



## INTERAÇÃO ENTRE AUTOTRANSFORMADORES DE POTÊNCIA E SOLICITAÇÕES DE ALTA FREQUÊNCIA DO SISTEMA ELÉTRICO

Carlos Magno Rodrigues Vasques

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador(es): Luiz Pereira Calôba

Helvio Jailson Azevedo Martins

Rio de Janeiro  
Outubro de 2011

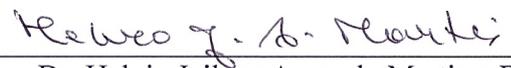
INTERAÇÃO ENTRE AUTOTRANSFORMADORES DE POTÊNCIA E  
SOLICITAÇÕES DE ALTA FREQUÊNCIA DO SISTEMA ELÉTRICO

Carlos Magno Rodrigues Vasques

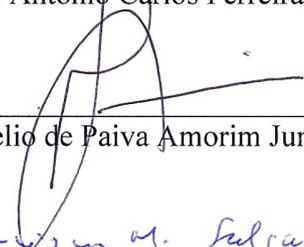
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

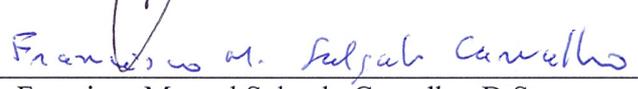
Examinada por:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Luiz Pereira Calôba, D. Ing.

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Helvio Jailson Azevedo Martins, D.Sc.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Antônio Carlos Ferreira, Ph.D.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Helio de Paiva Amorim Junior, D.Sc.

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Francisco Manoel Salgado Carvalho, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

OUTUBRO DE 2011

Vasques, Carlos Magno Rodrigues

Interação entre Autotransformadores de Potência e Solicitações de Alta Frequência do Sistema Elétrico/  
Carlos Magno Rodrigues Vasques – Rio de Janeiro:  
UFRJ/COPPE, 2011.

X, 135 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Luiz Pereira Calôba

Helvio Jailson Azevedo Martins

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 131-135.

1. Autotransformadores. 2. Medições de Transitórios de Tensão. 3. Interação. I. Calôba, Luiz Pereira *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

A Deus por ter me concedido saúde, sabedoria e perseverança para vencer mais uma etapa desta minha jornada.

A minha amada esposa Andréia, pela compreensão, amor e companheirismo durante estes anos.

Aos meus pais Carlos e Sirlei que são minhas referências de dedicação, amor, vida e luta. Além de responsáveis por tudo que eu sou.

A minha irmã Talitha, pelo carinho e apoio incondicional.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me concedido saúde, sabedoria e determinação para ir até o final.

Aos meus pais, por terem investido na educação e incentivado a conquistar mais um objetivo.

A minha esposa, pela compreensão e apoio nos momentos mais difíceis.

Agradeço ao professor Luiz P. Calôba pela forma dedicada e paciente na orientação deste trabalho.

Agradeço ao Helvio J. A. Martins, gerente do Laboratório de Diagnóstico em Equipamentos Elétricos, pela co-orientação e a oportunidade de desenvolver este trabalho, além da sua compreensão e amizade na ajuda da viabilização do mesmo.

Aos professores do PEE/COPPE/UFRJ pela dedicação e orientação nas disciplinas cursadas ampliando o meu conhecimento na área.

Aos amigos de trabalho Walter R. de C. Filho, Ítalo F. da Nova, Luís E. D. Santos, Miguel A. de C. Michalski, Fábio M. da Silva por todo auxílio nas medições realizadas. Ao Walter ressalto as intermináveis conversas e discussões sobre as diversas técnicas de medições e abordagens realizadas nesta dissertação.

Aos amigos de trabalho Rogério M. de Azevedo e Cintia de F. F. Carraro por todo auxílio nas simulações e desenvolvimento de rotinas desta dissertação. Ao Rogério agradeço pela paciência na revisão das simulações e texto.

Aos amigos de trabalho Leonardo T. B. dos Santos e Roberto C. de Menezes pelo apoio e esclarecimentos sobre alguns assuntos abordados nesta dissertação.

Aos meus amigos que de certa forma participaram dessa conquista.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## INTERAÇÃO ENTRE AUTOTRANSFORMADORES DE POTÊNCIA E SOLICITAÇÕES DE ALTA FREQUÊNCIA DO SISTEMA ELÉTRICO

Carlos Magno Rodrigues Vasques

Outubro/2011

Orientadores: Luiz Pereira Calôba

Helvio Jailson Azevedo Martins

Programa: Engenharia Elétrica

Nos últimos anos, falhas em autotransformadores de potência têm sido relatadas pelas concessionárias do setor elétrico Brasileiro, sendo estas associadas, em alguns casos, à interação destes equipamentos com o sistema elétrico de potência.

Diante deste quadro, iniciou-se este trabalho a partir de investigações e informações colhidas no campo, relativo às solicitações elétricas impostas a autotransformadores de potência, causadas por manobras de chaves seccionadoras e disjuntores quando da inserção de banco de autotransformadores no sistema elétrico. Foram realizados ensaios de caracterização no domínio da frequência nestes equipamentos e na instrumentação utilizada, além da avaliação de uma metodologia para medição e monitoramento das tensões transitórias nos autotransformadores, a partir do tap capacitivo das buchas.

Com base nas informações de frequências e amplitudes das manobras na subestação, realizaram-se as seguintes avaliações: efeito das manobras nas frequências naturais de oscilação dos autotransformadores, estimação da transferência de tensão entre os enrolamentos dos autotransformadores e avaliação do risco envolvido nas manobras medidas por meio do fator de severidade no domínio da frequência (FSDF).

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

INTERACTION BETWEEN POWER AUTOTRANSFORMERS AND HIGH  
FREQUENCY APPLICATIONS OF ELECTRIC POWER SYSTEM

Carlos Magno Rodrigues Vasques

October/2011

Advisors: Luiz Pereira Calôba

Helvio Jailson Azevedo Martins

Department: Electrical Engineering

In recent years, failures in power autotransformers have been reported by Brazilian utilities, which are associated, in some cases, with the interaction between these equipment and electric power system.

In this scenario, this work started from the investigations and measure information of on-site relating to stresses imposed on dielectric power autotransformers caused by switching of circuit-breakers and disconnectors during the insertion of power autotransformers bank in the electric power system. SFRA (sweep frequency response analysis) measurements were performed in autotransformers and instrumentation, beyond the evaluation of the methodology for measuring and monitoring of transient voltages from bushing capacitive taps of power.

Based on the information of frequencies and amplitudes, of the switching in power substation, the following were evaluated: effect of the switching on the natural frequencies oscillation of the power autotransformers, estimation of the voltage transfer between the windings of power autotransformers and finally, the evaluation of the risk involved in the switching through the frequency domain severity factor (FDSF).

# ÍNDICE

<b>Capítulo 1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo	3
1.2 Estrutura da Tese	4
<b>Capítulo 2 Noções Fundamentais e Definições Importantes</b>	<b>6</b>
2.1 Definição Básica de uma Subestação	6
2.2 Transformadores de Potência	9
2.3 Transitórios	11
2.4 Sobretensões	15
2.5 Sobretensão Temporária	15
2.6 Sobretensão Transitória	17
2.6.1 Sobretensão de Frente Lenta	17
2.6.2 Sobretensão de Frente Rápida	17
2.6.3 Sobretensão de Frente Muito Rápida	18
2.7 Formas de Onda	18
2.8 Espectro de Frequência	18
<b>Capítulo 3 Metodologias e Instrumentos</b>	<b>20</b>
3.1 Monitoramento dos Autotransformadores	20
3.2 Caracterização dos Autotransformadores	21
3.2.1 Impedância Terminal	21
3.2.2 Resposta em Frequência	24
3.3 Caracterização da Instrumentação	29
3.3.1 Monitoramento com Divisor Capacitivo	30
3.3.2 Monitoramento pelo Tap da Bucha	33
3.4 Sistema de Medição	36
3.4.1 Medição por Demanda	38
3.4.2 Medição Contínua - SOMA Lite	38
<b>Capítulo 4 Modelagem, Simulação e Medição</b>	<b>42</b>
4.1 Programa ATP	42
4.2 Modelo da Linha de Transmissão	43
4.3 Modelo de Barramento	43
4.4 Modelo de Disjuntores	43
4.5 Modelo de Chave Seccionadora	44
4.6 Modelo de Transformador de Potência	45

4.7 Modelo do Sistema	46
4.8 Simulações	46
4.9 Medições	50
4.9.1 Manobra de Disjuntor	52
4.9.2 Manobra de Chave Secionadora	53
4.10 Comparações Entre Medições e Simulações	55
4.10.1 Manobra de Disjuntor	55
4.10.2 Manobra de Chave Secionadora	58
<b>Capítulo 5 Análise, Identificação e Classificação</b>	<b>61</b>
5.1 Análise dos Resultados Utilizando FFT	61
5.2 Análise Gráfica no Domínio da Frequência	63
5.2.1 Medição e Caracterização dos Autotrafos	63
5.2.1.1 Normalização de Manobras	64
5.2.1.2 Medição x Caracterização	67
5.2.2 Fator de Severidade	70
5.2.2.1 Envoltórias da Densidade Espectral	71
5.2.2.2 Medição x Envoltória	74
5.3 Identificação das Manobras	76
5.3.1 Manobras de Chave Secionadora	78
5.3.2 Manobras de Disjuntores	81
5.3.3 Identificação - Chaves Secionadoras e Disjuntores	83
5.3.4 Identificação - Estatística das Manobras	86
5.4 Classificação de Eventos	91
<b>Capítulo 6 Estimação de Classes</b>	<b>93</b>
6.1 Motivação	93
6.2 Estimação de Classe - Árvore de Decisão	93
6.2.1 Tratamento de Dados	94
6.2.2 Árvore de Decisão	98
<b>Capítulo 7 Estudos de Caso</b>	<b>100</b>
7.1 Estudos	100
7.1.1 Estimativas	101
7.1.2 Abordagens - FSDF	107
7.1.3 Abordagens - FSDF (600 $\mu$ s)	115
<b>Capítulo 8 Conclusões, Constatações e Sugestões de Trabalho</b>	<b>124</b>
8.1 Conclusões	124
8.2 Constatações	127

8.3 Sugestões de Trabalhos Futuros	129
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>131</b>

# Capítulo 1

## Introdução

A utilização da energia elétrica se torna cada vez mais uma necessidade fundamental da humanidade. A dependência da energia é tamanha que mesmo uma interrupção temporária pode causar grandes prejuízos, sendo assim, existem grandes preocupações com a continuidade do fornecimento de energia implicando em um esforço para amenizar e reduzir as interrupções no sistema elétrico de potência brasileiro.

O sistema elétrico de potência, invariavelmente, está sujeito a perturbações e estas agirem sobre os equipamentos ligados a ele. Nestes casos os efeitos das perturbações a que os mesmos são expostos podem ser potencializados. Dentre os problemas que advêm da ocorrência de uma perturbação em um sistema operando em situações normais ou de carregamento podem-se citar: a sobretensão e o transitório de tensão. Assim, um sistema elétrico deve ser capaz de suportar um conjunto de distúrbios, mantendo suas unidades consumidoras atendidas com energia elétrica em condições satisfatórias sem comprometer seus equipamentos.

As sobretensões podem ser geradas por efeitos externos ao sistema elétrico – como descargas atmosféricas – ou pelo próprio sistema – como sobretensões internas causadas por manobras [1]. Manobras de chaves seccionadoras e disjuntores, curtos-circuitos e descargas atmosféricas geram sobretensões transitórias com um amplo espectro de frequências que podem excitar sobretensões ressonantes nos enrolamentos dos transformadores, quando coincidem com uma das frequências naturais do enrolamento ou parte do mesmo. Essas sobretensões ressonantes podem causar danos na isolação interna

dos equipamentos ou solicitar continuamente a sua isolação levando a uma falha. Não se pode evitar que descargas atmosféricas ocorram em linhas de transmissão ou mesmo sobretensões internas causadas por manobras, mas pode-se minimizar os seus efeitos investigando, avaliando e integrando os equipamentos entre si, e neste estudo em particular os transformadores de potência [2].

Os transformadores de potência são equipamentos muito importantes nos sistemas elétricos de potência, por isso, a retirada não planejada de operação destes equipamentos, decorrente de falhas, ocasiona grandes prejuízos para as empresas do setor elétrico. Quando o transformador é novo, ele possui suficiente rigidez dielétrica e mecânica para suportar condições não usuais de operação do sistema, mas com o passar dos anos ou ocorrência de eventos no sistema, a isolação do equipamento sofre gradativa deterioração podendo chegar a um ponto em que o transformador é incapaz de suportar eventos, como curto-circuitos e sobretensões transitórias.

Nos últimos anos algumas falhas de transformadores têm sido relatadas pelas concessionárias do Setor Elétrico Brasileiro, sendo associadas à interação destes equipamentos com o sistema elétrico [2]. No período de 2000-2008, 8 autotransformadores, de diferentes fabricantes, de uma determinada subestação falharam o que gerou grande preocupação, pois sabe-se que quando um destes autotransformadores se encontra fora de operação o fluxo de energia entre duas importantes regiões do país pode ser prejudicado [3].

Diante das falhas observadas nas unidades autotransformadoras desta subestação uma investigação das ocorrências nestes equipamentos foi iniciada, pois estas poderiam estar relacionadas às frequentes manobras realizadas na subestação. Como parte da investigação foram avaliadas as solicitações elétricas impostas no lado de 345 kV dos

autotransformadores, solicitações estas oriundas de manobras internas (chaveamentos de disjuntores e seccionadores) e externas a esta subestação.

## **1.1 Objetivo**

O objetivo deste trabalho é investigar e avaliar as solicitações elétricas impostas a autotransformadores de potência analisando os efeitos dos transitórios rápidos causados por manobras de chaves seccionadoras e disjuntores e aquelas oriundas de manobras externas à subestação quando da inserção do banco de autotransformadores no sistema.

Para isso serão realizadas investigações baseadas em informações colhidas no campo, relativas às amplitudes e frequências dos sinais típicos devido a manobras na subestação, bem como a eventos oriundos do sistema elétrico.

Para tal, foram realizados ensaios de caracterização no domínio da frequência dos autotransformadores na subestação a fim de avaliar suas amplificações e atenuações indicando a frequência onde ocorrem. Uma vez realizada esta caracterização, os autotransformadores foram instrumentados de modo a permitir o monitoramento das tensões nas buchas de 345 kV, quando da realização de manobras internas à subestação ou de eventos externos significativos que sejam capazes de sensibilizar o sistema de medição.

Os registros relativos a eventos e manobras internas e externas a SE, ocorrem de forma automática. Uma ferramenta de monitoração e diagnóstico de dados foi utilizada, sendo essa desenvolvida pelo Cepel e baseada na plataforma da National Instruments, utilizando como linguagem de programação o LabView.

Com base nas informações colhidas em campo será realizada uma avaliação do efeito desses sinais com relação às frequências naturais de oscilação dos autotransformadores com auxílio de técnicas de inteligência artificial.

Um estudo estatístico será apresentado para identificar toda a distribuição e característica das solicitações encontradas nas informações colhidas em campo, sendo as mesmas confrontadas com os resultados das simulações, a fim de compará-los para investigar possíveis eventos que possam causar danos aos autotransformadores da subestação avaliada.

## **1.2 Estrutura da Tese**

No Capítulo 2, é apresentada uma breve descrição sobre subestações, transformadores de potência e transitórios de tensão.

No Capítulo 3, são mostrados as metodologias e instrumentos utilizados para a caracterização dos autotransformadores na subestação, além de apresentar o sistema de medição e monitoramento.

No Capítulo 4, são apresentados critérios para as simulações de solicitações elétricas e as medições dos transitórios de tensão realizadas no campo além de estabelecer critérios para comparação das simulações e medições de transitórios.

O Capítulo 5 descreve o tratamento utilizado nas medições e a abordagem da análise, identificação e classificação.

O Capítulo 6 descreve a abordagem utilizada para a estimação de classes.

No Capítulo 7, são apresentados estudos de caso com as medições realizadas, além de apresentar estimativas da transferência das manobras bem como a avaliação de risco por meio do fator de severidade no domínio da frequência.

No Capítulo 8 são apresentadas algumas conclusões deste trabalho, e principalmente algumas recomendações para trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Noções Fundamentais e Definições

### Importantes

Um sistema elétrico de potência necessita de grandes unidades geradoras para suprir a crescente demanda dos consumidores (residências, lojas, indústrias, etc.). No entanto, estas unidades geradoras podem não estar localizadas próximas aos centros consumidores, sendo necessária a utilização de linhas de transmissão para conduzir a energia gerada até eles e, muitas vezes, fazer a interligação com outras unidades geradoras. Além disso, os níveis de tensão ideais para geração, transmissão e distribuição são diferentes um dos outros.

As subestações elétricas são parte importante no sistema elétrico, pois são nelas que começam e/ou terminam as linhas e ainda convertem os níveis de tensão através do uso de transformadores. São nelas também que são instalados os equipamentos para proteção das linhas bem como os equipamentos para manobras, que aumentam a confiabilidade do sistema [4].

### 2.1 Definição Básica de uma Subestação

Uma subestação elétrica (SE) é um conjunto de equipamentos elétricos com a finalidade de direcionar o fluxo de potência num sistema de potência, garantindo a transferência de energia a outros subsistemas e diversos tipos de consumidores de forma segura e confiável, provendo um ponto no qual dispositivos automáticos de proteção e meios de desviar o fluxo de potência ao longo de trechos de linhas

alternativas possam ser instalados. A Figura 2.1 mostra uma visão aérea da subestação de 765/500/345 kV de Tijuco Preto – Furnas – localizada no município de Mogi das Cruzes em São Paulo. A Figura 2.2 mostra o detalhe de um autotransformador na subestação de 765/500/345 kV de Tijuco Preto – Furnas. A Figura 2.3 mostra a subestação de 500/345 kV de Ibiúna – Furnas localizada no município de Ibiúna em São Paulo.



Figura 2.1 – Visão aérea da subestação de 765/500/345 kV Tijuco Preto – Furnas



Figura 2.2 – Detalhe de um autotransformador na subestação de 765/500/345 kV Tijuco Preto – Furnas



Figura 2.3 – Subestação de 500/345 kV Ibiúna – Furnas

Uma subestação pode ser associada a uma central geradora, controlando diretamente o fluxo de potência num sistema ou a transformadores de força, convertendo a tensão de fornecimento a um nível mais elevado ou mais baixo de tensão, ou ainda, conexão de um número de linhas de fornecimento em um mesmo nível de tensão. Geralmente a subestação preenche duas ou mais dessas funções. Basicamente, qualquer subestação consiste de um número de circuitos chegando e partindo, conectados entre si através de uma barra ou sistema de barramento comum [5].

As subestações são projetadas para satisfazer a uma ou mais das seguintes funções:

- Transformação - converte a tensão de suprimento para um nível diferente, maior ou menor, sendo designada SE elevadora ou abaixadora;
- Seccionadora, de manobra ou de chaveamento - Interliga circuitos de suprimento sob o mesmo nível de tensão possibilitando a sua multiplicação e possibilita o seccionamento de circuitos permitindo sua energização em trechos sucessivos de menor comprimento.

Sendo assim, as subestações podem ser classificadas da seguinte maneira:

- Quanto a *função*
  - Elevadora;
  - Abaixadora;
  - Seccionadora;
  - Manobra.
- Quanto ao *sistema suprido*
  - Transmissão;
  - Subtransmissão;
  - Distribuição;
  - Consumidor.

- Quanto a *instalação*
  - Abridadas;
  - Ao tempo.
- Quanto ao *isolamento*
  - Aéreas;
  - Blindadas.

Dos equipamentos instalados em uma subestação pode-se considerar que os principais são: os disjuntores, transformadores para instrumentos, chaves seccionadoras, equipamentos para compensação de reativos (compensadores), barramentos, equipamentos de proteção e os transformadores de potência.

## **2.2 Transformadores de Potência**

Um dos equipamentos mais complexos e de mais alto custo de uma subestação é o transformador de potência. Estes são máquinas estáticas que são capazes de elevar ou reduzir a tensão de forma a minimizar as perdas do sistema de transmissão pela redução de corrente requerida para determinada potência elétrica transmitida. Os transformadores de potência podem ser monofásicos ou trifásicos dependendo das necessidades específicas de cada instalação. As Figuras 2.4 e 2.5 mostram exemplos de transformadores monofásico e trifásico.

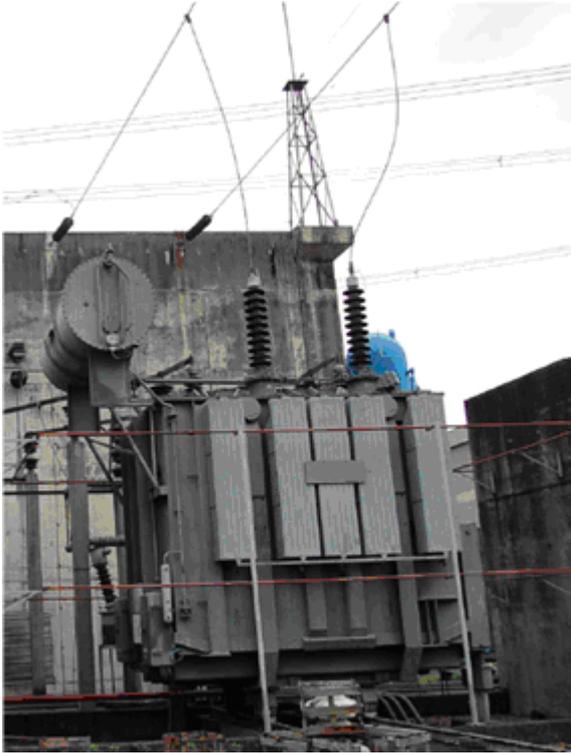


Figura 2.4 – Transformador monofásico de potência



Figura 2.5 – Transformador trifásico de potência

Num sistema elétrico, os transformadores são utilizados desde as usinas de produção, onde a tensão gerada é elevada a níveis adequados para permitir a transmissão econômica de potência, até os grandes pontos de consumo, onde a tensão é reduzida no nível de subtransmissão e de distribuição, alimentando as redes urbanas e rurais, onde novamente é reduzida para poder, enfim, ser utilizada com segurança pelos usuários do sistema [5]. A Figura 2.6 ilustra os diferentes tipos de transformadores utilizados num sistema elétrico.



Figura 2.6 – Esquema básico de um sistema elétrico

Devido à sua importância no sistema elétrico de potência, os transformadores devem ser projetados e dimensionados para que respondam de forma robusta aos diversos tipos de distúrbios do sistema elétrico, tais como transitórios de chaveamentos, curto-circuitos, descargas atmosféricas ou outras solicitações.

## 2.3 Transitórios

Nas subestações elétricas as manobras de disjuntores e chaves seccionadoras dão origem aos transitórios de alta frequência gerando uma solicitação dielétrica ao transformador que pode oferecer risco à sua vida útil.

Transitórios elétricos podem ser caracterizados por eventos que normalmente ocorrem em um curto espaço de tempo, mas que podem ser altamente danosos aos equipamentos do sistema elétrico. Estes ocorrem quando existe uma variação súbita nas condições de regime permanente de um sistema elétrico, como a abertura ou fechamento de uma chave seccionadora, uma descarga atmosférica, chaveamentos de manobra ou falhas que ocorrem em um ponto qualquer deste sistema.

O período transitório, quer seja de tensão, quer seja de corrente, é muito pequeno e, na maioria das vezes, insignificante quando comparado com o período de regime permanente do sistema. Entretanto, esses períodos transitórios são extremamente importantes, pois durante esses períodos os equipamentos interligados

ao sistema são submetidos às maiores solicitações elétricas devido as tensões ou as correntes excessivas [6].

Diante disso, uma análise dos transitórios é extremamente importante a fim de entender o comportamento do sistema elétrico neste período, pois é necessário que sejam considerados todos os possíveis transitórios aos quais os equipamentos estarão susceptíveis, para que, na ocorrência de algum destes, a confiabilidade e a qualidade da energia transmitida não seja afetada.

Os transitórios podem gerar sobretensões, sobrecorrentes, formas de ondas anormais, e espectro de frequência indesejável, podendo ocorrer separadamente ou todos ao mesmo tempo, dependendo do fenômeno ocorrido. A forma extremamente não linear do transitório pode resultar em imediata ruptura dielétrica dos materiais isolantes do transformador, bem como a deterioração gradativa e cumulativa da isolação, resultando em provável defeito futuro.

Nas Figuras 2.7 e 2.8 são apresentadas a parte ativa e o detalhe da bobina de alta tensão de um transformador que operava em uma usina hidrelétrica conectado a uma subestação blindada a gás SF<sub>6</sub>. Foram constatados danos bastante restritos na região do terminal de alta tensão [7, 26].



Figura 2.7 – Parte ativa de um transformador trifásico de 418 MVA-550 kV



Figura 2.8 – Danos na região superior da bobina de alta tensão da fase central

Os danos mais expressivos, como deformação e curto-circuito entre espiras, foram constatados na região superior da bobina de alta tensão da fase central, presumindo a ocorrência de ressonância parcial do enrolamento [7, 26].

A Figura 2.9 apresenta o enrolamento de um autotransformador que operava em uma subestação 230/161-13,8 kV. Foram constatados danos no enrolamento de 13,8 kV presumindo ressonância interna ao enrolamento [8].



Figura 2.9 - Danos no enrolamento de 13,8kV de um autotransformador de 230/161-13,8 kV

A Figura 2.10 apresenta um transformador de 550 kV que operava conectado a uma subestação blindada a gás SF<sub>6</sub>. Foram constatados danos no enrolamento presumindo solicitações superiores à suportabilidade suspeitando-se a origem de tensões transitórias/ressonantes [8].

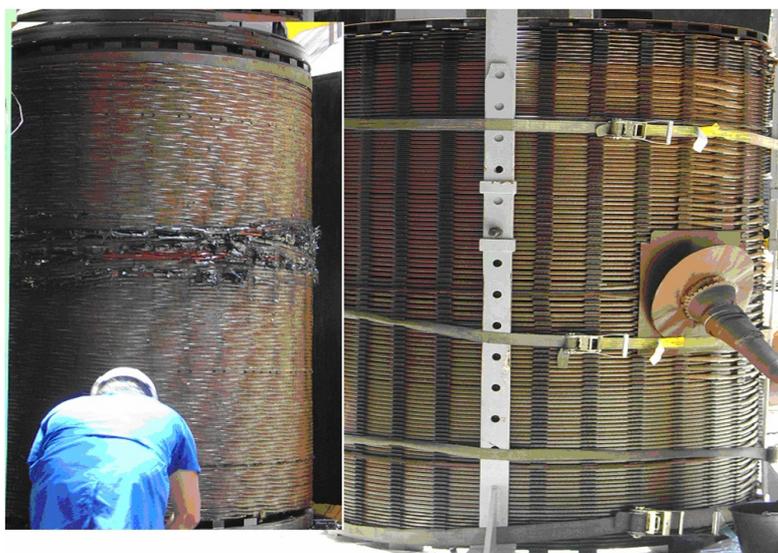


Figura 2.10 – Danos no enrolamento transformador de 550 kV

## 2.4 Sobretensões

São consideradas sobretensões, as tensões variáveis com o tempo, entre uma fase e a terra ou entre fases, cujo valor de crista é superior ao valor de crista da tensão máxima de um sistema [9, 21]. A atenção e o estudo das características das sobretensões são de grande importância para o sistema elétrico, pois estas podem solicitar o isolamento de linhas, subestações e equipamentos provocando a perda de rigidez dielétrica do isolante fazendo com que haja uma interrupção parcial ou total. Portanto os equipamentos devem ser dimensionados para suportá-las, diminuindo assim o risco de falhas.

As sobretensões de alta frequência são formadas a partir de reflexões e refrações de ondas trafegantes, que ocorrem nas discontinuidades do sistema, como por exemplo, em terminais abertos. Por isso essas podem apresentar formas e amplitudes diferenciadas na análise de pontos diferentes de um mesmo sistema [10].

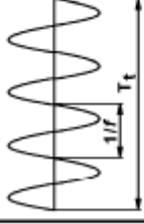
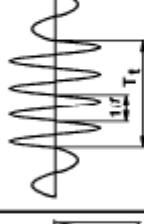
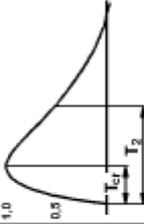
De acordo com a forma, o grau de amortecimento e a duração, sobretensões são divididas em: sobretensão temporária e sobretensão transitória. A Tabela 2.1 apresenta as classes e formas das solicitações de tensão e sobretensão [21].

## 2.5 Sobretensão Temporária

As sobretensões temporárias ocorrem durante um tempo consideravelmente longo, podendo variar de segundos a minutos. A sobretensão pode ser não amortecida ou fracamente amortecida [1, 10, 21].

Dentre as causas que, geralmente, provocam a sobretensão temporária podem ser citadas a redução repentina de carga e falta (por ex. curto-circuito monofásico).

Tabela 2.1 – Classes e formas das solicitações de tensão e sobretensão

Classe	Baixa frequência		Transitório	
	Continua	Temporária	Frente lenta	Frente rápida
Forma da tensão				
Faixas de formas de tensão	$f = 50 \text{ Hz}$ ou $60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $3600 \text{ s} \geq T_t \geq 0,03 \text{ s}$	$5000 \mu\text{s} \geq T_{cr} > 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$100 \text{ ns} \geq T_1 > 3 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$ $T_t \leq 3 \text{ ms}$
Forma normalizada da tensão	$f = 50 \text{ Hz}$ ou $60 \text{ Hz}$ $T_t^*$	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	$T_{cr} = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \mu\text{s}$	*
Ensaio normalizado de tensão suportável	*	Ensaio de frequência fundamental de curta duração	Ensaio de impulso de manobra	Ensaio de impulso atmosférico

\*) A ser especificado pela norma do respectivo equipamento.

## 2.6 Sobretensão Transitória

As sobretensões transitórias possuem curta duração, podendo variar de alguns milissegundos ou menos, oscilatória ou não oscilatória, usualmente fortemente amortecida [10, 21].

Sobretensões transitórias podem ser seguidas imediatamente por sobretensões temporárias. Em tais casos as duas sobretensões são consideradas eventos separados [21].

As sobretensões são classificadas em: sobretensões de frente lenta, sobretensões de frente rápida e sobretensões de frente muito rápida, conforme descrito abaixo.

### 2.6.1 Sobretensões de Frente Lenta

Sobretensão transitória, usualmente unidirecional, com tempo até a crista tal que  $20\mu\text{s} < T_{cr} \leq 500\mu\text{s}$ , e tempo até o meio valor (na cauda)  $T_2 \leq 20\text{ms}$  [21].

### 2.6.2 Sobretensões de Frente Rápida

Sobretensão transitória, usualmente unidirecional, com tempo até a crista tal que  $0,1\mu\text{s} < T_1 \leq 20\mu\text{s}$ , e tempo até o meio valor (na cauda)  $T_2 \leq 300\text{ms}$  [21].

### **2.6.3 Sobretensões de Frente Muito Rápida**

Sobretensão transitória, usualmente unidirecional, com tempo até a crista tal que  $T_f \leq 0,1\mu s$ , duração total  $T_t \leq 3ms$ , e com oscilações superpostas de frequências de  $30\text{ kHz} < f < 100\text{ MHz}$  [21].

É importante ressaltar que não podem ser estabelecidos limites definidos de transição entre esses grupos, uma vez que certos fenômenos podem causar sobretensões que se enquadram em uma ou outra classe [10].

## **2.7 Formas de Onda**

Assim como os espectros de tensão e corrente de um sistema de potência durante os eventos transitórios são de considerável importância, o espectro de frequência da onda também é. Os harmônicos podem contribuir para o aumento de perdas nos equipamentos do sistema, além de interferirem nos equipamentos de comunicação e processamento de dados. Em um transformador de potência, harmônicos na onda de tensão podem gerar perdas no ferro, enquanto harmônicos na onda da corrente perdas no cobre devido ao efeito pelicular, que de acordo com a frequência, faz com que a densidade de corrente varie de acordo com o raio do condutor, sendo maior na sua superfície [11].

## **2.8 Espectro de Frequências**

Estudos mostram que, além dos fatores acima mencionados, também é importante levar em conta o espectro de frequência ao quais os equipamentos estarão submetidos. Mesmo que a amplitude do sinal seja baixa, sua frequência pode coincidir com a frequência de ressonância do próprio equipamento, o que faz com que a onda

se amplifique. Se este fenômeno acontecer várias vezes, como por exemplo, causado por descargas atmosféricas ou chaveamentos de manobra, os esforços causados podem gerar falhas que em alguns casos podem ocorrer em algumas horas após o evento [12].

# Capítulo 3

## Metodologias e Instrumentos

Os transformadores, devido ao seu aspecto construtivo, apresentam características de circuito bastante complexas com resistências, indutâncias e capacitâncias distribuídas entre espiras, bobinas, enrolamentos, núcleo e tanque. Esta característica faz com que o transformador apresente um espectro de frequência único através de sua função de transferência que reflete essencialmente as variações de seus parâmetros internos em função da frequência, apresentando como característica principal frequências de ressonância e anti-ressonância.

Devido a esta característica alguns métodos de análise de transformadores de potência são baseados no seu comportamento ao longo da frequência, tais como: medição de impedância terminal variando a frequência e medição de resposta em frequência dos enrolamentos de alta e baixa tensão.

Estas técnicas têm como objetivo caracterizar o autotransformador no domínio da frequência descrevendo o seu comportamento nas frequências diferentes da frequência de operação, ou seja, frequência de 60 Hz.

### 3.1 Monitoramento dos Autotransformadores

Para avaliar as solicitações elétricas impostas aos autotransformadores da subestação, os mesmos foram instrumentados de modo a permitir monitoramento das tensões nas buchas de 345 kV, quando da realização de manobras internas a subestação ou de eventos externos significativos que sejam capazes de sensibilizar o

sistema de medição. Eventos decorrentes de descargas atmosféricas não foram previstos de serem medidos.

Em uma primeira etapa foram realizados ensaios de caracterização dos autotransformadores na subestação a fim de avaliar as amplificações e atenuações, indicando a frequência onde ocorrem. Posteriormente os autotransformadores foram instrumentados para permitir o monitoramento e novamente avaliar as amplificações e atenuações do conjunto.

Uma vez conhecida a característica dos autotransformadores e sua instrumentação, esta será utilizada para efetuar avaliações e possíveis correções nos sinais que foram adquiridos no domínio do tempo e posteriormente convertidos para o domínio da frequência.

## **3.2 Caracterização do Autotransformador**

Para a caracterização do autotransformador no domínio da frequência foram utilizadas duas técnicas: a impedância e a resposta em frequência entre os terminais.

### **3.2.1 Impedância Terminal**

Esta técnica baseia-se na medição da impedância terminal do autotransformador de potência em diversas frequências, através da utilização de uma ponte de medição de impedâncias com frequência variável (ponte RLC). Normalmente a faixa de frequência está compreendida entre 10Hz e 2MHz. Os “steps” de frequência podem ser escolhidos manualmente ou automaticamente, o que dependerá da ponte de medição a ser utilizada.

O número de medições a ser realizado será função do número de enrolamentos do transformador. No caso de um transformador trifásico com ligações delta e estrela deve-se realizar um total de seis medições de impedância terminal. As Figuras 3.1 e 3.2 mostram um exemplo típico deste transformador.

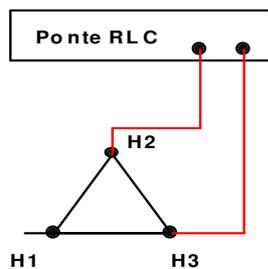


Figura 3.1 - Transformador trifásico  
medição terminais H

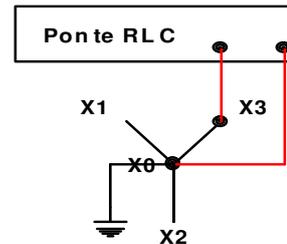


Figura 3.2 - Transformador trifásico  
medição terminais X

A medição consiste em conectar a ponte de impedância aos terminais externos do transformador referente ao enrolamento sob análise e medindo-se a impedância, variando a frequência no intervalo de interesse, por exemplo, de 10 Hz à 2 MHz. Obtêm para cada frequência o valor da impedância em módulo e ângulo. O procedimento é repetido então para cada enrolamento do transformador sendo que os enrolamentos não envolvidos na medição ficam abertos.

No caso do autotransformador em estudo a medição do módulo e o ângulo da impedância dos terminais de interesse foram feitos utilizando-se de uma ponte RLC, na faixa de frequência compreendida entre 10 Hz e 2 MHz. A Figura 3.3 mostra o circuito utilizado para medição da impedância terminal.

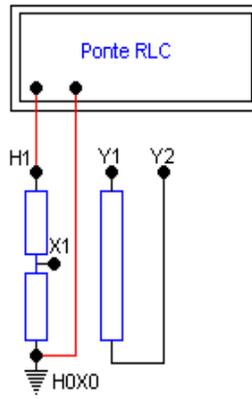


Figura 3.3 - Diagrama simplificado do circuito de medição de impedância

As Figuras 3.4, 3.5 e 3.6 apresentam os espectros de impedâncias conforme as configurações utilizadas para cada medição.

