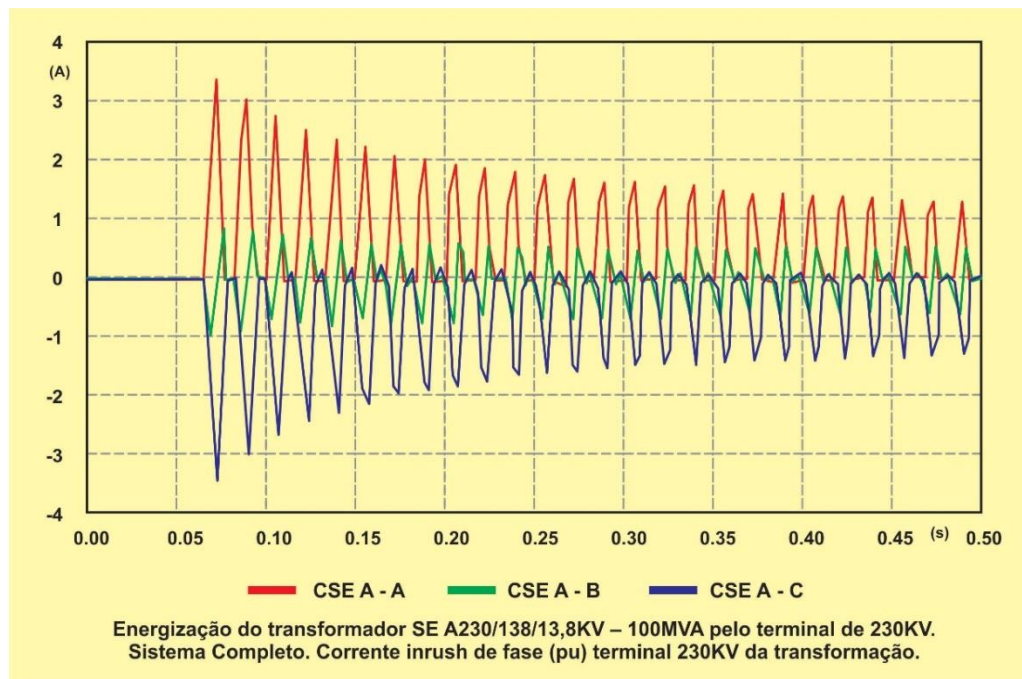


Figura 9.23 Exemplo Gráfico Energia Dissipada nos Para-raios Manobra de Energização Transformador 230/138/13,8 kV - 100 MVA.

