

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**MODELAGEM *BLACK-BOX* DE TRANSFORMADORES DE
POTÊNCIA EM ALTAS FREQUÊNCIAS**

Gabriela Sampaio Rêma

Outubro de 2018

Itajubá - MG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Gabriela Sampaio Rêma

**MODELAGEM *BLACK-BOX* DE TRANSFORMADORES DE
POTÊNCIA EM ALTAS FREQUÊNCIAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Ph.D. Benedito Donizeti Bonatto

Coorientador: Dr. Helvio Jailson Azevedo Martins

Outubro de 2018

Itajubá - MG

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela saúde, sabedoria e força para conclusão deste ciclo. Aos meus pais, pelo apoio.

Agradeço ao professor Benedito Donizeti Bonatto pela orientação e apoio na realização deste trabalho.

Agradeço ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e ao Cepel (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica) pelo financiamento.

Agradeço à toda equipe do LabDig (Laboratório de Diagnóstico em Equipamentos e Instalações Elétricas) do Cepel pelas orientações, conversas e experiências. Em especial, ao pesquisador Carlos Magno Rodrigues Vasques pela orientação, oportunidade e confiança no meu trabalho. Aos pesquisadores Dickson Silva de Souza e Rômulo dos Santos Delgado pelas conversas e orientações diárias. Ao Helvio Jailson Azevedo Martins pela coorientação e atenção.

Agradeço todo auxílio, orientações, disponibilidade e atenção do pesquisador Rogério Magalhães de Azevedo do Cepel e Guilherme Sarcinelli Luz do ONS (Operador Nacional do Sistema).

Agradeço também às equipes do Cepel / Furnas envolvidas nas medições apresentadas neste trabalho.

Aos professores da Unifei pela dedicação e orientação nas disciplinas cursadas ampliando o meu conhecimento na área e ao professor Antonio Carlos Siqueira de Lima da UFRJ/COPPE pelas orientações.

Aos meus amigos que de certa forma participaram desta etapa.

RESUMO

Para estudos de transitórios eletromagnéticos faz-se necessário um modelo do transformador de potência em altas frequências. Modelou-se o transformador por sua impedância vista do terminal de alta tensão. Trata-se de um transformador de potência monofásico de 200 MVA, $500/\sqrt{3}$ / $138/\sqrt{3}$ / 13,8 kV instalado em uma subestação. Foi utilizada a metodologia *black-box* através de medições em campo de impedância terminal na frequência de 20 Hz a 10 MHz por meio do acesso a terminais externos do transformador. Identificaram-se três modelos do transformador de potência e realizou-se uma análise comparativa entre eles: modelo baseado na análise da impedância terminal relacionando os pontos ressonantes através do fator de qualidade, modelo aproximado através do *Vector Fitting* e modelo *Saturable Transformer* associado a impedâncias complementares. Os modelos Impedância Terminal e *Saturable Transformer* baseiam-se nos pontos ressonantes da curva de impedância terminal na frequência. Já o *Vector Fitting* gera uma função, através da realocação de polos, que se aproxima da curva medida. Simularam-se as manobras de chaves seccionadoras através do *ATPDraw / ATP – Alternative Transients Program* – e realizou-se a validação dos modelos na faixa de frequência de 20 kHz a 10 MHz, com maior precisão até 2,5 MHz, através da medição em campo de transitórios de tensão.

Palavras-chave – Modelagem de Transformadores de Potência; Altas Frequências; Transitórios Eletromagnéticos; Modelagem *Black-Box*; Resposta em Frequência; Impedância Terminal; Medições em Campo; *ATPDraw / ATP*.

ABSTRACT

For electromagnetic transient studies it is necessary creating a model of the power transformer at high frequencies. The transformer was modeled by its impedance seen from the high voltage terminal. It is a single-phase power transformer of 200 MVA, $500/\sqrt{3}$ / $138/\sqrt{3}$ / 13.8 kV installed in a substation. The black-box methodology was used through terminal impedance field measurements at the frequency of 20 Hz to 10 MHz through access to transformer external terminals. Three models of the power transformer were identified and a comparative analysis was carried out: a model based on the analysis of the terminal impedance relating the resonance points through the quality factor, approximate model through Vector Fitting and Saturable Transformer model associated to impedances complementary. The Terminal Impedance and Saturable Transformer models are based on the resonant points of the terminal impedance curve at the frequency. While Vector Fitting generates a function, through the reallocation of poles, that approaches the measured curve. Disconnecting switches simulations were performed with the ATPDraw / ATP – Alternative Transients Program – and validation of the models in the 20 kHz to 10 MHz frequency range, with greater accuracy up to 2.5 MHz, was achieved by field measurements of voltage transients.

Keywords – Modeling of Power Transformers; High Frequencies; Electromagnetic Transients; Black-Box Modeling; Frequency Response; Terminal Impedance; Field Measurements; ATPDraw / ATP.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	II
ABSTRACT	III
SUMÁRIO	IV
LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE ABREVIATURAS	XI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO	1
1.2. OBJETIVO	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1. MODELAGEM	4
2.2. TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA	4
2.3. METODOLOGIAS DE MODELAGEM	5
2.4. CARACTERIZAÇÃO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	6
2.5. SOBRETENSÕES	8
2.6. SOLICITAÇÕES TRANSITÓRIAS DE ALTA FREQUÊNCIA	9
2.7. ATPDRAW / ATP	10
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
4. METODOLOGIA	18
5. MODELAGEM DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA	24
5.1. MODELO DO FABRICANTE	25
5.2. MODELO A PARTIR DA ANÁLISE DA IMPEDÂNCIA TERMINAL RELACIONANDO OS PONTOS RESSONANTES ATRAVÉS DO FATOR DE QUALIDADE	27
5.3. FUNÇÃO APROXIMADA ATRAVÉS DO <i>VECTOR FITTING</i>	30
5.4. MODELO <i>SATURABLE TRANSFORMER</i> DO <i>ATPDRAW</i> ASSOCIADO A IMPEDÂNCIAS COMPLEMENTARES	36
5.5. PROPOSTA ASSOCIANDO OS MODELOS BASEADOS NA IMPEDÂNCIA TERMINAL À TRANSFERÊNCIA DE TENSÃO NA FREQUÊNCIA	39
5.6. COMPARAÇÃO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA ENTRE OS TRÊS MODELOS	40
6. ANÁLISES E RESULTADOS	43
6.1. SIMULAÇÕES	44
6.2. MEDIÇÕES EM CAMPO DE TRANSITÓRIOS DE TENSÃO	52
6.3. VALIDAÇÃO DOS MODELOS DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA EM ALTAS FREQUÊNCIAS	61
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
7.1. CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES	72
7.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	74
7.3. PUBLICAÇÕES E ATIVIDADES NA ÁREA	75
REFERÊNCIAS	78

APÊNDICE A – MEDIÇÕES EM CAMPO DE TRANSFERÊNCIA DE TENSÃO NA FREQUÊNCIA.....	82
APÊNDICE B – EQUAÇÕES APROXIMAÇÃO ATRAVÉS DO VECTOR FITTING (GUSTAVSEN, SEMLYEN, 1999)	86
APÊNDICE C – CIRCUITO APROXIMADO ATRAVÉS DO VECTOR FITTING COM 84 POLOS.....	89
APÊNDICE D – CIRCUITO APROXIMADO ATRAVÉS DO VECTOR FITTING COM 15 POLOS.....	92
APÊNDICE E – MATRIZ DE ADMITÂNCIA	93
APÊNDICE F – CIRCUITO APROXIMADO ATRAVÉS DO VECTOR FITTING COM 15 POLOS – 2,5 MHZ	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Transformador de Potência Monofásico 200MVA, 500/3 / 138/3 / 13,8 (kV) instalado em uma subestação.	18
Figura 4.2 – Saída do prédio de 500 kV – Bancos de transformadores.	19
Figura 4.3 – Representação (a) dos pontos de acesso considerados e (b) da condição dos demais terminais.	20
Figura 4.4 – Medidor RLC Quadtech 7600.	20
Figura 4.5 – Medidor RLC HP 4285A.	20
Figura 4.6 – Diagrama representativo da medição de impedância do terminal 1 – alta tensão.	21
Figura 4.7 – Medição da impedância na frequência vista pelo terminal 1 – alta tensão.	21
Figura 4.8 – Diagrama representativo da medição de impedância do terminal 2 – baixa tensão.	22
Figura 4.9 – Medição da impedância na frequência vista pelo terminal 2 – baixa tensão.	22
Figura 5.1 – Circuito sintetizado: modelo fabricante.	25
Figura 5.2 – Módulo da impedância vista pelo terminal de alta tensão – Modelo fabricante.	26
Figura 5.3 – Ângulo da impedância vista pelo terminal de alta tensão – Modelo fabricante.	26
Figura 5.4 – Comparação entre medição e simulação: modelo fabricante.	27
Figura 5.5 – Medição do módulo da impedância na frequência vista pelo terminal de alta tensão – Destaque para os pontos considerados na modelagem.	27
Figura 5.6 – Definição da largura de banda considerada.	28
Figura 5.7 – Circuito sintetizado: modelo Impedância Terminal.	29
Figura 5.8 – Comparação entre módulo medição e simulação: modelo Impedância Terminal.	29
Figura 5.9 – Comparação entre ângulo medição e simulação: modelo Impedância Terminal.	30
Figura 5.10 – Circuito sintetizado utilizando o <i>Vector Fitting</i>	31
Figura 5.11 – Fluxograma geral do programa <i>Vector Fitting</i>	31
Figura 5.12 – Curva aproximada através <i>Vector Fitting</i> com 84 polos.	32
Figura 5.13 – Circuito resultante do <i>Vector Fitting</i> importado para o <i>ATPDraw</i>	33
Figura 5.14 – Comparação entre o módulo da medição e simulação: varredura na frequência do circuito resultante do <i>Vector Fitting</i> aproximado com 84 polos.	33
Figura 5.15 – Comparação entre o ângulo da medição e simulação: varredura na frequência do circuito resultante do <i>Vector Fitting</i> aproximado com 84 polos.	33
Figura 5.16 – Curva aproximada através <i>Vector Fitting</i> com 15 polos.	34
Figura 5.17 – Curva aproximada através <i>Vector Fitting</i> com 84 e 15 polos na faixa de frequência de 100 kHz a 10 MHz.	34
Figura 5.18 – Comparação entre o módulo da medição e simulação: varredura na frequência do circuito resultante do <i>Vector Fitting</i> aproximado com 15 e 84 polos.	35
Figura 5.19 – Comparação entre o ângulo da medição e simulação: varredura na frequência do circuito resultante do <i>Vector Fitting</i> aproximado com 15 e 84 polos.	35