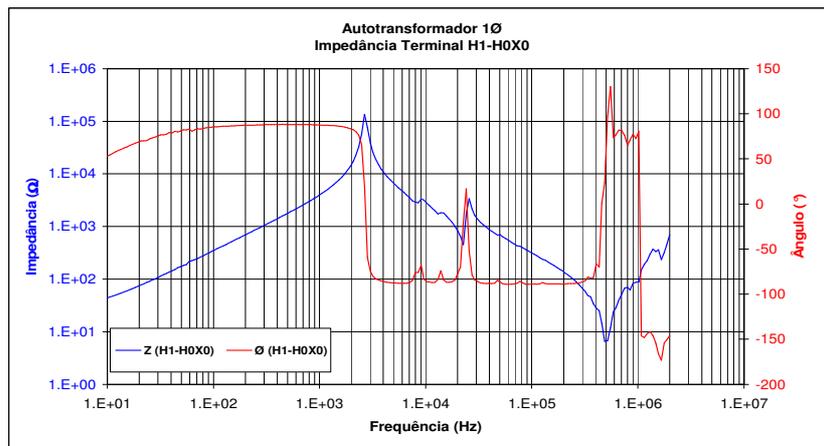


Figura 3.4 – Impedância terminal H1-H0X0

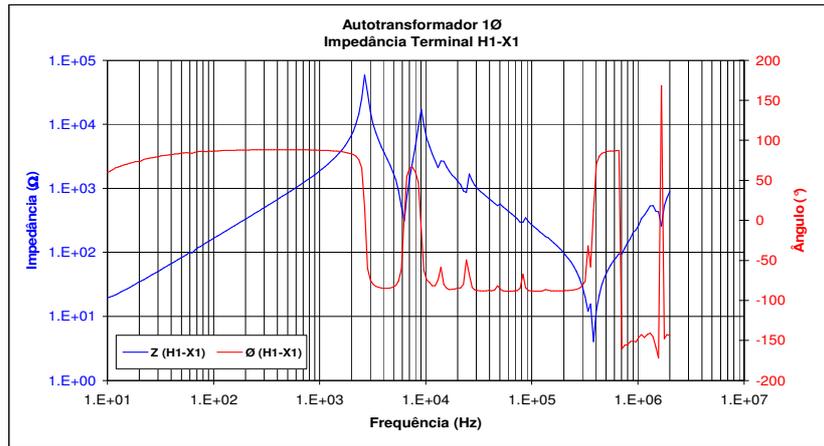


Figura 3.5 – Impedância terminal H1-X1

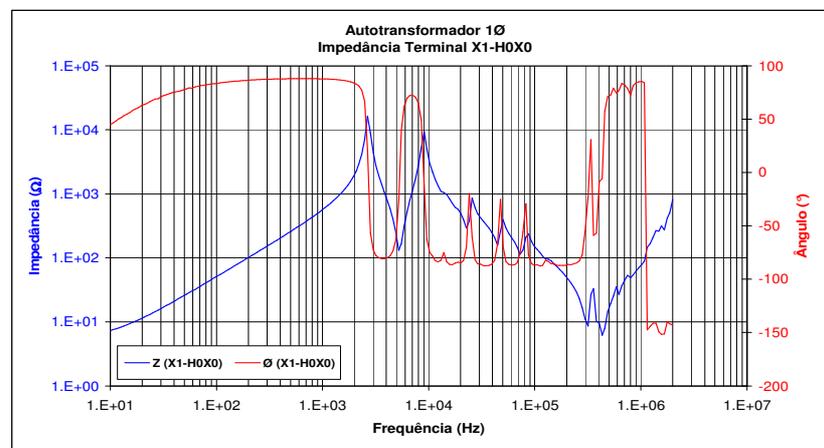


Figura 3.6 – Impedância terminal X1-H0X0

### 3.2.2 Resposta em Frequência

A medição da resposta em frequência, ou seja, medição da tensão transferida em frequências distintas de 60 Hz foi realizada aplicando-se um sinal senoidal de baixa tensão e frequência variável a um dos enrolamentos do autotransformador, medindo-se a transferência do mesmo para outro enrolamento. A frequência do sinal senoidal utilizado está compreendida na faixa de 10 Hz a 2 MHz. A Figura 3.7 mostra o diagrama simplificado utilizado na medição.

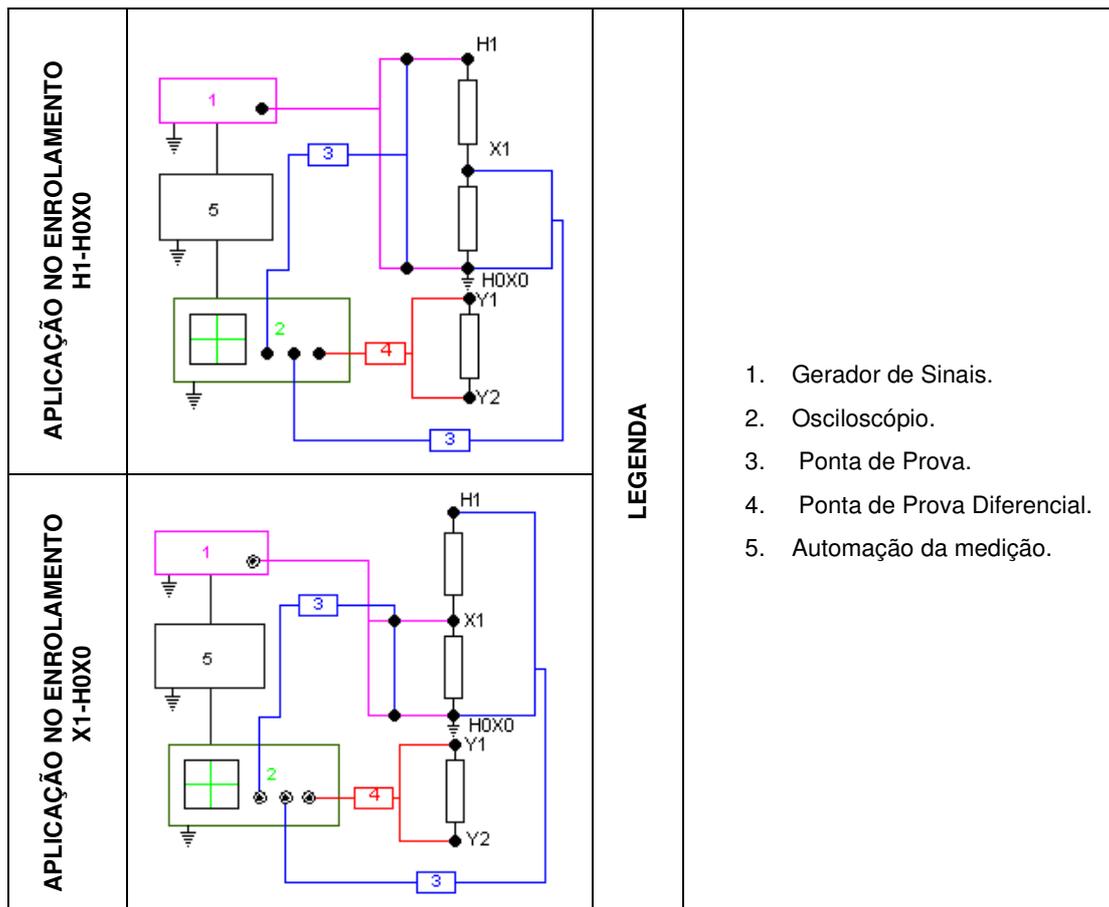


Figura 3.7 – Diagrama simplificado do circuito de medição de resposta em frequência

Este tipo de medição permite avaliar as amplificações (ressonâncias) e atenuações (anti-ressonâncias), indicando a frequência onde ocorrem. Normalmente estes valores são normalizados, tomando-se como base a relação de transformação à frequência de 60 Hz.

A consistência desta medição está na obtenção da relação nominal dos enrolamentos envolvidos, com a aplicação do sinal em frequência próxima aquela de trabalho.

A medição de resposta em frequência é bastante importante no sentido de avaliar possíveis interações entre surtos no sistema e o equipamento, bem como tornar conhecidos os pontos mais sensíveis do autotransformador.

As Figuras 3.8, 3.9 apresentam os espectros das tensões transferidas entre enrolamentos H e X.

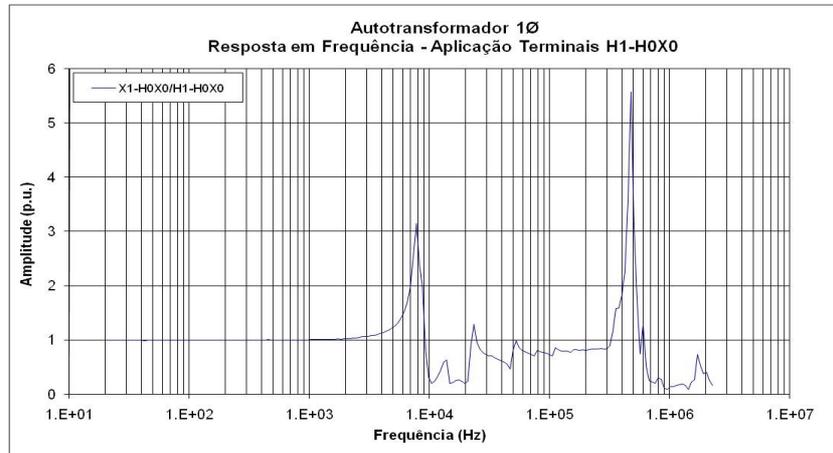


Figura 3.8 – Resposta em Frequência (aplicação terminal H1-H0X0 e medição X1-H0X0)

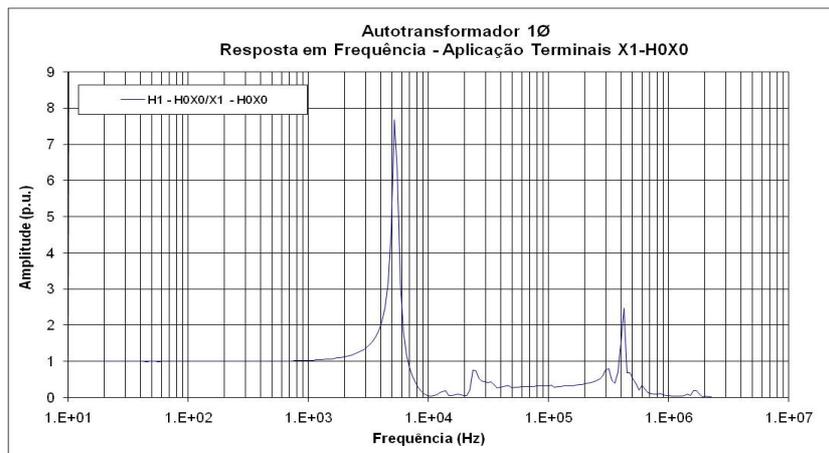


Figura 3.9 – Resposta em Frequência (aplicação terminal X1-H0X0 e medição H1-H0X0)

Em alguns gráficos de resposta em frequência são apresentadas a relação entre o valor do sinal de tensão de saída e o sinal de tensão de entrada ( $V_{saída}/V_{entrada}$ , no eixo das ordenadas), em função da frequência (no eixo das abscissas).

A relação  $V_{saída}/V_{entrada}$ , normalmente, é normalizada tendo como base a relação nominal do transformador para a posição considerada da chave comutadora. A forma de tratamento utilizada para os resultados de medição de transferência de tensão com as normalizações correspondentes é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Relação normalizada para medição da tensão de transferência

Tensão aplicada entre os terminais H:	$V_{H \text{ aplicada}}$
Tensão medida entre os terminais X:	$V_{X \text{ medida}}$
Tensão nominal entre os terminais H:	$V_{H \text{ nominal}}$
Tensão nominal entre os terminais X:	$V_{X \text{ nominal}}$

As tensões nominais são obtidas diretamente dos dados de placa do transformador e dependem das conexões estabelecidas nas chaves comutadoras associadas ao enrolamento de regulação.

No caso de um transformador trifásico com ligação delta e estrela, as tensões base utilizadas para a normalização são calculadas a partir das tensões em cima de cada enrolamento X (ligação estrela) e H (ligação delta), conforme mostrado na Figura 3.10.

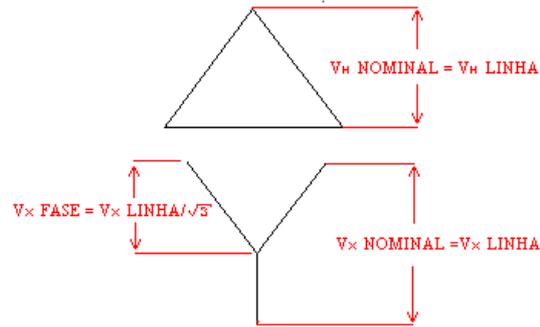


Figura 3.10: Tensões nominais e tensões nos enrolamentos X e H.

As equações 3.1 e 3.2 demonstram as tensões Base utilizadas para o cálculo dos enrolamentos X e H.

$$V_{X \text{ BASE}} = \frac{V_{X \text{ NOMINAL}}}{\sqrt{3}} \quad (3.1)$$

$$V_{H \text{ BASE}} = V_{H \text{ NOMINAL}} \quad (3.2)$$

Quando os terminais de aplicação da tensão estão no enrolamento de alta (H), e os terminais onde a resposta de tensão é medida estão no enrolamento de baixa (X), a normalização da tensão transferida entre eles é dada pela equação 3.3.

$$V_{X/H \text{ (p.u.)}} = \frac{V_{X \text{ MEDIDA}} / V_{H \text{ APLICADA}}}{V_{X \text{ BASE}} / V_{H \text{ BASE}}} \quad (3.3)$$

Quando os terminais de aplicação da tensão estão no enrolamento de baixa (X), ligado em estrela, e os terminais onde a resposta de tensão é medida estão no

enrolamento de alta (H), ligado em delta, a normalização da tensão transferida é dada pela equação 3.4.

$$V_{H/X \text{ (p.u.)}} = \frac{V_{H \text{ MEDIDA}} / V_{X \text{ APLICADA}}}{V_{H \text{ BASE}} / V_{X \text{ BASE}}} \quad (3.4)$$

### 3.3 Caracterização da Instrumentação

Além da caracterização dos autotransformadores no domínio da frequência, foi necessário caracterizar os instrumentos que foram utilizados na medição de transitórios de tensão, a fim de identificar as ressonâncias oriundas do conjunto – instrumentação e autotransformador – que posteriormente poderiam ser utilizadas para efetuar possíveis correções nos sinais aquisitados. Esta etapa é de extrema importância, pois é ela que irá caracterizar a instrumentação juntamente com o autotransformador de modo a garantir a confiabilidade da medição quantificando e qualificando os eventos através de suas principais características e sua ordem de grandeza permitindo assim uma inferência mais próxima da realidade da medição de transitórios, da mesma maneira que possibilita a repetibilidade desta medição.

Foram realizados ensaios utilizando dois arranjos distintos para a medição, conforme mostrado na Figura 3.11 e que serão detalhados a seguir.

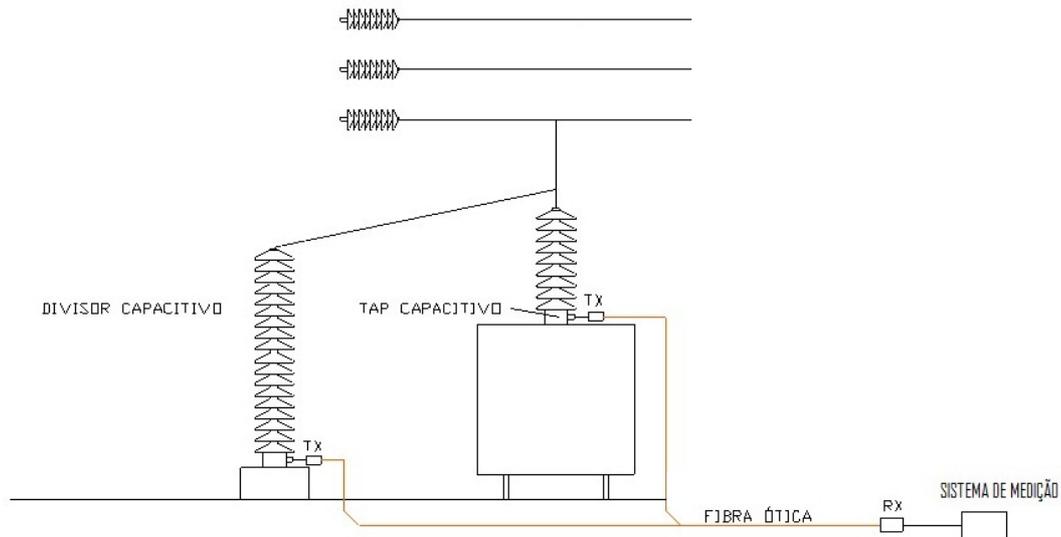


Figura 3.11 – Arranjos do ensaio

### 3.3.1 Monitoramento com Divisor Capacitivo

No primeiro arranjo utilizou-se um divisor capacitivo em paralelo com uma das buchas do autotransformador, um atenuador, um sistema transmissor/receptor de fibras ópticas e um sistema de medição, capaz de adquirir os sinais de interesse. A Figura 3.12 mostra uma foto do divisor capacitivo.

Uma das grandes dificuldades da utilização do arranjo com o divisor capacitivo é a necessidade de desligamento do autotransformador por um longo período, para sua montagem. Outra dificuldade encontrada fica por conta do transporte e da logística necessária para a disponibilização do divisor devido, principalmente, ao tamanho do mesmo. A inserção de uma capacitância em paralelo com a bucha do autotransformador também deve ser considerada, pois a inserção dessa capacitância modifica a característica do barramento aonde o autotransformador se encontra ligado.



Figura 3.12 – Divisor capacitivo utilizado para a medição

Deve-se existir ainda a preocupação com a segurança dos trabalhadores e os equipamentos envolvidos na montagem do arranjo, pois a inserção do divisor é realizada em uma condição provisória e controlada, uma vez que a montagem do mesmo, normalmente, não é previsto no planejamento original da subestação. Considerando-se a montagem dos três arranjos, as fases em cada autotransformador, com uma equipe de apoio devidamente treinada e equipamentos para o suporte na montagem, normalmente, é necessário algumas horas de desligamento do barramento para a montagem total do sistema de medição.

A avaliação desse arranjo passa pela caracterização do conjunto (divisor/atenuador/fibra óptica). A Figura 3.13 mostra o diagrama simplificado da medição do conjunto.

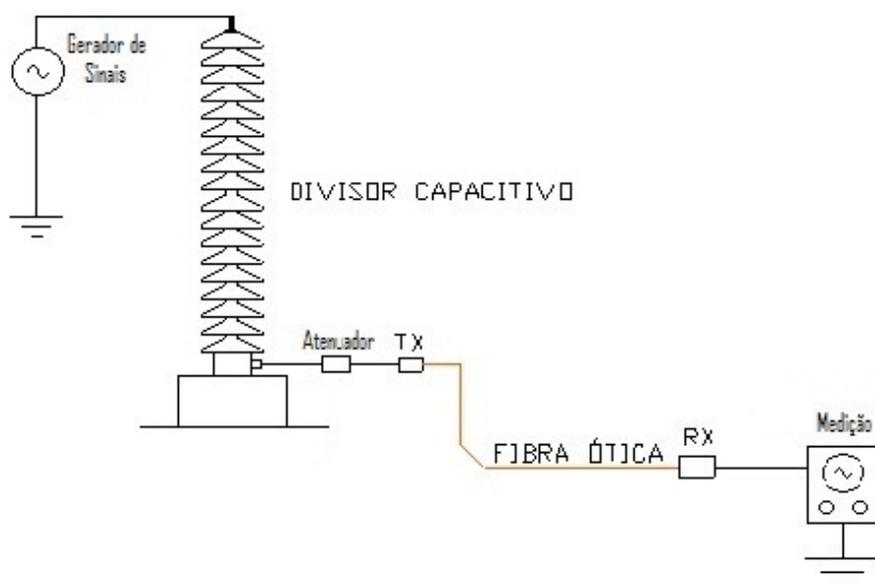


Figura 3.13 – Diagrama simplificado da caracterização do conjunto (divisor/atenuador/fibra óptica)

A utilização do atenuador deve ser atribuída ao condicionamento dos sinais de interesse aos limites de tensão do sistema de fibras ópticas. O sistema de fibras ópticas foi utilizado para o desacoplamento elétrico entre os divisores de tensão e a medição, a atenuação do ruído induzido devido à proximidade em que os instrumentos de medição se encontravam dos pontos energizados também foi considerada.

Os valores de atenuação do conjunto divisor/atenuador/fibra óptica para cada um dos três autotransformadores monitorados são mostrados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Valores de atenuação do conjunto (divisor/atenuador/fibra óptica)

<b>AUTOTRANSFORMADOR</b>			
<b>FABRICANTE</b>	<b>#X</b>	<b>#Y</b>	<b>#Z</b>
<b>FASE</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>RELAÇÃO</b>	18.223	18.292	18.187

A avaliação desse arranjo foi realizada considerando cada uma das três fases independentes. A Figura 3.14 mostra a caracterização do arranjo de cada fase do banco de autotransformadores.

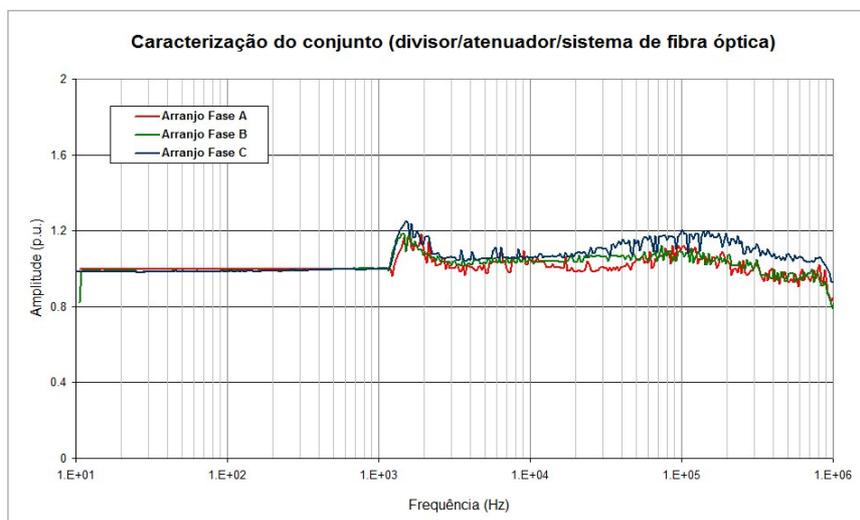


Figura 3.14 – Caracterização do conjunto (divisor/atenuador/fibra óptica)

### 3.3.2 Monitoramento pelo Tap da Bucha

O segundo arranjo utilizou-se de uma unidade de baixa tensão (UBT) [13] acoplada no tap capacitivo da bucha do autotransformador, um atenuador [14], um sistema transmissor/receptor de fibras ópticas e um sistema de medição, capaz de adquirir os sinais de interesse.

Cada um dos autotransformadores monitorados dispunha de um dispositivo chamado BPD (Bushing Potential Device) conectado ao tap capacitivo da bucha. Este dispositivo é responsável por fornecer pequenos valores de tensão, derivados do tap capacitivo da bucha a ele conectado, para alimentar os instrumentos de uso geral, tais como: voltímetros e relés.

A unidade de baixa tensão (UBT) foi instalada no interior da caixa do BPD para ajustar o sinal na saída do tap capacitivo a valores compatíveis para transmissão

através do cabo coaxial. Mesmo com a utilização da UBT se fez necessário a instalação de um atenuador para compatibilizar os sinais de interesse aos limites de tensão do sistema de fibras ópticas, sendo o sistema de fibras ópticas utilizado para o desacoplamento elétrico entre os divisores de tensão e a medição, a atenuação do ruído induzido devido à proximidade em que os instrumentos de medição se encontravam dos pontos energizados também foi considerada.

A Figura 3.15 mostra uma foto da unidade de baixa tensão (UBT) instalada no interior da caixa do BPD.

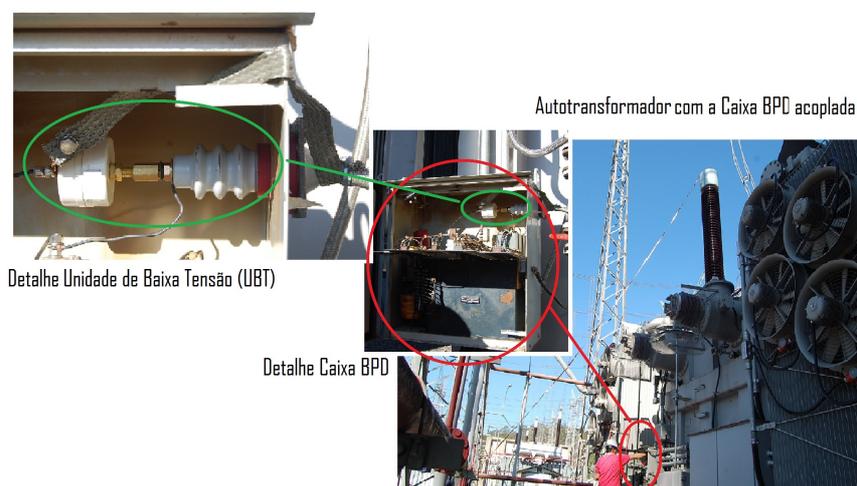


Figura 3.15 – Unidade de baixa tensão (UBT) instalada no interior da caixa do BPD

Uma das grandes vantagens da utilização da unidade de baixa tensão (UBT) é o curto tempo necessário para sua montagem, mesmo mantendo a necessidade de desligamento autotransformador, por questões de segurança. A isenção de influência direta ao barramento aonde o autotransformador se encontra ligado, devido à inserção da UBT, também deve ser considerada, pois a mesma é inserida ao tap capacitivo da bucha isentando assim qualquer mudança na característica do barramento.

Mesmo não existindo um planejamento prévio para a instalação das UBT's em equipamentos da subestação, as instalações das UBT's podem ser realizadas de

maneira provisória ou permanente devido, principalmente, à facilidade da instalação das mesmas e o que é necessário para confeccioná-las.

Considerando-se a montagem dos três arranjos, as fases em cada autotransformador, com uma equipe de apoio devidamente treinada são necessárias poucas horas de desligamento do barramento para a montagem total do sistema de medição. A desvantagem da utilização das UBT's é a necessidade de obter, de maneira confiável, a caracterização do conjunto (UBT acoplada no tap capacitivo da bucha do autotransformador/atenuador/fibra óptica) para posterior correções nos sinais aquisitados

A avaliação desse arranjo passa pela caracterização do conjunto (UBT acoplada no tap capacitivo da bucha do autotransformador/atenuador/fibra óptica). A Figura 3.16 mostra o diagrama simplificado da medição do arranjo.

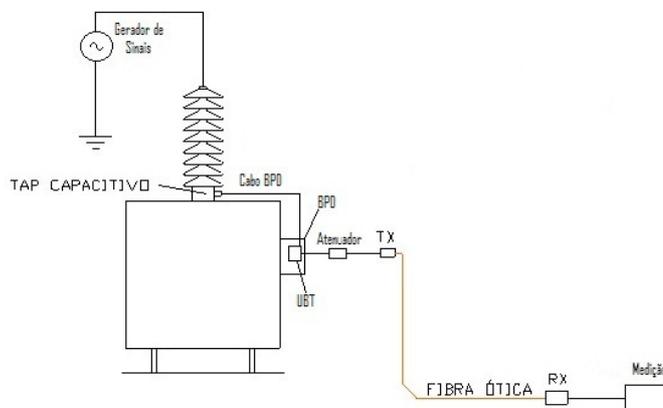


Figura 3.16 – Diagrama simplificado da caracterização do conjunto (UBT acoplada no tap capacitivo da bucha do autotransformador/atenuador/fibra óptica)

Os valores de atenuação do conjunto (UBT acoplada no tap capacitivo da bucha do autotransformador/atenuador/fibra óptica) para cada um dos três autotransformadores monitorados são mostrados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Valores de atenuação do conjunto (UBT acoplada no tap capacitivo da bucha do autotransformador/atenuador/fibra óptica)

<b>AUTOTRANSFORMADOR</b>			
<b>FABRICANTE</b>	<b>#X</b>	<b>#Y</b>	<b>#Z</b>
<b>FASE</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>RELAÇÃO</b>	206.361,1	206.529,7	177.563,3

Os valores de atenuação de cada conjunto para cada um dos três autotransformadores monitorados se diferem devido à característica intrínseca de cada circuito de medição.

A avaliação desse arranjo foi realizada considerando cada uma das três fases independentes. A Figura 3.17 mostra a caracterização do arranjo de cada fase do banco de autotransformadores.

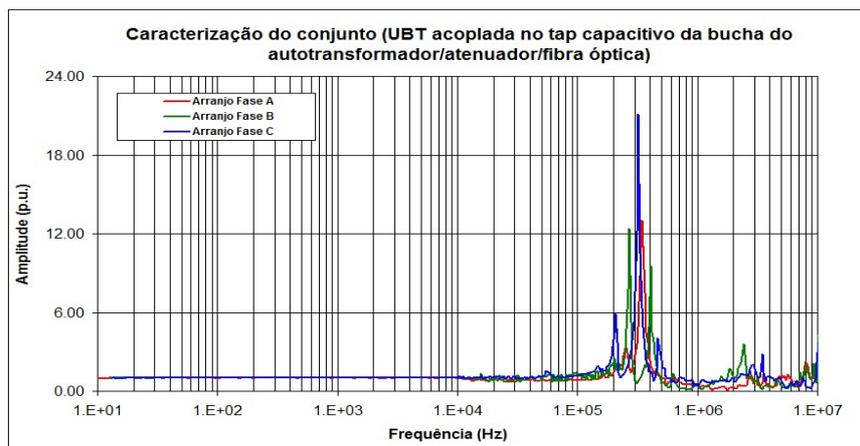


Figura 3.17 – Caracterização do conjunto (UBT acoplada no tap capacitivo da bucha do autotransformador/atenuador/fibra óptica)

### 3.4 Sistema de Medição

Existem diferentes metodologias para a medição de eventos transitórios de tensão, entretanto a maioria das metodologias publicadas até hoje apresentam técnicas de monitoramento por demanda, criando assim uma lacuna no que diz

respeito à monitoramento contínuo de transitórios de tensão de autotransformadores na subestação [15]. O sistema de medição utilizado possibilita a aquisição contínua dos eventos transitórios de tensão, provendo assim um acompanhamento dos eventos. Além da inserção da unidade de baixa tensão no tap capacitivo da bucha do autotransformador que oferece algumas vantagens conforme descrito anteriormente.

Nas Figuras 3.18 e 3.19 são ilustrados o sistema de medição e a disposição dos autotransformadores do banco de transformadores #1 e #2, respectivamente, considerando o monitoramento através do tap da bucha. Os autotransformadores estão separados a uma distância de aproximadamente 10 metros entre eles.

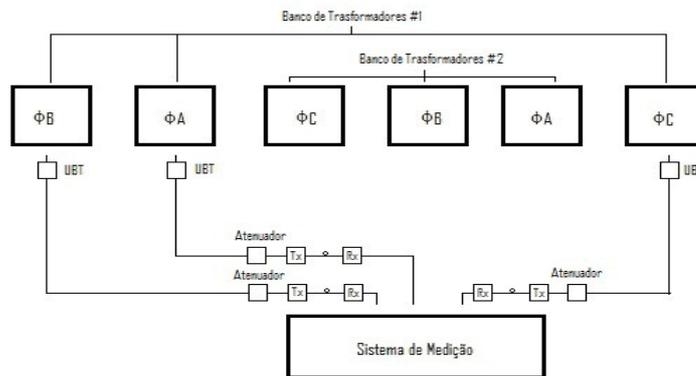


Figura 3.18 - Sistema de medição e a disposição dos autotransformadores do banco de transformadores #1

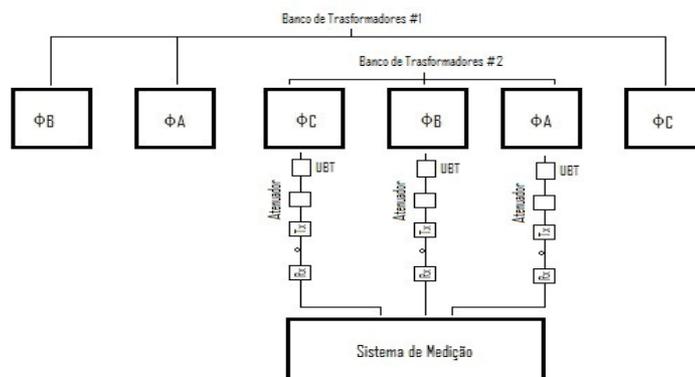


Figura 3.19 - Sistema de medição e a disposição dos autotransformadores do banco de transformadores #2

### 3.4.1 Medição por Demanda

A medição por demanda consiste em monitorar continuamente os eventos com um sistema de medição previamente ajustado, por exemplo, utilizando o trigger do osciloscópio. Os ajustes são realizados a partir da verificação dos eventos e suas características, uma vez detectado transitórios de tensão o sistema aquisita o mesmo, e para a realização de uma próxima medição é necessário reiniciar a processo de medição. Na Figura 3.20 está representado o diagrama simplificado para o monitoramento por demanda utilizado nas medições.

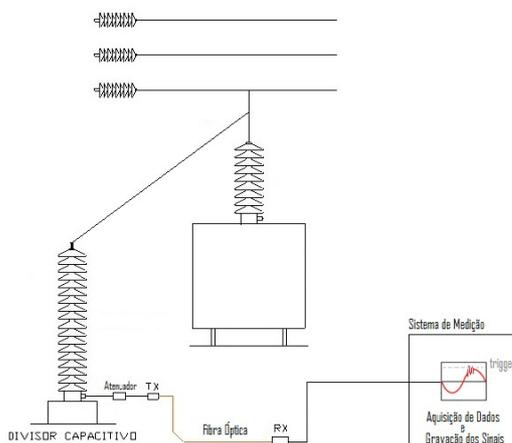


Figura 3.20 – Monitoramento por demanda utilizado nas medições

### 3.4.2 Medição Contínua - SOMA Lite

O sistema de medição que possibilita o monitoramento contínuo de transitórios de tensão foi intitulado de SOMA Lite, e sua concepção se baseia em um sistema computacional que foi desenvolvido com o objetivo de servir como uma ferramenta para possibilitar a aquisição contínua de dados de máquinas rotativas, auxiliando na análise de problemas e defeitos subestação [15].

Para a aplicação do sistema de monitoramento na subestação, inicialmente foi utilizada uma versão desenvolvida para medições de natureza mecânica, com algumas alterações relacionadas ao hardware de aquisição de dados. Todavia, durante testes realizados com o sistema em campo foi observado que a abordagem utilizada não era eficiente para a realização das medições necessárias. Apesar do sucesso da mesma nas aplicações relacionadas a medições mecânicas, a natureza das medições na subestação obrigou a revisão de algumas premissas do programa, e uma nova abordagem foi iniciada subestação [15].

Basicamente, três pontos foram considerados fundamentais para a adequação do sistema as necessidades de monitoramento de transitórios de tensão:

- Necessidade de independência total entre os ciclos de aquisição, análise e gravação pelo menos para cada placa de aquisição;
- Otimização do uso da memória das placas de aquisição e do computador utilizado;
- Maior velocidade de resposta do sistema em relação aos fenômenos observados.

Após a adequação do sistema SOMA Lite às necessidades de monitoramento de transitórios de tensão o sistema concentra os recursos computacionais em três funções básicas: aquisição dos dados, análise dos sinais e gravação dos dados. Na Figura 3.21 está representado o diagrama simplificado para o monitoramento com o sistema SOMA Lite utilizado nas medições.

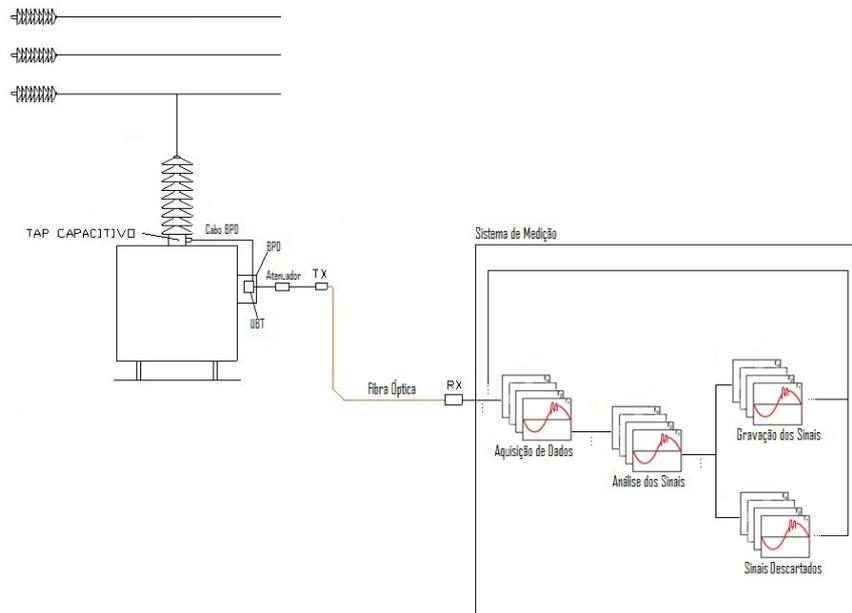


Figura 3.21 – Monitoramento com o SOMA Lite utilizado nas medições

Esse sistema se baseia em uma arquitetura do tipo cliente-servidor. A parte “servidor” é composta por um módulo de aquisição de dados, um módulo de análise e pré-processamento dos dados, um módulo de publicação dos dados e um módulo responsável pela gravação dos dados. A parte “cliente” é composta pelos módulos de interface, ou seja, onde o usuário poderá observar e manipular os dados coletados, on-line ou off-line [15].