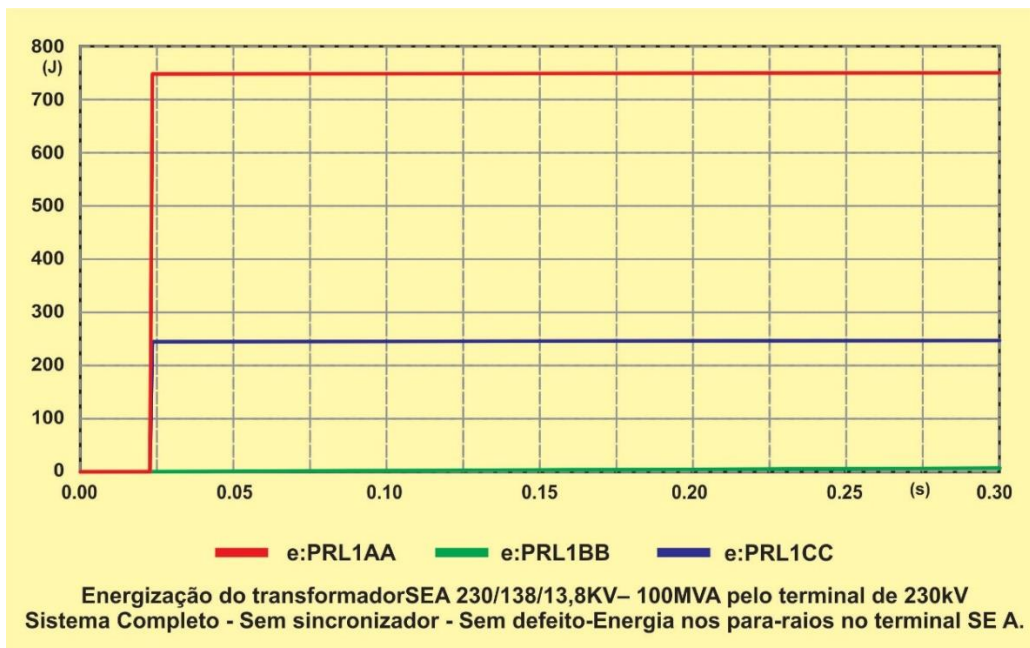
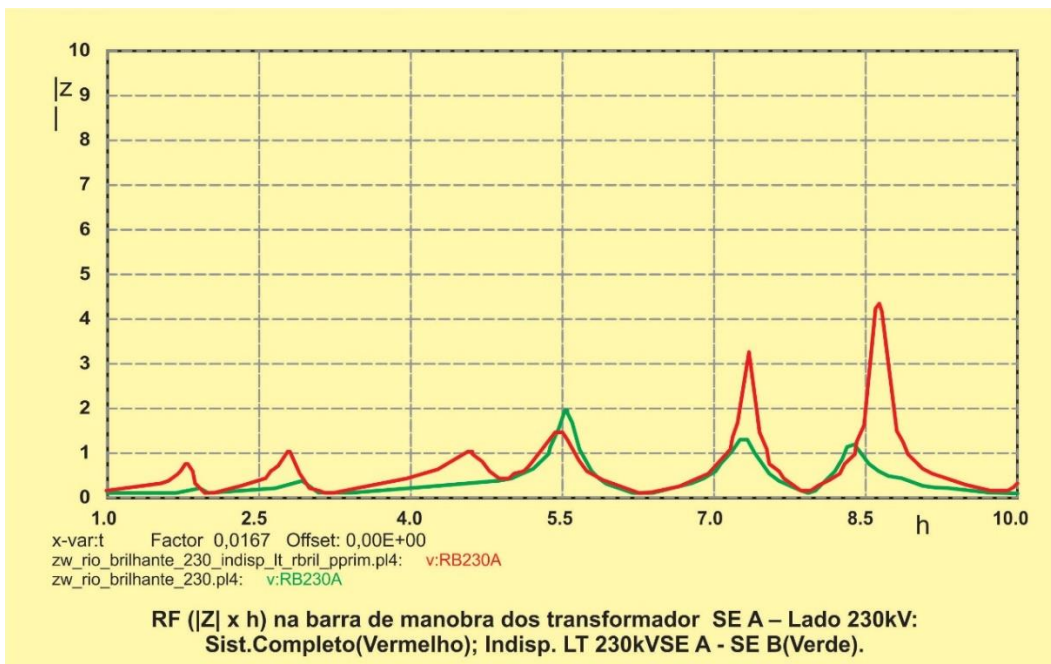


Figura 9.24 Exemplo Gráfico Curva de Variação da Impedância com a Frequência Vista pelo Terminal 230 kV de Manobra de Energização de Transformador 230/138/13,8 kV - 100 MVA.



9.7. TRT, Abertura de Linhas de Transmissão em Vazio, Manobra de Lâminas de Terra de Seccionadoras de Aterramento e Assimetria das Correntes de Curto-Circuito

1. Introdução e Objetivo

Deve ser apresentado o objetivo do estudo, informando as instalações, as linhas de transmissão e os equipamentos vinculados ao empreendimento, a sua localização física e o ano previsto para a entrada em operação.

Citar que estudos de TRT fazem parte do documento, justificando, caso ocorra, o motivo da não apresentação de algum tipo de estudo solicitado.