Figura 5.20 – Configuração do modelo <i>Saturable Transformer</i> do <i>ATPDraw</i> .	36
Figura 5.21 – Modelo ajustado a partir do <i>Saturable Transformer</i> associado a impedâncias complementares.	37
Figura 5.22 – Comparação entre o módulo da medição e simulação: modelo <i>Saturable</i> –	37
Figura 5.23 – Comparação entre o ângulo da medição e simulação: modelo <i>Saturable</i> – Impedância do terminal de alta tensão.	38
Figura 5.24 – Comparação entre o módulo da medição e simulação: modelo <i>Saturable</i> – Impedância do terminal de baixa tensão.	38
Figura 5.25 – Comparação entre o ângulo da medição e simulação: modelo <i>Saturable</i> – Impedância do terminal de baixa tensão.	38
Figura 5.26 – Representação do método utilizando a impedância vista do terminal 1 e a transferência de tensão.	39
Figura 5.27 – Comparação entre o módulo da medição e simulação com os três modelos.	41
Figura 5.28 – Comparação entre o ângulo da medição e simulação com os três modelos.	41
Figura 6.1 – Diagrama unifilar do trecho manobrado da subestação.	43
Figura 6.2 – Trecho da subestação simulado no <i>ATPDraw</i> utilizando o modelo JMarti – Simulação da manobra da chave 9447.	45
Figura 6.3 – Diferença de tensão simulada entre os polos da chave.	45
Figura 6.4 – Tensão - Manobra da chave 9447 – Simulação: modelo Impedância Terminal.	46
Figura 6.5 – Tensão - Manobra da chave 9447 – Simulação: modelo <i>Vector Fitting</i> .	46
Figura 6.6 – Tensão - Manobra da chave 9447 – Simulação: modelo <i>Saturable</i> .	46
Figura 6.7 – Tensão - Manobra da chave 9447 – Simulação.	47
Figura 6.8 – FFT da tensão - Manobra da chave 9447 – Simulação.	47
Figura 6.9 – Tensão - Manobra da chave 9437 – Simulação: modelo Impedância Terminal.	49
Figura 6.10 – Tensão - Manobra da chave 9437 – Simulação: modelo <i>Vector Fitting</i> .	49
Figura 6.11 – Tensão - Manobra da chave 9437 – Simulação: modelo <i>Saturable</i> .	49
Figura 6.12 – Tensão - Manobra da chave 9437 – Simulação.	50
Figura 6.13 – FFT da tensão - Manobra da chave 9437 – Simulação.	50
Figura 6.14 – Unidade secundária, atenuador e transmissor de fibra óptica conectados o tap capacitivo da bucha de alta tensão.	53
Figura 6.15 – Sistema de medição integrado ao tap capacitivo da bucha de alta tensão.	53
Figura 6.16 – Caracterização do sistema de medição na frequência.	54
Figura 6.17 – Representação da manobra de abertura da chave 9447.	56
Figura 6.18 – Tensão no tempo a partir da manobra da chave 9447 – Medição.	56
Figura 6.19 – FFT da tensão a partir da manobra da chave 9447 – Medição.	57
Figura 6.20 – Impulso máximo positivo de tensão a partir da manobra da chave 9447 no tempo – Medição.	57
Figura 6.21 – FFT do impulso de tensão máximo positivo a partir da manobra da chave 9447 – Medição.	58
Figura 6.22 – Representação da manobra de abertura da chave 9437.	58
Figura 6.23 – Tensão no tempo a partir da manobra da chave 9437 – Medição.	58
Figura 6.24 – FFT da tensão a partir da manobra da chave 9437 – Medição.	59

Figura 6.25 – Impulso máximo negativo de tensão a partir da manobra da chave 9437 no tempo – Medição.....	59
Figura 6.26 – FFT do impulso de tensão máximo negativo a partir da manobra da chave 9437 – Medição.	59
Figura 6.27 – FFT do impulso de tensão de maior amplitude a partir da manobra das chaves 9447 e 9437 – Medição.	60
Figura 6.28 – Tensão - Manobra da chave 9447 – Modelo Impedância Terminal x Medição.....	62
Figura 6.29 – Tensão - Manobra da chave 9447 – Modelo <i>Vector Fitting</i> x Medição.....	62
Figura 6.30 – Tensão - Manobra da chave 9447 – Modelo <i>Saturable</i> x Medição.	62
Figura 6.31 – FFT da tensão - Manobra da chave 9447 – Modelo Impedância Terminal x Medição.....	63
Figura 6.32 – FFT da tensão - Manobra da chave 9447 – Modelo <i>Vector Fitting</i> x Medição.....	63
Figura 6.33 – FFT da tensão - Manobra da chave 9447 – <i>Saturable Transformer</i> x Medição.....	63
Figura 6.34 – FFT da tensão - Manobra da chave 9447 – Simulação x Medição.	64
Figura 6.35 – Tensão - Manobra da chave 9437 – Modelo Impedância Terminal x Medição.....	64
Figura 6.36 – Tensão - Manobra da chave 9437 – Modelo <i>Vector Fitting</i> x Medição.....	65
Figura 6.37 – Tensão - Manobra da chave 9437 – Modelo <i>Saturable</i> x Medição.	65
Figura 6.38 – FFT da tensão - Manobra da chave 9437 – Modelo Impedância Terminal x Medição.....	65
Figura 6.39 – FFT da tensão - Manobra da chave 9437 – Modelo <i>Vector Fitting</i> x Medição.....	66
Figura 6.40 – FFT da tensão - Manobra da chave 9437 – Modelo <i>Saturable</i> x Medição.	66
Figura 6.41 – FFT da tensão - Manobra da chave 9437 – Simulação x Medição.	66
Figura 6.42 – Módulo da impedância do terminal de alta tensão na frequência, destacando a faixa	68
Figura 6.43 – Ângulo da impedância do terminal de alta tensão na frequência, destacando a faixa até 2,5 MHz.....	68
Figura 6.44 – Curva aproximada através do <i>Vector Fitting</i> até 2,5 MHz.	69
Figura 6.45 – Comparação entre o módulo da medição e simulação: varredura na frequência do circuito resultante do <i>Vector Fitting</i> aproximado com 15 polos até 2,5 MHz.	69
Figura 6.46 – Comparação entre o ângulo da medição e simulação: varredura na frequência do circuito resultante do <i>Vector Fitting</i> aproximado com 15 polos até 2,5 MHz.	69
Figura 6.47 – FFT da tensão até 2,5 MHz - Manobra da chave 9437– Modelo <i>Vector Fitting</i> até 2,5 MHz e até 10 MHz x Medição.....	70
Figura 6.48 – FFT da tensão até 2,5 MHz - Manobra da chave 9437– Modelo <i>Vector Fitting</i> até 2,5 MHz, Modelo Impedância Terminal e Modelo <i>Saturable</i> x Medição.....	70
Figura A.1 – Instrumentação da medição de transferência de tensão na frequência montada em campo.	82
Figura A.2 – Diagrama representativo da medição de transferência de tensão entre os terminais 1 e 2 (aplicação terminal 1).....	83

Figura A.3 – Medição da transferência de tensão entre os terminais 1 e 2 (aplicação no terminal 1).	83
Figura A.4 – Diagrama representativo da medição de transferência de tensão entre os terminais 2 e 1 (aplicação terminal 2).....	84
Figura A.5 – Medição da transferência de tensão entre os terminais 2 e 1 (aplicação no terminal 2).	84
Figura A.6 – Relação entre a impedância e transferência de tensão – Terminal 1. ..	85
Figura A.7 – Relação entre a impedância e transferência de tensão – Terminal 2. ..	85
Figura D.1 – Condição dos terminais considerando três pontos de acesso.....	93
Figura D.2 – Condição dos terminais considerando dois pontos de acesso.	95
Figura D.3 – Impedância mútua Z_{21} calculada através da medição de impedância terminal e transferência de tensão.	95
Figura D.4 – Impedância mútua Z_{12} calculada através da medição de impedância terminal e transferência de tensão.	96
Figura D.5 – Medição da impedância vista do terminal 1 com os outros terminais curtos-circuitados e aterrados considerando dois pontos de acesso.	97
Figura D.6 – Impedância mútua calculada através do método híbrido – medição de impedância com os terminais abertos e curtos-circuitados e aterrados.	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classes e formas de onda das solicitações de tensão.....	9
Tabela 3.1 – Origem dos transitórios elétricos e faixas de frequências associadas..	12
Tabela 3.2 – Classificação relacionando os grupos à faixa de frequência e aos surtos transitórios.....	12
Tabela 4.1 – Relação dos terminais com os enrolamentos.....	19
Tabela 5.1 – Parâmetros do modelo a partir da análise da impedância terminal na frequência.	29
Tabela 6.1 – Principais componentes de frequência da simulação utilizando os três modelos – Manobra da chave 9447.	48
Tabela 6.2 – Principais componentes de frequência da simulação utilizando os três modelos – Manobra da chave 9437.	51
Tabela 6.3 – Principais componentes de frequência da tensão transitória medida – Manobra das chaves 9447 e 9437.	60

LISTA DE ABREVIATURAS

ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
C	Capacitor
Cepel	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
EMTDC	<i>Electromagnetic Transients including DC</i>
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program</i>
f	frequência
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
kHz	Quilo Hertz
kV	Quilo Volts
L	Indutor
LabDig	Laboratório de Diagnóstico em Equipamentos e Instalações Elétricas
MHz	Mega Hertz
NBR	Norma brasileira
PSCAD	<i>Power Systems Computer Aided Design</i>
Q	Fator de qualidade
R	Resistor
RLC	Resistor – Indutor – Capacitor
SF ₆	Hexafluoreto de enxofre
SFRA	<i>Sweep Frequency Response Analyzer</i>
TRT	Tensão de restabelecimento transitória
U _m	Tensão máxima de linha
Z	Impedância

1. INTRODUÇÃO

O sistema elétrico está sujeito a perturbações eletromagnéticas que podem colocar em risco os equipamentos ligados a ele. Tratam-se de variações transitórias de altas frequências. E é neste curto período em que os equipamentos estão expostos às maiores solicitações, o que pode comprometer sua vida útil e, conseqüentemente, a confiabilidade e qualidade do fornecimento de energia elétrica.