A aquisição do sistema se dá de maneira ininterrupta, ou seja, uma vez que o sistema é iniciado, os drivers das placas de aquisição necessárias serão acionados e as mesmas passarão a coletar as informações desejadas. Só haverá a liberação de tais recursos uma vez que o sistema for desligado. Na Figura 3.22 algumas telas do sistema são apresentadas.

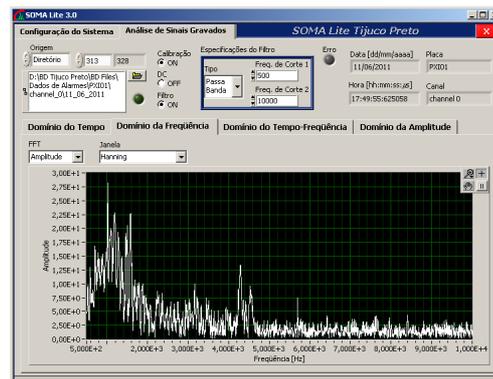
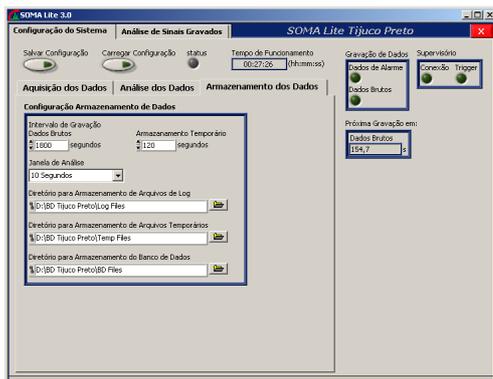
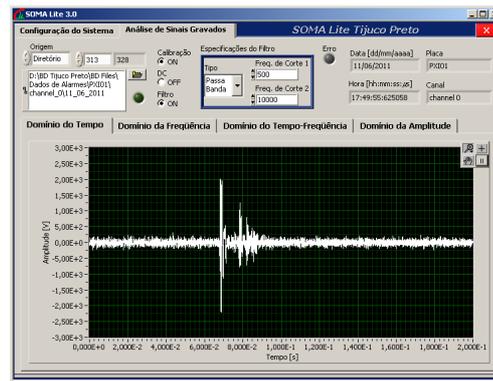
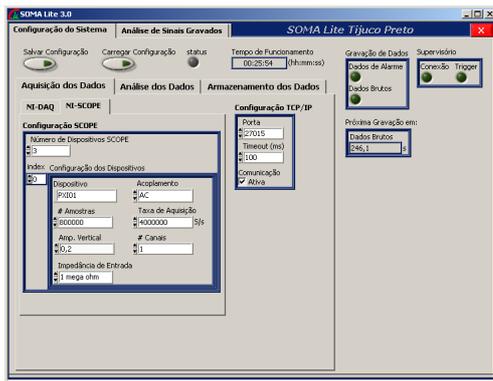


Figura 3.22 – Telas do sistema SOMA Lite

# Capítulo 4

## Modelagem, Simulação e Medição

Ao se modelar um sistema elétrico é necessário considerar a frequência do fenômeno a ser analisado, mesmo existindo uma dificuldade na representação precisa envolvendo todas as frequências. Outra consideração refere-se às aproximações e simplificações levando-se em conta a precisão requerida nos resultados.

### 4.1 Programa ATP

Através do programa ATP (Alternative Transient Program) é possível a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas com configurações arbitrárias.

Uma solução contínua no tempo não é possível, portanto o programa gera resultados discretos de acordo com o passo de integração estipulado.

O programa permite ainda a representação de não-linearidades, elementos com parâmetros concentrados, elementos com parâmetros distribuídos, chaves, transformadores, reatores, etc.

Existem alguns modelos pré-disponíveis no ATP [16, 25], tais como: elementos concentrados; elementos RL acoplados; transformadores; linhas de transmissão; elementos não-lineares; chaves; fontes; pára-raios etc.

As considerações para modelagem da subestação em estudo passam pelo modelo da linha de transmissão, do barramento, de disjuntores, de seccionadores e autotransformadores de potência.

## 4.2 Modelo da Linha de Transmissão

A modelagem de uma linha de transmissão pode ser realizada considerando modelos extremamente simples e outros mais complexos diferenciando assim a modelagem. O programa ATP permite algumas opções para a modelagem de linhas de transmissão utilizando modelos conhecidos, tais como:

- Modelo  $\pi$ ;
- Modelo de Bergeron;
- Modelo Semlyen;
- Modelo José Marti;
- Modelo em Componentes de Fase, etc.

## 4.3 Modelo de Barramento

A modelagem do barramento é realizada similarmente à modelagem de linhas de transmissão. Da mesma maneira, a modelagem do barramento pode ser realizada utilizando os modelos mencionados anteriormente, considerando-se o comprimento, o seu arranjo fixo e as características dos condutores utilizados.

## 4.4 Modelo de Disjuntores

Quando o disjuntor encontra-se fechado, sua modelagem pode ser feita considerando o mesmo como uma capacitância concentrada para a terra adicionando-se seu comprimento ao barramento no qual está conectado. Entretanto quando este se encontra aberto, o mesmo pode ser representado por uma capacitância série, também chamada de capacitância de equalização, que é responsável por auxiliar na

extinção do arco elétrico, e por sua capacitância para a terra, que é dividida em duas, com o mesmo valor cada uma, e dispostas uma de cada lado da capacitância série [17].

No caso de manobras nestes equipamentos, utiliza-se o modelo presente no ATP chamado “chave controlada por tempo”, que permite a escolha do tempo de abertura e fechamento do mesmo, e de cada lado desse modelo são colocadas as duas capacitâncias concentradas, assim como quando estes se encontram abertos [3].

Na Figura 4.1 são apresentadas as curvas, de simulação, do fechamento de um disjuntor no lado de baixa tensão do autotransformador.

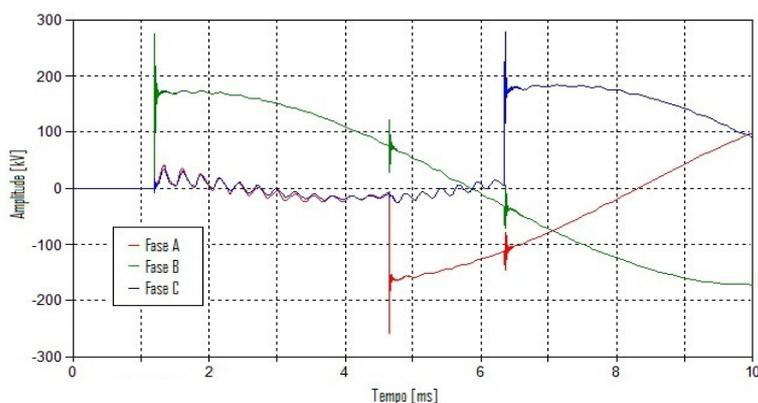


Figura 4.1 - Tensão terminal de baixa tensão do autotransformador – simulação do fechamento de um disjuntor

## 4.5 Modelo de Chave Secionadora

As seccionadoras quando se encontram fechadas, podem ser representadas por uma capacitância para a terra, e seus comprimentos são adicionados ao barramento ao qual esta está conectada. Entretanto, quando as chaves estão abertas, para sua representação, um barramento é desconectado do outro, pois esta isola completamente um sistema do outro.

Para a simulação de manobra de chaves também foi considerado o modelo presente no ATP de “chave controlada por tempo” [3].

Na Figura 4.2 é apresentada a curva, de simulação, do fechamento de uma chave seccionadora no lado de baixa tensão do autotransformador.

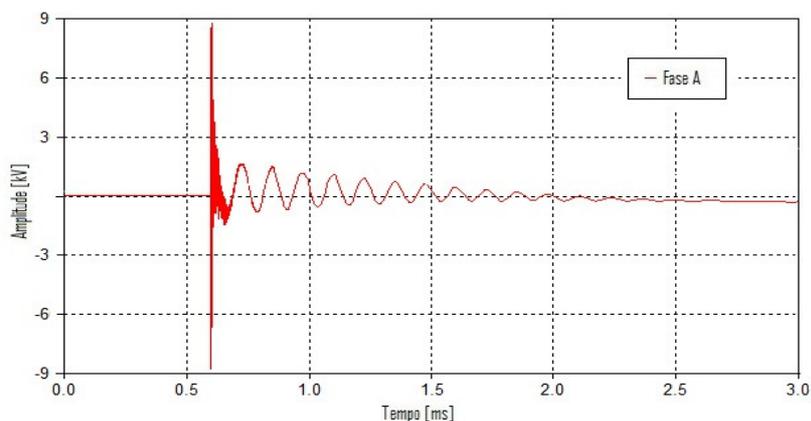


Figura 4.2 - Tensão terminal de baixa tensão do autotransformador – simulação fechamento de chave seccionadora

## 4.6 Modelo de Autotransformador de Potência

Os autotransformadores de potência são equipamentos complexos e difíceis de serem modelados. Na sua representação devem ser considerados vários parâmetros como: capacitâncias série entre espiras, e em paralelo (relacionadas ao núcleo e ao tanque que são aterrados), indutâncias próprias de cada espira, e mútua entre as bobinas, e resistências. Portanto, para sua correta representação, é recomendado que seja utilizado um modelo fornecido pelo próprio fabricante do equipamento, mas, quando este não pode ser adquirido, algumas aproximações devem ser consideradas.

Uma das formas de se representar um autotransformador é por uma capacitância concentrada para a terra. Esta capacitância pode ser obtida através da faixa de tensão do próprio autotransformador ou através da curva de impedância terminal ( $Z(\omega)$ ) obtida através da medição de impedância terminal do autotransformador.

Outra forma possível de modelagem do autotransformador é através de programas de síntese de rede, como o Vector Fitting, proposto por Gustavsen e Semlyen [18]. O programa ajusta os dados no domínio da frequência por funções polinomiais racionais, e a partir da curva de impedância terminal ( $Z(\omega)$ ) é apresentado um circuito que reproduz a curva de impedância na frequência. Esta representação é usualmente chamada de “caixa preta”.

## 4.7 Modelo do Sistema

Para a representação do sistema foi necessário a inserção de uma fonte de tensão, representando a geração de energia, juntamente com uma impedância, para impedir a reflexão das ondas. Sendo o valor desta impedância igual ao valor da impedância de surto da linha de transmissão.

## 4.8 Simulações

Um dos pontos importantes da simulação é a modelagem dos autotransformadores, pois ela deve representar o comportamento do equipamento em 60Hz e nas altas frequências [10, 19].

Cada um dos autotransformadores envolvidos na simulação apresenta um espectro de impedância terminal, apesar dos espectros se aproximarem um do outro a simulação deve ser realizada considerando a impedância de cada um dos enrolamentos do autotransformador. As Figuras, 4.3 e 4.4, apresentam o espectro de impedância terminal de cada um dos enrolamentos do autotransformador, localizado no banco de transformadores #1.

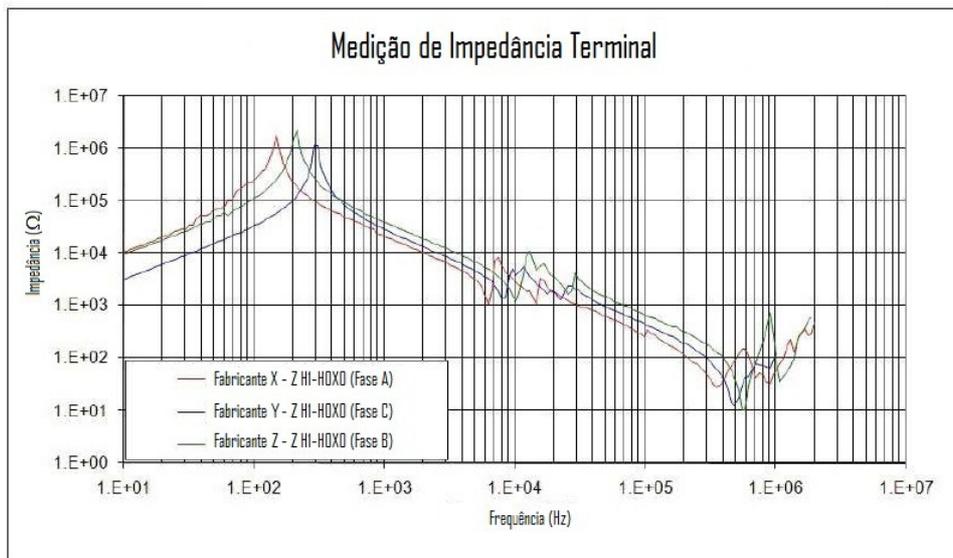


Figura 4.3 – Impedância terminal no lado de alta tensão do autotransformador

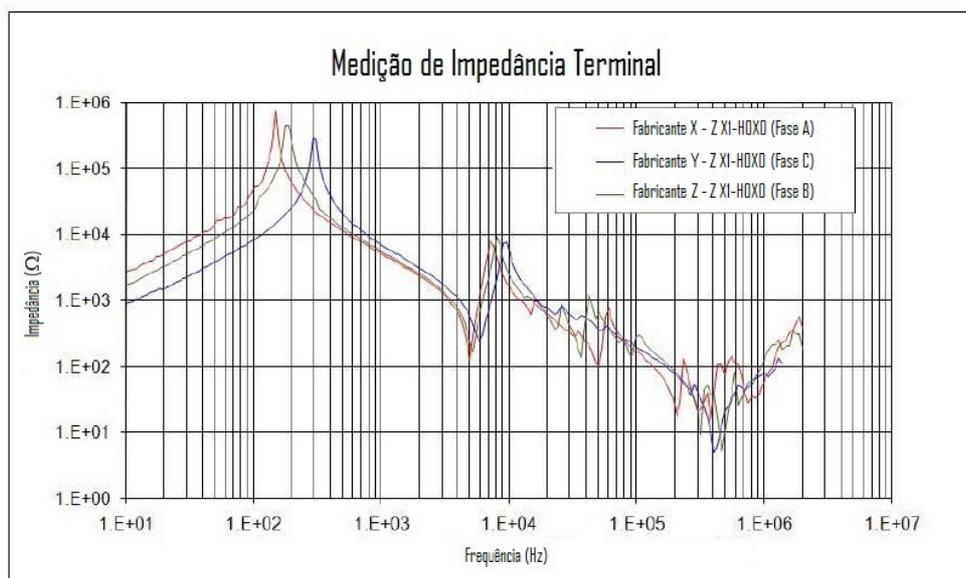


Figura 4.4 – Impedância terminal no lado de baixa tensão do autotransformador

Outro aspecto importante é a disposição da instalação dos autotransformadores na subestação e as distâncias das chaves seccionadoras e disjuntores que são manobradas próximos a eles.

Foram monitorados dois bancos de transformadores dispostos conforme a Figura 4.5. Os autotransformadores estão separados a uma distância de aproximadamente 10 metros entre eles.

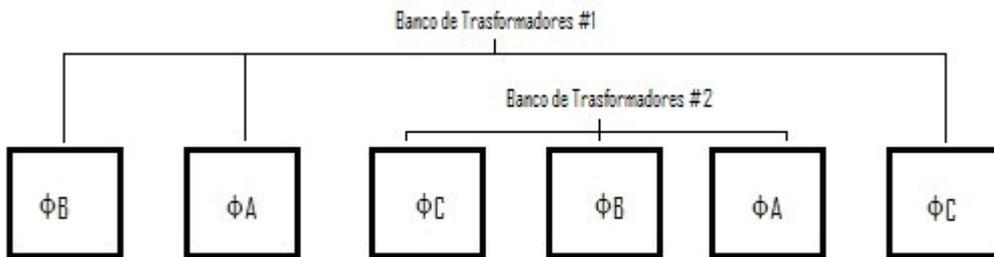


Figura 4.5 – Disposição da instalação dos autotransformadores

A Figura 4.6 apresenta duas curvas de transitórios, no terminal de baixa tensão do autotransformador, conectados as fases A e C e obtidas através de simulação.

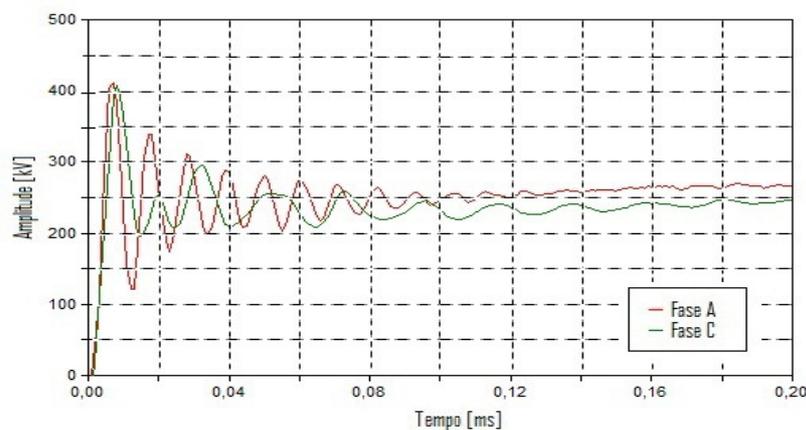


Figura 4.6 - Transitórios no terminal de baixa tensão do autotransformador

Nota-se que existe uma diferença entre as duas curvas, esta é justificada pela diferença de distância do disjuntor manobrado aos autotransformadores das fases A e C.

O autotransformador conectado à fase C é a unidade mais à direita da instalação dos autotransformadores na subestação, em relação a unidade da fase A existe uma distância de 100 metros, aproximadamente. Diante desse fato, as curvas se diferem, pois as ondas que chegam à fase A não são as mesmas que chegam à fase C fazendo com que as formas dos transitórios gerados nas duas fases sejam diferentes.

A Figura 4.7 ilustra uma parte da área modelada da subestação, onde os equipamentos destacados são os que foram manobrados nas simulações que serão apresentadas ao longo do capítulo, sendo considerado um dos autotransformadores do banco de transformadores #1.

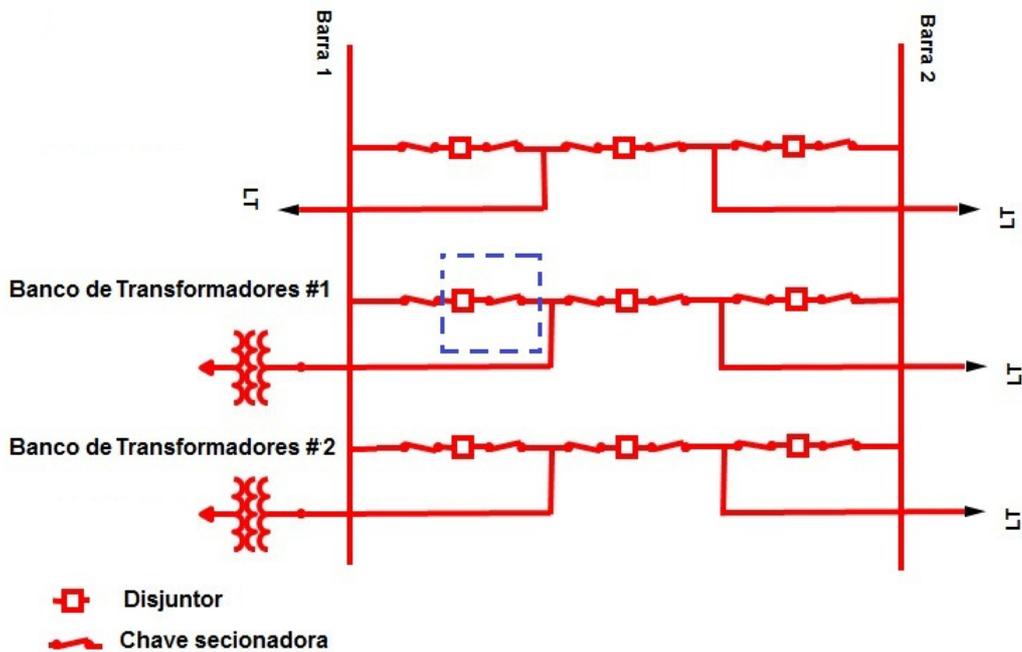


Figura 4.7 - Parte da subestação modelada

A Figura 4.8 mostra um exemplo das distâncias consideradas para a simulação de um dos autotransformadores, utilizando o ATP, ligado a chave seccionadora e disjuntores.

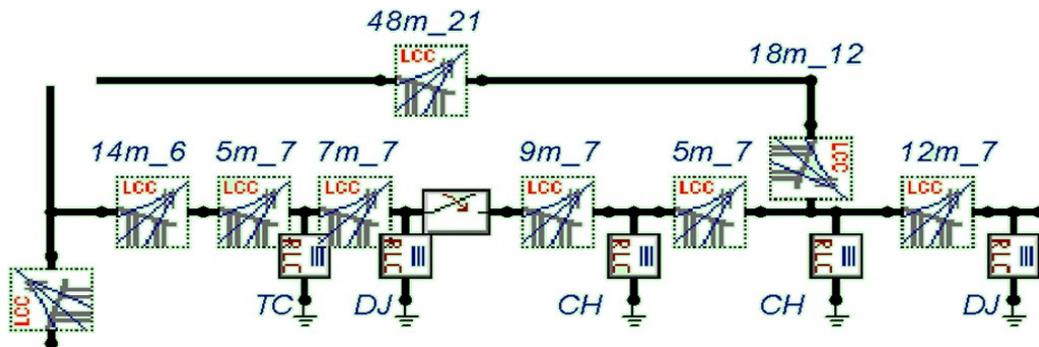


Figura 4.8 - Exemplo de distâncias consideradas para simulação utilizando o ATP

É importante ressaltar que para cada caso existe um tipo de modelagem diferente, portanto estudos devem ser feitos para que se possa concluir sobre os métodos a serem utilizados, pois um tipo de modelagem pode ser o melhor para uma determinada simulação, mas isso não significa que seja o melhor para todas [3].

As simulações apresentadas são compostas pela representação de linhas e barramentos pelo modelo de Jose Marti, e pela representação do autotransformador pelo circuito obtido através da curva de impedância terminal.

## 4.9 Medições

As medições na subestação foram realizadas para que se pudesse investigar a influência de transitórios rápidos gerados por chaveamentos de manobra, como abertura e fechamento de disjuntores e chaves seccionadoras.

Estudos mostram que quando algum sinal de uma determinada frequência atinge um equipamento, que tem essa mesma frequência de ressonância, este pode

ser amplificado de tal forma que ultrapasse os limites especificados de suportabilidade, podendo causar falhas no equipamento atingido [20].

Realizando-se a medição de resposta em frequência é possível avaliar as ressonâncias e atenuações indicando a frequência onde ocorrem. Esta medição é bastante importante no sentido de avaliar possíveis interações entre surtos no sistema e o equipamento, bem como tornar conhecidos os pontos mais sensíveis do autotransformador.

Diante disso, foram realizadas algumas manobras na subestação para que fossem feitas medições de tensão nos terminais do autotransformador, e a partir desses dados seriam possíveis investigações sobre a interação do autotransformador com as manobras submetidas a ele. Portanto, se faz necessário conhecer as frequências de oscilação dos equipamentos e das manobras às quais estes são submetidos. As Figuras, 4.9 e 4.10, apresentam o espectro de resposta em frequência de cada um dos enrolamentos dos autotransformadores localizados no banco de transformadores #1.

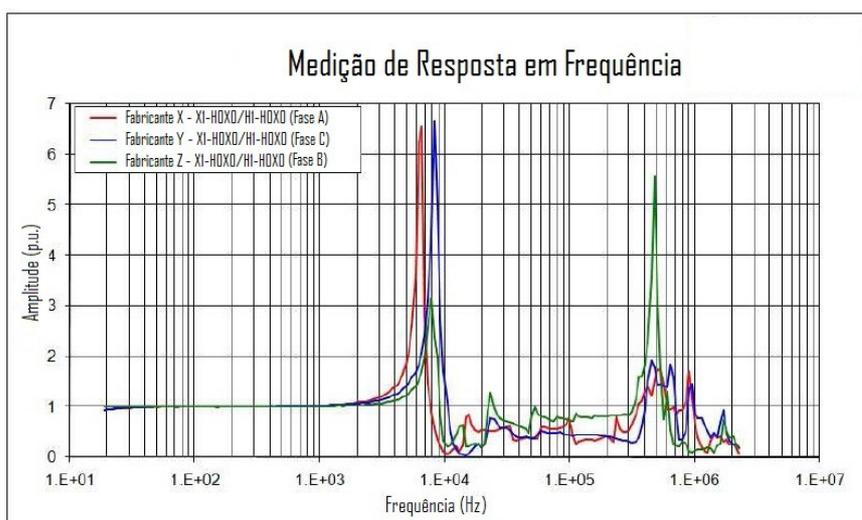


Figura 4.9 - Resposta em frequência dos autotransformadores – aplicação em H1-H0X0

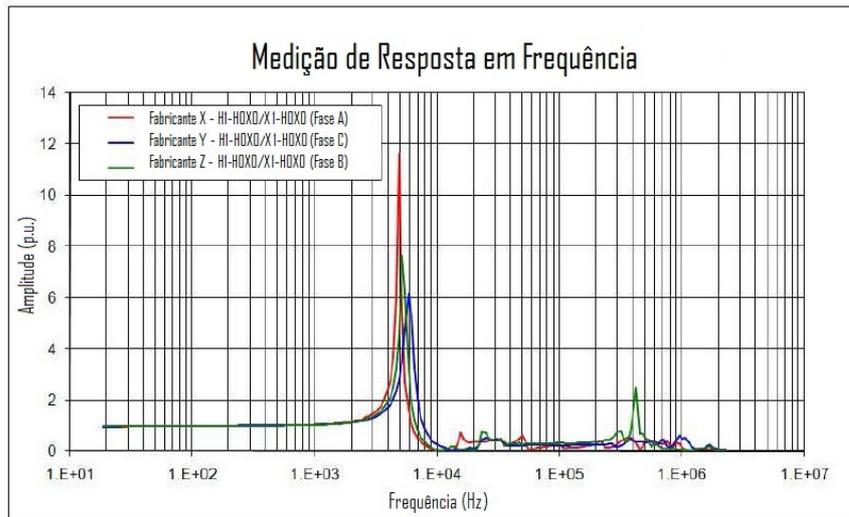


Figura 4.10 - Resposta em frequência dos autotransformadores – aplicação em X1-H0X0

### 4.9.1 Manobra de Disjuntor

Como parte da investigação sobre a interação do autotransformador e as solicitações de alta frequência do sistema elétrico realizou-se chaveamentos dos disjuntores que se encontravam próximo ao autotransformador e que fazem parte dos equipamentos envolvidos na energização e desenergização do banco de transformadores.

Acredita-se que as manobras dos equipamentos mais próximos são as principais causadoras dos efeitos transitórios, pois, o caminho percorrido por estes apresentam menores impedâncias, conseqüentemente são menos atenuados, podendo provocar maiores tensões no equipamento. Da mesma maneira, acredita-se que, devido aos menores trechos de barramentos, as reflexões provocam sinais com frequências mais altas.

Na Figura 4.11 é apresentada a curva de fechamento de um disjuntor no lado de baixa tensão do autotransformador, fase C, sendo esta a medição realizada no campo.

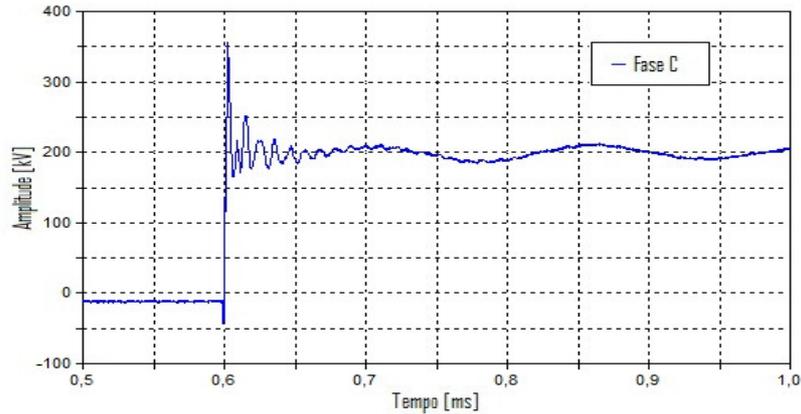


Figura 4.11 - Tensão terminal de baixa tensão do autotransformador - medição

Na Figura 4.12 é apresentada a medição de fechamento de outro disjuntor no lado de alta tensão do autotransformador.

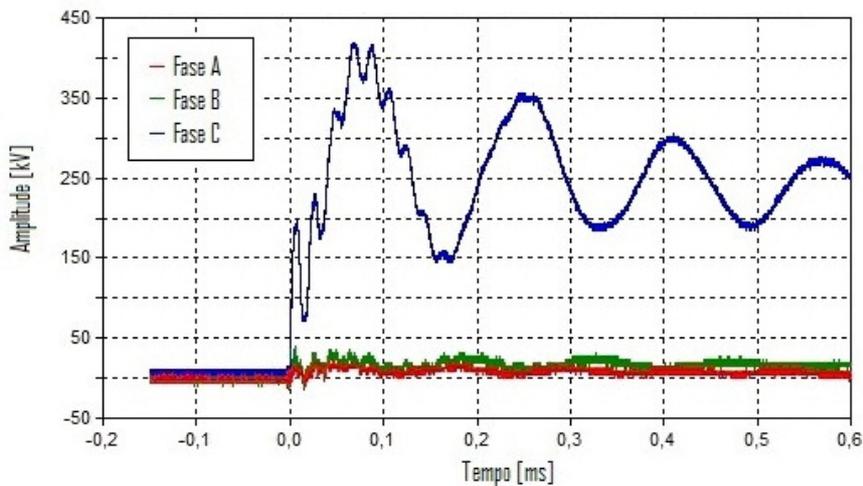


Figura 4.12 - Tensão terminal de alta tensão do autotransformador - medição

## 4.9.2 Manobra de Chave Secionadora

Assim como o disjuntor, realizaram-se manobras com a chave seccionadora que se encontrava próxima ao autotransformador e que faz parte dos equipamentos envolvidos na energização e desenergização do banco de transformadores.

Na Figura 4.13 é apresentada a curva de medição do fechamento de uma chave seccionadora no terminal de baixa tensão do autotransformador.

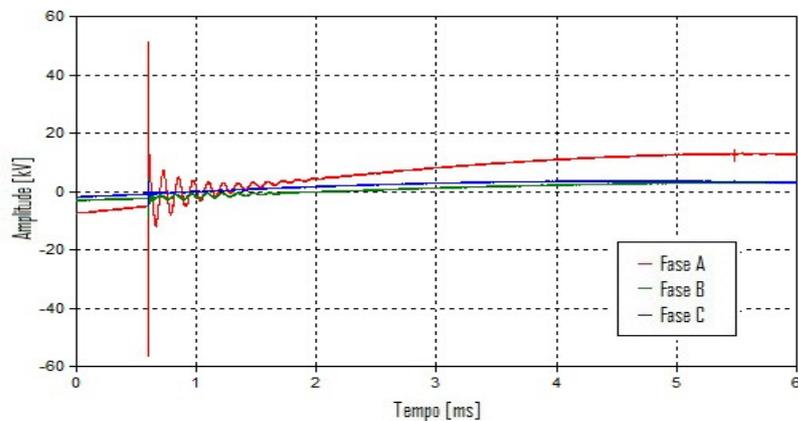


Figura 4.13 - Tensão terminal de baixa tensão do autotransformador - medição

Na Figura 4.14 é apresentada a curva de medição do fechamento de uma chave seccionadora no terminal de alta tensão do autotransformador.

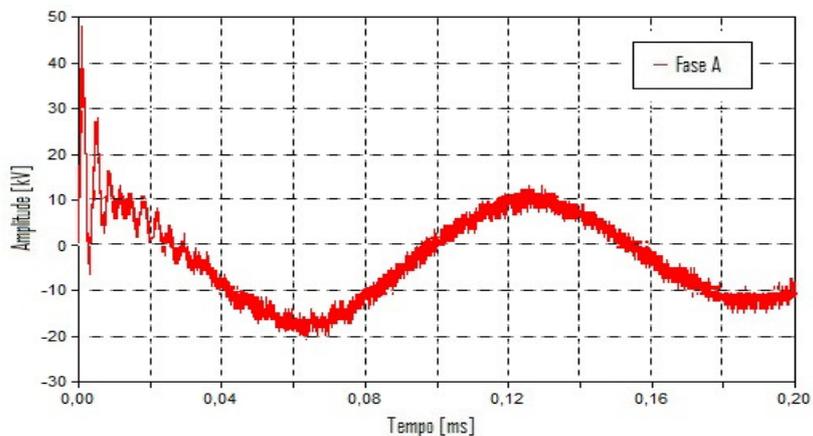


Figura 4.14 - Tensão terminal de alta tensão do autotransformador – medição

Nota-se que existe diferença entre o gráfico da chave seccionadora e do disjuntor, Figuras 4.12 e 4.14. Isso se deve ao fato de que a velocidade de fechamento

dos pólos do disjuntor é muito superior à da chave seccionadora, gerando, praticamente, somente um transitório.

Entretanto as chaves seccionadoras, quando são manobradas, levam um tempo maior para concluir a operação, da ordem de alguns segundos, gerando vários centelhamentos até seu completo fechamento.

Quando os contatos da chave seccionadora se aproximam, o campo elétrico entre eles aumenta, fazendo com que uma descarga aconteça. Essa descarga carrega o trecho não conectado à fonte do sistema diminuindo assim a diferença de potencial entre os contatos e fazendo com que o arco elétrico se extinga. Esse fenômeno ocorre várias vezes até que a distância entre os contatos da chave seccionadora seja suficientemente pequena para que o arco elétrico não se extinga até o seu completo fechamento.

Este fenômeno explica a existência dos vários transitórios gerados pela manobra, ocasionados pelos vários centelhamentos que ocorrem antes que a chave seccionadora seja completamente fechada.

## **4.10 Comparações Entre Medições e Simulações**

Serão apresentadas as comparações entre as medições realizadas no campo e as simulações.

### **4.10.1 Manobra de Disjuntor**

As simulações a serem comparadas com as medições são as compostas pela representação de linhas e barramentos pelo modelo de Jose Marti, pois este foi o que melhor se aproximou da solução, e pela representação do autotransformador pelo

circuito obtido através da curva de impedância terminal, pois este apresenta aproximadamente a mesma resposta em frequência que o autotransformador, gerando assim uma resposta mais precisa.

Nas Figuras 4.15 e 4.16 são apresentadas as curvas de fechamento de um disjuntor no lado de baixa tensão do autotransformador, as mesmas representam a simulação e a medição no campo, respectivamente.

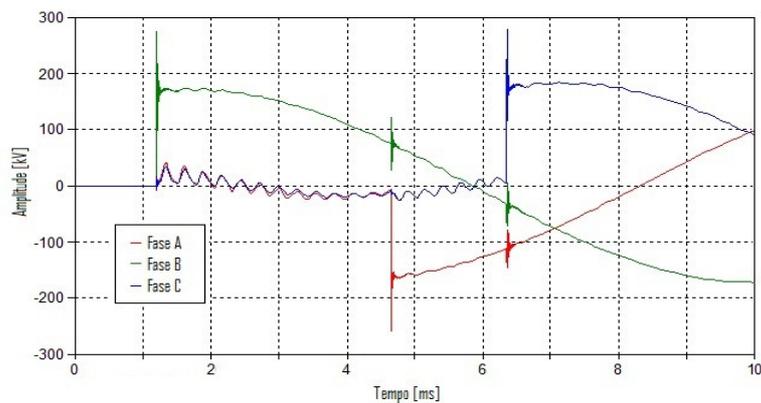


Figura 4.15 - Tensão terminal de baixa tensão do autotransformador - simulação

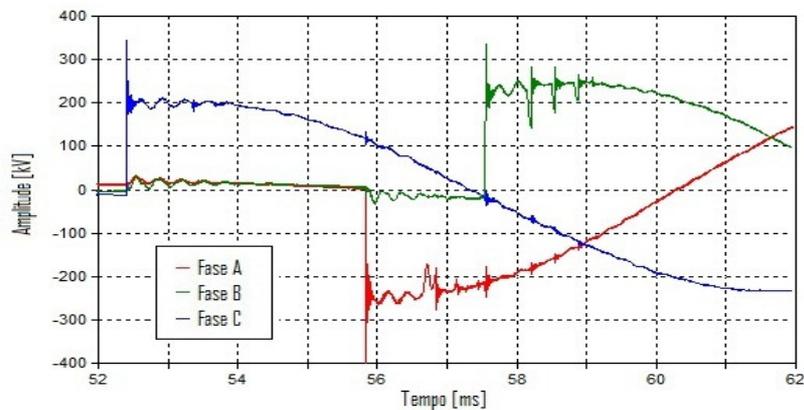


Figura 4.16 - Tensão terminal de baixa tensão do autotransformador - medição

Nas Figuras 4.17 e 4.18 são apresentadas as curvas de fechamento de um disjuntor no lado de alta tensão do autotransformador, as mesmas representam a simulação e a medição no campo, respectivamente.