Também devem ser mencionados os demais estudos e tipos de análises a ser apresentadas no documento — como o referente às tensões e correntes induzidas em lâminas de terra de seccionadoras e o da assimetria das correntes de curto-circuito.

Informar a(s) norma(s) adotadas como referência para os estudos.

2. Conclusões

Devem ser destacadas as conclusões associadas a cada um dos estudos de desenvolvidos:

2.1. Conclusões dos estudos TRT faltas termiais

2.2. Conclusões dos estudos TRT faltas quilométricas

2.3. Conclusões dos estudos TRT abertura em oposição de fases

2.4. Conclusões dos estudos da abertura de linhas em vazio

2.5. Conclusões dos estudos das tensões e correntes induzidas em lâminas de terra de seccionadoras de aterramento

2.6. Conclusões dos estudos da assimetria das correntes de curto-circuito

3. Recomendações

Devem ser relacionadas as recomendações quanto aos requisitos de ensaios de TRT dos disjuntores, a aplicação dos valores normalizados ou a necessidade de requisitos especiais.

Quando da necessidade de requisitos especiais, é necessário informar ou referenciar, para envio ao fabricante, os parâmetros que violaram as envoltórias normalizadas.

Devem ser recomendado os requisitos quanto às lâminas de terra da seccionadoras de aterramento (classe A – baixo grau de acoplamento ou classe B- alto grau de acoplamento), ou, caso necessário, submeter à consulta do fabricante os casos especiais.

Recomendar os requisitos quanto à assimetria das correntes de curto-circuito.

4. Representação da Rede e Dados Considerados

Aplicam-se as mesmas diretrizes estabelecidas no item 4 do modelo de relatório para os estudos de transitórios eletromagnéticos de energização de linhas de transmissão, religamento tripolar e rejeição de carga, apresentado no item 8.4 do presente documento.

No estudo da TRT, deve incluir-se a informação das capacitâncias parasitas dos componentes da subestação consideradas nas simulações.

5. Metodologia Adotada, Premissas e Critérios

5.1. Metodologia Adotada

Neste item serão apresentadas as metodologias empregadas nos estudos de TRT, as tensões e correntes induzidas em lâminas de terra de seccionadoras e a assimetria das correntes de curto-circuito.

Também devem ser elencados os parâmetros das simulações.

5.2. Premissas e Critérios

Informar neste item as envoltórias normalizadas consideradas nas análises, para cada um dos tipos de estudo de TRT desenvolvido (falta terminal, falta quilométrica, abertura em oposição de fases, abertura de linha em vazio), informando os valores da TRT, TCTRT e o fator de primeiro polo. Citar também a norma utilizada.

Informar — para a análise das tensões e correntes induzidas em lâminas de terra das seccionadoras — os valores de norma adotados, citando a norma.

6. Resultados das Simulações

Os resultados das simulações de TRT serão apresentados em tabelas anexas, informando as condições estudadas, as correntes de curto-circuito passante nos disjuntores, os valores da TRTS e TCTRTS, para faltas terminais, as quilométricas, a abertura em oposição de fases e a abertura da linha em vazio.

Os resultados das análises das tensões e correntes induzidas em lâminas de terra das seccionadoras e da assimetria das correntes de curto-circuito devem também ser apresentadas em tabelas.

Apresentar, em anexo ao relatório de estudos, os gráficos com as formas de onda das TRTS.

Apresentar também as principais constatações associadas a cada uma das manobras estudadas em referência aos resultados apresentados nas tabelas e nos gráficos, com as formas de onda das tensões e correntes.

O item 8, a seguir (anexos), contém as sugestões de tabelas para a apresentação dos resultados das simulações, juntamente com exemplos de gráficos com as formas de onda das TRTS.

7. Referências

Espaço reservado para as referências relacionadas ao anexo em questão.