Sendo assim, faz-se pertinente estudos sobre a interação entre os equipamentos de alta tensão e o sistema e análise das solicitações elétricas impostas aos equipamentos.

“Na análise de transitórios, um dos mais importantes aspectos é o fato de que um componente físico pode ter diferentes modelos de representação; dependendo do contexto do problema estudado” (AJUZ, *et al*, 1987, p.15).

1.1. MOTIVAÇÃO

Há aproximadamente 30 anos, em uma subestação do Sistema Interligado Brasileiro, três unidades de transformador de potência e uma bucha falharam, além do aumento dos valores de descargas parciais em várias buchas do mesmo tipo (FEITOSA, *et al*). Trata-se de uma subestação de 500 / 138 kV blindada isolada a SF₆, de grande importância para o suprimento de energia elétrica de uma determinada região.

As análises na época indicaram a ocorrência de solicitações transitórias de alta frequência relacionadas a algumas manobras de chaves seccionadoras realizadas no lado de 500 kV como possível causa das falhas. Desta forma, “determinou-se a restrição de operação destas chaves que, desde então, não são operadas quando um dos seus terminais está sob tensão” (FEITOSA, *et al*, p.2).

Estas restrições acarretam, em algumas situações, penalizações e cobranças à empresa transmissora de energia responsável pela subestação, além de levarem a manobras adicionais de disjuntores e, por vezes, o compensador síncrono é desnecessariamente desligado.

Com o objetivo de analisar a possibilidade de retirar as restrições operativas,

que vêm causando prejuízos financeiros e operacionais, iniciou-se uma investigação para avaliar a interação das solicitações elétricas originadas das manobras de chaves seccionadoras no lado de 500 kV com as unidades transformadoras. A etapa de simulação é parte desta investigação e o modelo do transformador impacta diretamente os resultados das simulações.

1.2. OBJETIVO

Para análise da interação entre as solicitações de transitórios eletromagnéticos gerados a partir das manobras de chaves seccionadoras e o transformador de potência faz-se necessário a representação do equipamento em altas frequências.

A representação do transformador na frequência nominal não é suficiente – com o aumento da frequência, o efeito capacitivo é predominante. Por outro lado, a representação de todos os elementos que caracterizam o transformador em altas frequências não é prática. Portanto, deve-se construir um modelo representativo e prático, que atenda à faixa de frequência de interesse, para que haja confiabilidade e robustez nos resultados das simulações.

O objetivo desta dissertação é a identificação de modelos em altas frequências do transformador de potência para estudos de transitórios eletromagnéticos e fazer uma análise comparativa entre estes modelos. Tratam-se de modelos baseados em medições em campo de resposta em frequência.

Para validação e análise dos modelos, compara-se a simulação à medição de transitórios de tensão gerados a partir de manobras de chaves seccionadoras do lado de 500 kV.

Tanto as medições de resposta em frequência para caracterização e modelagem do transformador, quanto as medições de transitórios de tensão foram realizadas pelo LabDig do Cepel.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

De forma a atingir os objetivos propostos, esta dissertação está dividida em sete capítulos.

O Capítulo 1 introduz o tema deste trabalho, apresenta a motivação para escolha do assunto, o contexto no qual está inserido e o objetivo.

No Capítulo 2 são apresentados alguns conceitos e definições relacionados ao tema, que serão mencionados no decorrer da dissertação.

No Capítulo 3 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre modelagem de transformadores, referencia-se alguns trabalhos consagrados da literatura e publicações recentes sobre o assunto.

No Capítulo 4 é apresentada a metodologia utilizada para a modelagem do transformador de potência, e faz-se uma descrição das medições de impedância terminal na frequência realizadas em campo.

O Capítulo 5 apresenta os três modelos do transformador e os métodos de análise da curva de impedância na frequência para se chegar até eles.

No Capítulo 6 validam-se os modelos comparando a simulação às medições em campo de transitórios de tensão.

As conclusões, propostas para trabalhos futuros, artigos publicados e atividades na área são apresentadas no Capítulo 7 e, em seguida, as referências bibliográficas que embasaram esta dissertação.

Há, ainda, os Apêndices de A a E contendo as medições de transferência de tensão, as equações para montagem da matriz de admitância e as sínteses dos circuitos aproximados através do *Vector Fitting*.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este trabalho trata da modelagem do transformador de potência em altas frequências. Serão abordados conceitos e definições relacionados ao tema e que serão mencionados e/ou tratados no decorrer da dissertação.

2.1. MODELAGEM

Um modelo, segundo Ogata (1998), é uma representação de um dado sistema e sua validade depende do quanto se aproxima do comportamento real do mesmo. A modelagem é definida como a elaboração de um modelo, utilizando uma linguagem, um meio e segundo um ponto de vista.

Há diferentes maneiras de representar um sistema, dependendo da perspectiva e aplicação considerada. Sendo assim, um modelo matemático não é o único para um dado sistema. É possível aumentar a precisão de um modelo, porém, na maioria das vezes, isso acarreta em uma maior complexidade. Sendo assim, deve-se estabelecer um compromisso entre a simplicidade do modelo e a precisão dos resultados da análise (OGATA, 1998).

2.2. TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

De acordo com Mamede (2011), o transformador é um equipamento de operação estática que, por meio de indução eletromagnética, transfere energia do circuito primário para o circuito secundário e terciário, sendo, no entanto, mantida a mesma frequência, porém com tensões e correntes diferentes.

Vasques (2011) define os transformadores como equipamentos 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.

Segundo Suñé *et al* (2013), o transformador de potência é um equipamento de fundamental importância para o Sistema Elétrico, sendo responsável pela transformação de tensão. Pode ter como função a elevação – aplicações em subestações de geração, por exemplo – ou rebaixamento – aplicações em sistemas de transmissão ou distribuição, por exemplo – da mesma. Além de sua importância operacional, possui também grande valor financeiro agregado, sendo o de maior

significância em uma subestação de transmissão e distribuição elétrica. Estas características associadas tornam essencial a confiabilidade e disponibilidade deste equipamento.

Ainda de acordo com Suñé *et al* (2013, p.7), “falhas destes ativos podem ocasionar interrupções de fornecimento de energia por períodos prolongados, podendo repercutir no sistema produtivo industrial e na sociedade de forma geral”.

Logo, a definição do objeto em estudo é devido à sua importância para o Sistema Elétrico de Potência, que possui relação direta com a confiabilidade e disponibilidade do fornecimento de energia elétrica; ao seu valor financeiro agregado e à complexidade na construção.

2.3. METODOLOGIAS DE MODELAGEM

Para se construir um modelo de transformador de potência em altas frequências há, basicamente, três metodologias: *white-box*, *black-box* e *grey-box*. Chega-se até um modelo *white-box* a partir de informações dos aspectos construtivos do equipamento, e são necessários detalhes dos enrolamentos. Já a metodologia *black-box* baseia-se no comportamento do equipamento na frequência e o acesso é através dos terminais externos do transformador. A proposta da metodologia *grey-box* combina as duas metodologias, associando as informações de pontos internos à resposta em frequência do equipamento.

O modelo *black-box* é um equivalente terminal de um dado componente da rede, que permite o cálculo de tensões e correntes. A vantagem deste método é que o modelo pode ser calculado sem a necessidade de conhecimento sobre suas características internas (MARTINS, 2007), informações, na maioria das vezes, restritas ao fabricante.

Os equivalentes obtidos através das medições de impedância / admitância nos terminais do transformador na frequência são adequados para simular a interação de eventos transitórios de alta frequência entre o transformador e a rede (GUSTAVSEN, et al, 2017).

Para se chegar a um modelo do transformador de potência através da metodologia *black-box* é necessário conhecer o comportamento do transformador na frequência.

2.4. CARACTERIZAÇÃO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Os ensaios de resposta em frequência medem a impedância ou admitância dos terminais e a transferência de tensão entre os terminais de transformadores sob uma determinada faixa de frequência. São largamente utilizados para fins de diagnóstico.

Suñé *et al* (2013, p.7) descrevem sobre a resposta em frequência para uso na análise de diagnóstico de transformadores:

As medições realizadas em transformadores em bom estado fornecem um diagrama de resposta em frequência de referência ou também denominado no meio técnico “assinatura do transformador”. Obter esta informação é importante porque é com ela que são comparadas as medições de resposta em frequência realizadas após a ocorrência de eventos no sistema, que podem ter danificado os enrolamentos do transformador.

Segundo Rocha *et al* (2011, p.101):

As medições de resposta em frequência dos transformadores, que são atualmente utilizadas basicamente para subsidiar os processos de Manutenção, precisam ser realizadas também com o objetivo de determinar as matrizes de admitância próprias e mútuas entre fases e enrolamentos, fornecendo os recursos necessários à modelagem de transformadores [...].

A caracterização no domínio da frequência, quando feita para fins de modelagem, deve levar em consideração, por exemplo, a condição dos outros terminais e o nível de interferência na medição de fase, pontos que não são tão relevantes tratando-se da análise para diagnóstico. Outro ponto importante é que os terminais não considerados como pontos de acesso, devem permanecer inalterados e na sua condição de operação.

Yu, Zanjí e Chong (2009) afirmam que para calcular a impedância terminal e a transferência de tensão entre os terminais, não é necessário obter a distribuição de corrente ou de tensão nos enrolamentos, apenas as tensões e as correntes nos seus pontos terminais.