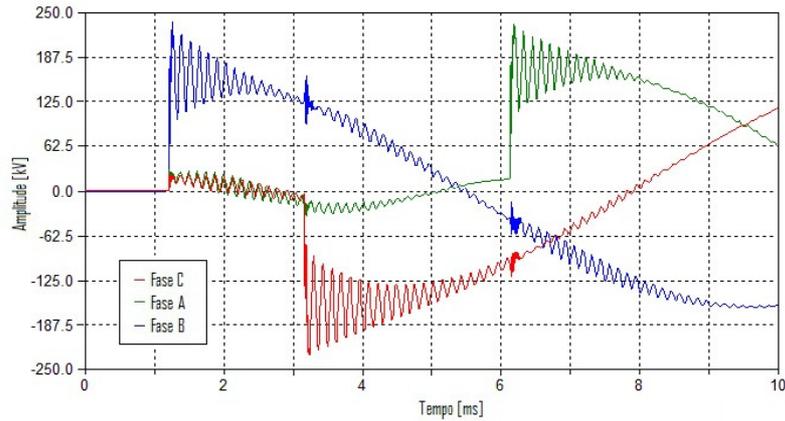


Figura 4.17 - Tensão terminal de alta tensão do autotransformador - simulação

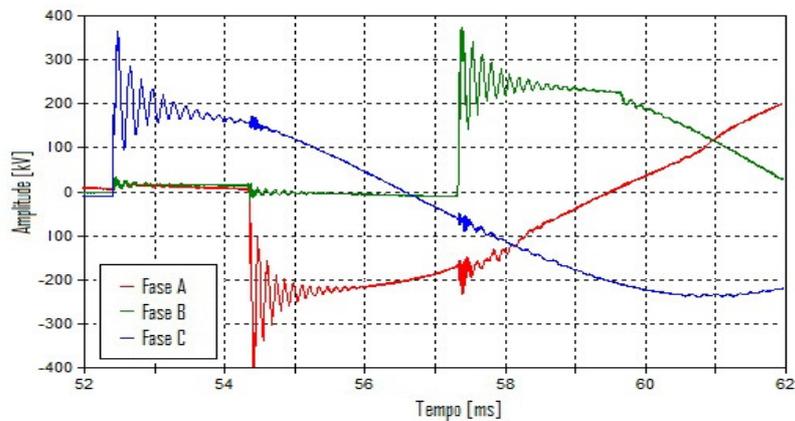


Figura 4.18 - Tensão terminal de alta tensão do autotransformador - medição

Pode-se perceber que as tensões adquiridas pelas simulações são diferentes das tensões medidas, em relação às amplitudes, isso se deve ao fato de que as simulações foram feitas com modelos simplificados, desprezando alguns parâmetros que poderiam atenuar a amplitude da onda [3].

Na figura 4.19 estão apresentadas as duas curvas relativas à simulação da manobra de fechamento do disjuntor e à medição realizada no campo.

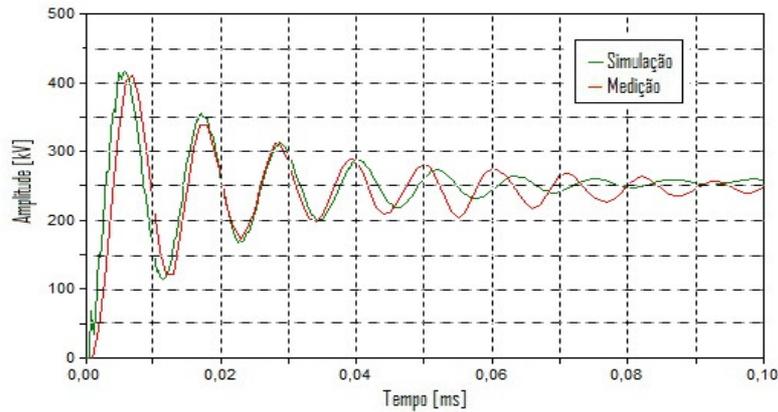


Figura 4.19 - Simulação e medição dos transitórios gerados pela manobra do disjuntor

## 4.10.2 Manobra de Chave Secionadora

Assim como as comparações das manobras do disjuntor, as manobras de chave secionadora foram efetuadas utilizando-se as mesmas bases para simulação.

Para a simulação das chaves foi utilizado o modelo “chave controlada por tempo”, apesar de esse não representar totalmente o que acontece na realidade, pois ao se manobrar uma chave, um tempo considerável é requerido para que esta saia da posição “completamente fechada” e vá para a posição “completamente aberta”. Nesse intervalo, vários centelhamentos ocorrem gerando diversos transitórios no sistema. Por isso, para a simulação da manobra da chave, foi considerado apenas um desses centelhamentos, que pode ser representado, muito simplificada, por um fechamento seguido de uma abertura dessa chave após um tempo relativamente rápido, da ordem de microsegundo [3].

Na Figura 4.20 é apresentada a tensão no terminal do autotransformador, fase A, devido a manobra.

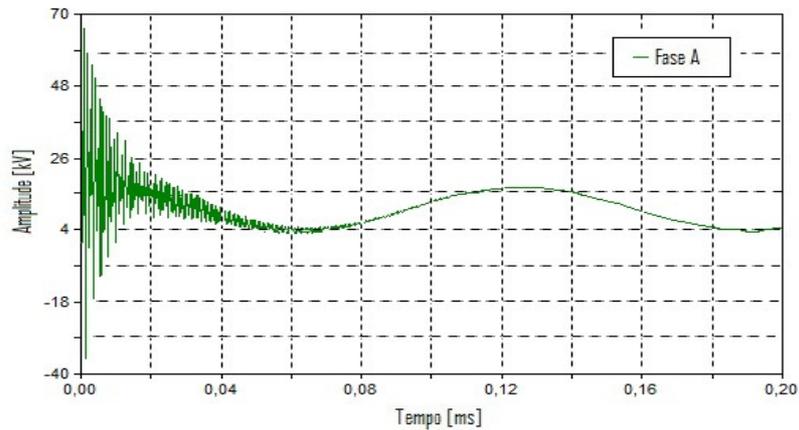


Figura 4.20 - Simulação de um centelhamento gerado pela manobra de uma chave seccionadora

Pode-se perceber que os transitórios gerados pelas manobras de chave seccionadoras apresentam diferentes frequências quando comparados com os gerados pelas manobras de disjuntor. Para uma melhor comparação, no próximo capítulo será realizada uma análise do espectro de frequência referente a esses dois tipos de manobra.

Na Figura 4.21 é apresentado o gráfico onde a simulação e a medição da manobra de chave seccionadora estão plotados para possíveis comparações.

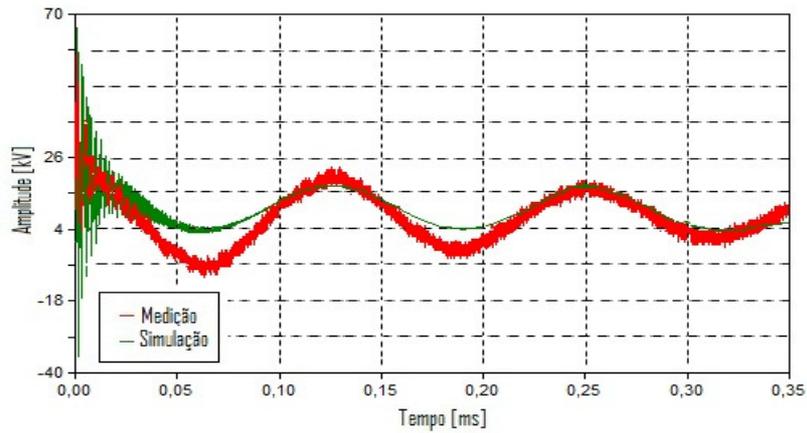


Figura 4.21 - Simulação e medição de um centelhamento gerado pela manobra de uma chave seccionadora

A partir da Figura 4.21 pode-se perceber que não foi obtido um resultado exatamente igual à simulação, o que já era de se esperar, pois além dessa simulação não ter representado todos os componentes do sistema em questão, um centelhamento gerado por uma manobra de chave também é difícil de ser modelado, mas, apesar da simplicidade do modelo, o resultado obtido apresentou grande semelhança à medição.

# Capítulo 5

## Análise, Identificação e Classificação

A partir das simulações e medições de transitórios e do levantamento da caracterização no domínio da frequência de todos os instrumentos, a avaliação deve ser complementada utilizando-se os resultados da medição de transitórios aplicando-se a transformada rápida de Fourier (FFT – Fast Fourier Transform) a estes resultados, obtendo-se assim o espectro de frequências envolvidas na medição de transitórios de tensão.

### 5.1 Análise dos Resultados Utilizando FFT

A Transformada de Fourier (FT – Fourier Transform) é muito utilizada atualmente na área de processamento de imagens, e tem esse nome em homenagem ao físico francês Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830). A FT decompõe as funções analisadas em senos e cossenos, e faz com que sua imagem no domínio da frequência tenha para cada ponto no eixo das abscissas uma frequência diferente [21].

Para que a FT possa converter um sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência, é necessário que este sinal seja contínuo, mas como usualmente os sinais a serem processados apresentam descontinuidades é necessário que se utilize a versão discreta da FT, que, mais tarde, foi chamada de Transformada Rápida de Fourier, sendo esta muito utilizada atualmente [22].

Por isso, para calcular os espectros de frequências das tensões transitórias obtidas no terminal das buchas dos autotransformadores foi utilizada a Transformada Rápida de Fourier (FFT). As frequências analisadas estão limitadas ao espectro de frequências determinado pelo intervalo de integração ( $\Delta t$ ) e pela janela de tempo de

amostragem ( $T_{max}$ ). A frequência máxima do espectro é igual a  $1/(2.\Delta t)$ , com espaçamento entre frequências igual a  $1/T_{max}$ .

A densidade espectral está associada à energia do sinal e, portanto, o tempo de observação (ou duração) das sobretensões transitórias é um fator que impacta diretamente nos resultados no domínio da frequência. Por outro lado, uma vez terminado o transitório, o valor da densidade espectral nas frequências mais altas permanece inalterado [10].

Nas Figuras 5.1 e 5.2 são apresentados os gráficos de uma medição de manobra do fechamento de uma chave seccionadora e o correspondente espectro de frequências das tensões transitórias utilizando a Transformada Rápida de Fourier.

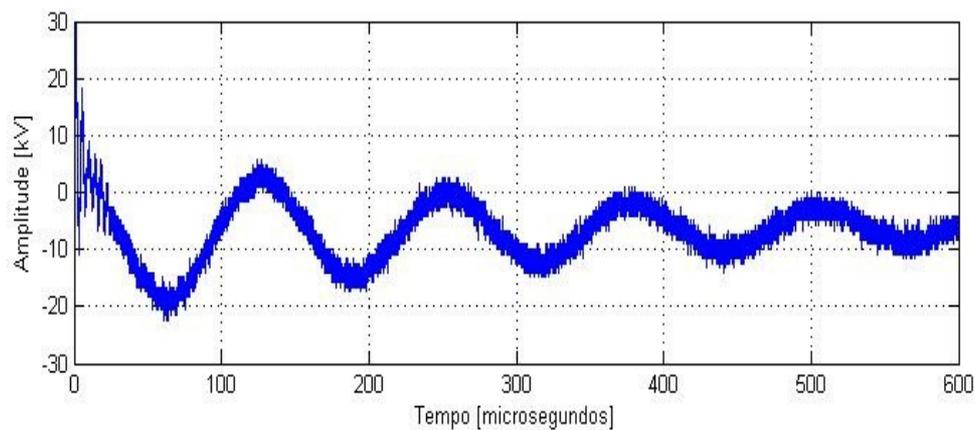


Figura 5.1 – Medição de manobra do fechamento de uma chave seccionadora

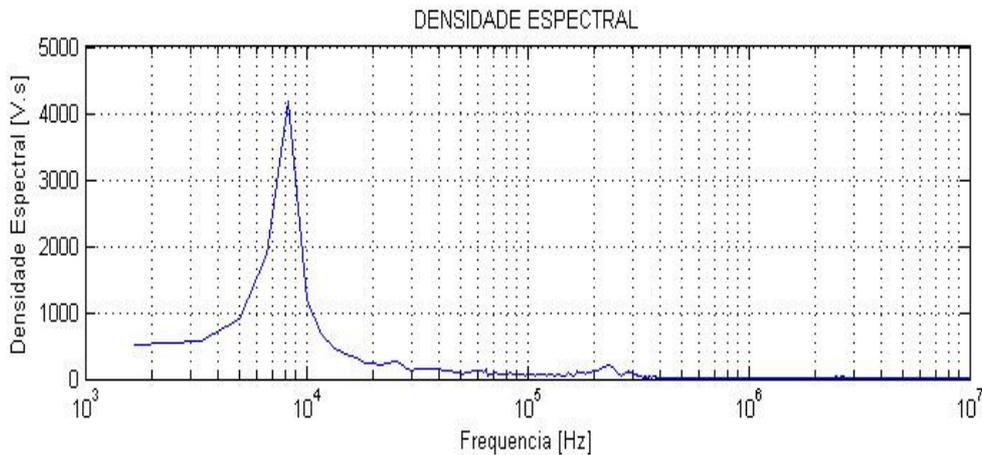


Figura 5.2 – FFT da manobra de fechamento de uma chave seccionadora

## 5.2 Análise Gráfica no Domínio da Frequência

Neste trabalho foram realizadas duas abordagens de análise das medições. Uma delas foi realizada superpondo informações de caracterização no domínio da frequência dos autotransformadores e as aplicações de FFT nas medições de manobras. A outra proposta foi realizada considerando a avaliação de risco envolvido nestas manobras por meio de um fator de severidade no domínio da frequência (FSDF), proposto pelo CIGRÉ através do grupo de estudos JWG A2/C4-03 [10].

### 5.2.1 Medição e Caracterização dos Autotrafos

A superposição das informações de caracterização na frequência dos autotransformadores e as aplicações de FFT nas medições de manobras permitem avaliar as coincidências dos eventos transitórios e regiões de ressonâncias dos autotransformadores.

Entretanto, para realizar a superposição é necessária a normalização das medições de manobra e da caracterização dos autotransformadores para indicar uma

mesma faixa de valores das informações evitando assim que uma dimensão se sobreponha em relação à outra.

### 5.2.1.1 Normalização das Manobras

Além das medições de transitórios de tensão foram realizadas medições da tensão do sistema aplicando-se nas mesmas a transformada rápida de Fourier, conforme ilustrado nas Figuras 5.3 e 5.4.

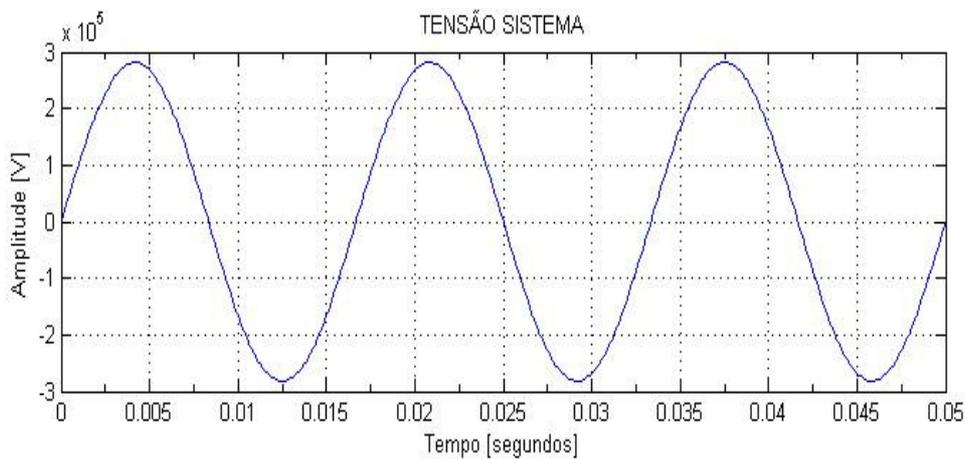


Figura 5.3 – Tensão do sistema – lado de baixa tensão do autotransformador

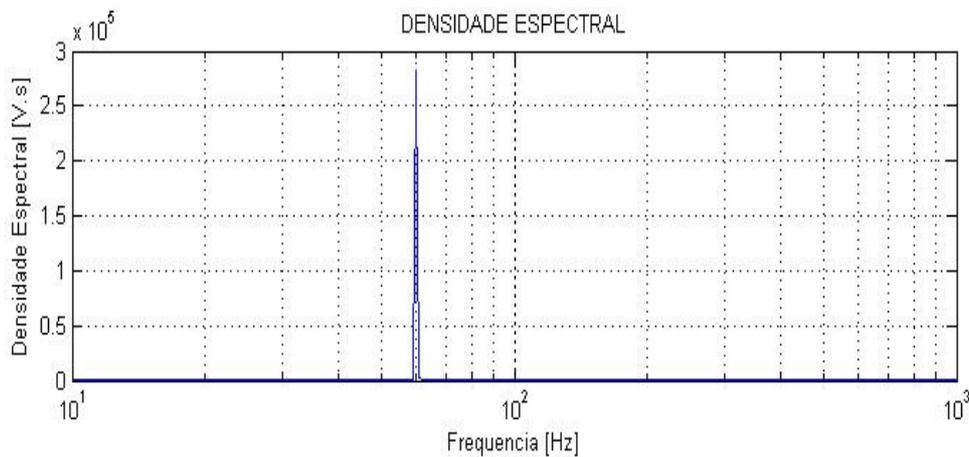


Figura 5.4 – FFT da tensão do sistema – lado de baixa tensão do autotransformador

Uma vez conhecida a curva de tensão do sistema e sua transformada realizou-se a normalização das medições de transitórios resultando assim um espectro da medição de transitórios de tensão normalizado.

A normalização foi realizada tendo como base a relação entre o módulo da FFT do sinal de tensão medido e o módulo da FFT do sinal de tensão de do sistema (no eixo das ordenadas), em função da frequência (no eixo das abscissas).

Na Figura 5.5 mostra-se o espectro na frequência normalizado da medição de manobra do fechamento da chave seccionadora apresentado na Figura 5.2.

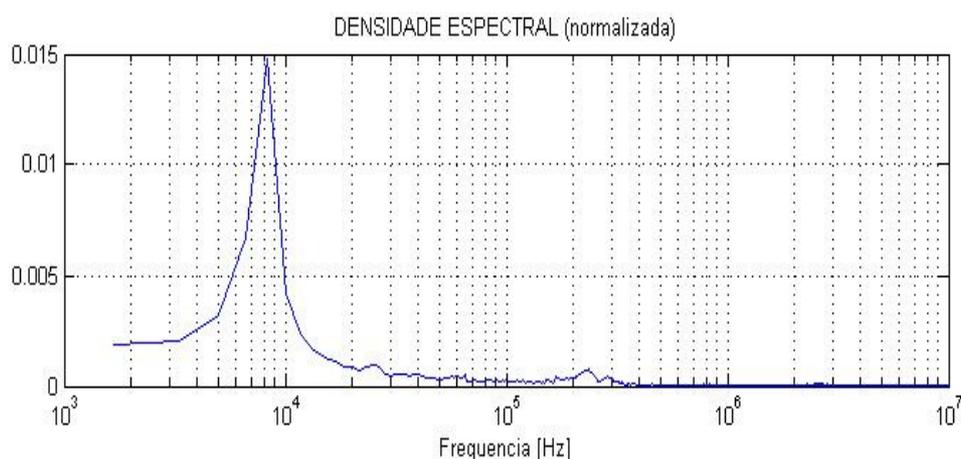


Figura 5.5 – FFT Normalizada da medição de manobra do fechamento da chave seccionadora apresentada na Figura 5.2

Entretanto, conforme descrito no capítulo 3, as curvas de medição são corrigidas segundo a característica de cada um dos conjuntos de medição associados a cada um dos autotransformadores. Esta correção se faz necessária devida à característica intrínseca dos conjuntos de medições utilizados que permitem a medição de transitórios de tensão.

A correção foi realizada tendo como base a multiplicação entre o espectro na frequência de medição normalizado e o espectro na frequência da correção para a medição (no eixo das ordenadas), em função da frequência (no eixo das abscissas).

Na Figura 5.6 é apresentado o gráfico de correção para a medição da manobra de fechamento da chave seccionadora apresentada na Figura 5.1.

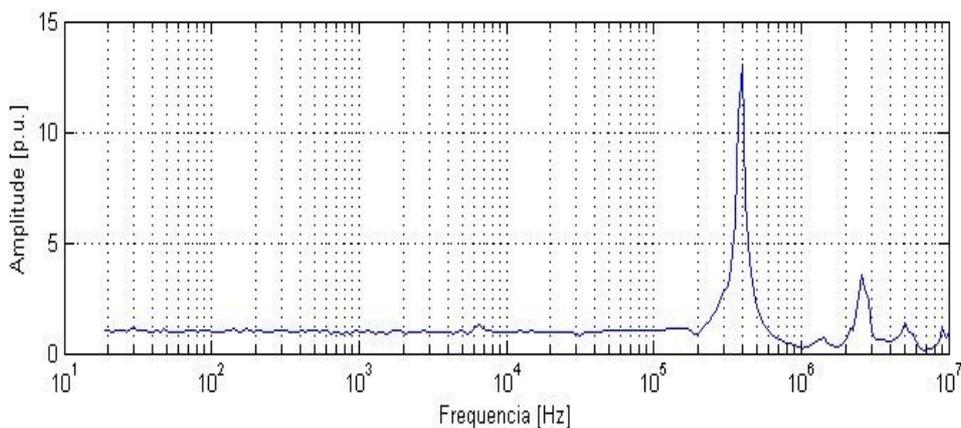


Figura 5.6 – Correção para a medição da manobra de fechamento da chave seccionadora apresentada na Figura 5.1

Na Figura 5.7 é apresentado o espectro de frequência, normalizado e corrigido, da medição de manobra do fechamento da chave seccionadora apresentado na Figura 5.1.

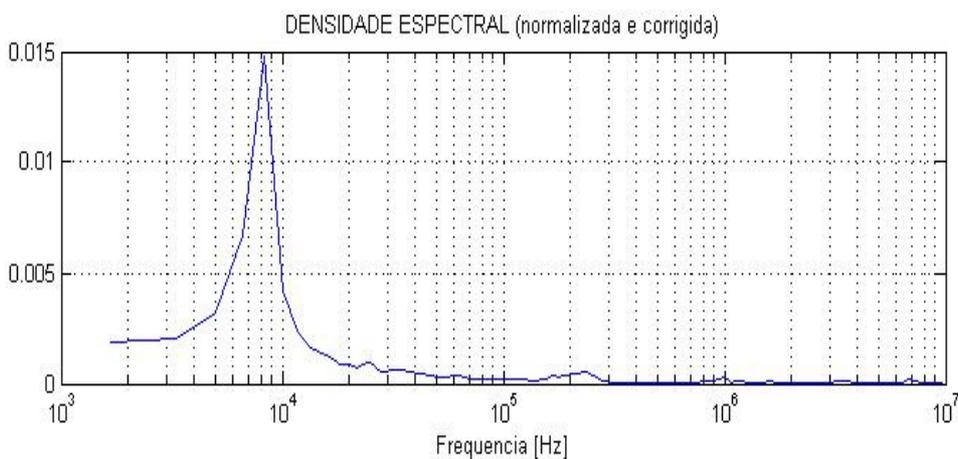


Figura 5.7 – FFT da manobra de fechamento de uma chave seccionadora, corrigida e normalizada

## 5.2.1.2 Medição x Caracterização

Foram identificadas as regiões de ressonância de cada autotransformador e nas Tabelas 5.1 e 5.2 são apresentadas as informações de faixas de frequências e ressonâncias medidas de cada autotransformador, no lado de baixa e alta tensão, respectivamente.

Tabela 5.1 – Frequências e ressonâncias dos autotransformadores - lado de baixa tensão.

Banco de Transformadores	Transformador Fabricante	Fase	Faixas de Frequência (kHz) Lado Baixa Tensão	Fator de Amplificação	
				Fator (pu)	Frequência (kHz)
#1	#X	A	3,0 - 7,7	6,8	6,2
	#Y	B	3,2 - 6,5	7,7	5,2
			400 - 440	2,7	423
#Z	C	3,0 - 6,2	10,2	4,9	
#2	#U	A	2,9 - 8,3	9,3	6,5
	#V	B	3,3 - 10,4	7,5	8,25
	#W	C	2,6 - 5,8	11,8	4,9
			330 - 378	2,8	356

Tabela 5.2 – Frequências e ressonâncias dos autotransformadores - lado de alta tensão.

Banco de Transformadores	Transformador Fabricante	Fase	Faixas de Frequência (kHz) Lado Alta Tensão	Fator de Amplificação	
				Fator (pu)	Frequência (kHz)
#1	#X	A	6,5 - 11	6,6	9,2
			420 - 712	2,0	475
			898 - 1000	1,8	951
	#Y	B	4,3 - 9,2	3,1	7,8
			335 - 630	5,6	475
	#Z	C	4,6 - 8,2	4,0	6,5
			355 - 670	2,3	503
800 - 1000			1,6	952	
#2	#U	A	3,0 - 9,8	8,4	7,4
			423 - 755	4,5	448
			755 - 1200	3,2	1130
	#V	B	5,2 - 15,6	7,4	11,7
			565 - 1200	2,5	712
	#W	C	2,7 - 7,8	7,3	6,6
			317 - 500	4,4	423

Nas Figuras 5.8 e 5.9 são apresentadas as análises no domínio da frequência, através de um gráfico, superpondo a caracterização de um dos autotransformadores do banco, e uma manobra de fechamento de um dos disjuntores, no lado de baixa, que interagem com o lado de baixa e alta do autotransformador, respectivamente.

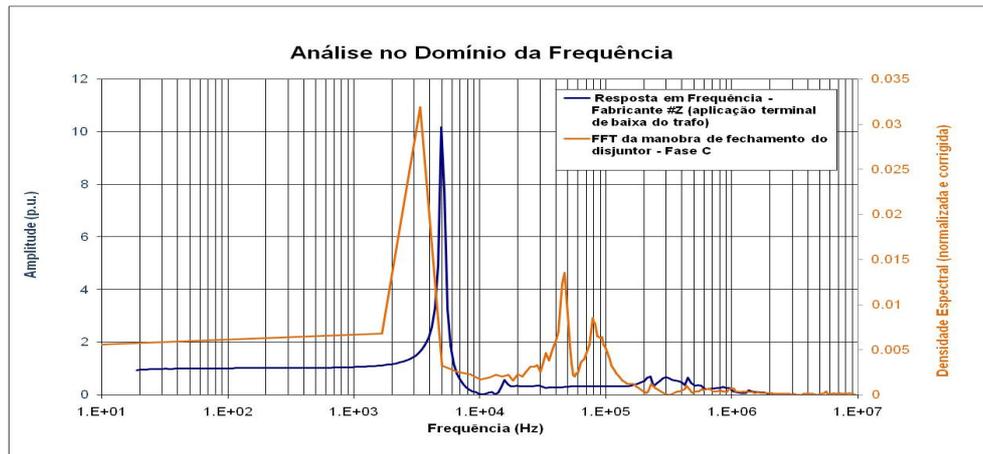


Figura 5.8 – Análise gráfica da resposta em frequência no lado de baixa tensão de um autotransformador e a medição de uma manobra de fechamento de um disjuntor no lado de baixa tensão

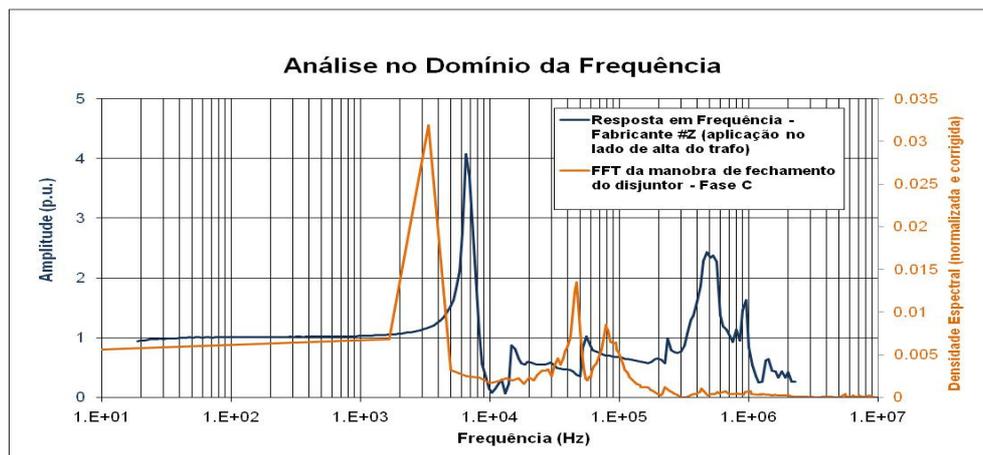


Figura 5.9 – Análise gráfica da resposta em frequência no lado de alta tensão de um autotransformador e a medição de uma manobra de fechamento de um disjuntor no lado de baixa tensão

Nas Figuras 5.10 e 5.11 são apresentadas as análises no domínio da frequência, através de um gráfico, superpondo a caracterização de um outro autotransformador e uma manobra de fechamento de uma das chaves seccionadoras, no lado de alta, que interagem com o lado de baixa e alta do autotransformador, respectivamente.

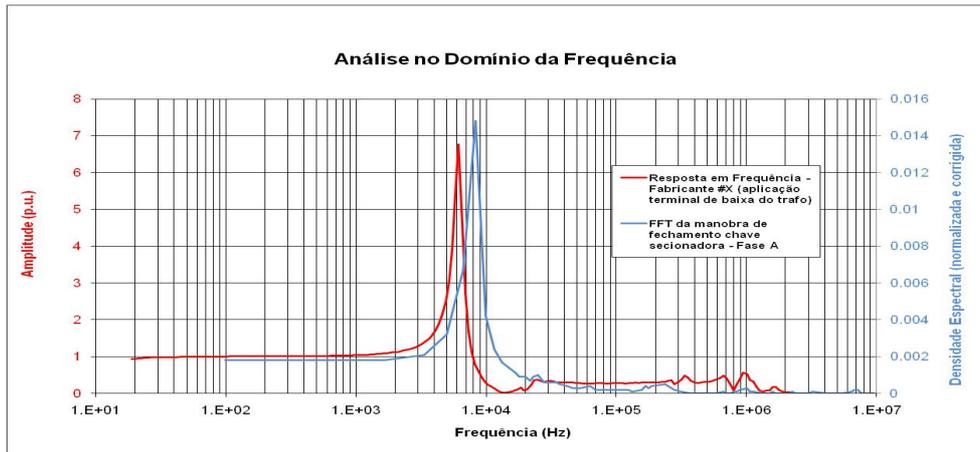


Figura 5.10 – Análise gráfica da resposta em frequência no lado de baixa tensão de um autotransformador e a medição de uma manobra de fechamento de uma chave seccionadora no lado de alta tensão

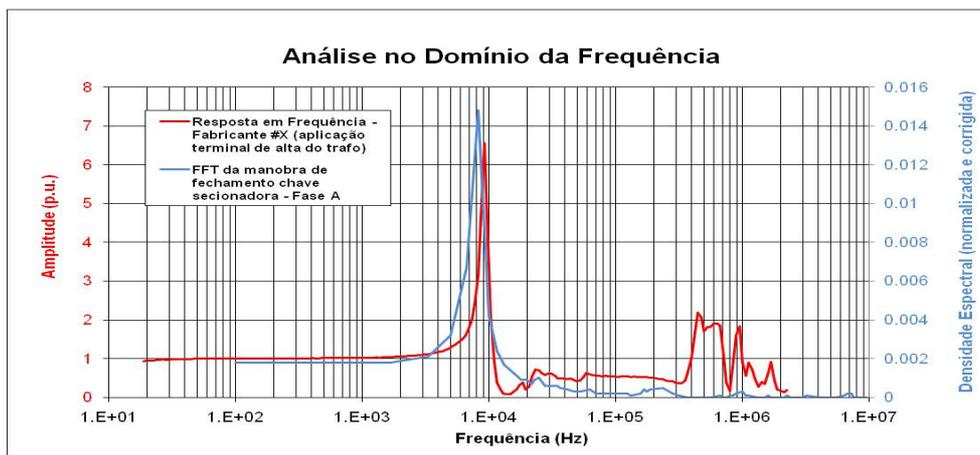


Figura 5.11 – Análise gráfica da resposta em frequência no lado de alta tensão de um autotransformador e a medição de uma manobra de fechamento de uma chave seccionadora no lado de alta tensão

## 5.2.2 Fator de Severidade

O CIGRÉ através do grupo de estudos JWG A2/C4-03 elaborou uma brochura técnica aonde consolida alguns trabalhos realizados pelo grupo, permitindo concluir que os valores máximos das sobretensões, embora muito importantes, não são os únicos fatores de risco para o transformador. Também devem ser levados em conta os efeitos do espectro de frequências da onda de tensão transitória resultante da excitação oscilatória envolvendo a interação de cada equipamento com o sistema [10].

Estes estudos tiveram como objetivo a determinação da magnitude e faixa de frequência típicas dos transitórios de tensão nos terminais dos transformadores produzidos pelas manobras de disjuntores ou chaves seccionadoras e aplicação de curtos-circuitos próximos a subestação. Com isso o trabalho propõe uma metodologia para avaliar o risco envolvido nestas manobras por meio de um fator de severidade no domínio da frequência (FSDF), a partir da comparação do espectro de frequência da tensão simulada nos terminais do transformador com o espectro de frequência das ondas de impulso de ensaios do próprio transformador [10].

Entretanto, o que será apresentado é uma avaliação do risco envolvido nas manobras medidas por meio do FSDF a partir da comparação do espectro de frequência da tensão medida no terminal da bucha do autotransformador, conforme apresentado no capítulo 3, com o espectro de frequência das ondas de impulso de ensaios do próprio autotransformador.

### 5.2.2.1 Envoltórias da Densidade Espectral

Todo transformador antes de ser energizado e colocado em operação é submetido à ensaios através de formas de onda padronizadas, pré-determinados por normas, tais como, aplicação de onda plena (1,2/50  $\mu$ s), do impulso de manobra

(100/1000  $\mu\text{s}$ ) e das ondas cortadas na cauda para diferentes tempos de corte ( $\tau$ ). Estas formas de onda padronizadas são utilizadas no dimensionamento da isolamento do autotransformador e são aplicadas nos ensaios dielétricos em laboratório.

A Figura 5.12 ilustra, como exemplo, as formas de onda cortada na cauda. Na Figura 5.13, apresentam-se, como exemplo, os espectros de frequências da onda plena (1,2/50  $\mu\text{s}$ ), do impulso de manobra (100/1000  $\mu\text{s}$ ) e das ondas cortadas na cauda para diferentes tempos de corte ( $\tau$ ), considerando tensões de ensaio de 1550 kV e 1705 kV [10].

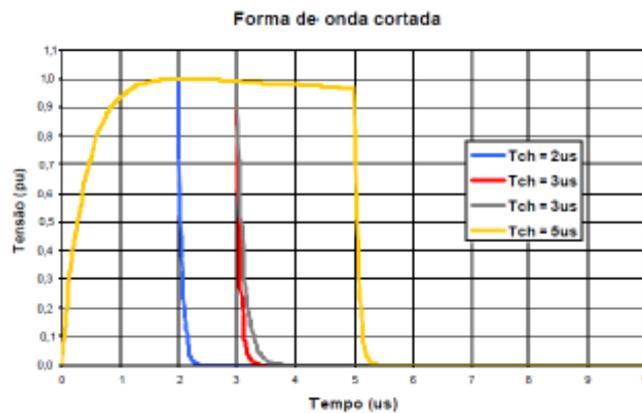


Figura 5.12 – Formas de onda cortada na cauda [10]

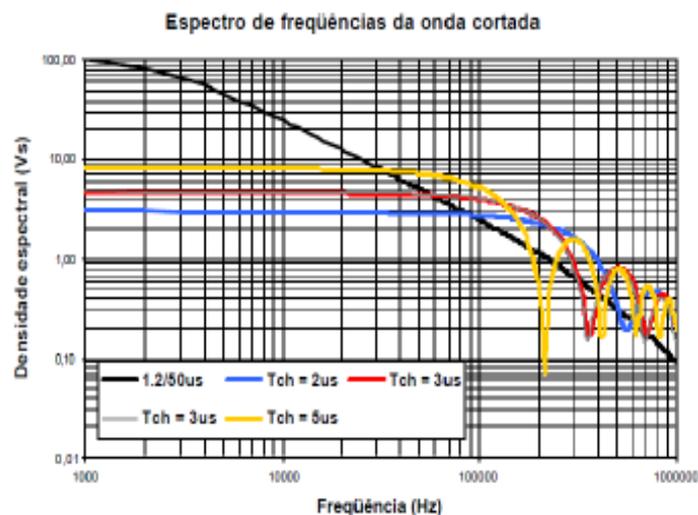


Figura 5.13 – Espectros de frequências da onda cortada na cauda [10]

A partir do cálculo do espectro de frequências de cada forma de onda padronizada, é possível definir uma envoltória que corresponde aos maiores valores de densidade espectral para cada valor de frequência. A Figura 5.14 apresenta, como exemplo, as curvas de densidade espectral para cada forma de onda padronizada e também para a envoltória definida pela onda cortada com tempos de corte variando de 2,0 a 6,0  $\mu\text{s}$  [10].