8. Anexos

Tabela 8.1. Exemplo de Tabela Apresentação Resultados Estudos de TRT - Falta Terminal e Quilométrica.

| Falta | Local | tipo | Corrente de falta através do disjuntor | | Sequência de abertura | TRT máxima | | TCTR máxima | | Figuras |
|-----------|-------|------|--|-----|-----------------------|------------|----|-------------|---------|---------|
| | | | (A _{eficaz}) | (%) | | Fase | kV | Fase | (kV/μs) | |
| | | | | | | | | | | |
| Terminal | LT | 3F | | | | | | | | |
| | barra | 3F | | | | | | | | |
| | LT | 3FT | | | | | | | | |
| | barra | 3FT | | | | | | | | |
| | LT | FT | | | | | | | | |
| | barra | FT | | | | | | | | |
| Quilomet. | LT | FT | | | | | | | | |
| | LT | FT | | | | | | | | |
| | LT | FT | | | | | | | | |

Tabela 8.2. Exemplo de Tabela Apresentação Resultados Estudos de TRT Abertura em Oposição de Fases.

| Ângulo de defasagem | I _{cc} – pico (A) | TRT – pico (kV) | Fase | TCTR (kV/ μs) | Figura |
|---------------------|----------------------------|-----------------|------|---------------|--------|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

Tabela 8.3. Exemplo de Tabela Apresentação Resultados Estudos de TRT Abertura de Linha em Vazio.

| Condição Pré Manobra Tensão/Freq. | Sequência de abertura | Defeito fase-terra no Terminal remoto | Corrente da LT em vazio (Apico) | TRT máx. pico (kV) | Fase | TCTR (kV/μs) | Figura |
|-----------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------------|--------------------|------|--------------|--------|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

Tabela 8.4. Exemplo de Tabela Apresentação Resulta dos Estudos de TRT Abertura em Linha em Vazio.

| Condição Pré Manobra Tensão/Freq. | Seqüência de abertura | Defeito fase-terra no Terminal remoto | Corrente da LT em vazio (Apico) | TRT máx. pico (kV) | Fase | TCTRT (kV/ μ s) | Figura |
|-----------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------------|--------------------|------|---------------------|--------|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

Tabela 8.5. Exemplo de Tabela Apresentação Resultados Correntes e Tensões Induzidas por Acoplamento Eletromagnético - Lâmina de Terra de Secionadoras.

| Fase | Indução Eletromagnética no Circuito 1 (I_L, V_L) | | Carregamento Máximo Circuito Paralelo (A eficaz) |
|------|--|------------------|--|
| | Corrente (A pico) | Tensão (kV pico) | |
| A | | | |
| B | | | |
| C | | | |

Nota: (a) Distância entre eixos dos circuitos (circuitos independentes): x metros.
 (b) Tensão máxima no circuito paralelo: x(kV).

Tabela 8.6. Exemplo de Tabela Apresentação Resultados Correntes e Tensões Induzidas por Acoplamento Eletrostático - Lâmina de Terra de Secionadoras.

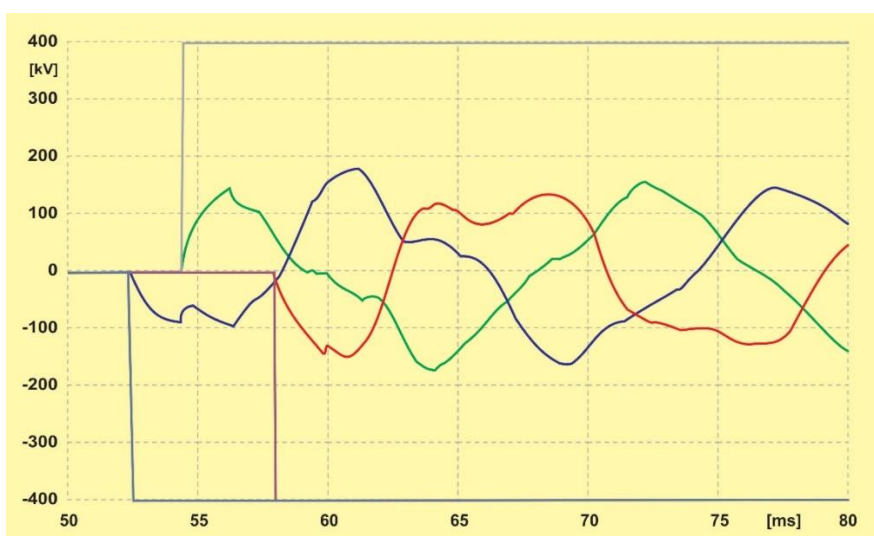
| Fase | Indução Eletrostática no Circuito 1 (I_c, V_c) | | Carregamento Máximo Circuito Paralelo (A eficaz) |
|------|--|------------------|--|
| | Corrente (A pico) | Tensão (kV pico) | |
| A | | | |
| B | | | |
| C | | | |