No ensaio de impedância na frequência mede-se a impedância do terminal para o referencial de terra. Trata-se da impedância do transformador vista pelo terminal.

A impedância – resistências e reatâncias – deve possuir seus valores de ângulos de fase na faixa entre -90° e 90° , de acordo com a Equação 1.

$$Z = R \pm jX \quad (1)$$

O indutor e o capacitor possuem suas reatâncias variantes com a frequência segundo as Equações 2 e 3 e fazem referência aos zeros e polos, respectivamente, da curva de impedância terminal. Sendo assim, quanto maior a frequência maior a reatância indutiva e menor a reatância capacitiva.

$$X_L = 2\pi fL \quad (2)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (3)$$

Já a técnica da transferência de tensão consiste na aplicação de um sinal de tensão em um dos terminais e a medição do efeito desta excitação em um outro terminal. Trata-se da função de transferência de tensão. Medindo-se a transferência de tensão entre terminais de enrolamentos distintos, caracteriza-se uma medição da relação de transformação em frequências diferentes de 60Hz (MARTINS, 2007).

Há dois métodos de realizar o ensaio de transferência de tensão: através da aplicação de impulso de tensão de baixa amplitude ou aplicando um sinal senoidal de tensão e variando sua frequência.

De acordo com Ogata (1998, p.386):

Um sistema linear e invariante no tempo, submetido a uma excitação senoidal, terá como resposta, em regime estacionário, um sinal também senoidal da mesma frequência do sinal de entrada. Mas a amplitude e o ângulo de fase do sinal de saída serão, em geral, diferentes da amplitude e do ângulo de fase do sinal de entrada. [...] A representação de módulo da função de transferência e ângulo de fase na frequência dá-se o nome de Diagrama de Bode.

Já quando se utiliza um sinal impulsivo para a obtenção da função de transferência é necessário transformar o sinal aplicado e o medido para o domínio da frequência. Para tanto, utiliza-se a Transformada de Fourier. Utilizando o método impulsivo tem-se limitação quanto à frequência máxima alcançada (MARTINS, 2007).

Martins (2007, p.24) descreve sobre a relação entre a impedância terminal e a transferência de tensão: “Numa primeira aproximação, os polos das curvas de resposta em frequência são zeros correspondentes nas curvas de impedância.” Isto

deve-se ao fato de que a transferência de tensão está diretamente ligada com o efeito magnético. Na frequência em que há a mínima impedância, há a maior transferência de tensão entre os terminais.

2.5. SOBRETENSÕES

A NBR 6939:2000 (ABNT NBR 6939: Coordenação do Isolamento – Procedimento, 2000) define sobretensão como qualquer tensão entre fase e terra, ou entre fases, cujo valor de crista excede o valor de crista deduzido da tensão máxima do equipamento ($U_m \sqrt{2}/\sqrt{3}$ ou $U_m \sqrt{2}$, respectivamente).

As sobretensões são divididas entre sobretensão temporária e sobretensão transitória. A sobretensão temporária caracteriza-se pela sobretensão de frequência fundamental de duração relativamente longa, que pode ser não amortecida ou fracamente amortecida. Em alguns casos sua frequência pode ser várias vezes menor ou maior que a frequência fundamental. A sobretensão transitória é definida como a sobretensão de curta duração, de alguns milissegundos ou menos, oscilatória ou não oscilatória, usualmente fortemente amortecida. Sobretensões transitórias podem ser seguidas imediatamente por sobretensões temporárias. Em tais casos as duas sobretensões são consideradas eventos separados (NBR 6939:2000, p.3).

A NBR 6939:2000 classifica as sobretensões transitórias da seguinte forma:

- Sobretensões de Frente Lenta: usualmente unidirecional, com tempo até a crista tal que $20 \mu\text{s} < T_{cr} \leq 5000 \mu\text{s}$, e tempo até o meio valor (na cauda) $T_2 \leq 20 \text{ ms}$.
- Sobretensões de Frente Rápida: 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) $T_2 \leq 300 \text{ ms}$.
- Sobretensões de Frente Muito Rápida: usualmente unidirecional, com tempo até a crista tal que $T_f \leq 0,1 \mu\text{s}$, duração total $T_t \leq 3 \text{ ms}$, e com oscilações superpostas de frequências de $30 \text{ kHz} < f < 100 \text{ MHz}$.

As classes e formas de onda das solicitações de tensão são mostradas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Classes e formas de onda das solicitações de tensão.

Classe	Baixa frequência		Transitório		
	Contínua	Temporária	Frente lenta	Frente rápida	Frente muito rápida
Forma da tensão					
Faixas de formas de tensão	$f = 50 \text{ Hz ou } 60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $3600 \text{ s} \geq T_t \geq 0,03 \text{ s}$	$5000 \mu\text{s} \geq T_{cr} > 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$20 \mu\text{s} \geq T_1 > 0,1 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$100 \text{ ns} \geq T_f > 3 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$ $T_t \leq 3 \text{ ms}$
Forma normalizada da tensão	$f = 50 \text{ Hz ou } 60 \text{ Hz}$ T_t^*	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	$T_{cr} = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	*
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.

Referência: NBR 6939:2000.

2.6. SOLICITAÇÕES TRANSITÓRIAS DE ALTA FREQUÊNCIA

Variações súbitas nas condições de regime permanente de um sistema elétrico geram sobretensões que podem ser originadas por descargas atmosféricas, faltas, curtos-circuitos ou manobras internas à subestação (AJUZ, *et al*, 1987). Tratam-se de solicitações em altas frequências.

Segundo Rocha *et al* (2011, p.11):

As sobretensões de alta frequência resultam da superposição das reflexões e refrações das ondas viajantes (de tensão ou corrente) que são geradas a partir dos impulsos advindos das variações bruscas de tensão. Estas reflexões e refrações de ondas viajantes ocorrem nas discontinuidades encontradas no interior das subestações [...]. A formação das sobretensões, com pequenos tempos de frente de onda e altas frequências é um fenômeno puramente de ondas viajantes. Por isso, as sobretensões encontradas em diferentes pontos da subestação poderão variar de forma e amplitude em locais situados a poucos metros de distância um do outro.

De acordo com Vasques (2011), estes transitórios geram uma solicitação dielétrica ao transformador que pode oferecer risco à sua vida útil. O período dos transitórios é insignificante quando comparado ao período de regime permanente do sistema. Todavia, são de extrema importância pois durante esses períodos os equipamentos interligados ao sistema são submetidos às maiores solicitações elétricas devido às tensões ou às correntes excessivas (*apud* LYNCE, 2004).

Os transitórios geram solicitações em uma ampla faixa de frequência e chegar-se a um modelo que represente o transformador em toda a faixa não se torna prático. Este trabalho busca identificar modelos de transformadores para a análise de transitórios eletromagnéticos causados por manobras de chaves seccionadoras.

2.7. ATPDRAW / ATP

Utilizou-se nas simulações o *ATPDraw / ATP*. Segundo Rocha *et al* (2011, p. 27): “Por razões históricas e econômicas, o programa *ATP* se tornou a referência no setor elétrico brasileiro, como ferramenta computacional para a simulação de transitórios eletromagnéticos.” Trata-se de um programa do tipo *EMTP*, utiliza a técnica de resolução no domínio do tempo (*apud* ATP Rule Book, Herverlee, Belgium, 1987).

Rocha *et al* (2011, p.27 *apud* Dommel, 1996) descreve que:

Com programas desta classe, a solução é determinada para cada passo de tempo Δt , em geral prefixado. Partindo-se das condições iniciais em $t = t_0$, as tensões em cada nó do sistema em análise são determinadas em $t = (t_0 + \Delta t)$, $(t_0 + 2\Delta t)$, $(t_0 + 3\Delta t)$, ..., até o tempo máximo de simulação $t_{\text{máx}}$. No processo de cálculo das tensões e correntes em cada terminal, se faz necessário conhecer as tensões e correntes em instantes de tempo anteriores, ou seja, a história do sistema. Mudanças súbitas na configuração do sistema (como defeitos, abertura e fechamento de disjuntores, etc.) e a presença de elementos não lineares, podem ser modelados sem muita dificuldade.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a implementação de um modelo de transformador de potência, equipamento de suma importância para o sistema elétrico, para estudos de transitórios eletromagnéticos, além do valor ôhmico da resistência entre os terminais de cada enrolamento e o valor das indutâncias próprias de cada bobina e indutâncias mútuas entre bobinas, devem ser considerados os valores de capacitâncias encontradas ao longo da bobina (capacitância série), as capacitâncias entre bobinas e entre bobinas e o referencial de terra (ROCHA, *et al*, 2011).

Há modelos de transformadores disponíveis nos *EMTP*. Estes, porém, não são capazes de representar o comportamento do transformador para análise de fenômenos transitórios de altas frequências, uma vez que, não se leva em consideração adequadamente o comportamento ressonante do transformador causado por sua geometria (JURISIC *et al*, 2015; MORCHED, MARTÍ, OTTEVANGERS, 1993).

São apresentados a seguir alguns trabalhos consagrados na área e publicações recentes sobre a modelagem de transformadores em altas frequências.

Em 1990, cria-se, no âmbito do Cigré, um *Working Group* com o objetivo de estudar as diretrizes para a representação dos elementos de rede no cálculo de transitórios. Primeiramente, relaciona-se as origens de transitórios elétricos com as faixas de frequências. Esta relação é mostrada na Tabela 3.1. O trabalho apresenta uma classificação em quatro grupos dependendo da faixa de frequência e do fenômeno transitório associado. A Tabela 3.2 apresenta a faixa de frequência e a classificação dos surtos relacionadas a cada grupo.

Tabela 3.1 – Origem dos transitórios elétricos e faixas de frequências associadas.