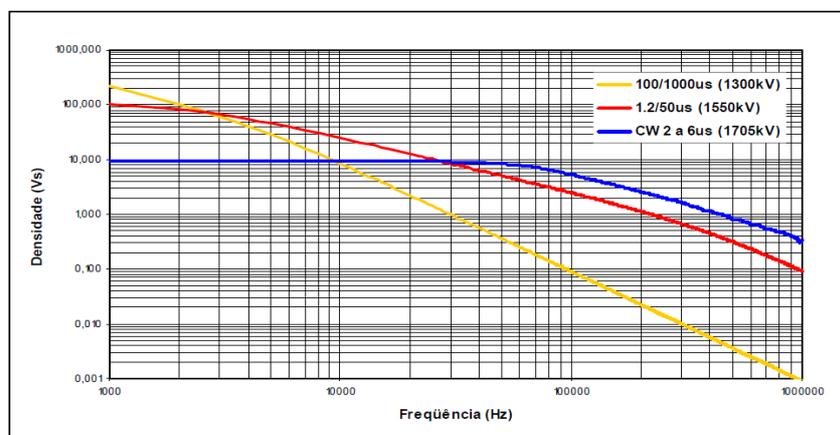


Figura 5.14 – Envoltórias definidas pelas formas de onda padronizadas [10]

Com o exemplo, a envoltória definida pelas formas de onda padronizadas é apresentada na Figura 5.15 e é composta pelas formas de ondas padronizadas (Impulso de manobra: IM = 1300 kV; Impulso atmosférico com forma de onda plena: IA = 1550 kV; e Impulso atmosférico com forma de onda cortada na cauda: IAC = 1705 kV) e a envoltória definida pelo ensaio de impulso atmosférico com corte na frente de onda (IAF = 2015 kV) com tempos de corte variando de 0,5 a 1,0  $\mu\text{s}$ .

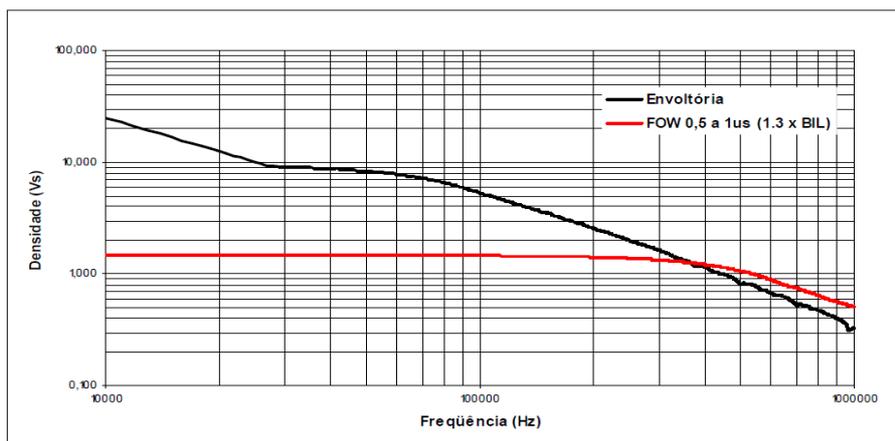


Figura 5.15 – Envoltórias definidas pelas formas de onda padronizadas e pela frente de onda [10]

### 5.2.2.2 Medição x Envoltória

Nas análises das medições realizadas foi utilizado um tempo máximo da janela igual a  $100 \mu\text{s}$  com um intervalo ( $\Delta t$ ) de  $0,01 \mu\text{s}$ , de tal forma que o espectro de frequências calculado esteja limitado a  $50 \text{ MHz}$  com um espaçamento entre frequências de  $10 \text{ kHz}$ . Como os ensaios nos autotransformadores estavam limitados a  $2 \text{ MHz}$  as análises se limitaram a esta frequência máxima.

Com o propósito de estabelecer-se um novo critério que leve em conta o espectro de frequências dos transitórios presentes na SE, foi definido o Fator de Severidade no Domínio da Frequência (FSDF) como a razão entre a densidade espectral da tensão transitória calculada ( $V_s$ ) e a densidade espectral da envoltória definida pelas formas de onda padronizadas [10]. A Figura 5.16 ilustra a proposta do critério fazendo alusão à suportabilidade do transformador.

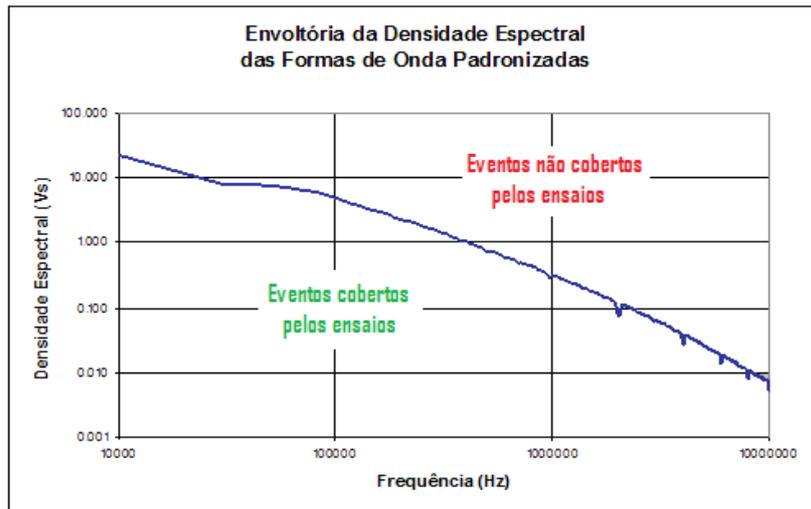


Figura 5.16 – Suportabilidade do transformador - envoltória

Nas Figuras 5.17 e 5.18 são apresentadas a curva no tempo do transitório de tensão do fechamento de um disjuntor (o mesmo das curvas 5.8 e 5.9) e a razão entre a densidade espectral da tensão transitória do fechamento do disjuntor e a densidade espectral da envoltória definida pelas formas de onda padronizadas, respectivamente.

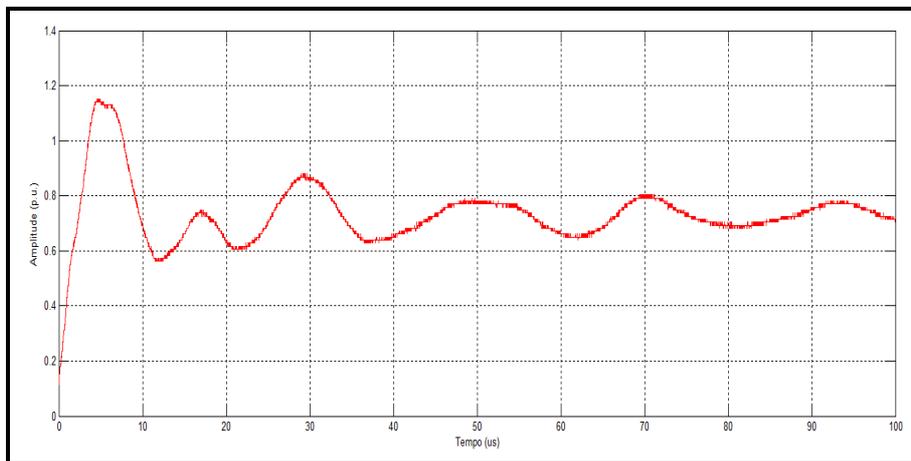


Figura 5.17 – Transitório de tensão da manobra de fechamento do disjuntor

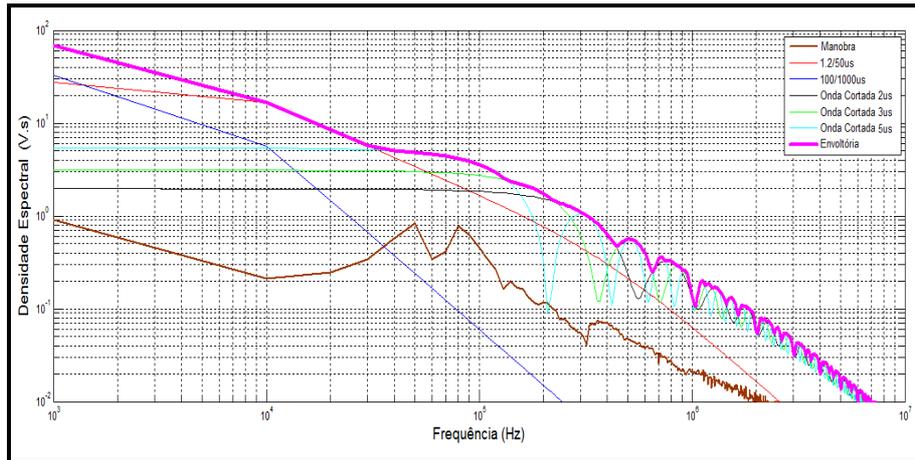


Figura 5.18 – Espectro de tensão transitória da manobra de fechamento do disjuntor

Nas Figuras 5.19 e 5.20 são apresentadas a curva no tempo do transitório de tensão do fechamento de uma chave seccionadora (a mesmo das curvas 5.10 e 5.11) e a razão entre a densidade espectral da tensão transitória do fechamento da chave seccionadora e a densidade espectral da envoltória definida pelas formas de onda padronizadas, respectivamente.

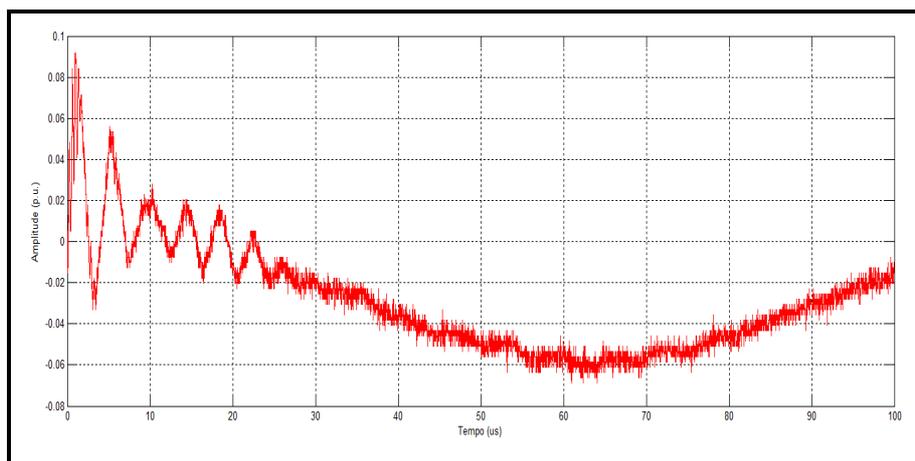


Figura 5.19 – Transitório de tensão da manobra de fechamento da chave seccionadora

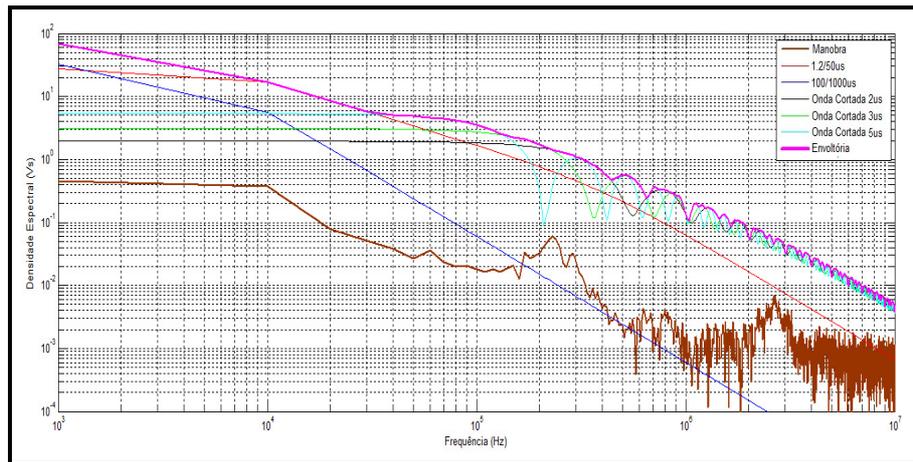


Figura 5.20 – Espectro de tensão transitória da manobra de fechamento da chave seccionadora

### 5.3 Identificação das Manobras

Sendo as ocorrências de transitórios de tensão mais frequentes as produzidas pelas manobras de disjuntores ou chaves seccionadoras, se fez necessária a identificação das excitações oriundas de manobras na subestação que atuam nos autotransformadores.

Para tal, foram definidas previamente com a operação, quais manobras deveriam ser realizadas e em que condições. A Tabela 5.5 mostra, como exemplo, uma das tabelas de manobra usada.

Tabela 5.5 – Tabela de manobras

Pasta01					
Arq. (Tek)	Tipo de Manobra	Equipamento	Fase	Data	Horário
Tek 000	Fechamento	Sec. S1	A	Fevereiro/2011	14:02h
001			B		
002			C		
003		A	14:12h		
004		B			
005		C			
006		A	14:42h		
007		B			
008		C			
009	A	14:46h			
010	B				
011	C				
012	A	14:50h			
013	B				
014	C				
015	B	Sec. S4	A		14:59h
016	A				
017	C				
018	A				
019	B		15:02h		
020	C				
021	A				
022	B		15:04h		
023	C				
024	A				
025	B	15:14h			
026	C				
027	A				
028	B	15:13h			
029	C				
030	A				
031	B	15:21h			
032	C				
033	A				
034	B	15:23h			
035	C				
036	A				
037	B	15:40h			
038	C				
039	C				
040	B	15:44h			
041	A				
042	C				
043	B	16:05h			
044	A				
045	C				

### 5.3.1 Manobras de Chave Secionadora

Além da identificação de cada arquivo, conforme exemplificado na Tabela 5.5, algumas características na medição da manobra de chaves seccionadoras podem ser observadas, conforme ilustrado nas Figuras 5.15 e 5.16.

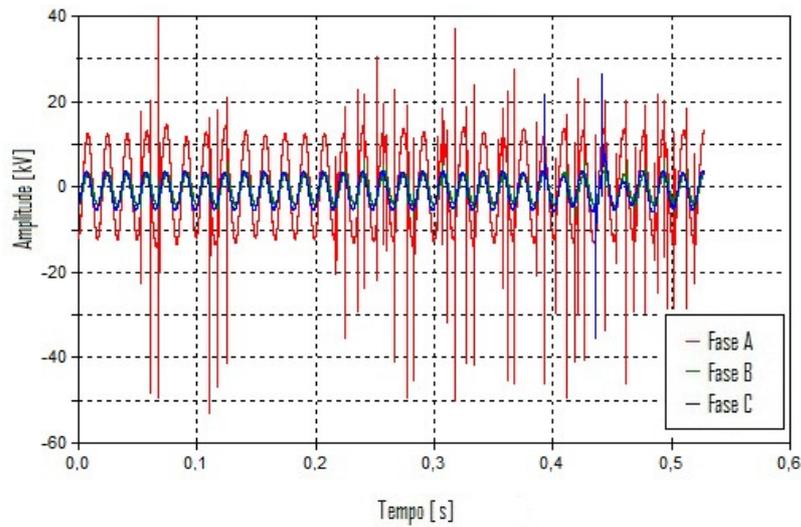


Figura 5.15 – Manobra de fechamento - chave seccionadora

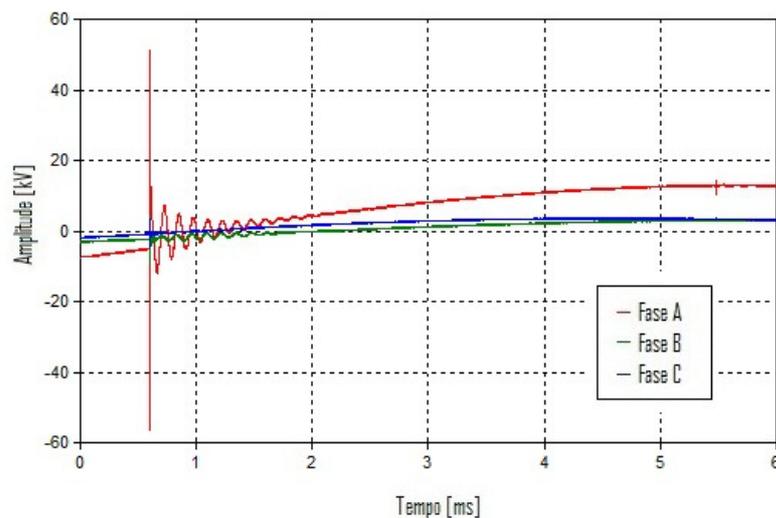


Figura 5.16 – Um dos reacendimentos da manobra de fechamento da chave seccionadora

A identificação da manobra é possível porque durante a operação (manobras de abertura ou de fechamento) de chaves seccionadoras um elevado número de reacendimentos acontece através dos seus contatos, devido a rápida variação de tensão e a lenta variação de distância entre os mesmos. Estes reacendimentos (ou descargas elétricas entre contatos) provocam o aparecimento de um grande número de transitórios de alta frequência.

A partir das medições foram identificadas as principais componentes do transitório gerado pelos pulsos e energia emitidos na direção do transformador a cada vez que se rompe o dielétrico durante uma manobra quer seja de fechamento quer seja de abertura da chave seccionadora. Estes pulsos ocorrem em uma sucessão de arcos elétricos e em número elevado durante a manobra, conforme aproximação ou distanciamento das lâminas de contato.

Na Figura 5.17 são apresentadas as principais regiões de frequência dos transitórios de tensão gerados por cada manobra de abertura de chave seccionadora do banco de transformadores #1, no lado de baixa e alta tensão dos autotransformadores, considerando as medições de transitórios de tensão realizadas.

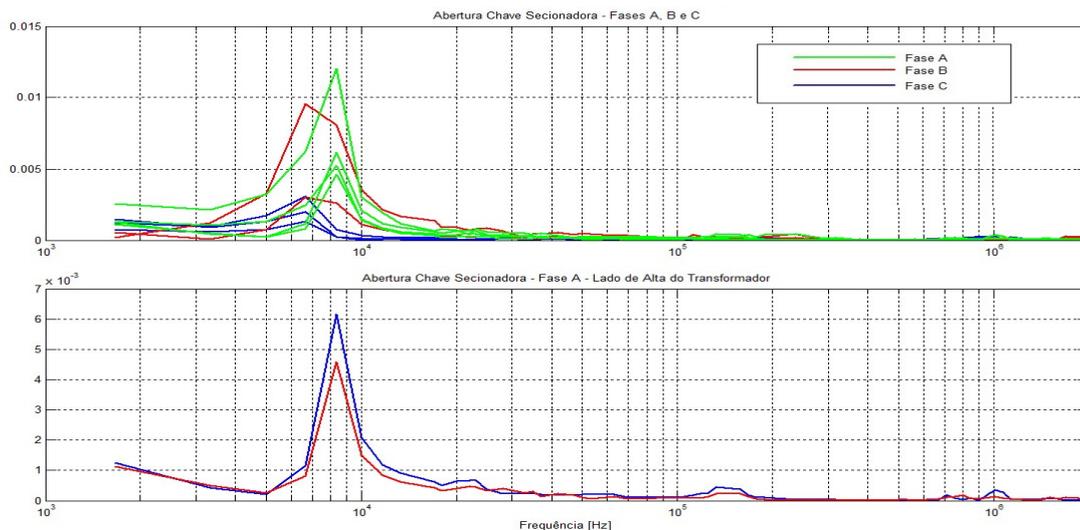


Figura 5.17 – Principais regiões de frequência dos transitórios de tensão gerados pela abertura de chave seccionadora, no lado de baixa e alta tensão dos autotransformadores

Em uma manobra de abertura de uma chave seccionadora, a partir do momento que é iniciado a separação elétrica dos contatos, o meio isolante entre os contatos tenta extinguir a corrente antes que a separação mecânica entre os contatos seja suficiente para uma completa interrupção. Isto ocorre sucessivas vezes até que a distância entre contatos seja suficientemente grande para que não ocorram mais reacendimentos. Esta separação elétrica dos contatos nos faz esperar que a maior energia envolvida está no último acendimento, pois é a maior distância entre os contatos elétricos provocando assim o transitório contendo a maior energia.

Deve-se ressaltar que para a aquisição nas manobras de abertura de chaves seccionadoras o sinal registrado refere-se ao acendimento com mais alta energia que dispara o sistema de aquisição, não necessariamente o primeiro acendimento nem mesmo o último, portanto justificam-se alguns menores níveis de sobretensão gerado por estas manobras.

Na Figura 5.18 são apresentadas as principais regiões de frequência dos transitórios de tensão gerados por cada manobra de fechamento de chave seccionadora do banco de transformadores #1, no lado de baixa e alta tensão dos autotransformadores, considerando as medições de transitórios de tensão realizadas.

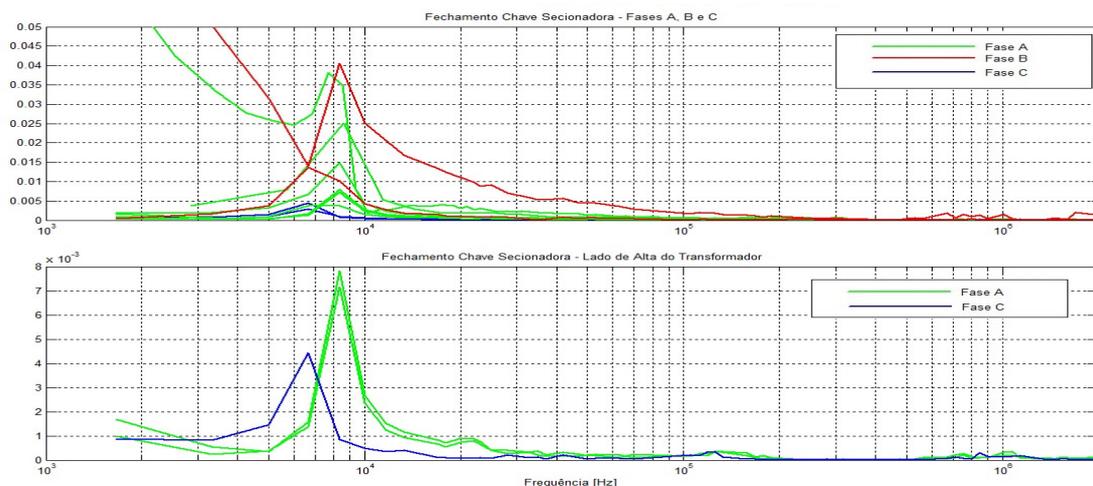


Figura 5.18 – Principais regiões de frequência dos transitórios de tensão gerados pelo fechamento de chave seccionadora, no lado de baixa e alta tensão dos autotransformadores

Em uma manobra de fechamento de chave seccionadora o movimento é contrário da abertura, ou seja, a partir do momento que é iniciado a aproximação mecânica dos contatos elétricos o campo elétrico aumenta até que uma descarga elétrica aconteça. Depois que isto acontece, uma corrente flui através do arco elétrico e carrega o trecho aberto de barramento com a tensão do lado da fonte. Desta forma, a diferença de potencial entre contatos decresce e o arco elétrico se extingue, havendo novamente a separação elétrica entre os dois contatos. Isto ocorre sucessivas vezes até que a distância entre contatos seja suficientemente pequena, de forma que o arco elétrico é mantido até que ocorra o fechamento mecânico dos contatos [10]. Esta aproximação elétrica dos contatos nos faz esperar que a maior energia envolvida esteja no primeiro acendimento, pois é a maior distância entre os contatos elétricos e provocando o maior arco elétrico e conseqüentemente o transitório contendo a maior energia.

Para a aquisição nas manobras de fechamento de chaves seccionadoras o sinal registrado refere-se ao acendimento com mais alta energia que dispara o sistema de aquisição, provavelmente, o primeiro acendimento, portanto justificam-se níveis de sobretensão maiores gerados por estas manobras se comparado à abertura.

### **5.3.2 Manobras de Disjuntores**

Diferente da manobra de chave seccionadora a manobra de disjuntor não apresenta reacedimento, tendo em vista a maior velocidade de operação e a forma como a corrente é interrompida nestes equipamentos. Assim sendo, o colapso de tensão nos terminais do disjuntor é equivalente a tensão existente no lado da fonte no instante do fechamento dos contatos do disjuntor. Normalmente, para se estar do lado conservativo, considera-se que o fechamento ocorre no máximo da tensão.

Assim sendo, a identificação de cada arquivo, conforme exemplificado na Tabela 5.5, é muito importante e algumas características na medição da manobra de disjuntor podem ser observadas, conforme ilustrado nas Figuras 5.19 e 5.20.

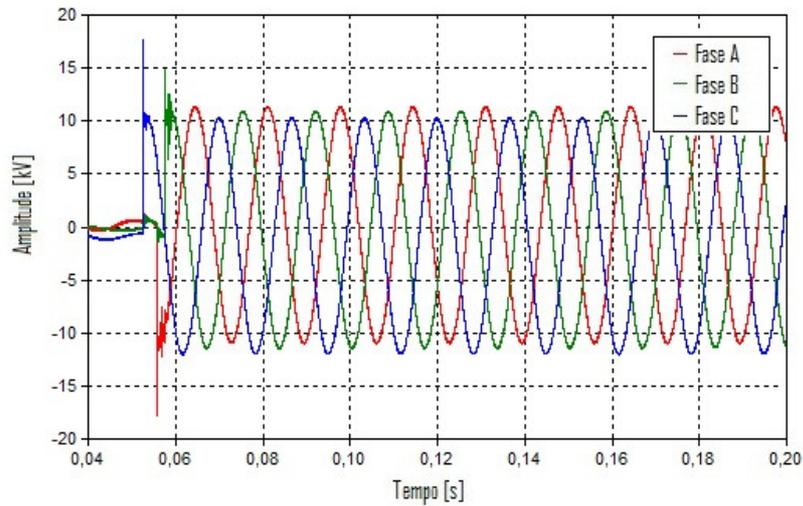


Figura 5.19 – Manobra de fechamento - disjuntor

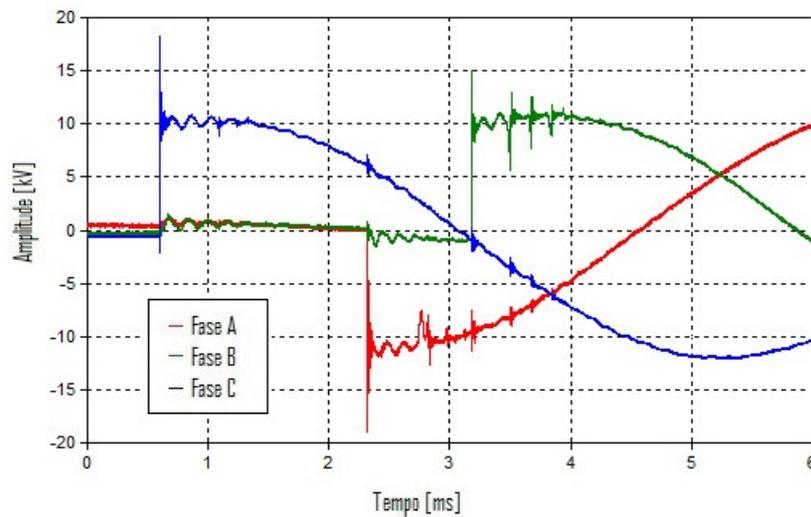


Figura 5.20 – Zoom na manobra de fechamento - disjuntor

A partir das medições foram identificadas as principais regiões de frequência do transitório gerado pelo fechamento do disjuntor e a energia emitida na direção do autotransformador.

Na Figura 5.21 são apresentadas as principais regiões de frequência dos transitórios de tensão gerados por cada manobra de fechamento de disjuntor do banco de transformadores #1, no lado de baixa e alta tensão dos autotransformadores, considerando as medições de transitórios de tensão realizadas.

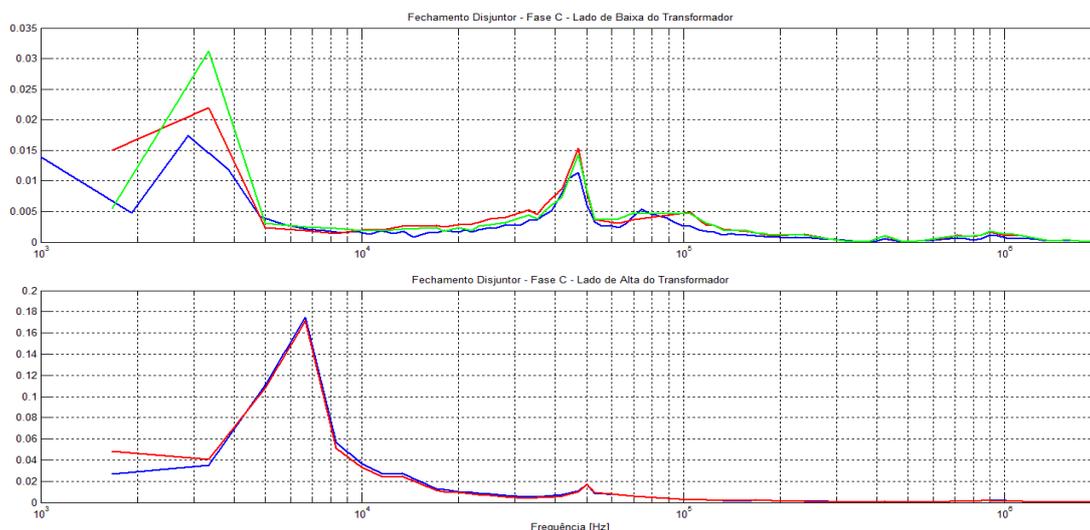


Figura 5.21 – Principais regiões de frequência dos transitórios de tensão gerados pelo fechamento de disjuntor, no lado de baixa e alta tensão dos autotransformadores

Manobras de abertura de disjuntores, praticamente, não geram sobretensões, por isso essas manobras não envolveram energias suficientes para disparar o sistema de aquisição, sendo esse motivo da não apresentação das mesmas.

### 5.3.3 Identificação - Chaves Secionadoras e Disjuntores

Além das regiões de ressonância de cada autotransformador foram identificadas as principais componentes dos transitórios de tensão gerados pela energia de cada manobra realizada, quer seja de um fechamento ou abertura de chaves secionadoras, quer seja de um fechamento ou abertura de disjuntores, considerando as medições de transitórios de tensão realizadas.

Nas Figuras 5.22 e 5.23 são apresentadas as principais regiões de frequência dos transitórios de tensão gerados pela energia de cada manobra realizada de fechamento ou abertura de chave seccionadora e, de fechamento de disjuntor do banco de transformadores #1, independente de fases, o lado da manobra ocorrida e considerando as medições de transitórios de tensão realizadas.

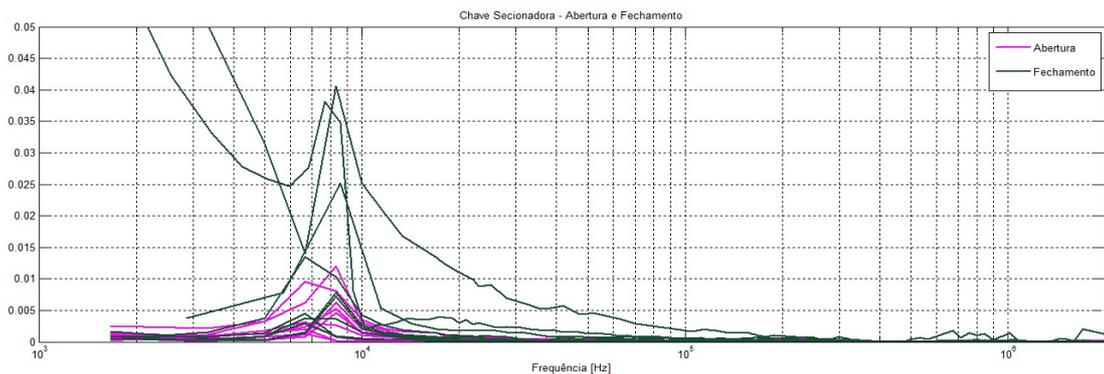


Figura 5.22 – Principais regiões de frequência dos transitórios de tensão gerados pelo fechamento ou abertura de chave seccionadora

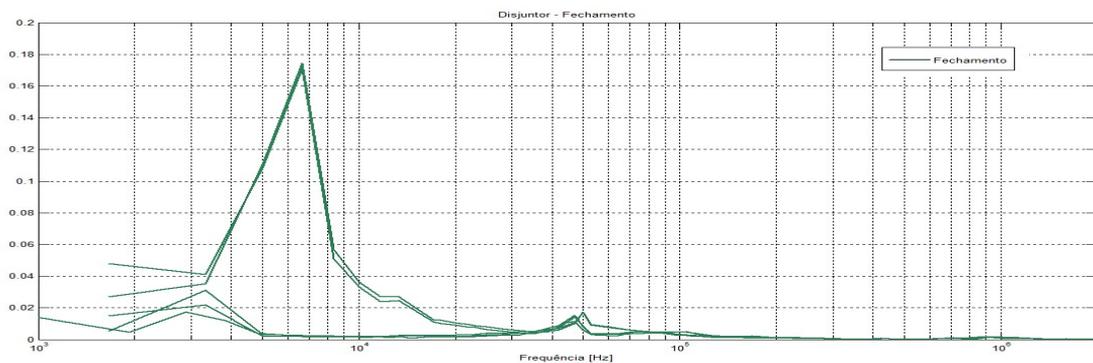


Figura 5.23 – Principais regiões de frequência dos transitórios de tensão gerados pelo fechamento de disjuntor

Além da identificação das principais componentes dos transitórios de tensão gerados pela energia de cada manobra realizada, foram realizadas as identificações

das principais componentes dos transitórios de tensão gerados pela simulação de cada manobra quer seja de um fechamento ou abertura de chaves seccionadoras, quer seja de um fechamento de disjuntores. As simulações foram realizadas para validar todas as medições.

Nas Figuras 5.24 e 5.25 são apresentadas as principais regiões de frequência dos transitórios de tensão gerados pela energia de cada simulação realizada de fechamento ou abertura de chave seccionadora e, de fechamento de disjuntor do banco de transformadores #1, independente de fases e o lado da manobra ocorrida.

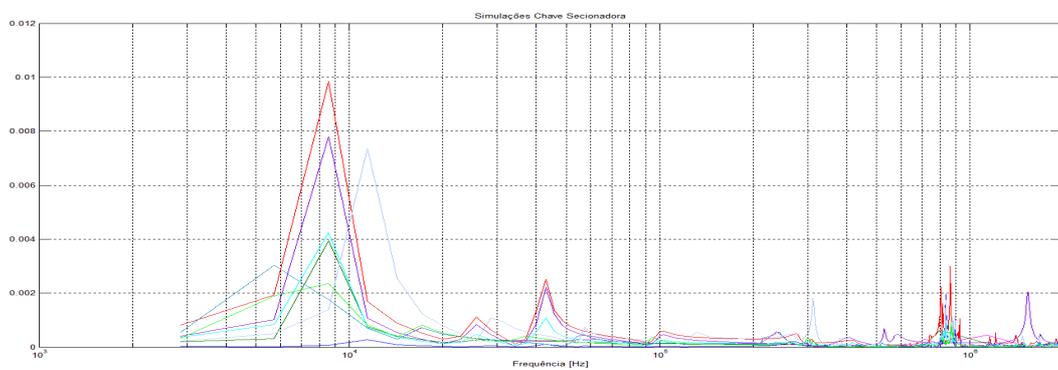


Figura 5.24 – Principais regiões de frequência dos transitórios de tensão gerados pelo fechamento ou abertura de chave seccionadora - simulação

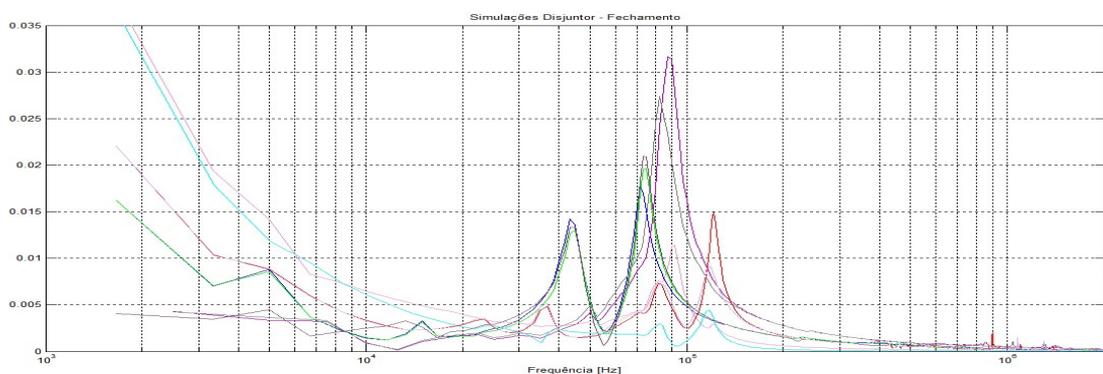


Figura 5.25 – Principais regiões de frequência dos transitórios de tensão gerados pelo fechamento de disjuntor - simulação

Com exceção das simulações da maioria dos disjuntores que apresentaram pequenas ou nenhuma ressonância na região de unidades de kHz e desconsiderando pequenas diferenças apresentadas nas simulações das chaves seccionadoras pode-se concluir que as simulações se aproximam das medições realizadas no campo, principalmente considerando que as simulações são aproximações dos eventos gerados na subestação.