Nota: (a) Distância entre eixos dos circuitos (circuitos independentes): x metros.
 (b) Tensão máxima no circuito paralelo: x(kV).

Tabela 8.7. Exemplo de Tabela Apresentação Resultados Cálculo Assimetria das Correntes de Curto-circuito.

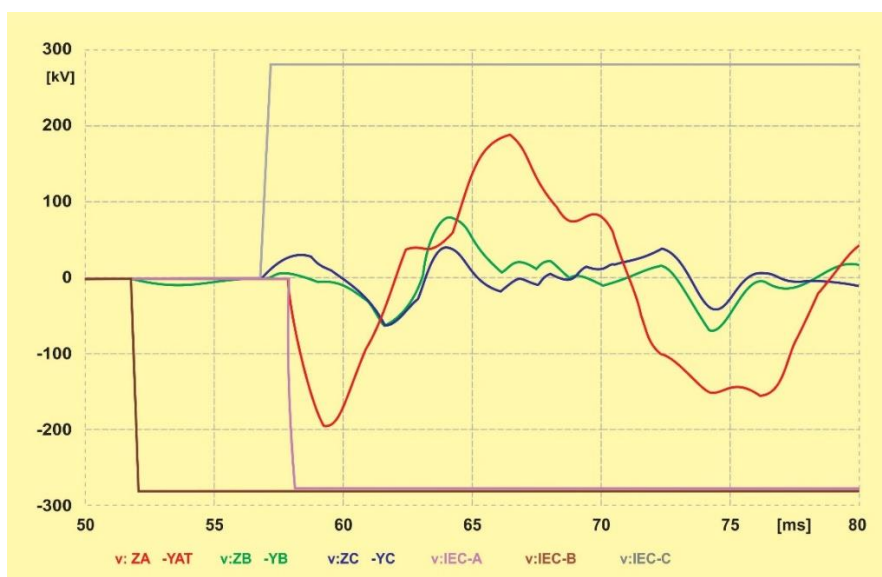
| Subestação | Curto-circuito simétrico (KA) | X/R | τ (ms) | Fator de Assimetria (f) |
|------------|-------------------------------|-----|-------------|-------------------------|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

Figura 9.25 Exemplo Gráfico TRT Abertura Falta Terminal com Envoltórias de Norma.