Origem	Faixa de Frequência
Energização de Transformadores - Ferroressonância	(DC) 0,1 Hz - 1 kHz
Rejeição de Carga	0,1 Hz - 3 kHz
Falta Sólida	50/60 Hz - 3 kHz
Início de uma Falta	50/60 Hz - 20 kHz
Energização de Linha	50/60 Hz - 20 kHz
Religamento de Linha	(DC) 50/60 Hz - 20 kHz
Recuperação de Falta Sólida	50/60 Hz - 20 kHz
Recuperação de Curto em Linha	50/60 Hz - 100 kHz
Várias tentativas de reenergização por disjuntor	10 kHz - 1 MHz
Surtos Atmosféricos e Falhas em Subestações	10 kHz - 3 MHz
Comutação de Chaves Seccionadoras e Falhas em Subestações Blindadas	100 kHz - 50 MHz

Referência: *Cigré Working Group*, 1990.

Tabela 3.2 – Classificação relacionando os grupos à faixa de frequência e aos surtos transitórios.

Grupo	Faixa de Frequência	Classificação do Surto	Representação Principal
I	0,1 Hz a 3 kHz	Oscilações de Baixa Frequência	Sobretensões Temporárias
II	50/60 Hz a 20 kHz	Frente Lenta	Sobretensões de Comutação
III	10 kHz a 3 MHz	Frente Rápida	Sobretensões de Surtos Atmosféricos
IV	100 kHz a 50 MHz	Frente Muito Rápida	Sobretensões originadas de Restrikes

Referência: *Cigré Working Group*, 1990.

Para cada grupo, há o modelo sem a consideração da transferência entre os enrolamentos e outro considerando-a. O modelo do Grupo I apresenta as perdas no núcleo e no cobre, representadas pelas indutâncias e resistências do ramo de magnetização e dos enrolamentos, e despreza o efeito capacitivo. O modelo do Grupo II considera, além das perdas consideradas no modelo I, as capacitâncias entre os enrolamentos, dos enrolamentos para a terra e a capacitância ligada ao núcleo.

Já no modelo do Grupo III, além das capacitâncias representadas no modelo do Grupo II, representa-se as capacitâncias ao longo do enrolamento. Não se considera mais o efeito do núcleo. Para o modelo sem a transferência de surto, o enrolamento é representado através de um circuito RLC em paralelo associado a ramos RLC série. E para o modelo do Grupo IV leva-se em consideração, basicamente, o efeito capacitivo.

Em 1991, Soysal, propõe a modelagem de transformadores de potência,

reatores e máquinas rotativas para análises de transitórios eletromagnéticos a partir de medições de impedância na frequência através de terminais externos dos equipamentos.

Um método numérico é aplicado para o cálculo dos parâmetros da equação de estado diretamente das características de impedância terminal medida, sem a necessidade das informações relacionadas aos aspectos construtivos. O modelo proposto oferece vantagens em relação ao esforço computacional em simulações no domínio do tempo e limitações quanto à avaliação do transformador, uma vez que, desconsidera a estrutura interna dos enrolamentos (SOYSAL, 1991; MARTINS, 2007).

Morched, Martí e Ottevangers (1993) identificam, nos trabalhos já apresentados, duas tendências para descrever o modelo de transformadores de potência em altas frequências: informação de detalhes do enrolamento interno ou conhecimento das características na frequência, obtidas através de medições em seus terminais. Quanto ao modelo através dos aspectos construtivos do enrolamento, além das informações serem restritas aos fabricantes, os autores descrevem como adequado para o cálculo da distribuição de tensão ao longo de um enrolamento devido à excitação de impulso, mas inadequado para o cálculo de transitórios envolvendo a interação entre o transformador e o sistema. Além disso, o tamanho das matrizes envolvidas torna este tipo de representação impraticável para os estudos do sistemas através do *EMTP*.

Sendo assim, os autores apresentam um modelo baseado nas características da matriz de admitância do transformador em uma determinada faixa de frequência. Os elementos da matriz de admitância nodal são aproximados por funções racionais. Essas aproximações são representadas sob a forma de uma rede RLC em um formato adequado para uso direto no *EMTP* (MORCHED, MARTÍ, OTTEVANGERS, 1993).

A estrutura geral das redes RLC reflete as características de frequência conhecidas das funções de admitância de um transformador representadas por três tipos de ramos paralelos: comportamento indutivo em baixas frequências, que inclui os efeitos dependentes da frequência devido ao efeito pelicular nos enrolamentos e perdas de corrente no núcleo de ferro, representado por ramos RL; as capacitâncias entre enrolamentos e entre o enrolamento e terra são representadas por ramos RLC e o comportamento predominantemente capacitivo em altas frequências,

representado por ramos RC (MORCHED, MARTÍ, OTTEVANGERS, 1993).

Desde 1998 até os dias atuais, Gustavsen vem trabalhando em um método de ajuste vetorial (*Vector Fitting*) de dados no domínio da frequência por funções polinomiais racionais. O método proposto por ele e por Semlyen em 1999 garante a precisão e estabilidade numérica do modelo computacional obtido. Isto é feito substituindo os polos de partida por um conjunto de polos conseguido através de uma função escalonamento. Os autores já haviam apresentado, em 1998, um método utilizando funções com polos de partida reais. Em 1999, eles ampliam o método para funções com um grande número de picos de ressonância, permitindo polos de partida complexos. O ajuste é feito através de um processo iterativo (GUSTAVSEN, SEMLYEN, 1998, 1999).

Muitos trabalhos foram publicados pelo autor com aperfeiçoamentos e aplicações do método. Em seguida, citam-se alguns.

Em 2002, Gustavsen apresenta a rotina *Matrix Fitting*, uma versão atualizada e otimizada do método *Vector Fitting*. Trata-se de um método robusto e está implementado através de rotinas computacionais de domínio público. O equivalente pode ser importado para uso no *ATP*, validando o método também no domínio do tempo.

O autor descreve, em 2004, a técnica de medição e modelagem utilizada para obter um modelo *black-box* de um transformador de potência de dois enrolamentos, com o objetivo de calcular transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência. Uma aproximação racional da matriz de admitância é calculada no domínio da frequência na faixa de 50 Hz a 1 MHz, submetida à implementação de passividade. No mesmo ano, o autor publica um trabalho sobre as medições com os terminais não aterrados. Propõe-se a medição em sequência zero (GUSTAVSEN, 2004).

Em 2007, Gustavsen e Mo descrevem um equivalente do circuito sintetizado para o ambiente de simulação PSCAD/EMTDC associando a medição de impedância na frequência à transferência de tensão.

Gustavsen propõe, em 2010, a montagem da matriz de admitância através da medição de resposta em frequência híbrida, combinando condições dos terminais em curto-circuito e em aberto (GUSTAVSEN, 2010). Em 2015, o autor aborda uma

filtragem para representação dos transformadores tanto em alta frequência quanto na frequência da rede (GUSTAVSEN, 2015).

Em 2017, Gustavsen *et al* aumentam a abordagem de um modelo equivalente baseado na função de transferência de tensão através de medições nos terminais do transformador que permite o cálculo de tensões em pontos internos no enrolamento.

A modelagem através do *Vector Fitting* gera uma função racional aproximada da curva medida. Apresenta resultados precisos e eficientes quanto à modelagem de linhas de transmissão, modelos de transformadores e equivalentes de rede. Entretanto, por tratar-se de um método matemático, não representa fisicamente o equipamento.

Yu, Zanj e Chong (2009) modelam o enrolamento do transformador através do modelo π para linhas de transmissão e as funções de impedância do ponto de condução e transferência de tensão do circuito equivalente são calculados usando análise nodal.

Porém, os parâmetros do modelo em ampla faixa de frequência são difíceis de obter e em altas frequências, a perda não pode ser ignorada e o efeito pelicular faz com que as indutâncias das linhas mudem com a frequência (YU, ZANJI, CHONG, 2009).

Os autores destacam a importância de se estabelecer a faixa de frequência para a qual o modelo é válido, buscando atender à faixa dos surtos aos quais o transformador está sujeito. A maior parte da energia dos componentes de frequência acima de 10 MHz da onda de sobretensão passa pela capacitância da bucha e não causa danos aos isolamentos do transformador. A bucha de alta tensão tem efeito de filtro passa-baixa (YU, ZANJI, CHONG, 2009).

O Cigré apresenta, em 2011, um estudo sobre a interação entre transformadores e o sistema elétrico com foco nos transitórios eletromagnéticos de alta frequência.

Quanto à modelagem de transformadores, três modelos foram utilizados: capacitância concentrada; modelo de capacitância entre terminais, fornecido pelo

fabricante e modelo RLC sintetizado a partir das curvas de resposta em frequência do transformador vista pelo terminal em análise.

O estudo apresenta estudos de casos ligados a transitórios eletromagnéticos de empresas de energia pelo Brasil e sugere uma maior exploração das questões referentes a medições de resposta em frequência, modelagem de transformadores – utilização de modelos *black-box* a partir de medições de resposta em frequência e modelos *white-box* fornecidos pelos fabricantes – e medições de transitórios rápidos em campo (ROCHA, *et al*, 2011).

Em 2013, Azevedo, Rodrigues e Cerqueira propõem uma metodologia para representação de transformadores de potência baseada em medições de impedância terminal na frequência. O método é baseado na análise dos pontos máximos e mínimos da curva de impedância e relaciona os valores ressonantes de capacitância e indutância através do fator de qualidade. Um exemplo de aplicação da metodologia são trabalhos sobre TRT – tensão de restabelecimento transitória.

Trata-se de uma síntese simples e que necessita apenas da medição de impedância terminal na frequência para se chegar ao modelo do transformador. Não considera a interação entre os enrolamentos. Desta forma, não atende em situações em que se objetiva saber o surto transferido.

Marchesan *et al* (2015) apresentam um modelo de transformador de potência utilizando o *Vector Fitting*, baseado em medições da matriz de admitância, utilizando duas abordagens: a primeira utiliza como instrumentação um osciloscópio e um gerador de funções, enquanto a segunda utiliza um analisador de resposta em frequência. Os resultados mostram que ambas as metodologias podem ser usadas para montar a matriz de admitância. No entanto, o *SFRA – Sweep Frequency Response Analyzer* – apresentou melhores resultados, justificados, segundo os autores, pela maior imunidade a ruídos e a interferências geradas por harmônicos.