### 5.3.4 Identificação – Estatística das Manobras

Após o levantamento das regiões dos transitórios de tensão foi realizada a distribuição normal do fechamento e abertura de chaves seccionadoras, e do fechamento de disjuntores das medições para auxiliar nas análises realizadas com as frequências encontradas na interação dos autotransformadores e o sistema.

Nas Figuras 5.26 e 5.27 são apresentadas as distribuições das medições de manobra de fechamento e abertura de chave seccionadora, respectivamente.

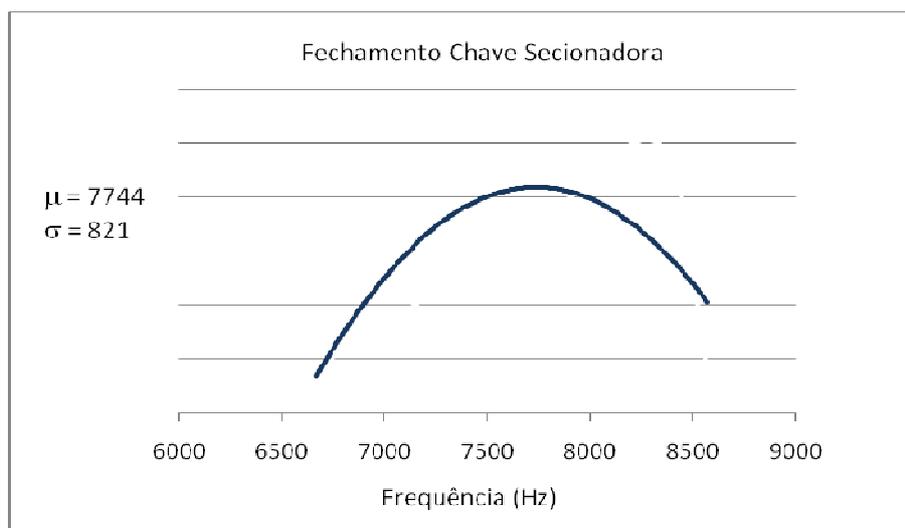


Figura 5.26 – Distribuição dos transitórios de tensão gerados pelo fechamento de chave seccionadora - medições

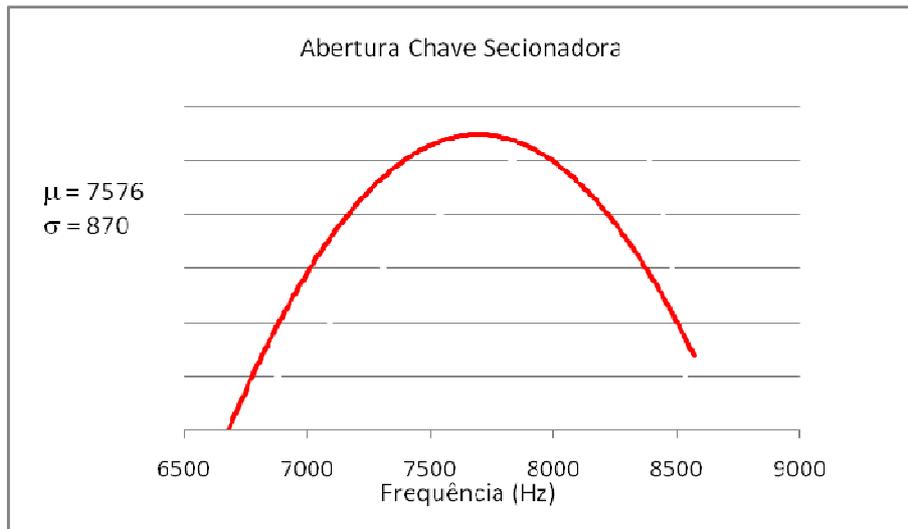


Figura 5.27 – Distribuição dos transitórios de tensão gerados pela abertura de chave seccionadora - medições

Na Figura 5.28 é apresentada a distribuição das medições de manobra de fechamento e abertura de chave seccionadora.

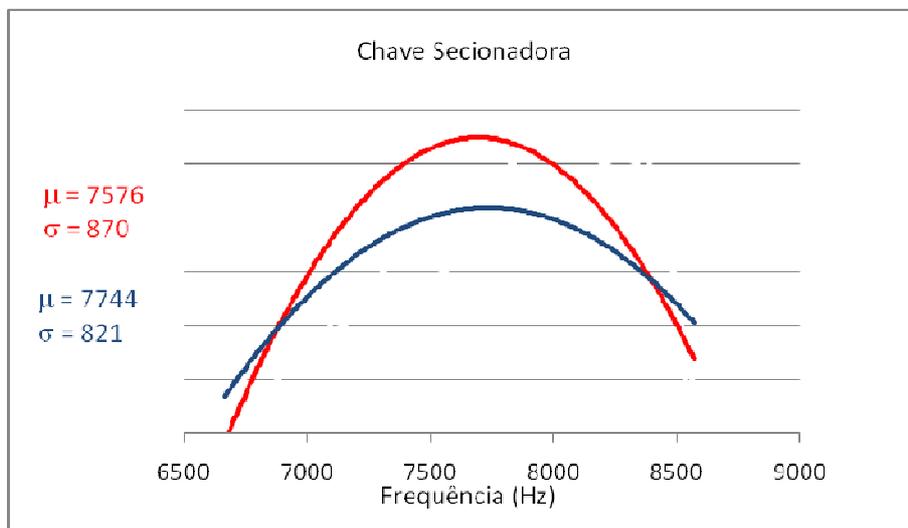


Figura 5.28 – Distribuição dos transitórios de tensão gerados pelo fechamento e abertura de chave seccionadora – medições

Nas Figuras 5.29 e 5.30 são apresentadas as distribuições das medições de manobra de fechamento de disjuntor dividido em duas regiões, de menor e maior frequência, respectivamente.

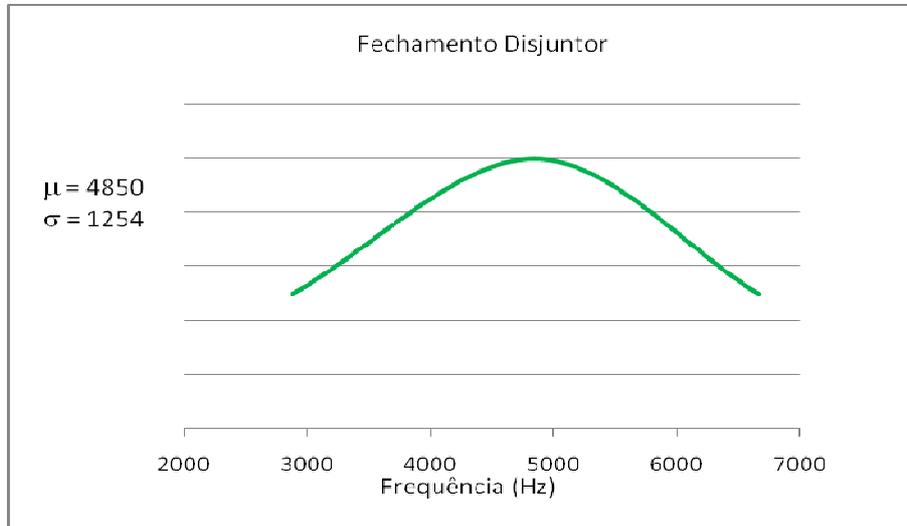


Figura 5.29 – Distribuição dos transitórios de tensão gerados pelo fechamento de disjuntor na região de menor frequência – medições

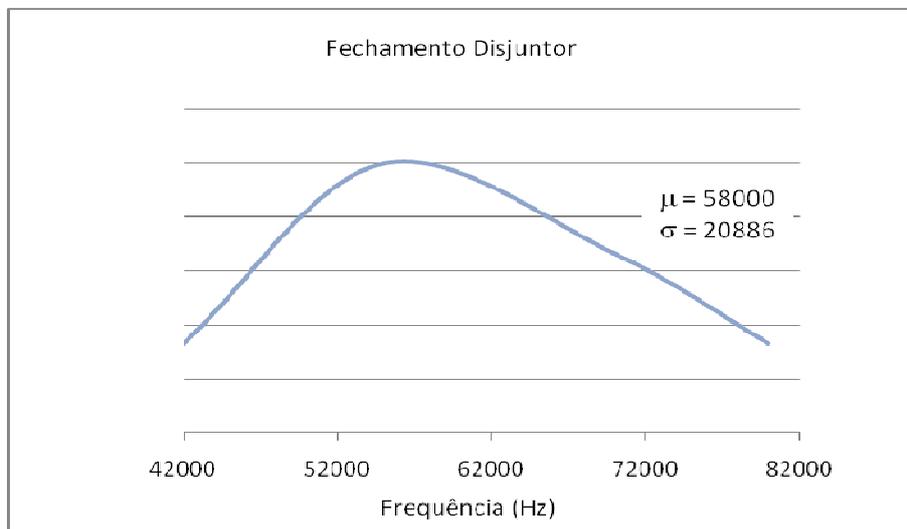


Figura 5.30 – Distribuição dos transitórios de tensão gerados pelo fechamento de disjuntor na região de maior frequência – medições

Na Figura 5.32 é apresentada a distribuição da manobra de fechamento de disjuntor.

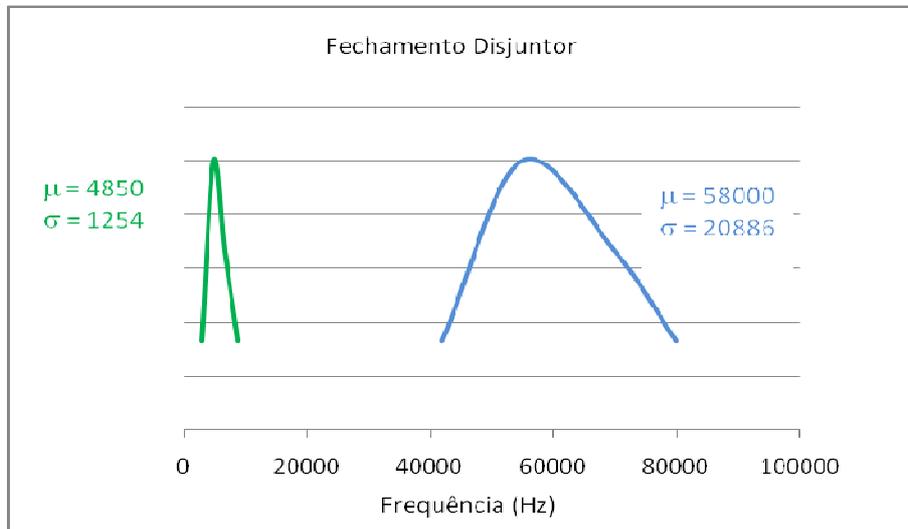


Figura 5.32 – Distribuição dos transitórios de tensão gerados pelo fechamento de disjuntor – medições

Na Figura 5.35 é apresentada a distribuição das manobras de fechamento e abertura de chave seccionadora e, de fechamento de disjuntor.

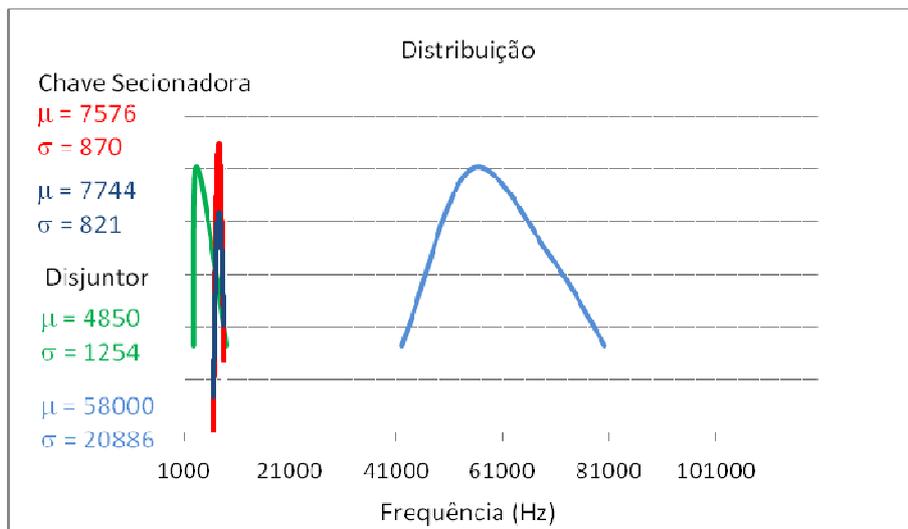


Figura 5.34 – Distribuição dos transitórios de tensão gerados pelas manobras de fechamento e abertura de chave seccionadora e, de fechamento de disjuntor

A partir das análises, as frequências encontradas na interação dos autotransformadores do banco de transformadores #1 com o sistema, considerando as manobras realizadas no lado de baixa tensão do autotransformador, são apresentadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Frequências encontradas na interação dos autotransformadores com o sistema considerando as manobras no lado de baixa tensão do autotransformador.

Lado de Baixa Tensão	
Frequências das manobras (kHz)	
Disjuntores	Chaves Seccionadoras
2,8-3,3 ; 46 ; 75-90	6,7-8,5

As frequências encontradas na interação dos autotransformadores com o sistema, considerando as manobras realizadas no lado de alta tensão dos autotransformadores, são apresentadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Frequências encontradas na interação dos autotransformadores com o sistema considerando as manobras no lado de alta tensão do autotransformador.

Lado de Alta Tensão	
Frequências das manobras (kHz)	
Disjuntores	Chaves Seccionadoras
6,7 ; 50-52	6,7-8,3

Após o levantamento das frequências encontradas na interação dos autotransformadores com o sistema, Tabelas 5.3 e 5.4, e das regiões de ressonância de cada autotransformador, Tabelas 5.1 e 5.2, verifica-se que as frequências de manobras que geram componentes na região de 6,7 - 8,5 kHz podem ser amplificadas

devido às regiões de ressonância dos autotransformadores, por este motivo a análise da interação dos autotransformadores com o sistema deve ser feita individualmente.

## **5.4 Classificação dos Eventos**

Existem algumas normas brasileiras que são responsáveis por determinar procedimentos para ensaios dielétricos aplicados aos equipamentos de potência e que são realizados em laboratório para assegurar que as solicitações advindas de um determinado evento ocorrido no sistema elétrico não comprometam o funcionamento do equipamento.

A norma ABNT NBR 6939 [21] define as classes e formas das solicitações de tensão e sobretensão, conforme apresentado anteriormente na Tabela 2.1 no capítulo 2.

De acordo com a Tabela 2.1, dependendo da forma, do grau de amortecimento e a duração, as tensões e sobretensões são divididas nas classes: tensão contínua de frequência fundamental, sobretensão temporária e sobretensão transitória, sendo a última subdividida em sobretensões de frente lenta, rápida e muito rápida.

O CIGRÉ através do grupo de trabalho CIGRE Working Group 33-02 propõe classificar os eventos transitórios em quatro grupos baseado em faixas de frequências, conforme apresentado na Tabela 5.5

Tabela 5.5 – Classificação por faixas de frequência proposta pelo CIGRÈ Working Group 33-02 (1990)

Grupo	Faixa de Frequência	Características no domínio do tempo	Representação válida para
I	0.1 Hz a 3 kHz	Oscilações de baixa frequência	Sobretensões temporárias
II	50 Hz a 20 kHz	Surtos de frente Lenta	Sobretensões de manobra
III	10 kHz a 3 MHz	Surtos de frente Rápida	Sobretensões devido a surtos atmosféricos
IV	100 kHz a 50 MHz	Surtos de frente muito rápida	Sobretensões por Reacendimentos

Ao analisar a Tabela 5.5 e sintetizar a mesma na Figura 5.36 conclui-se que existe superposição considerável das faixas de frequência dificultando assim a classificação dos eventos.

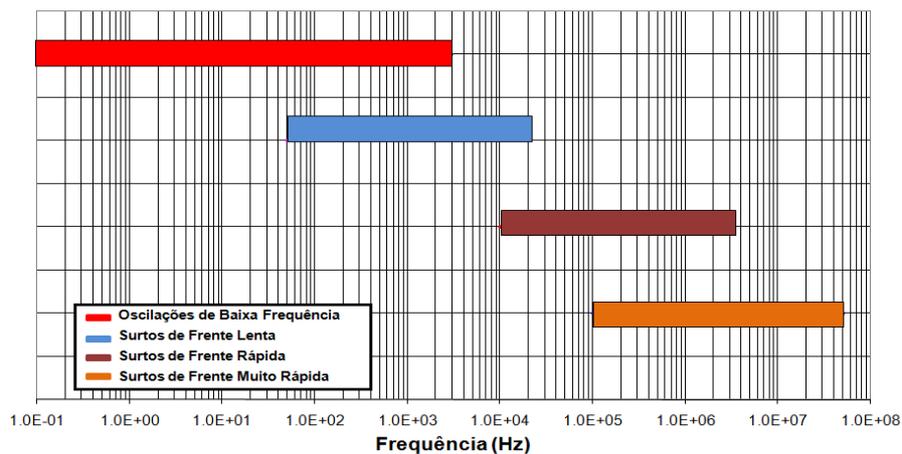


Figura 5.36 – Classificação por faixas de frequência proposta pelo CIGRÈ Working Group 33-02 (1990)

A classificação de eventos de interesse nessa dissertação se restringe à classificação dos eventos medidos, manobras de chaves seccionadoras e disjuntores, por isso as classificações dos eventos foram realizadas utilizando as características de cada manobra baseadas no levantamento estatístico apresentado, e assim sendo, uma proposta de estimação de classe para os eventos medidos, manobras de chaves seccionadoras e disjuntores se faz necessário.

# Capítulo 6

## Estimação de Classes

Este capítulo apresenta uma proposta de estimação de classes para os eventos medidos, manobras de chaves seccionadoras e disjuntores. A proposta utilizou-se de uma árvore de decisão como algoritmo de classificação.

### 6.1 Motivação

A estimação de classes a que um objeto pertence a partir de um conjunto de medidas que o descreve é um problema típico de reconhecimento de padrões. Várias e muito distintas aproximações têm sido adotadas a cerca da solução deste problema, desde as aproximações puramente estatísticas até as soluções baseadas em redes neurais, tendo todas elas as suas vantagens e desvantagens [29].

O desenvolvimento de uma ferramenta de estimação de classes foi motivado dada a previsão de aumento significativo do volume de medições que vem sendo realizadas durante a conclusão desta dissertação, além de auxiliar o tratamento dos dados mais rapidamente.

### 6.2 Estimação de Classes – Árvore de Decisão

Amplamente utilizadas em algoritmos de classificação, as árvores de decisão são representações simples do conhecimento e um meio eficiente de construir classificadores

que predizem classes baseadas nos valores de atributos de um conjunto de dados [30]. Estas são similares a regras if-then, e assim sendo, se tornam uma estrutura muito usada em problemas de classificação.

As árvores de decisão tomam como entrada uma situação descrita por um conjunto de atributos e retorna uma decisão, que é o valor predito para o valor de entrada. Os atributos de entrada podem ser discretos ou contínuos. Para a aplicação proposta serão considerados valores discretos. O aprendizado de valores discretos é chamado classificação [31].

Após a construção de uma árvore de decisão é importante avaliá-la. Esta avaliação é realizada através da utilização de dados que não tenham sido usados na parametrização da árvore. Esta estratégia permite estimar como a árvore generaliza os dados e se adapta a novas situações, podendo, também, estimar a proporção de erros e acertos ocorridos na construção da árvore.

Ao longo do texto será demonstrado o funcionamento da árvore de decisão indicando manobra de chave seccionadora ou disjuntor advindos de dados providos de medições realizadas no campo utilizando a técnica de medição por demanda. Estes dados são tratados previamente para um melhor desempenho da árvore.

## **6.2.1 Tratamento de Dados**

O tratamento dos eventos, a partir de medições de manobras de fechamento e abertura de chaves seccionadoras e disjuntores, são feitos de modo a superpor informações de caracterização na frequência dos autotransformadores e as aplicações de FFT e, considerando a avaliação de risco envolvido nestas manobras por meio de um

fator de severidade no domínio da frequência (FSDF), conforme apresentado no capítulo anterior.

A utilização das características de cada manobra foi baseada no levantamento estatístico apresentado no item 5.3.3 indicando as regiões de ressonância das medições realizadas. Foram adotados como entrada da árvore de decisão os valores de frequência de cada ressonância presente em cada uma das curvas de medições de manobra de chaves seccionadoras e disjuntores.

Na Figura 6.1 é apresentada a distribuição das manobras de fechamento e abertura de chave seccionadora e, de fechamento de disjuntor, ao longo da frequência.

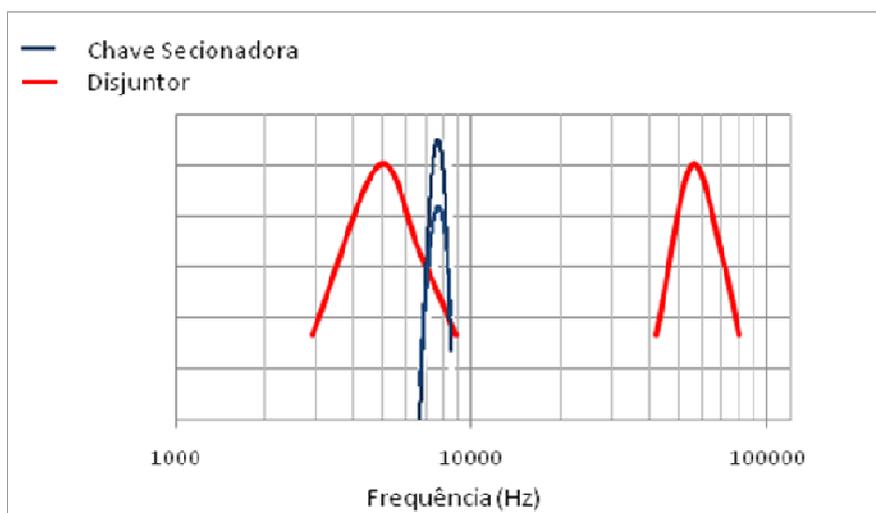


Figura 6.1 – Distribuição das manobras ao longo da frequência

As medições foram analisadas na faixa compreendida entre 10 Hz e 2 MHz, conforme informado no Capítulo 3. Entretanto as manobras medidas apresentaram ressonâncias entre 1 kHz e 100 kHz, conforme apresentada na Figura 6.1. Para cada medição há pelo menos duas informações predominantes, valor da ressonância e

frequência de ocorrência por década na região de 1 a 100 kHz. Porém em algumas medições realizadas foram apresentados quatro pontos de ressonância obtendo assim quatro valores de ressonância e quatro de frequência de ocorrência, considerando as duas décadas de interesse.

A partir das observações dos dados foi identificada cada uma das componentes de frequência de cada curva na região de 1 a 100 kHz, sendo as mais relevantes identificadas nas frequências apresentadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Principais frequências identificadas

<b>Frequências (kHz)</b>	<b>3334</b>	<b>4334</b>	<b>5000</b>	<b>6667</b>	<b>7400</b>	<b>8334</b>	<b>39000</b>	<b>47000</b>	<b>53000</b>	<b>70000</b>	<b>79000</b>
<b>Identificação</b>	<b>F1</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>	<b>F4</b>	<b>F5</b>	<b>F6</b>	<b>F7</b>	<b>F8</b>	<b>F9</b>	<b>F10</b>	<b>F11</b>

Foram identificadas três regiões distintas, a primeira região com frequências menores que 5 kHz ( $< F3$ ), a segunda com frequências entre 5 e 8,3 kHz ( $F3 - F6$ ), e a terceira com frequências maiores que 8,3 kHz ( $> F6$ ).

Na Figura 6.2 é apresentada a estrutura de identificação das componentes de frequência mapeando-as em regiões de frequências pré-definidas.

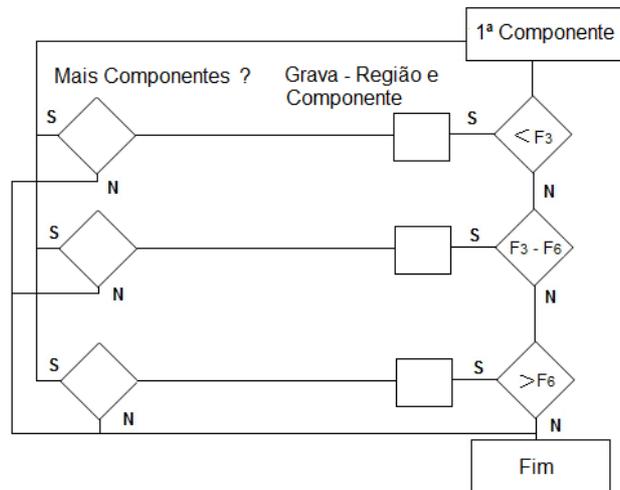


Figura 6.2 – Estrutura de identificação das ressonâncias das manobras medidas e regiões pré-definidas

Foram consideradas 26 manobras, sendo 20 manobras de chave seccionadora e 6 manobras de disjuntores. Foram utilizados os valores de frequência em cada ressonância como entrada para árvore e a classificação de manobras de chave seccionadora ou disjuntor como variáveis alvo da classificação.

Os dados foram selecionados, separando-os em duas partes. A primeira etapa, composta por 70% dos dados, foi utilizada para parametrização da árvore. Para a segunda etapa foram considerados 30% dos dados, que foram utilizados para teste.

Como o número de manobras de chave seccionadora, utilizado como dados, é maior do que o número de manobras de disjuntor fez-se necessário equilibrar as populações para parametrização e teste, sendo assim o número de manobras de disjuntores foi aumentado.

## 6.2.2 Árvore de Decisão

A definição da árvore de decisão se deu com a análise dos dados. A Figura 6.3 apresenta a árvore utilizada para a classificação das manobras.

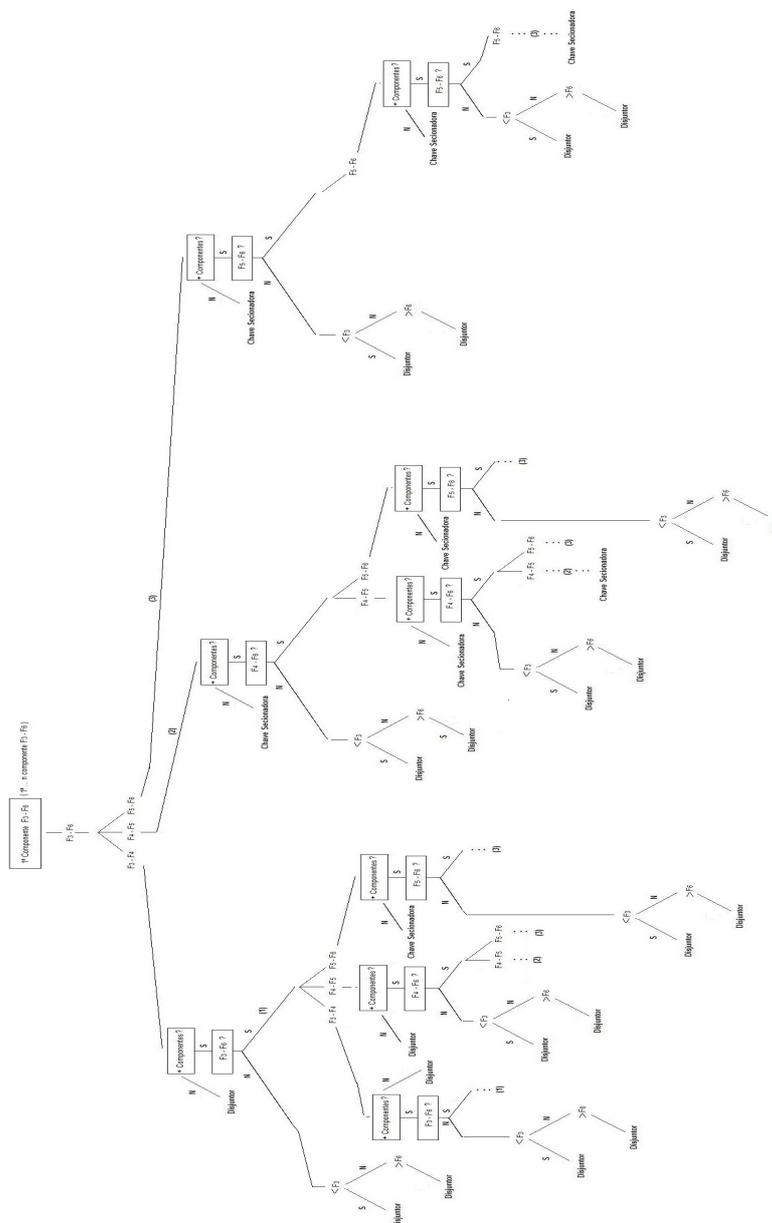


Figura 6.3 – Árvore de decisão utilizada

Como a região contendo as frequências entre 5 e 8,3 kHz (F3 – F6) é a que gera mais dúvidas, a análise da árvore de decisão inicia-se nesta região, sendo esta realizada considerando a ordem crescente das componentes.

Para a avaliação da árvore foram levantados os resultados da classificação de cada manobra de chave seccionadora ou disjuntor com todos os dados de teste, excluindo os dados de parametrização previamente separados. A Figura 6.4 apresenta o resultado esperado e o apresentado pela árvore de decisão.

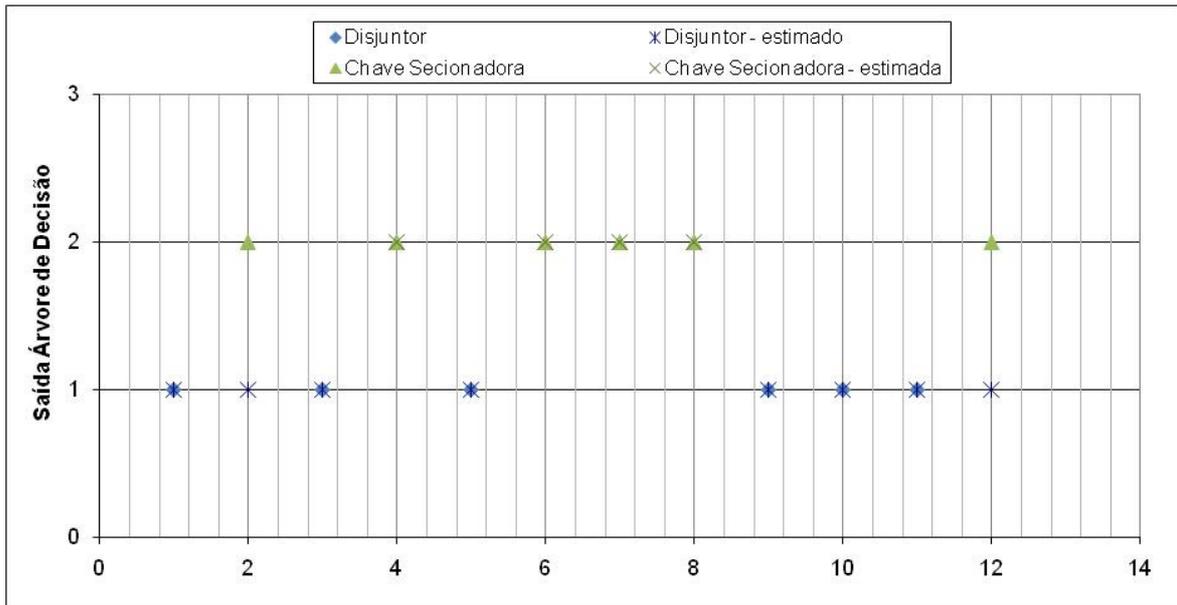


Figura 6.4 – Resultados esperados e os apresentados pela árvore de decisão

# Capítulo 7

## Estudos de Caso

Este capítulo apresenta estudos de caso abordando as medições de manobras de chaves seccionadoras e disjuntores. Serão apresentadas estimativas da transferência das manobras para os lados de baixa e alta tensão do autotransformador, bem como a avaliação de risco envolvendo as medições de manobras por meio do fator de severidade no domínio da frequência (FSDF).

### 7.1 Estudos

A partir da utilização da ferramenta computacional para a identificação das medições de manobras de chaves seccionadoras e disjuntores, e das metodologias de análise das medições apresentadas no Capítulo 5, foram realizados estudos com as medições de manobras consideradas mais críticas.

Além de avaliar o risco envolvido nas manobras por meio de um fator de severidade no domínio da frequência (FSDF), nestes estudos foram estimadas as componentes de frequência aos quais os enrolamentos, de baixa e alta tensão, do autotransformador são submetidos. Estas estimativas foram realizadas a partir das medições das manobras e da função de transferência do autotransformador.

### 7.1.1 Estimativas

Utilizando a superposição das informações de caracterização na frequência dos autotransformadores e as aplicações de FFT nas medições de manobras foi possível avaliar as coincidências dos eventos transitórios com as regiões de ressonâncias dos autotransformadores, bem como estimar a transferência das componentes de frequência para o enrolamento oposto do autotransformador, ou ainda, estimar as componentes de frequência que foram geradas por uma manobra no enrolamento oposto do autotransformador que foi realizada a medição. Além das curvas contendo as regiões de ressonância de cada autotransformador foram superpostas as curvas das principais componentes de frequência dos transitórios de tensão gerados em cada manobra e a curva da impedância característica do enrolamento em que a manobra foi realizada.

Todas as medições das manobras apresentadas foram aquisitadas no lado de baixa tensão do autotransformador, conforme apresentado no capítulo 3. Sendo assim, para as manobras geradas no lado de baixa tensão do autotransformador a estimativa da transferência das componentes de frequência foi realizada considerando a multiplicação da curva contendo as principais componentes dos transitórios de tensão e a curva das regiões de ressonância de cada autotransformador. A curva de resposta em frequência do autotransformador pode ser entendida como a curva que retrata a função de transferência do mesmo.

Para as manobras geradas no lado de alta tensão do autotransformador a estimativa das componentes de frequência geradas no enrolamento de alta tensão do autotransformador foi realizada considerando a divisão da curva de medição contendo as principais componentes dos transitórios de tensão e a curva das regiões de ressonância de cada autotransformador (função de transferência da alta para a baixa tensão).

Na Figura 7.1 são apresentadas as componentes de frequência do transitório de tensão gerado pelo fechamento do disjuntor no lado de baixa tensão do autotransformador, a curva de resposta em frequência do autotransformador com aplicação no lado de baixa tensão e medição no lado de alta tensão do autotransformador, a impedância do enrolamento no lado de baixa tensão do autotransformador e a estimativa das componentes de frequência transferidas para o enrolamento de alta tensão do autotransformador, respectivamente.

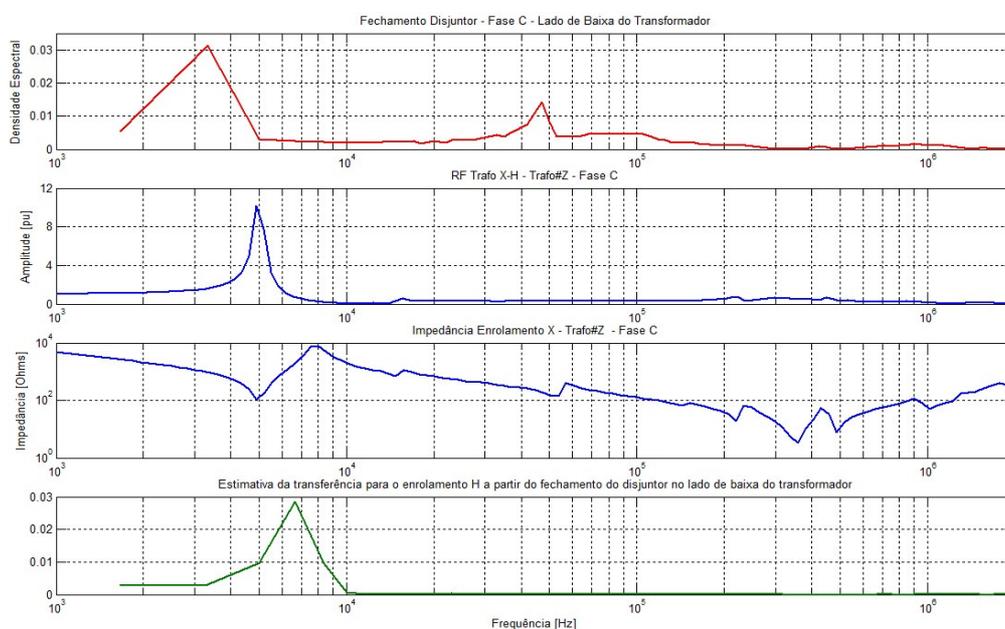


Figura 7.1 – Regiões contendo as componentes de frequência do transitório de tensão medido, resposta em frequência, impedância terminal e estimativa das componentes de frequência transferidas para o enrolamento de alta tensão do autotransformador

Na Figura 7.2 são apresentadas as principais regiões do transitório de tensão gerado pelo fechamento do disjuntor no lado de alta tensão do autotransformador e medido no lado de baixa tensão do mesmo, a curva de resposta em frequência do

autotransformador com aplicação no lado de alta tensão e medição no lado de baixa tensão do autotransformador, a impedância do enrolamento no lado de alta tensão do autotransformador e a estimativa das componentes de frequência geradas no enrolamento de alta tensão do autotransformador, respectivamente.