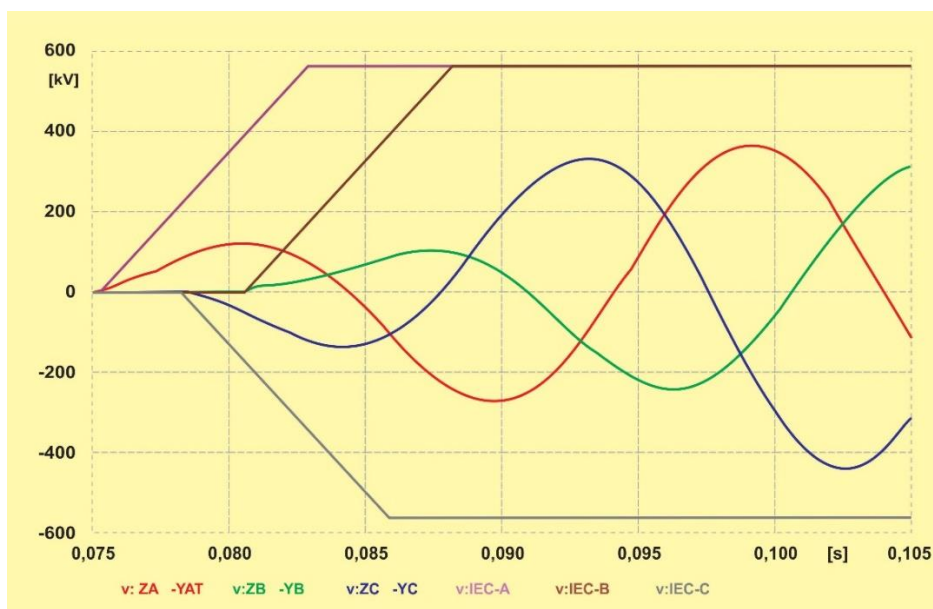
TRT na abertura dos disjuntores da linha 230k VSE-A - SE-B pelo terminal SE-A para defeito tipo terminal (trifásico - não aterrado) no lado linha do disjuntor 245kV.

Figura 9.26 Exemplo Gráfico TRT Abertura Falta Quilométrica com Envoltórias de Norma.



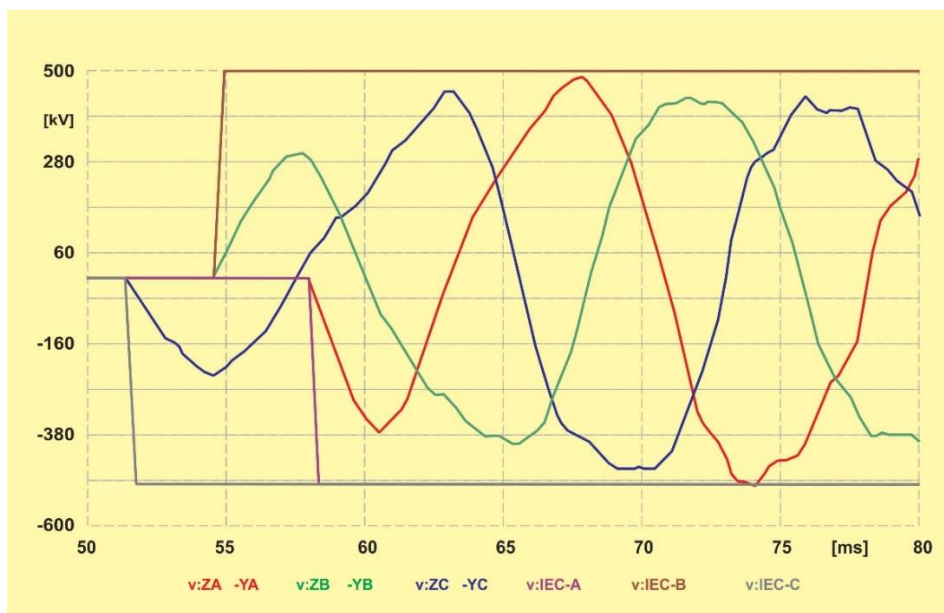
TRT na abertura dos disjuntores da linha 230kV SE-A - SE-B pelo terminal SE-A para defeito quilométrico monofásico (fase A) a 1,76Km do terminal de saída da SE-A, disjuntor 245kV.

Figura 9.27 Exemplo Gráfico TRT Abertura Linha a Vazio com Envoltórias de Norma.



TRT na abertura em vazio da linha 230kV SE-A - SE-B pelo disjuntor de 245kV do terminal SE-A, sem falta.

Figura 9.28 Exemplo Gráfico TRT Abertura Linha a Vazio com Envoltórias de Norma.