Jurisc *et al* destacam, também em 2015, a dificuldade de representar o transformador em altas frequências. Os autores chegam ao modelo a partir da matriz de admitância do transformador através de medições de resposta em frequência e fazem uma comparação do desempenho e precisão de ajuste de diferentes métodos numéricos (JURISIC, *et al*, 2015).

Em 2016, Jurisic *et al* fazem uma comparação entre três modelos de transformadores para representação na faixa de até 20 kHz: o modelo BCTRAN ampliado com matriz de capacitância, modelo *grey-box* e modelo *black-box* baseado na análise de medições de resposta em frequência (JURISIC, *et al*, 2016). Os autores detalham, em 2017, o modelo *grey-box* com base em um cálculo de método de elementos finitos, derivado de informações limitadas sobre a geometria do transformador (JURISIC, *et al*, 2017).

No mesmo ano, López *et al* analisam a precisão e o desempenho de diferentes modelos de enrolamento de transformadores disponíveis na literatura, por meio de comparações no domínio do tempo e da frequência, com medições em um protótipo de enrolamento. Faz-se, também, a avaliação do tempo de processamento necessário para cada modelo. Os resultados mostram que, a inclusão da dependência da frequência dos parâmetros do modelo, é um fator decisivo para reproduzir com precisão as medições (LÓPEZ, *et al*, 2017).

Diante da pesquisa bibliográfica realizada ratifica-se que representar o transformador em altas frequências não é tarefa trivial. Para se chegar a uma síntese do transformador em altas frequências, sem acesso às informações dos aspectos construtivos, deve-se partir de medições que caracterizam o equipamento na frequência através de acesso aos seus terminais. É importante determinar a faixa de frequência e as ressonâncias significativas para cada aplicação, para que seja possível chegar a um modelo representativo e prático.

4. METODOLOGIA

A partir da revisão bibliográfica realizada, verificou-se que, para estudos da interação de solicitações transitórias com o transformador de potência, a metodologia mais adequada é a *black-box*. Para tanto, deve-se analisar o comportamento do transformador na frequência.

Realizou-se a caracterização no domínio da frequência em campo do transformador de potência em estudo. Trata-se de um transformador monofásico de 200 MVA, $500/\sqrt{3} / 138/\sqrt{3} / 13,8$ kV. A subestação possui doze unidades destas em operação – formando quatro bancos trifásicos (TR52, TR54, TR56 e TR58) – e duas unidades reservas. Os terciários dos bancos de transformadores alimentam duas unidades de geradores síncronos e os serviços auxiliares da subestação. Os setores de 500 kV e 138 kV são blindados, isolados a gás SF₆ e abrigados. As Figuras 4.1 e 4.2 mostram, respectivamente, o transformador de potência e o trecho aéreo entre a saída do prédio de 500 kV e os bancos de transformadores.

Figura 4.1 – Transformador de Potência Monofásico 200MVA, $500/\sqrt{3} / 138/\sqrt{3} / 13,8$ (kV) instalado em uma subestação.



Figura 4.2 – Saída do prédio de 500 kV – Bancos de transformadores.



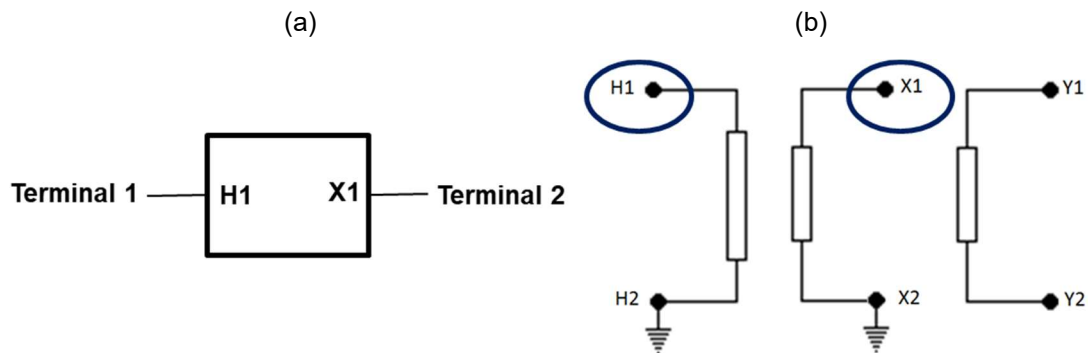
Os ensaios de resposta em frequência foram realizadas na fase A do banco TR52 – tratando-se de transformadores iguais (mesmas especificações e fabricante) considerou-se os resultados de impedância terminal na frequência medidos para todos os transformadores dos bancos TR52, TR54 e TR56 – com os taps nas posições 2 ($525/\sqrt{3}$ kV) e 9A ($138/\sqrt{3}$ kV) e com o equipamento desconectado da rede. Mediu-se na faixa de frequência de 20 Hz a 10 MHz.

Levou-se em consideração como ponto de acesso os terminais de alta (H1) e baixa (X1) tensão. Os terminais H2 e X2 encontram-se aterrados e os terminais Y1 e Y2, em aberto. A Tabela 4.1 relaciona os terminais com os enrolamentos e a Figura 4.3 representa a condição dos terminais, destacando os pontos de acesso considerados.

Tabela 4.1 – Relação dos terminais com os enrolamentos

Terminais		Enrolamentos	
1	H1	Alta Tensão	Primário
Aterrado	H2		
2	X1	Baixa Tensão	Secundário
Aterrado	X2		
Aberto	Y1	13,8 kV	Terciário
Aberto	Y2		

Figura 4.3 – Representação (a) dos pontos de acesso considerados e (b) da condição dos demais terminais.



Para medição de impedância utilizou-se um medidor RLC. Aplica-se um sinal de tensão e mede-se corrente e tensão resultantes. Da relação entre a tensão e a corrente medidas obtém-se a impedância em módulo e ângulo.

De 20 Hz a 100 kHz utilizou-se o medidor QuadTech modelo 7600, aplicou-se 5V na entrada. E de 100 kHz a 10 MHz fez-se uso do medidor HP modelo 4285A, com aplicação de 2V na entrada. Os medidores são mostrados na Figuras 4.4 e 4.5, respectivamente. Aquisitou-se um total de 346 pontos.

Figura 4.4 – Medidor RLC Quadtech 7600.



Figura 4.5 – Medidor RLC HP 4285A.



Utilizaram-se fitas de cobre da instrumentação até o terminal das buchas com o objetivo de diminuir a indutância. Porém perde-se repetibilidade no ensaio, uma vez que, dependendo da disposição das fitas, altera-se o arranjo de medição. Há estudos

em andamento no Cepel quanto à utilização de cabos na medição de resposta em frequência associado a técnicas para eliminação do efeito do cabo.

As Figuras 4.6 e 4.7 mostram um diagrama representativo da medição de impedância do terminal 1 – alta tensão – e o resultado da impedância na frequência em módulo e ângulo, respectivamente. Já as Figuras 4.8 e 4.9 mostram a representação da medição e os resultados de impedância na frequência para o terminal 2 – baixa tensão –, respectivamente.

Figura 4.6 – Diagrama representativo da medição de impedância do terminal 1 – alta tensão.

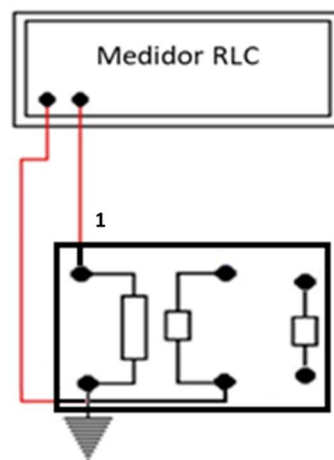


Figura 4.7 – Medição da impedância na frequência vista pelo terminal 1 – alta tensão.

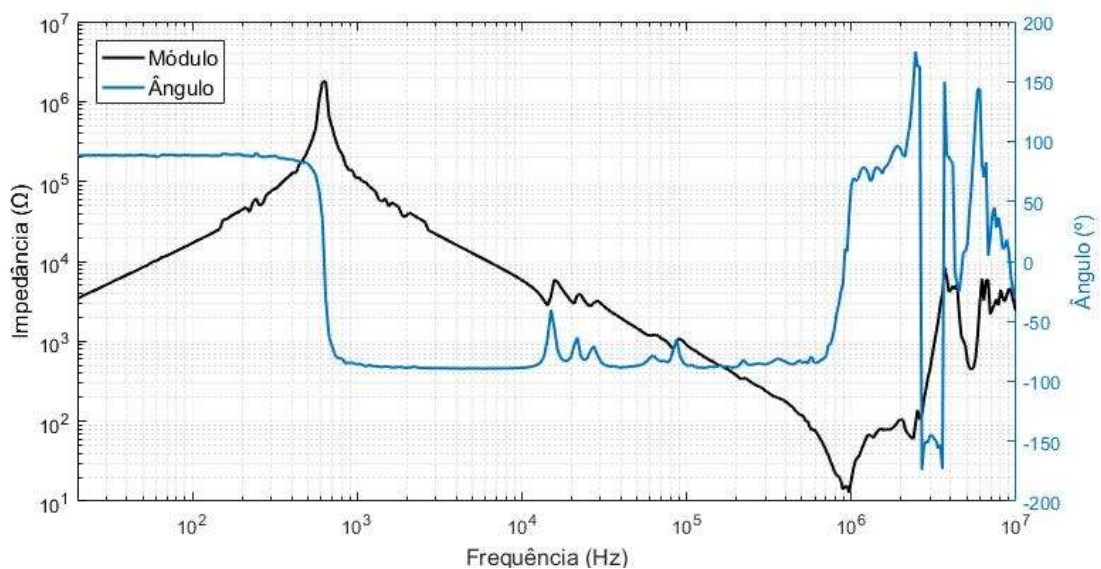


Figura 4.8 – Diagrama representativo da medição de impedância do terminal 2 – baixa tensão.