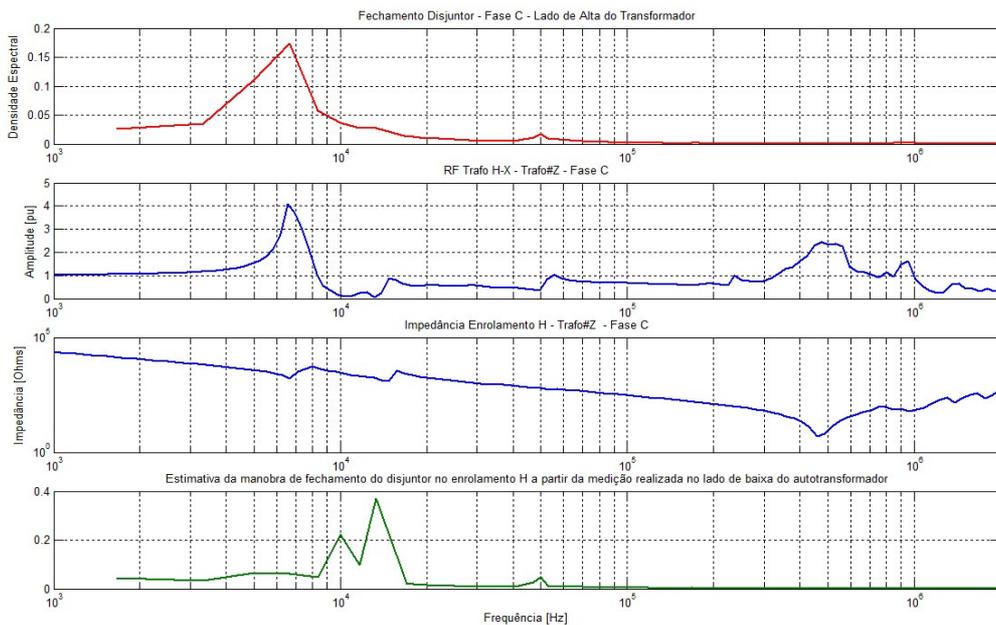


Figura 7.2 – Regiões contendo as componentes de frequência do transitório de tensão medido, resposta em frequência, impedância terminal e estimativa das componentes de frequência gerados no enrolamento de alta tensão do autotransformador

Na Figura 7.3 são apresentadas as componentes de frequência do transitório de tensão gerado pela abertura da chave seccionadora no lado de baixa tensão do autotransformador, a curva de resposta em frequência do autotransformador com aplicação no lado de baixa tensão e medição no lado de alta tensão do autotransformador, a impedância do enrolamento no lado de baixa tensão do

autotransformador e a estimativa das componentes de frequência transferidas para o enrolamento de alta tensão do autotransformador, respectivamente.

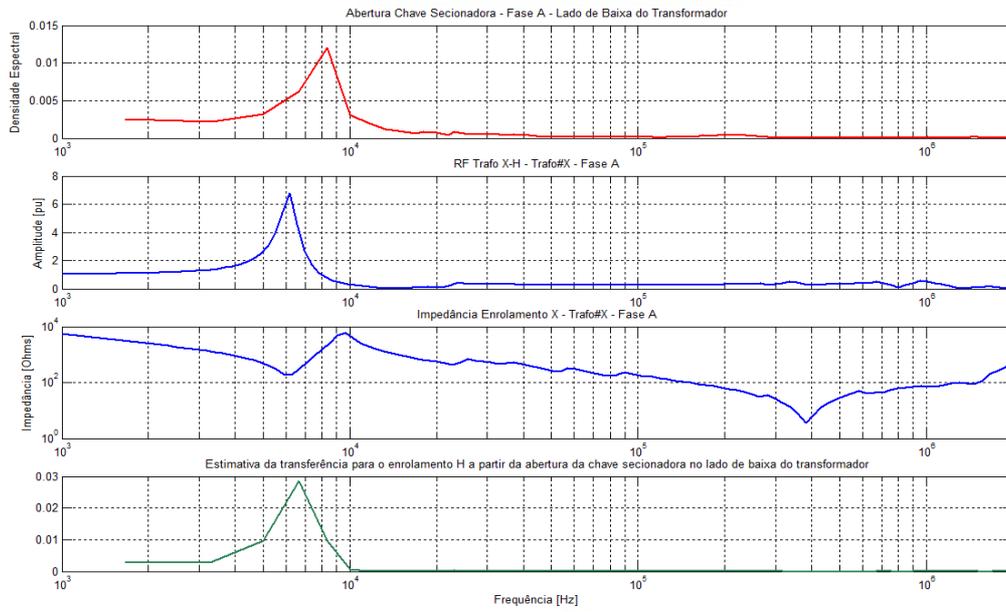


Figura 7.3 – Regiões contendo as componentes de frequência do transitório de tensão medido, resposta em frequência, impedância terminal e estimativa das componentes de frequência transferidos para o enrolamento de alta tensão do autotransformador

Na Figura 7.4 são apresentadas as principais regiões do transitório de tensão gerado pela abertura da chave seccionadora no lado de alta tensão do autotransformador e medido no lado de baixa tensão do mesmo, a curva de resposta em frequência do autotransformador com aplicação no lado de alta tensão e medição no lado de baixa tensão do autotransformador, a impedância do enrolamento no lado de alta tensão do autotransformador e a estimativa das componentes de frequência geradas no enrolamento de alta tensão do autotransformador, respectivamente.

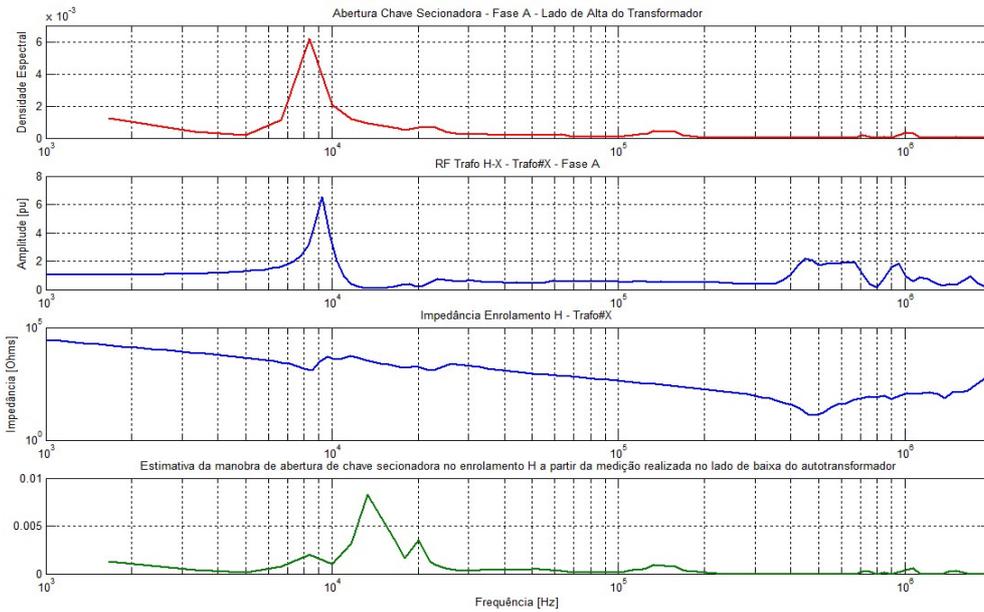


Figura 7.4 – Regiões contendo as componentes de frequência do transitório de tensão medido, resposta em frequência, impedância terminal e estimativa das componentes de frequência gerados no enrolamento de alta tensão do autotransformador

Na Figura 7.5 são apresentadas as componentes de frequência do transitório de tensão gerado pelo fechamento da chave seccionadora no lado de baixa tensão do autotransformador, a curva de resposta em frequência do autotransformador com aplicação no lado de baixa tensão e medição no lado de alta tensão do autotransformador, a impedância do enrolamento no lado de baixa tensão do autotransformador e a estimativa das componentes de frequência transferidas para o enrolamento de alta tensão do autotransformador, respectivamente.

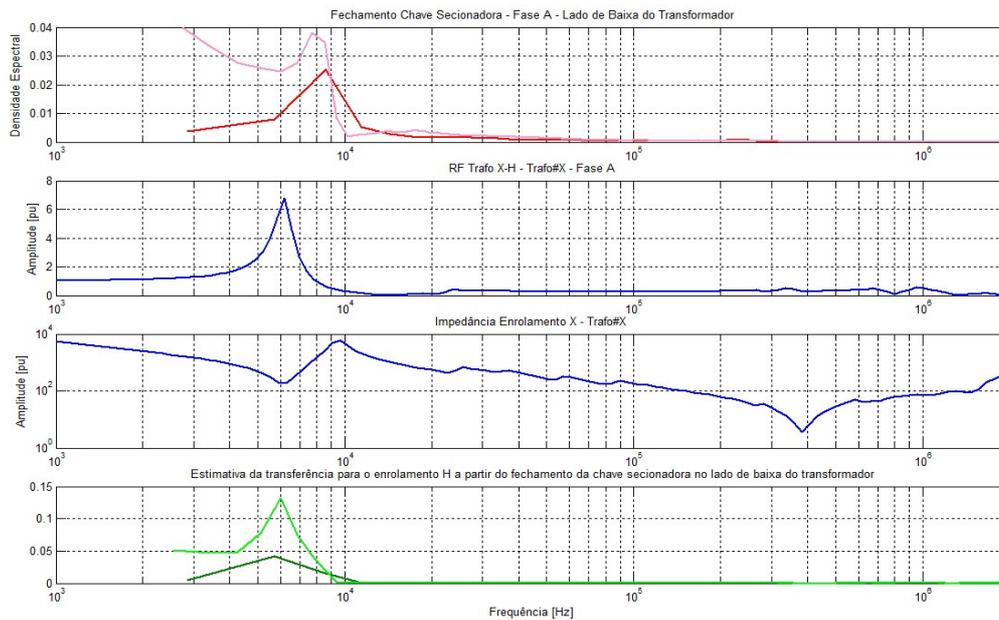


Figura 7.5 – Regiões contendo as componentes de frequência do transitório de tensão medido, resposta em frequência, impedância terminal e estimativa das componentes de frequência transferidos para o enrolamento de alta tensão do autotransformador

Na Figura 7.6 são apresentadas as principais regiões do transitório de tensão gerado pelo fechamento da chave seccionadora no lado de alta tensão do autotransformador e medido no lado de baixa tensão do mesmo, a curva de resposta em frequência do autotransformador com aplicação no lado de alta tensão e medição no lado de baixa tensão do autotransformador, a impedância do enrolamento no lado de alta tensão do autotransformador e a estimativa das componentes de frequência geradas no enrolamento de alta tensão do autotransformador, respectivamente.

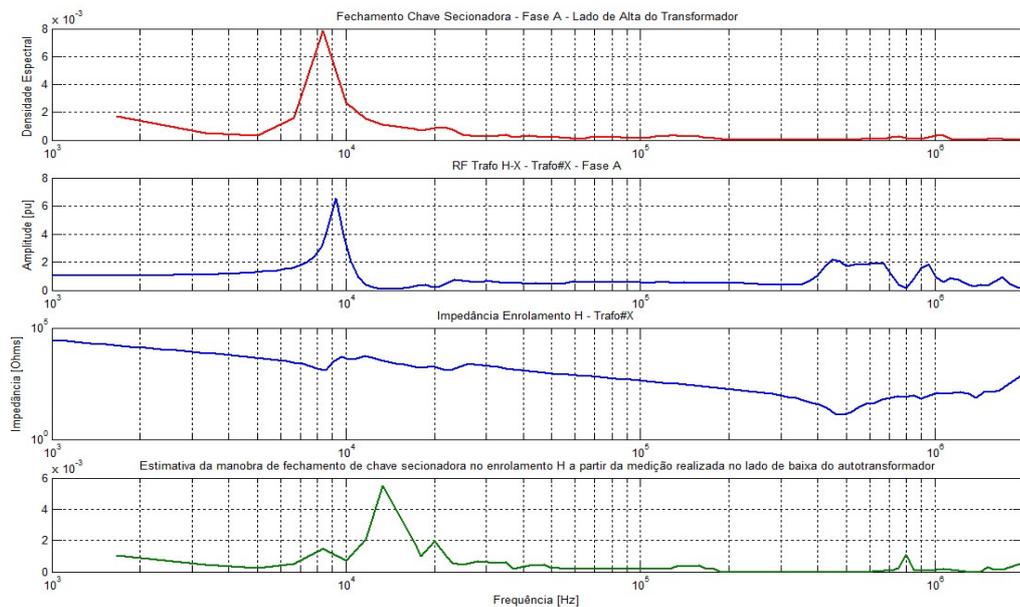


Figura 7.6 – Regiões contendo as componentes de frequência do transitório de tensão medido, resposta em frequência, impedância terminal e estimativa das componentes de frequência gerados no enrolamento de alta tensão do autotransformador

## 7.1.2 Abordagens – FSDF

Foram realizadas avaliações de risco envolvido nas manobras consideradas mais críticas por meio de um fator de severidade no domínio da frequência (FSDF), sendo as mesmas apresentadas a seguir.

Nas avaliações realizadas foi utilizado um tempo máximo da janela igual a 100  $\mu$ s com um intervalo ( $\Delta t$ ) de 0,01  $\mu$ s, de tal forma que o espectro de frequências calculado esteja limitado a 50 MHz com um espaçamento entre frequências de 10 kHz. Entretanto, como os ensaios nos autotransformadores estavam limitados a 2 MHz as análises se limitaram a esta frequência máxima.

Nas Figuras 7.7 e 7.8 são apresentadas a curva no tempo do transitório de tensão do fechamento de um disjuntor no lado de baixa tensão do autotransformador e a razão entre a densidade espectral da tensão transitória do fechamento do disjuntor e a densidade espectral da envoltória definida pelas formas de onda padronizadas, respectivamente.

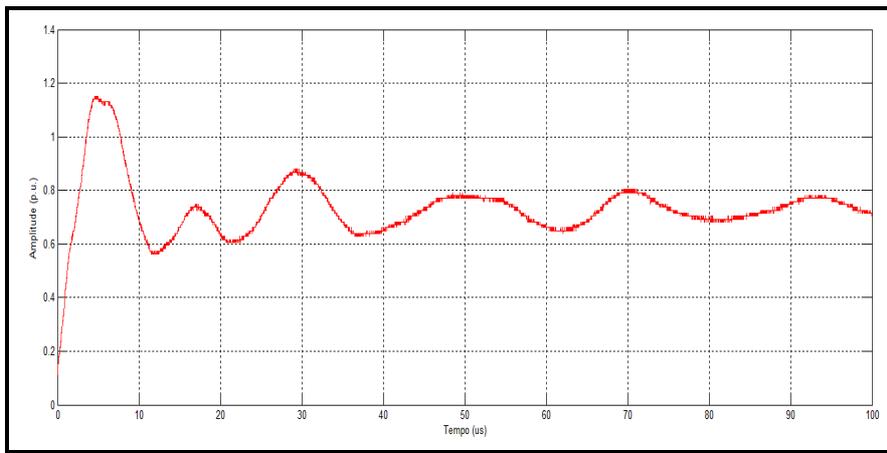


Figura 7.7 – Transitório de tensão da manobra de fechamento do disjuntor no lado de baixa tensão do autotransformador

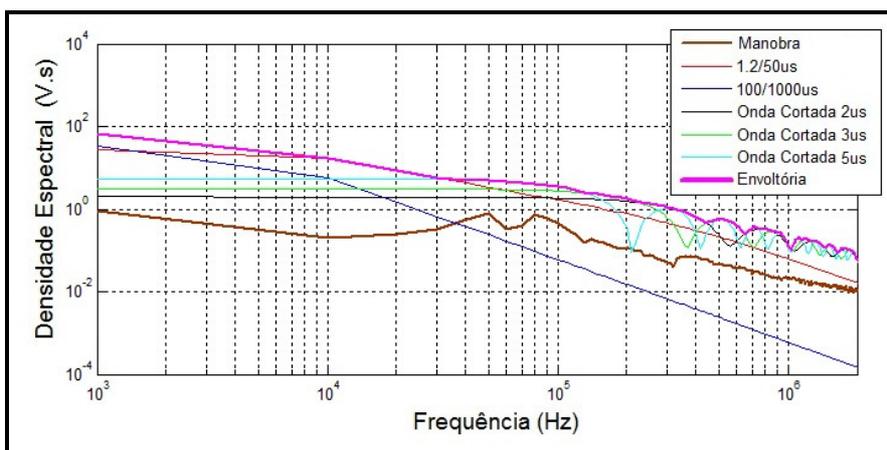


Figura 7.8 – Espectro de tensão transitória da manobra de fechamento do disjuntor no lado de baixa tensão do autotransformador

Nas Figuras 7.9 e 7.10 são apresentadas a curva no tempo do transitório de tensão da manobra de fechamento de um disjuntor no lado de alta tensão do autotransformador e a razão entre a densidade espectral da tensão transitória do fechamento do disjuntor e a densidade espectral da envoltória definida pelas formas de onda padronizadas, respectivamente.

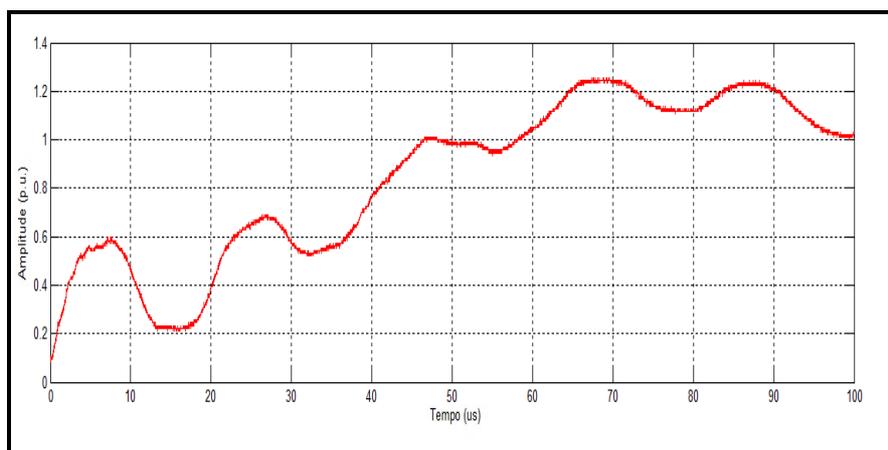


Figura 7.9 – Transitório de tensão da manobra de fechamento do disjuntor no lado de alta tensão do autotransformador

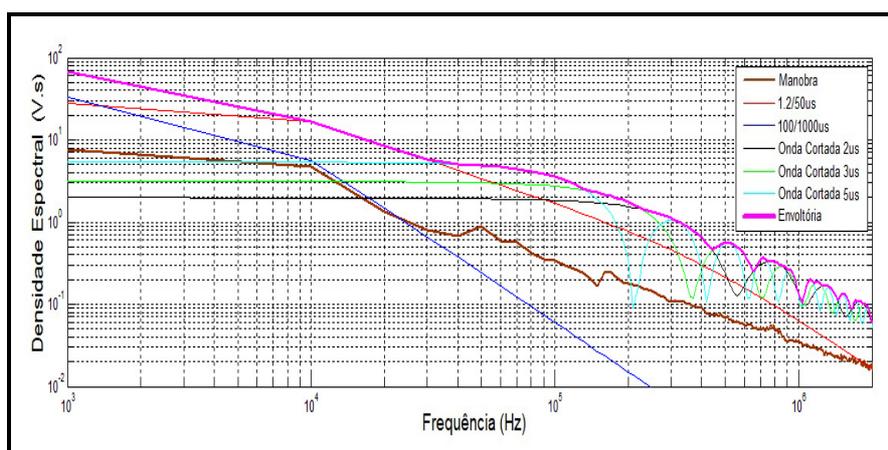


Figura 7.10 – Espectro de tensão transitória da manobra de fechamento do disjuntor no lado de alta tensão do autotransformador

Nas Figuras 7.11 e 7.12 são apresentadas a curva no tempo do transitório de tensão da manobra de abertura de uma chave seccionadora no lado de baixa tensão do autotransformador e a razão entre a densidade espectral da tensão transitória do fechamento do disjuntor e a densidade espectral da envoltória definida pelas formas de onda padronizadas, respectivamente.

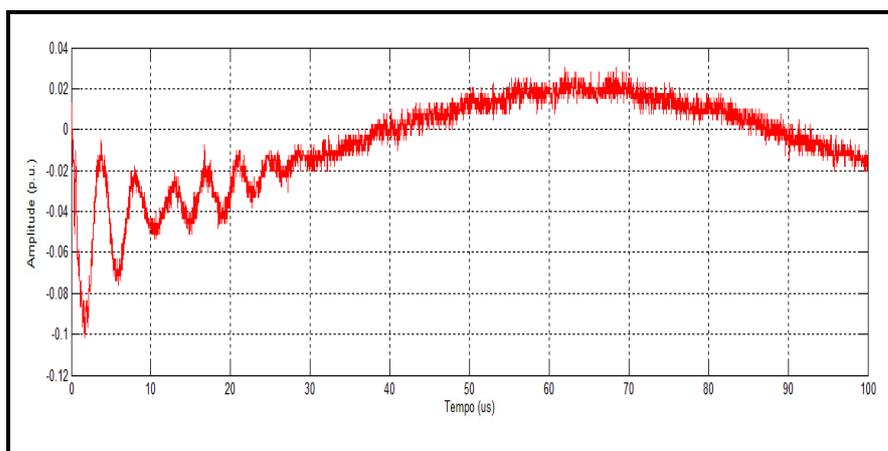


Figura 7.11 – Transitório de tensão da manobra de abertura de uma chave seccionadora no lado de baixa tensão do autotransformador

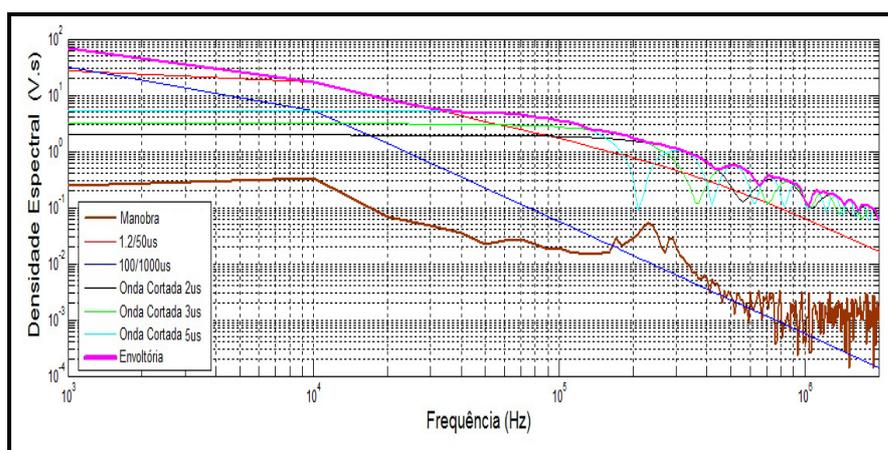


Figura 7.12 – Espectro de tensão transitória da manobra de abertura de uma chave seccionadora no lado de baixa tensão do autotransformador

Nas Figuras 7.13 e 7.14 são apresentadas a curva no tempo do transitório de tensão da manobra de abertura de uma chave seccionadora no lado de alta tensão do autotransformador e a razão entre a densidade espectral da tensão transitória do fechamento do disjuntor e a densidade espectral da envoltória definida pelas formas de onda padronizadas, respectivamente.

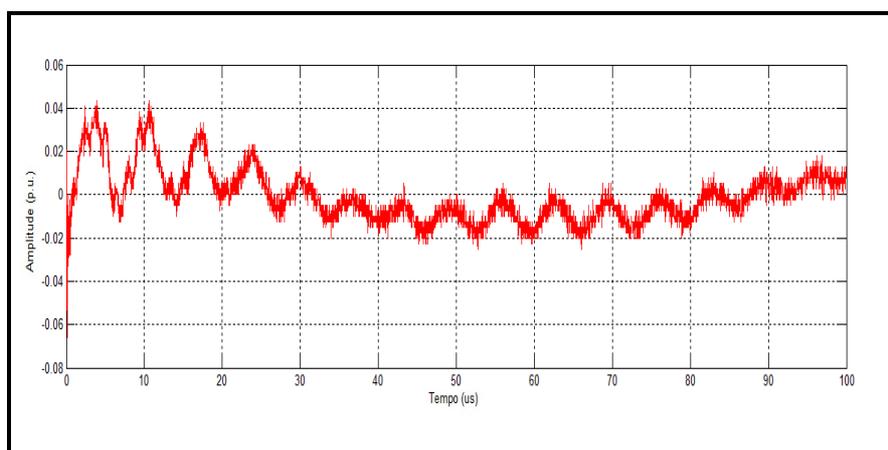


Figura 7.13 – Transitório de tensão da manobra de abertura de uma chave seccionadora no lado de alta tensão do autotransformador

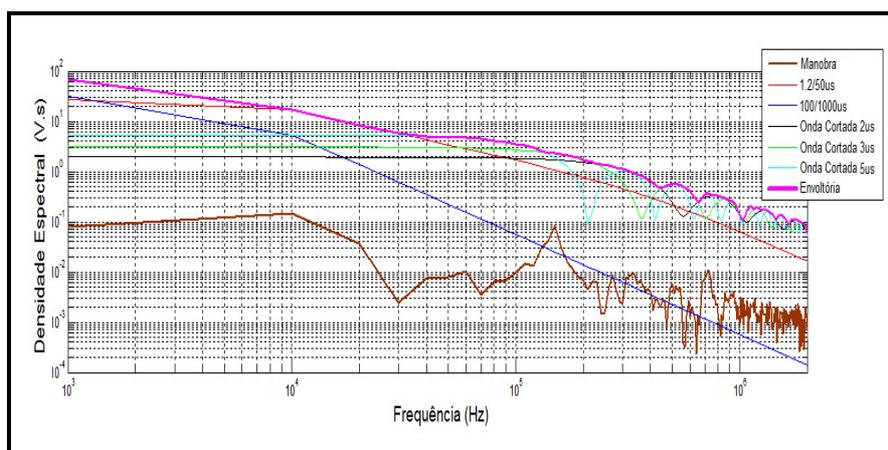


Figura 7.14 – Espectro de tensão transitória da manobra de abertura de uma chave seccionadora no lado de alta tensão do autotransformador

Nas Figuras 7.15, 7.16 e 7.17 são apresentadas duas curvas no tempo do transitório de tensão da manobra de fechamento de uma chave seccionadora no lado de baixa tensão do autotransformador, manobras I e II, além da razão entre a densidade espectral da tensão transitória do fechamento da chave seccionadora, manobras I e II, e a densidade espectral da envoltória definida pelas formas de onda padronizadas, respectivamente.

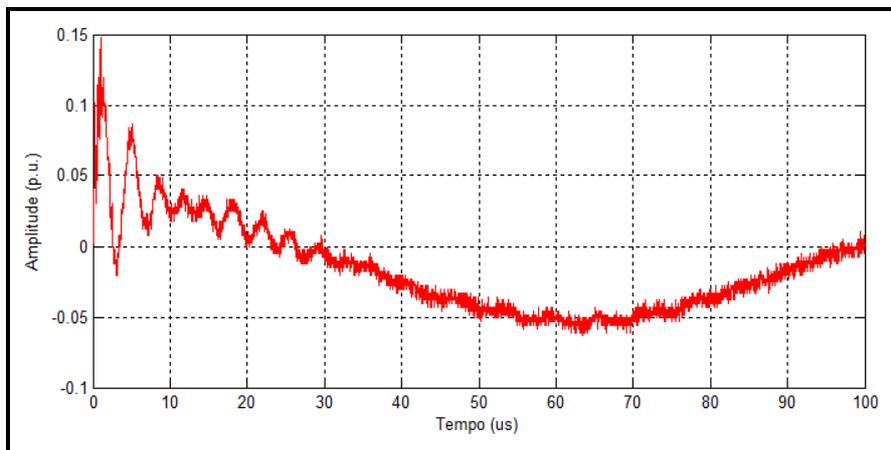


Figura 7.15 – Transitório de tensão da manobra de fechamento de uma chave seccionadora no lado de baixa tensão do autotransformador – Manobra I

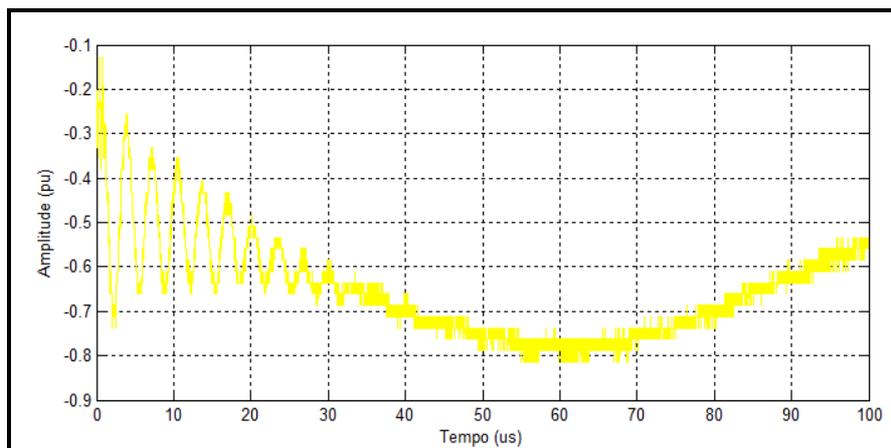


Figura 7.16 – Transitório de tensão da manobra de fechamento de uma chave seccionadora no lado de baixa tensão do autotransformador – Manobra II

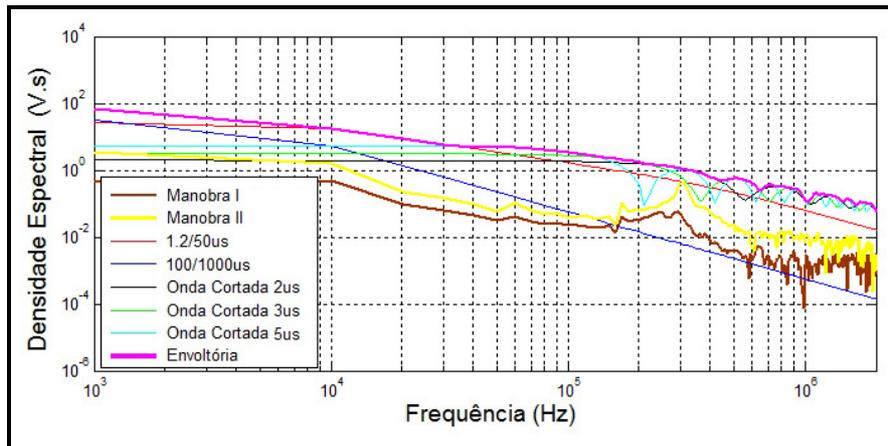


Figura 7.17 – Espectro de tensão transitória da manobra de fechamento de uma chave seccionadora no lado de baixa tensão do autotransformador – manobras I e II

Nas Figuras 7.18 e 7.19 são apresentadas a curva no tempo do transitório de tensão da manobra de fechamento de uma chave seccionadora no lado de alta tensão do autotransformador e a razão entre a densidade espectral da tensão transitória do fechamento chave seccionadora e a densidade espectral da envoltória definida pelas formas de onda padronizadas, respectivamente.

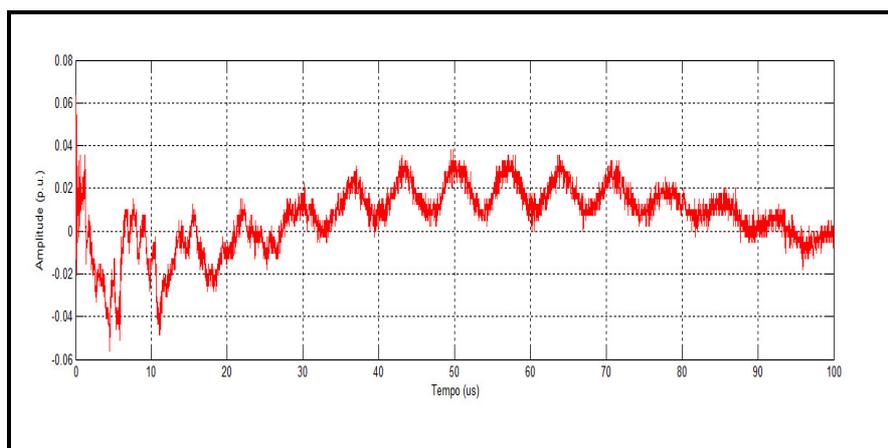


Figura 7.18 – Transitório de tensão da manobra de fechamento de uma chave seccionadora no lado de alta tensão do autotransformador

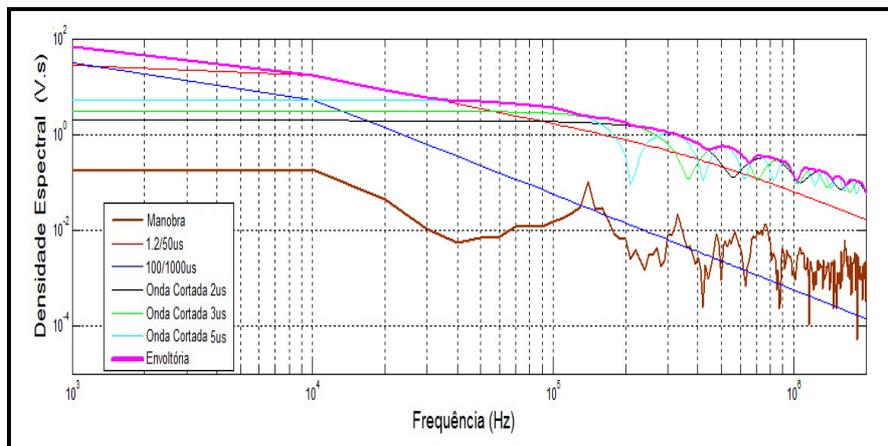


Figura 7.19 – Espectro de tensão transitória da manobra de fechamento de uma chave seccionadora no lado de alta tensão do autotransformador

A Tabela 7.1 sintetiza os resultados dos FSDF para as frequências relevantes de cada uma das respectivas manobras. Pela análise desta tabela observa-se que apenas a manobra de fechamento de disjuntor no lado de alta tensão apresentou valores mais próximos do FSDF, sendo que para a onda cortada (3  $\mu$ s) foi apresentado um valor de 51% acima do limite.

Tabela 7.1 – Síntese das abordagens utilizando o FSDF

Medições de Manobra	Lado da Manobra	Autotransformador	Freq. Críticas (kHz)	FSDF		
				1.2/50us	Onda Cortada (3us)	Envolvória
Fech. Disjuntor	Baixa Tensão	Fase C - Fabricante #Z	50	0,24	0,27	0,17
	Alta Tensão		10	0,28	1,51	0,28
Abert. Chave Seccionadora	Baixa Tensão	Fase A - Fabricante #X	230	0,09	0,04	0,04
	Alta Tensão		150	0,08	0,04	0,04
Fech. Chave Seccionadora	Baixa Tensão	Fase A - Fabricante #X	290	0,12	0,08	0,05
			310	0,9	0,77	0,37
	Alta Tensão	Fase A - Fabricante #X	140	0,09	0,04	0,04

Ao analisar a Tabela 7.1 com os resultados dos FSDF para as frequências relevantes de cada uma das respectivas manobras observa-se que apenas a manobra de fechamento de disjuntor no lado de alta tensão apresentou valores mais próximos do FSDF, sendo que para a onda cortada ( $3 \mu\text{s}$ ) foi apresentado um valor de 51% acima do limite.

### **7.1.3 Abordagens – FSDF ( $600 \mu\text{s}$ )**

Nas avaliações das manobras por meio de um fator de severidade no domínio da frequência (FSDF) foi considerado o tempo máximo da janela igual a  $100 \mu\text{s}$ . Entretanto, ao se analisar as medições com a janela de  $600 \mu\text{s}$  percebeu-se que as frequências que contribuem com a maior energia não apareciam por não estarem contidas na janela de  $100 \mu\text{s}$ , sendo assim, foram realizadas novas abordagens considerando a janela de  $600 \mu\text{s}$  com um intervalo ( $\Delta t$ ) de  $0,01 \mu\text{s}$ . Pelo mesmo critério as análises se limitaram a frequência máxima 2 MHz..

Nas Figuras 7.20 e 7.21 são apresentadas a curva no tempo do transitório de tensão do fechamento de um disjuntor no lado de baixa tensão do autotransformador e a razão entre a densidade espectral da tensão transitória do fechamento do disjuntor e a densidade espectral da envoltória definida pelas formas de onda padronizadas, respectivamente.