TRT na abertura em discordância de fase igual a 180°, da linha 230kV SE-A - SE-B, pelo disjuntor de 245 kV do terminal SE-A.

9.8. Coordenação do Isolamento

1. Introdução e Objetivo

Apresentar o objetivo do estudo, informando as subestações com os respectivos vãos de conexões (linhas, transformadores e demais equipamentos) para os quais o estudo de coordenação do isolamento será desenvolvido.

Complementar com considerações, caso necessário — como, por exemplo, a justificativa da não realização do estudo de coordenação do isolamento associado a um determinado pátio da subestação.

2. Conclusões

Destacar os valores das máximas solicitações em termos da amplitude das sobretensões impostas aos diferentes equipamentos da subestação, comparando com os respectivos níveis de isolamento dos equipamentos para impulsos atmosféricos.

Também concluir acerca da adequação dos para-raios para a proteção dos equipamentos, no interior das subestações, e das distâncias entre os para-raios e os equipamentos, de acordo com o projeto básico das subestações.

3. Recomendações

Recomendar os níveis de isolamento para os equipamentos da subestação, a tensão nominal dos para-raios e as distâncias entre os para-raios e equipamentos da subestação.

4. Metodologia Adotada, Premissas e Critérios

4.1. Metodologia Adotada

Neste item, deve ser apresentada a metodologia empregada no estudo coordenação do isolamento, tendo como referência as diretrizes estabelecidas no item 3.2.13 do presente documento.

4.2. Premissas e Critérios

Devem ser informadas as amplitudes das sobretensões máximas admissíveis para as sobretensões nos diferentes níveis de tensão das subestações, considerando a margem de segurança, que também deve ser informada, em relação ao valor da tensão suportável normalizada de impulso atmosférico (TSNIA) ou BIL dos equipamentos.

Tabela 4.1. Exemplo de Tabela Sobretensões Máximas Admissíveis nas Subestações.

| Tensão Nominal da SE | AAAkV | BBBkV |
|---|-------|-------|
| Nível de Isolamento a Impulso Atmosférico | | |
| Sobretensão Máxima Admissível | | |

5. Dados Utilizados

Neste tópico é necessário informar os seguintes dados principais, utilizados nas modelagens simulações e análises:

5.1. Arranjo das Subestações

Apresentar os diagramas unifilares, plantas e cortes, indicando a localização dos equipamentos, com as distâncias envolvidas, correspondentes aos pátios das subestações, por nível de tensão.

5.2. Linha de Transmissão

Apresentar os parâmetros das linhas de transmissão com a silhueta da torre típica, indicado as respectivas distâncias entre condutores e cabos para-raios, altura condutor solo.

5.3. Para-raios

Apresentar as características dos para-raios considerados para os setores da subestação objeto do estudo.

6. Modelagem dos Equipamentos

Apresentar a modelagem dos diversos equipamentos das subestações utilizados na representação no programa ATP, considerando a natureza de alta frequência associada ao fenômeno sob análise. Os componentes usualmente representados são:

Linhas de transmissão;

Barramentos e conexões;

Para-raios;

Demais equipamentos (disjuntores, chaves, transformadores de potência, reatores, TCs, TPs).

Apresentar também a forma de onda considerada para a modelagem da descarga atmosférica (amplitude e tempo de frente das descargas diretas e indiretas para cada nível de tensão analisado).

7. Configurações Analisadas

Apresentar as configurações das subestações consideradas nas análises, que devem ser completas e degradadas com a redução do número de componentes conectados, objetivando maximizar as sobretensões.

8. Resultado das Simulações

A Tabela 8.1 exemplifica a maneira de apresentação das sobretensões verificadas nos componentes da subestação, obtidas por meio da simulação com o programa ATP.

Devem-se apresentar, em anexo ao relatório, os gráficos com as formas de onda das sobretensões e os casos mais críticos, obtidos com o ATP.