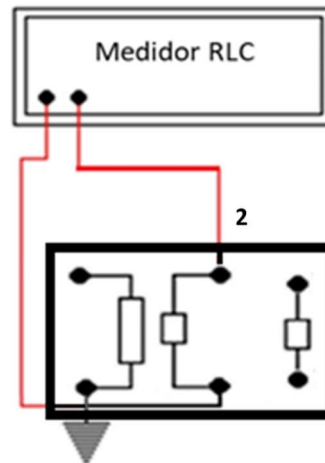
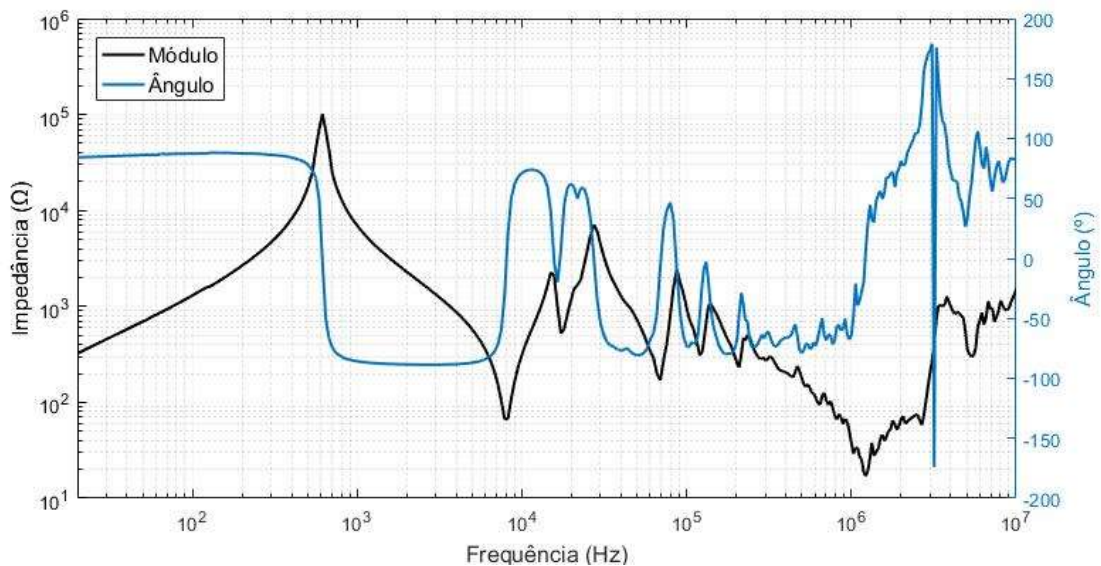


Figura 4.9 – Medição da impedância na frequência vista pelo terminal 2 – baixa tensão.



Notam-se interferências na medição principalmente no final do espectro. Com o aumento da frequência, há maior influência do arranjo de medição, aumenta-se consideravelmente a reatância indutiva dos condutores e conexões – que é desprezível em baixas frequências – e a reatância capacitiva possui valor muito baixo, comportando-se, praticamente, como um curto-circuito, o que provoca capacitâncias parasitas ao arranjo.

Além disso, há limitações quanto à instrumentação considerando os níveis de tensão aplicada. Tratando-se da impedância variante com a frequência, conseqüentemente há alterações nos valores de tensões e correntes medidos. Nas frequências baixas, os valores de impedâncias são maiores, o que causa correntes baixas. Já em altas frequências, além da maior influência da impedância do arranjo

de medição, os valores de impedâncias e, conseqüentemente, os valores de tensões medidas são muito baixos.

A medição de ângulo de fase é mais susceptível às interferências. A partir de, aproximadamente, 2 MHz, os valores de ângulo ultrapassam a faixa entre -90° e 90° o que configura um erro na medição de impedância terminal, de acordo com a Equação 1 apresentada anteriormente.

As medições de transferência de tensão na frequência encontram-se no Apêndice A e não foram utilizadas nos três modelos que serão descritos, apenas nas propostas de um modelo associando a impedância terminal à transferência de tensão e na montagem da matriz de admitância.

5. MODELAGEM DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

Para modelagem do transformador de potência, analisa-se a curva de impedância terminal na frequência objetivando-se chegar a uma síntese que represente o transformador em altas frequências. Segundo Frontin (2013, p. 251): “O transformador pode ser considerado como um número de diferentes circuitos RLC ligados e acoplados uns aos outros”.

Relacionando a curva de impedância na frequência vista do lado de alta tensão – em que encontram-se as restrições operativas – com a síntese do circuito tem-se comportamento indutivo até, aproximadamente, 650 Hz e o efeito capacitivo até, aproximadamente, 1 MHz. De 1 MHz a 10 MHz nota-se a predominância do comportamento indutivo novamente.

As frequências em que as reatâncias se igualam (máxima troca de energia entre capacitor e indutor) são denominadas frequências ressonantes. Nestes pontos o valor da impedância é igual à parcela resistiva. Os pontos máximos são denominados ressonâncias paralelas e os pontos mínimos ressonâncias séries, uma vez que, na associação em paralelo, há o maior valor de impedância quando capacitor e indutor ressonam e nos circuitos RLC série o valor de impedância é mínimo quando há ressonância.

Modela-se um sistema através de uma metodologia e segundo um ponto de vista. Chegou-se a três modelos do transformador de potência utilizando a metodologia *black-box*:

- Análise da impedância terminal relacionando os pontos ressonantes através do fator de qualidade;
- Função aproximada através do *Vector Fitting*;
- *Saturable Transformer* do *ATPDraw* associado a impedâncias complementares.

O modelo baseado na análise da impedância terminal relacionando os pontos ressonantes a partir do fator de qualidade e a aproximação através do *Vector Fitting* têm como ponto de vista a impedância do terminal de alta tensão. Já o modelo *Saturable Transformer* do *ATPDraw* associado a impedâncias complementares baseou-se na impedância vista pelo terminal de alta e baixa tensão. Representaram-

se nas simulações os modelos trifásicos.

Para simplificar, os modelos serão definidos neste trabalho, por vezes, como: modelo Impedância Terminal, modelo *Vector Fitting* e modelo *Saturable* correspondendo, respectivamente, ao modelo baseado na análise da impedância terminal relacionando os pontos ressonantes a partir do fator de qualidade, modelo aproximado através do *Vector Fitting* e modelo *Saturable Transformer* do *ATPDraw* associado a impedâncias complementares.

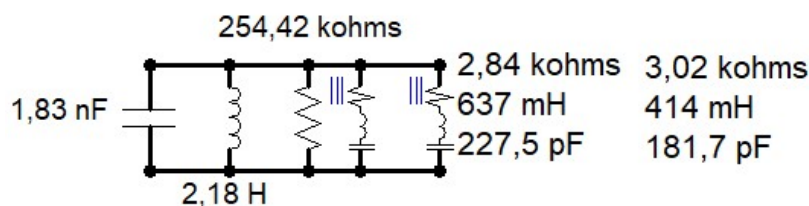
Apresenta-se, também, o modelo disponibilizado pelo fabricante e uma proposta de associar os modelos baseados na impedância do terminal de alta tensão à transferência de tensão.

Em Rêma *et al* (2018) é apresentada a comparação entre o modelo Impedância Terminal e o *Vector Fitting* aproximado com 84 polos sem a aplicação da passividade até 2 MHz. Para análise no domínio no tempo, simulou-se a aplicação de um degrau de tensão e mediu-se a corrente transitória.

5.1. MODELO DO FABRICANTE

O fabricante do transformador forneceu um modelo baseado na impedância vista pelo lado de alta tensão. Trata-se de um circuito sintetizado a partir da impedância na frequência resultante de um modelo *white-box*. Montou-se o circuito no *ATPDraw*, mostrado na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Circuito sintetizado: modelo fabricante.



Através das rotinas *Frequency Scan* e *Plotxy* do *ATPDraw* é possível plotar o comportamento dos circuitos na frequência, determinando-se as frequências mínimas e máximas e o número de pontos por década. Aplica-se uma fonte de corrente alternada com amplitude de 1A e mede-se a tensão – equivalente ao valor de impedância, fazendo-se a verredura na frequência. Utilizaram-se 100 pontos por década.

Os resultados do comportamento na frequência do modelo fornecido pelo

fabricante, em módulo e ângulo, são apresentados nas Figuras 5.2 e 5.3, respectivamente.

Figura 5.2 – Módulo da impedância vista pelo terminal de alta tensão – Modelo fabricante.