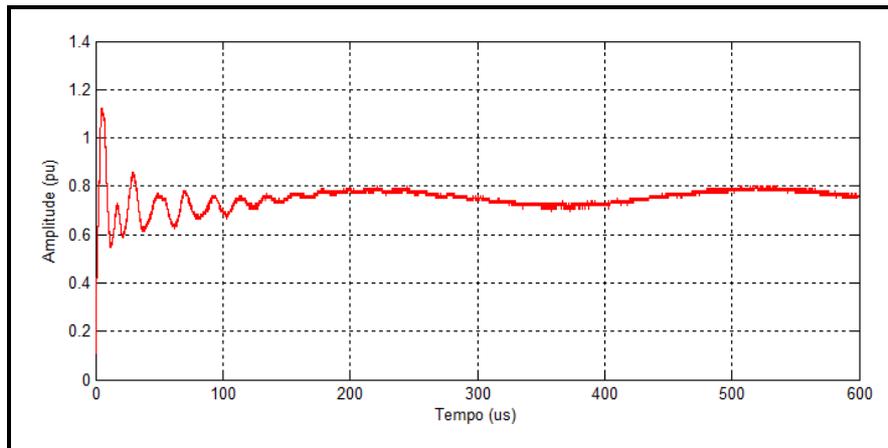


Figura 7.20 – Transiente de tensão da manobra de fechamento do disjuntor no lado de baixa tensão do autotransformador – 600  $\mu$ s

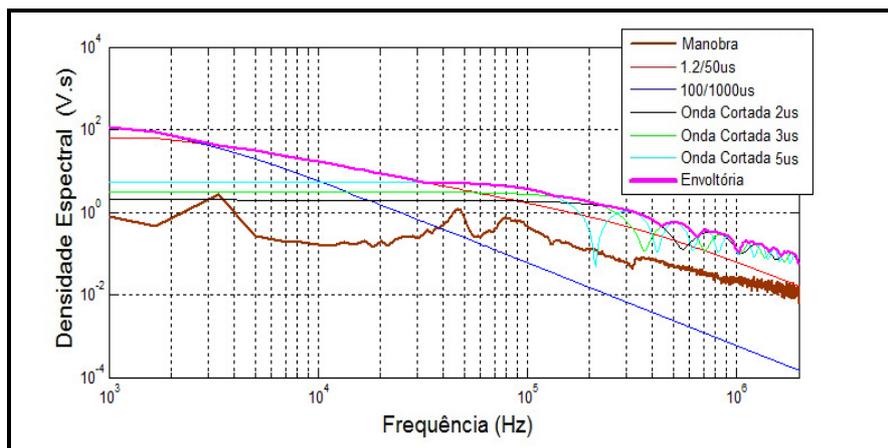


Figura 7.21 – Espectro de tensão transitória da manobra de fechamento do disjuntor no lado de baixa tensão do autotransformador - 600  $\mu$ s

Nas Figuras 7.22 e 7.23 são apresentadas a curva no tempo do transiente de tensão da manobra de fechamento de um disjuntor no lado de alta tensão do autotransformador e a razão entre a densidade espectral da tensão transitória do fechamento do disjuntor e a densidade espectral da envoltória definida pelas formas de onda padronizadas, respectivamente.

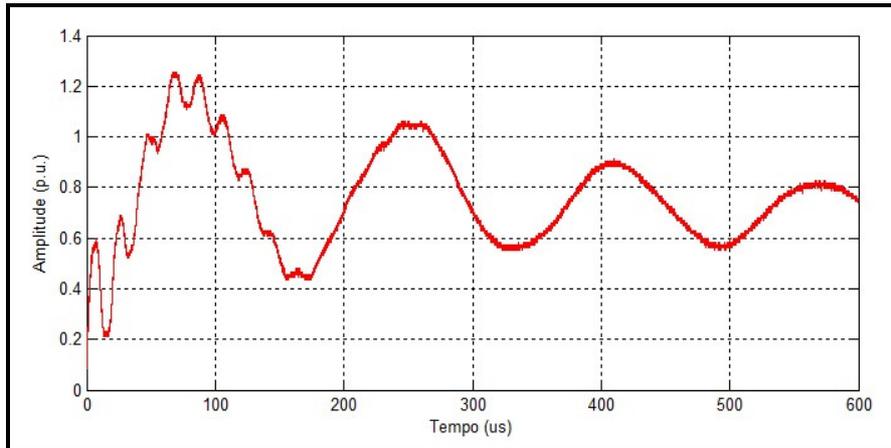


Figura 7.22 – Transiente de tensão da manobra de fechamento do disjuntor no lado de alta tensão do autotransformador – 600  $\mu$ s

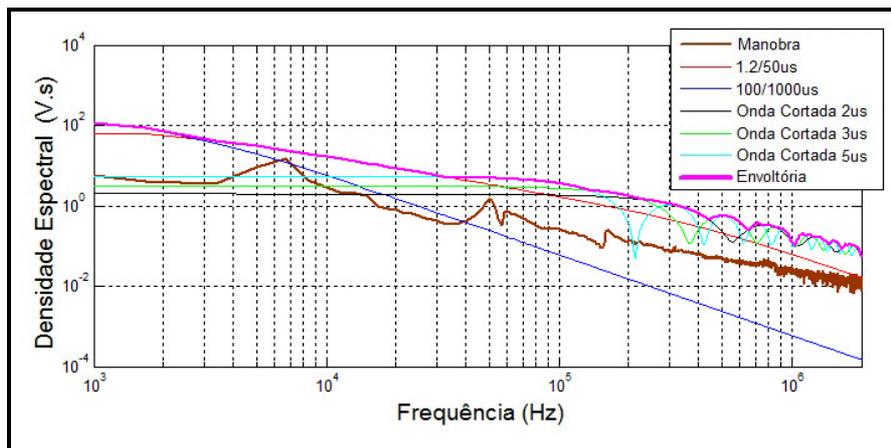


Figura 7.23 – Espectro de tensão transitória da manobra de fechamento do disjuntor no lado de alta tensão do autotransformador – 600  $\mu$ s

Nas Figuras 7.24 e 7.25 são apresentadas a curva no tempo do transiente de tensão da manobra de abertura de uma chave seccionadora no lado de baixa tensão do autotransformador e a razão entre a densidade espectral da tensão transitória da abertura da chave seccionadora e a densidade espectral da envoltória definida pelas formas de onda padronizadas, respectivamente.

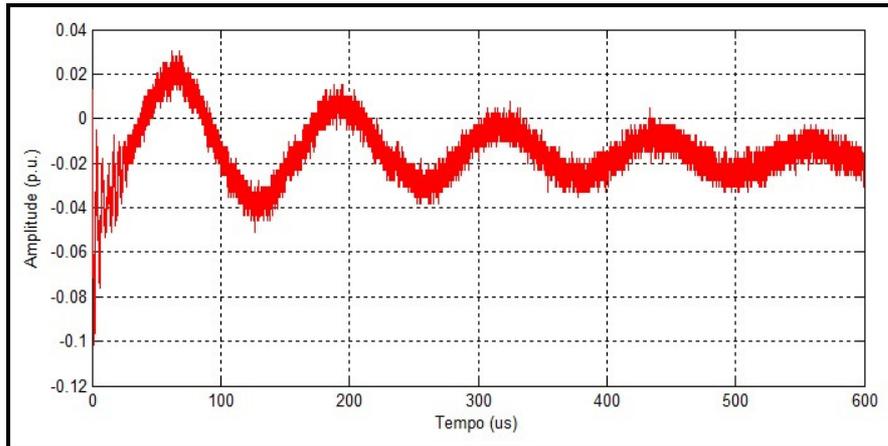


Figura 7.24 – Transiente de tensão da manobra de abertura de uma chave seccionadora no lado de baixa tensão do autotransformador – 600  $\mu$ s

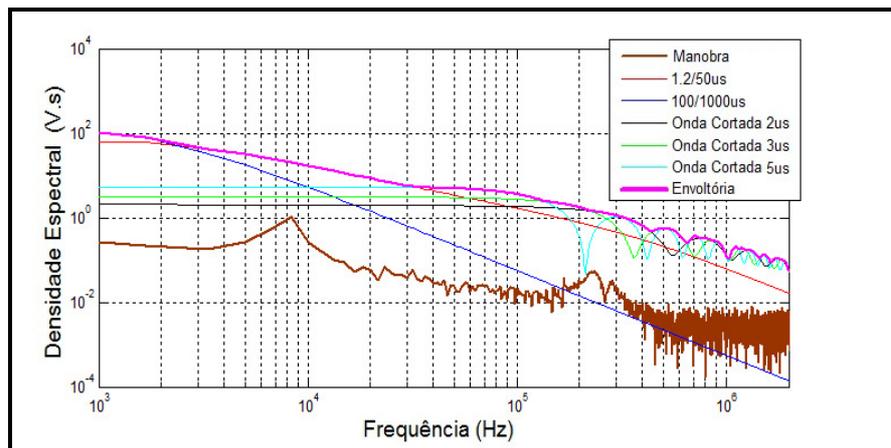


Figura 7.25 – Espectro de tensão transitória da manobra de abertura de uma chave seccionadora no lado de baixa tensão do autotransformador – 600  $\mu$ s

Nas Figuras 7.26 e 7.27 são apresentadas a curva no tempo do transiente de tensão da manobra de abertura de uma chave seccionadora no lado de alta tensão do autotransformador e a razão entre a densidade espectral da tensão transitória da de abertura da chave seccionadora e a densidade espectral da envoltória definida pelas formas de onda padronizadas, respectivamente.

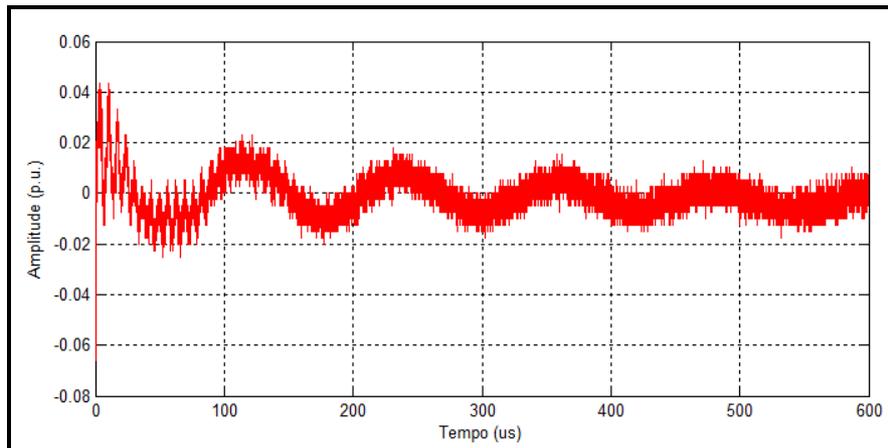


Figura 7.26 – Transiente de tensão da manobra de abertura de uma chave seccionadora no lado de alta tensão do autotransformador – 600  $\mu$ s

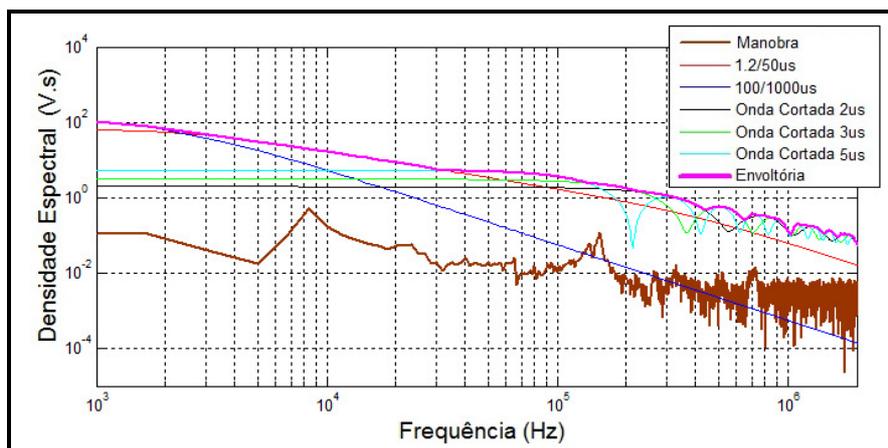


Figura 7.27 – Espectro de tensão transitória da manobra de abertura de uma chave seccionadora no lado de alta tensão do autotransformador– 600  $\mu$ s

Nas Figuras 7.28, 7.29 e 7.30 são apresentadas a curva no tempo do transiente de tensão da manobra de fechamento de uma chave seccionadora no lado de baixa tensão do autotransformador, manobras I e II, e a razão entre a densidade espectral da tensão transitória do fechamento da chave seccionadora, manobras I e II, e a densidade espectral da envoltória definida pelas formas de onda padronizadas, respectivamente.

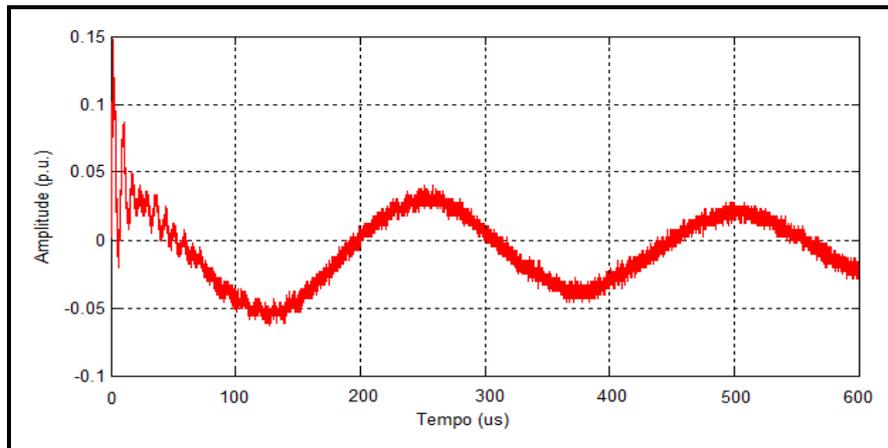


Figura 7.28 – Transitório de tensão da manobra de fechamento de uma chave seccionadora no lado de baixa tensão do autotransformador – manobra I – 600  $\mu$ s

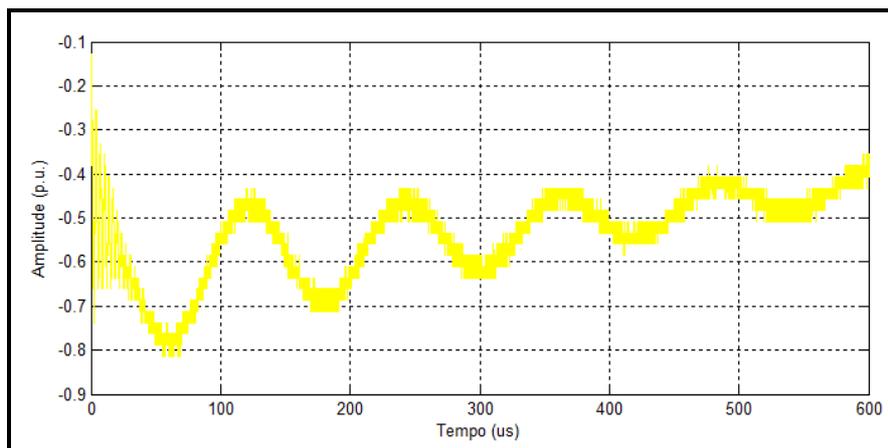


Figura 7.29 – Transitório de tensão da manobra de fechamento de uma chave seccionadora no lado de baixa tensão do autotransformador – manobra II – 600  $\mu$ s

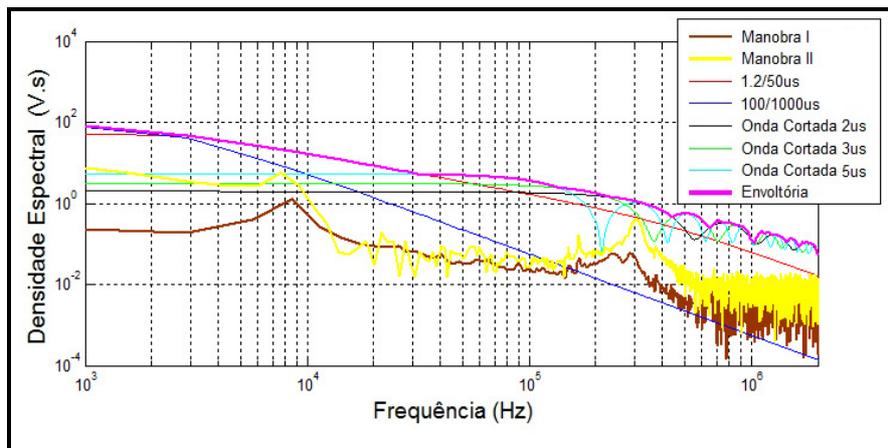


Figura 7.30 – Espectro de tensão transitória da manobra de fechamento de uma chave seccionadora no lado de baixa tensão do autotransformador – manobras I e II – 600  $\mu$ s

Nas Figuras 7.31 e 7.32 são apresentadas a curva no tempo do transitório de tensão da manobra de fechamento de uma chave seccionadora no lado de alta tensão do autotransformador e a razão entre a densidade espectral da tensão transitória do fechamento da chave seccionadora e a densidade espectral da envoltória definida pelas formas de onda padronizadas, respectivamente.

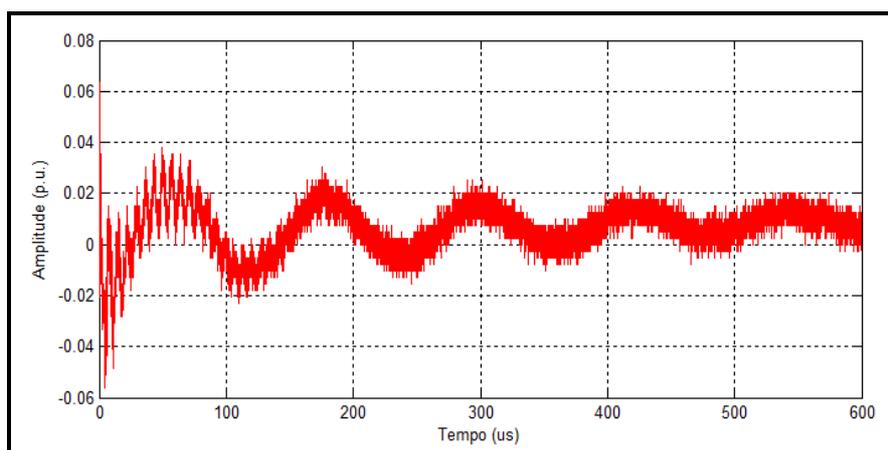


Figura 7.31 – Transitório de tensão da manobra de fechamento de uma chave seccionadora no lado de alta do autotransformador – 600  $\mu$ s

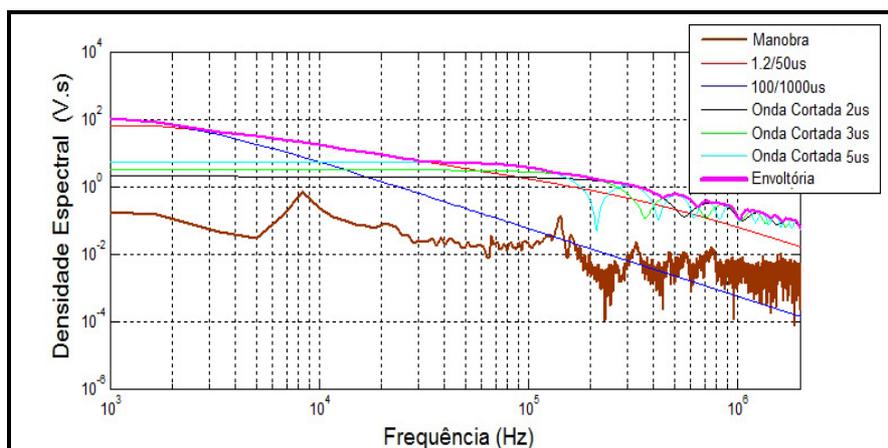


Figura 7.32 – Espectro de tensão transitória da manobra de fechamento de uma chave seccionadora no lado de alta do autotransformador – 600  $\mu$ s

A Tabela 7.2 sintetiza os resultados dos FSDF para as frequências relevantes de cada uma das respectivas manobras. Pela análise desta tabela observa-se que além da manobra de fechamento de disjuntor no lado de alta tensão, a manobra de fechamento da chave seccionadora apresentou valores mais próximos do FSDF em frequências mais baixas dos valores apresentados na Tabela 7.1, e novamente para a onda cortada (3  $\mu$ s) foi apresentado um valor de 379% acima do limite na manobra de fechamento de disjuntor e 85% acima do limite para a manobra de fechamento da chave seccionadora.

Tabela 7.2 – Síntese das abordagens utilizando o FSDF – 600  $\mu$ s

Medições de Manobra	Lado da Manobra	Autotransformador	Freq. Críticas (kHz)	FSDF		
				1.2/50us	Onda Cortada (3us)	Envoltória
Fech. Disjuntor	Baixa Tensão	Fase C - Fabricante #Z	46,7	0,33	0,40	0,25
	Alta Tensão		6,7	0,59	4,79	0,59
Abert. Chave Seccionadora	Baixa Tensão	Fase A - Fabricante #X	8,4	0,05	0,33	0,05
	Alta Tensão		8,3	0,05	0,17	0,05
Fech. Chave Seccionadora	Baixa Tensão	Fase A - Fabricante #X	8,5	0,06	0,40	0,06
			7,7	0,27	1,85	0,27
	Alta Tensão	Fase A - Fabricante #X	8,3	0,03	0,21	0,03

Pela análise realizada na Tabela 7.2 observa-se que além da manobra de fechamento de disjuntor no lado de alta tensão, a manobra de fechamento da chave seccionadora apresentou valores mais próximos do FSDF em frequências mais baixa, quando comparado com a análise dos resultados da Tabela 7.1, e novamente para a onda cortada ( $3 \mu\text{s}$ ) foi apresentado um valor de 379% acima do limite na manobra de fechamento de disjuntor e 85% acima do limite para a manobra de fechamento da chave seccionadora.

# Capítulo 8

## Conclusões, Constatações e Sugestões de Trabalhos Futuros

### 8.1 Conclusões

- Ao comparar as simulações e as medições das manobras de disjuntores pode-se perceber que, em alguns casos, os resultados obtidos apresentam diferenças tanto na amplitude quanto nas frequências ressonantes. Isso se deve principalmente à modelagem do autotransformador que, além das limitações em se obter uma medição que possa caracterizá-lo em todo o espectro de frequência e, posteriormente, obter um modelo que tenha a mesma resposta, as condições elétricas durante as medições de transitórios podem ser diferentes daquelas quando foram medidas as características do autotransformador;
- Na comparação entre as simulações e as medições de manobras de chaves seccionadoras é possível perceber que não foram obtidos resultados exatamente iguais, o que já era de se esperar, pois há um componente adicional que é a modelagem dos centelhamentos gerados por esta manobra. Mas, apesar da simplicidade do modelo, o resultado obtido apresentou grande semelhança à medição;

- É possível perceber que os transitórios gerados pelas manobras de chaves seccionadoras apresentam diferentes frequências quando comparados com os gerados pelas manobras de disjuntor;
- Uma das abordagens de análise das medições foi realizada superpondo informações de caracterização no domínio da frequência dos autotransformadores e as aplicações de FFT nas medições de manobras permitindo avaliar as coincidências de componentes de frequências dos eventos transitórios e regiões de ressonâncias dos autotransformadores;
- Outra abordagem de análise das medições foi realizada considerando a avaliação de risco envolvido nestas manobras por meio de um fator de severidade no domínio da frequência (FSDF), proposto pelo CIGRÉ através do grupo de estudos JWG A2/C4-03 que permite a avaliação do risco envolvido nas manobras e concluir sobre os valores máximos de sobretensão e a região do espectro de frequências da onda de tensão transitória resultante da excitação oscilatória envolvendo a interação de cada equipamento com o sistema;
- Foi apresentada uma proposta de estimação de classes para os eventos medidos, manobras de chaves seccionadoras e disjuntores, utilizando-se de uma árvore de decisão como algoritmo de classificação, sendo que para a utilização de um algoritmo de classificação é recomendado uma utilização maior de dados para que o mesmo não se torne tendencioso na classificação;
- A partir da superposição das informações de caracterização na frequência dos autotransformadores e as aplicações de FFT nas medições de manobras foram estimadas as componentes de frequência aos quais os enrolamentos, de baixa e alta tensão, do autotransformador são submetidos, a partir das medições das manobras consideradas mais críticas e da função de transferência do autotransformador;

- Foram realizadas avaliações de risco envolvido nas manobras consideradas mais críticas por meio de um fator de severidade no domínio da frequência (FSDF) utilizando um tempo máximo da janela igual a 100  $\mu$ s conforme abordagens realizadas pelo Grupo de trabalho conjunto JWG A2/C4-03 – CIGRÉ, Brasil – 2010 através da Brochura Técnica. Para os resultados com as frequências relevantes de cada uma das respectivas manobras observa-se que apenas a manobra de fechamento de disjuntor no lado de alta tensão apresentou valores mais próximos do FSDF, sendo que para a onda cortada (3  $\mu$ s) foi apresentado um valor de 51% acima do limite;
- Foram realizadas avaliações de risco envolvido nas manobras consideradas mais críticas por meio de um fator de severidade no domínio da frequência (FSDF) utilizando um tempo máximo da janela igual a 600  $\mu$ s. Ao se analisar as medições percebeu-se que as frequências que contribuem com a maior energia não apareciam por não estarem contidas na janela de 100  $\mu$ s. Pela análise realizada observa-se que além da manobra de fechamento de disjuntor no lado de alta tensão, a manobra de fechamento da chave seccionadora apresentou valores mais próximos do FSDF em frequências mais baixas, quando comparado com a análise utilizando a janela de 100  $\mu$ s, e novamente para a onda cortada (3  $\mu$ s) foi apresentado um valor de 379% acima do limite na manobra de fechamento de disjuntor e 85% acima do limite para a manobra de fechamento da chave seccionadora.

## 8.2 Constatações

- É de fundamental importância a caracterização no domínio da frequência dos autotransformadores, pois esta apresenta um espectro de frequência único através de sua função de transferência que reflete essencialmente as variações de seus parâmetros internos em função da frequência, apresentando como característica principal - frequências de ressonância e anti-ressonância;
- Pela mesma razão é de fundamental importância o conhecimento da caracterização no domínio da frequência de toda instrumentação envolvida nas medições;
- As características de toda instrumentação devem ser conhecidas a fim de conhecer os limites de tensão e banda de frequências para as medições;
- O monitoramento de transitórios de tensão com o divisor capacitivo em paralelo com uma das buchas do autotransformador é comumente utilizado, entretanto apresenta dificuldades na utilização do arranjo. Devido à sua montagem existe a necessidade de desligamento do autotransformador do barramento por um longo período;
- Outro desafio na utilização do divisor capacitivo para o monitoramento de transitórios de tensão é a dificuldade no transporte e logística necessária para sua disponibilização devido, principalmente, ao seu tamanho e peso;
- Quando do uso do divisor capacitivo a inserção de uma capacitância em paralelo com a bucha do autotransformador também deve ser considerada em relação à capacitância do barramento;

- Deve existir ainda a preocupação com a segurança dos trabalhadores e os equipamentos envolvidos na montagem do arranjo, pois a inserção do divisor é realizada em uma condição provisória e controlada, uma vez que a montagem do mesmo, normalmente, não é prevista no planejamento original da subestação;
- O monitoramento de transitórios de tensão com a unidade de baixa tensão (UBT) acoplada no tap capacitivo da bucha do autotransformador não é tão difundida quanto o monitoramento de transitórios de tensão com o divisor capacitivo em paralelo com uma das buchas do autotransformador, entretanto apresenta algumas vantagens da sua utilização, sendo uma das grandes vantagens o curto tempo necessário para sua montagem, mesmo mantendo a necessidade de desligamento do autotransformador, por questões de segurança;
- Devido à inserção da UBT no tap capacitivo da bucha minimiza-se qualquer mudança na característica do barramento;
- Mesmo não existindo um planejamento prévio para a instalação das UBT's em equipamentos da subestação, esta pode ser realizada de maneira provisória ou permanente devido, principalmente, a facilidade da instalação e confecção das mesmas;
- A medição por demanda consiste em monitorar continuamente a medição com um sistema de medição previamente ajustado. Os ajustes são realizados a partir da verificação dos eventos e suas características, uma vez detectado transitórios de tensão o sistema adquire o mesmo, e para a realização de uma próxima medição é necessário reiniciar o processo de medição;
- O sistema de medição SOMALite possibilita o monitoramento contínuo de transitórios de tensão e se baseia em um sistema computacional desenvolvido

com o objetivo de servir como uma ferramenta para possibilitar a aquisição contínua de dados, auxiliando na análise eventos que surgem na subestação;

- Para realizar a superposição das informações foi necessária a normalização das medições de manobra e da caracterização dos autotransformadores em relação à componente de frequência de 60 Hz;
- Foram identificadas as principais componentes dos transitórios de tensão de cada manobra realizada e medida, quer seja de um fechamento ou abertura de chaves seccionadoras, quer seja de um fechamento de disjuntores;

### **8.3 Sugestões de Trabalhos Futuros**

- A caracterização em frequência dos autotransformadores é utilizada basicamente para subsidiar os processos de transporte e manutenção. Estas também precisam ser realizadas com o objetivo de determinar parâmetros dos enrolamentos dos autotransformadores fornecendo os recursos necessários a modelagem de autotransformadores;
- Como a realização da medição de transitórios de tensão no campo ainda apresenta desafios, uma investigação quanto aos critérios e metodologias para análise de resultados é de grande interesse;
- Para o monitoramento de transitórios, além do uso do divisor capacitivo em paralelo com uma das buchas do autotransformador e o monitoramento de transitórios de tensão com a unidade de baixa tensão (UBT) acoplada no tap capacitivo da bucha do autotransformador sugere-se estudos buscando e avaliando alternativas;

- Um maior aprofundamento na modelagem de autotransformadores, utilizando modelos “caixa preta” a partir da caracterização em frequência dos autotransformadores (por exemplo: rotina Vector Fitting), ou até mesmo modelos “caixa branca” que permitem a verificação das ressonâncias internas dos enrolamentos, podem ser explorados;
- Pode-se explorar a modelagem da operação de uma chave seccionadora considerando todas as etapas de uma manobra, desde os centelhamentos até o seu completo fechamento ou abertura;
- Aprimoramento de um autotransformador permitindo avaliar o seu comportamento interno e as consequências da aplicação de um transitório de tensão contendo frequências próximas à ressonâncias do equipamento;
- Uma avaliação entre a relação do número de solicitações transitórias as quais o autotransformador fica submetido e sua suportabilidade ao longo do tempo de operação;
- Um maior conhecimento do comportamento do enrolamento frente aos surtos repetitivos que podem ocorrer devido aos diversos tipos de manobras inerentes a operação do sistema;
- Otimização da árvore de decisão para o auxílio nas análises dos resultados;
- Extração automática de parâmetros das manobras a partir das medições utilizando algoritmos de otimização associados a redes neurais;
- Criação de um banco de dados contendo um histórico das solicitações impostas aos autotransformadores de modo a possibilitar uma avaliação mais criteriosa das solicitações impostas ao mesmo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] A. D'Ajuz, C. S. Fonseca, F. M. S. Carvalho, J. Amon Filho, L. E. N. Dias, M. P. Pereira, P. C. V. Esmeraldo, R. Vaisman, S. O. Frontin, "*Transitórios elétricos e coordenação de isolamento – aplicação em sistemas de potencia de alta tensão*", Rio de Janeiro: FURNAS Centrais Elétricas e Universidade Federal Fluminense, 1987.

[2] Helvio J. A. Martins, Carlos Magno R. Vasques, Cintia de F. F. Carraro, Ítalo Foradini da Nova, Luiz Eduardo D. Santos, Miguel A.C. Michalski, Rogério M. Azevedo, Walter R. de Cerqueira Filho - "*Medição de transitórios eletromagnéticos oriundos de manobras controladas em três autotransformadores do banco AT07 (765/345 kV), da SE tijuco preto, em Mogi das Cruzes – SP*", Relatório Técnico CEPEL - DLE-9401/11, 2011.

[3] MACHADO, P. V., "*Efeitos de transitórios rápidos em transformadores de potência devido a chaveamento de equipamentos de manobra*" – Trabalho Conclusão de Curso – UFF – 2010.

[4] DE SOUSA, F., "*Estudo e projeto elétrico básico de uma SE*" – Universidade Federal do Espírito Santo – 2004.

[5] LIMA, G. dos A., "*Subestação*" – Centro Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco – CEFET-PE – 2007.

[6] LYNCE, M., “*Fundamentos sobre transitórios eletromagnéticos*” – Universidade Federal de Uberlândia – UFU – 2004.

[7] Helvio J. A. Martins, Alexandre N. da Silva, Thiago B. Dupim. “*Avaliação de transformadores trifásicos elevadores, 16/525 kV, 418,5 MVA – UHE Machadinho*” Relatório Técnico CEPEL - DIE-26.770/04 – 2004.

[8] ROCHA, A. C. O. “*Workshop sobre interação transformador-sistema*” – CEPEL – JWG CIGRE A2/C4.3 – Outubro de 2009.

[9] FERREIRA, C., “*Curso de especialização em sistemas elétricos*” – CESE – Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI – 2010.

[10] ROCHA, A. C. O. e outros, “*Interação entre transformadores e o sistema elétrico com foco nos transitórios eletromagnéticos de alta frequência*” – Brochura Técnica – Grupo de trabalho conjunto JWG A2/C4-03 – CIGRÉ, Brasil – 2010.

[11] ROBERT, R., “*Efeito pelicular*” – Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 22, nº 2 – Junho 2000.

[12] FREIRE, Antonio R. F. e outros, “*Interação transitória entre transformadores e o sistema elétrico: novos requisitos para a especificação*” Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE, Rio de Janeiro - RJ, Brasil, Outubro 2007.

[13] SILVA, M. T. F. da e outros, “*Buchas capacitivas de alta tensão para medição e monitoramento de transitórios*”, XIV ERIAC – CIGRÉ, Maio 2011.

[14] W. R. Cerqueira, O. B. Oliveira, A. Neves and F. A. Chagas, “*Capacitive and resistive attenuators for HV impulse measuring systems*”, 9th International Symposium on High Voltage Engineering, Graz, Austria, September 1995.

[15]. Michalski, M. A.C., “*Avaliação do funcionamento inicial do sistema SOMA Lite na SE tijuco preto*” Relatório Técnico CEPEL - DLE-17992/11- 2011.

[16] FILHO, C. S. P. e outros, “*Análise de redes elétricas no domínio do tempo - introdução ao ATP*” CESEP/UFMG.

[17] Report Prepared by the Fast front Transients Task Force. “*Modeling guidelines for fast front transients*” – IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, nº 1, Janeiro 1996.

[18] GUSTAVSEN, B. e Semlyen, A., “*Rational approximation of frequency domain by vector fitting*” – IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, nº 3, Julho 1999.

[19] AZEVEDO, R. M., e outros. “*Modelagem do circuito de ensaio de geração de arco elétrico no ATP*” – XIII ERIAC – Argentina – 2009.

[20] Antunes, R.<sup>(1)</sup>; Massaro, U. R. R.; Fernandes, A. B.<sup>(2)</sup>; Freire, A. R. R.<sup>(3)</sup>  
“*Sobretensões transitórias de alta frequência quando da energização de transformadores*” (1)ELETROSUL, Florianópolis, SC, Brasil; (2) ONS, Recife, PE, Brasil; (3) CHESF, Recife, PE, Brasil.

[21] NBR 6939 “*Coordenação do isolamento – procedimento*” – Novembro de 2000.

[22] H. J. A. Martins, A. Neves, “Investigation about failures in 500 kV/185 MVA generator transformers at Luiz Gonzaga”, 12nd International Symposium on High Voltage Engineering, Bangalore, India, 2001.

[23] DOMMEL, H. W. “*Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multiphase networks*” – IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-88, nº 4, Abril 1969.

[24] DOMMEL, H. W. “*Eletromagnetic transients program reference book (EMTP Theory Book)*” – Bonneville Power Administration, Portland, USA, 1986.

[25] LEUVEN EMTP Center. “*ATP – alternative transient program – rule book*” – Herverlee, Belgium.

[26] BECHARA, R. “*Análise de falhas de transformadores de potência*” – Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo – 2010.

[27] BRAGA, A. P.; LUDEMIR, T. B.; CARVALHO, A. C. P. L. F, “*Redes neurais artificiais – teoria e aplicações*” Editora LTC – 2000

[28] DINIZ, S. S. “*Uso de técnicas neurais para o reconhecimento de comandos à voz*”  
Dissertação de Mestrado – Instituto Militar de Engenharia: Rio de Janeiro, 1997.

[29] FONSECA, J. M. R. da. “*Indução de arvores de decisão*” - Dissertação de  
Mestrado – Universidade Nova de Lisboa: Lisboa, 1994.

[30] SHIBA, M. H. e outros. “*Classificação de imagens de sensoriamento remoto pela  
aprendizagem por árvore de decisão: uma avaliação de desempenho*” – XII Simpósio  
Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia – Brasil – 2005.

[31] Stuart Russel, Peter Norvig. “*Artificial intelligence, a modern approach.*” – Second  
Edition, Prentice Hall, 2003.

[32] Hunt, E. B., Marin, J., & Stone, P. J. “*Experiments in induction*” – New York:  
Academic Press, 1966.