Tabela 8.1. Exemplo de Tabela Apresentação dos Resultados das Simulações com o ATP - Máximas Sobretensões Encontradas - Descarga Indireta.

| Caso | Local da descarga | Configuração da SE | Vão de LT | Trafo | Reator | TC | TP | Barra-mento |
|------|-------------------|--------------------|-----------|-------|--------|----|----|-------------|
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

9. Anexos

Figura 9.29 Exemplo de Gráfico Apresentação dos Resultados das Simulações com o ATP - Máximas Sobretensões Encontradas - Descarga Indireta na LT 230kV SEA - SEB - Configuração completa.

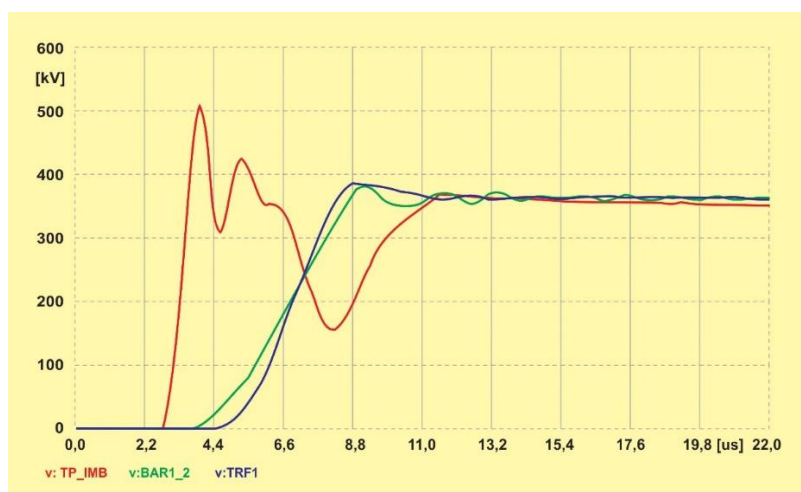
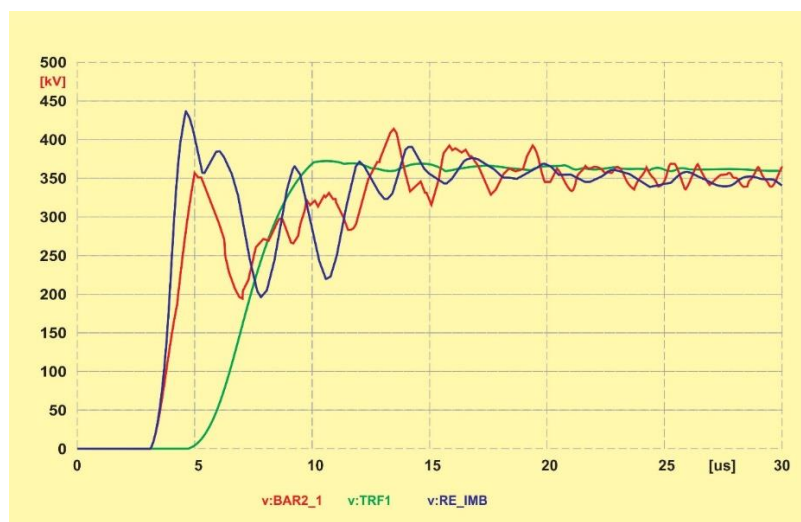


Figura 9.30 Exemplo de Gráfico Apresentação dos Resultados das Simulações com o ATP - Máximas Sobretensões Encontradas - Descarga Indireta na LT 230kV SEA - SEB C1- Configuração Degradada: sem o Segundo Circuito C2 da LT e do Transformador T1.



10. Planilhas de Dados Técnicos

As planilhas de dados técnicos devem ser encaminhadas juntamente ao Projeto Básico das novas instalações, conforme estabelecido no Submódulo 7.3 vigente, contendo as características técnicas dos equipamentos mais relevantes para os estudos de sistema e para a operação da rede.