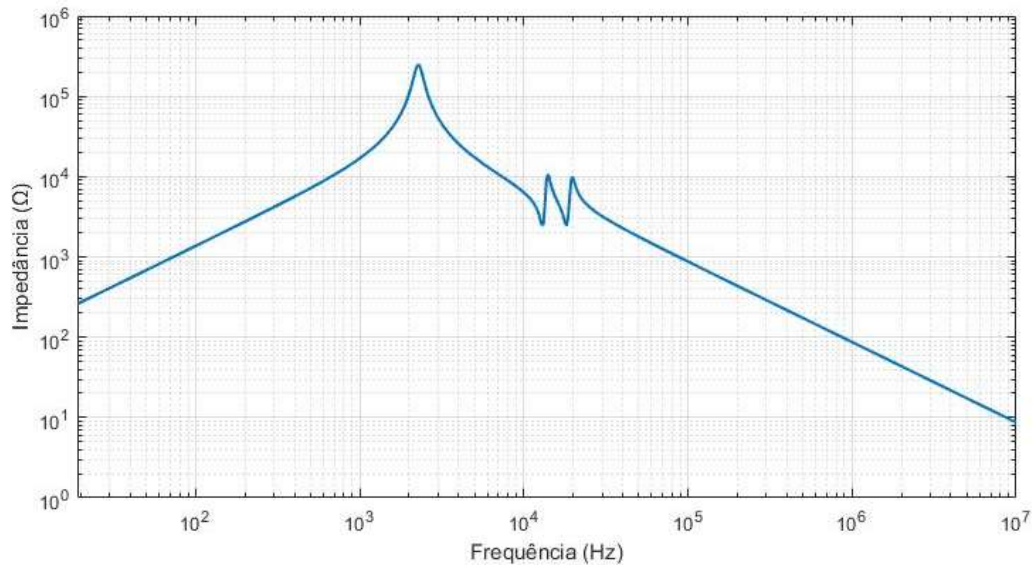
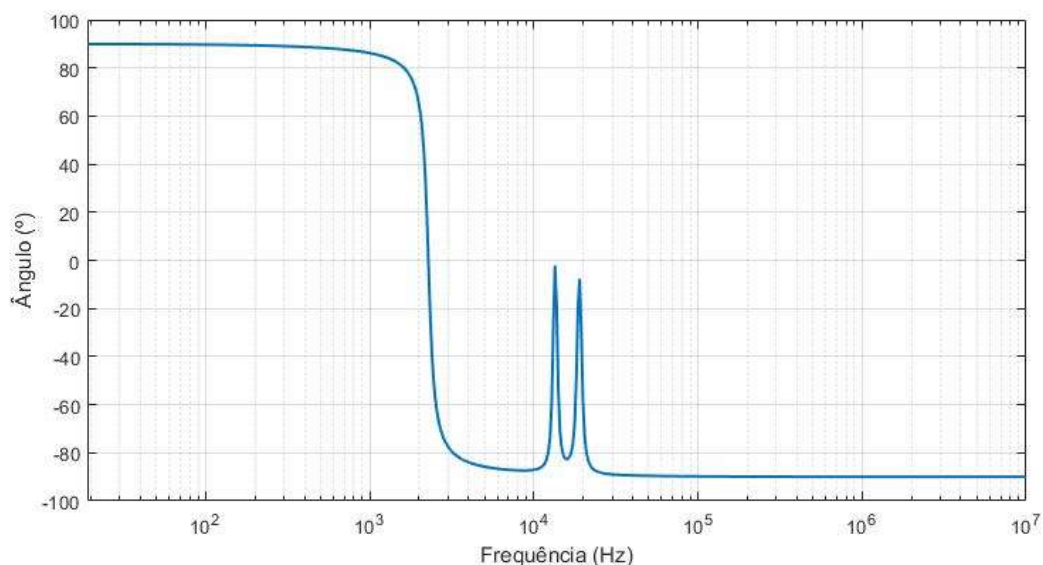
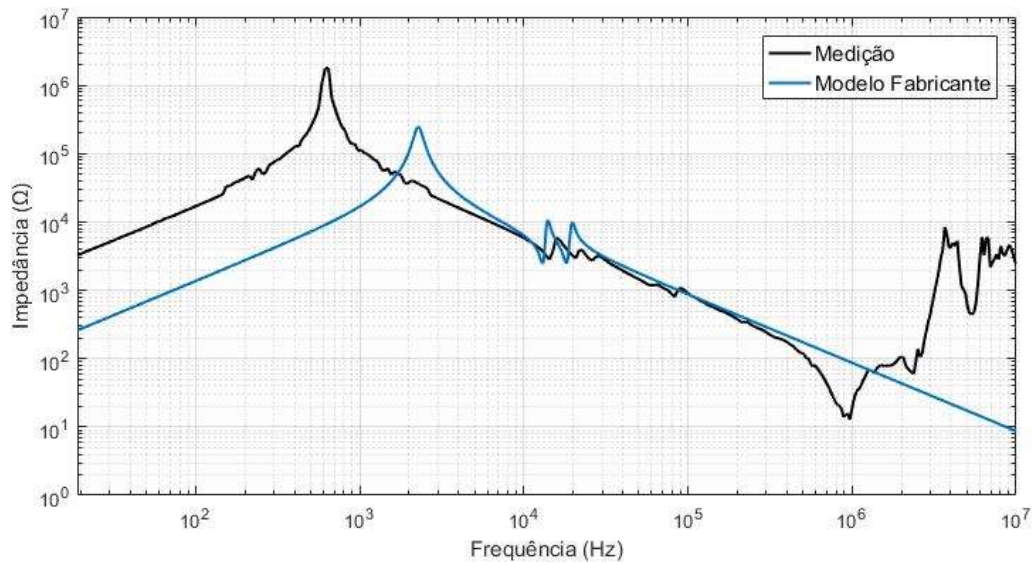


Figura 5.3 – Ângulo da impedância vista pelo terminal de alta tensão – Modelo fabricante.



Comparando-se o resultado na frequência do modelo com a impedância medida (Figura 5.4), verifica-se que o modelo do fabricante não representa o transformador em altas frequências. Quanto a diferença em relação ao ponto de ressonância paralela, acredita-se que deve-se à condição dos terminais durante a medição realizada em campo e as condições utilizadas pelo fabricante para confecção do modelo. Uma vez que, mediu-se também a impedância vista do terminal de alta tensão com os outros terminais curtos-circuitados e aterrados e a resposta em frequência do modelo do fabricante assume uma condição intermediária entre as duas condições – com os terminais em aberto e curtos-circuitados.

Figura 5.4 – Comparação entre medição e simulação: modelo fabricante.

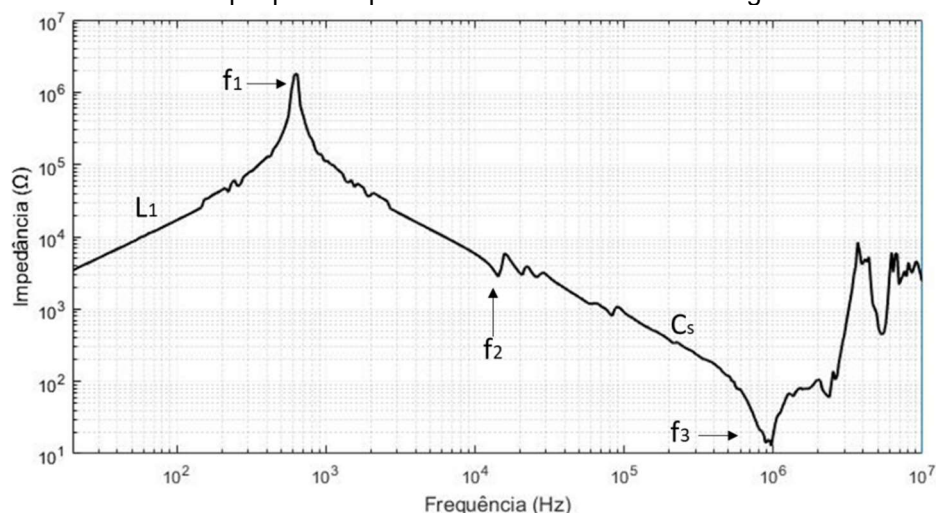


5.2. MODELO A PARTIR DA ANÁLISE DA IMPEDÂNCIA TERMINAL RELACIONANDO OS PONTOS RESSONANTES ATRAVÉS DO FATOR DE QUALIDADE

Azevedo, Rodrigues e Cerqueira (2013) propõem uma modelagem baseada na medição de impedância terminal na frequência, relacionando os valores de capacitância e indutância dos pontos ressonantes através do fator de qualidade. Trata-se de um método prático, simplificado e chega-se ao modelo baseado em um terminal. Possui limitações em relação à quantidade de pontos ressonantes, principalmente se as frequências estiverem muito próximas.

A Figura 5.5 mostra a medição de impedância do terminal de alta tensão com destaque para os pontos considerados na modelagem.

Figura 5.5 – Medição do módulo da impedância na frequência vista pelo terminal de alta tensão – Destaque para os pontos considerados na modelagem.



Considera-se a frequência de ressonância paralela (f_1), a ressonância série (f_2) com diferença maior que 3 dB em relação à frequência central e a ressonância série (f_3) entre a capacitância de surto (C_s) e a indutância das conexões. Não há restrição em considerar as ressonâncias séries menores. Optando por apresentá-las, aumenta-se a precisão e, conseqüentemente, a complexidade do circuito.

Inicia-se a modelagem levando-se em consideração f_1 e C_s , identifica-se o valor da resistência do primeiro circuito da síntese e calculam-se os valores de indutância (L_1) – referente à frequência nominal – e capacitância. Em seguida, verifica-se o valor de resistência relacionado a f_2 e associam-se os valores de capacitância e indutância através de duas definições de fator de qualidade mostradas nas Equações 4 e 5 (AZEVEDO, RODRIGUES, CERQUEIRA, 2013).

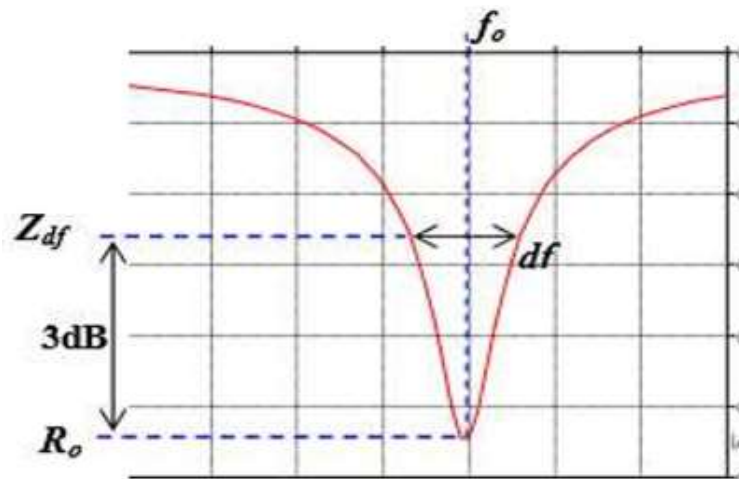
$$Q = \frac{2\pi f_0 L_0}{R_0} \quad (4)$$

$$Q = \frac{f_0}{df} \quad (5)$$

A variável df – diferencial na frequência – presente na Equação 5 é a largura de banda – medida da faixa de frequência na qual a resposta do sinal está situada a 3 dB em relação à resposta na frequência central. A impedância relacionada à largura de banda é determinada pela Equação 6 e ilustrada na Figura 5.6 (AZEVEDO, RODRIGUES, CERQUEIRA, 2013).

$$Z_{dB} = 20 \log \left(\frac{z_{df}}{R_0} \right) \quad (6)$$

Figura 5.6 – Definição da largura de banda considerada.



Referência: AZEVEDO, RODRIGUES, CERQUEIRA, 2013.

Relacionando as definições de qualidade, tem-se o valor de indutância e capacitância determinados pelas Equações 7 e 8, respectivamente.

$$L_0 = \frac{R_0}{2\pi df} \quad (7)$$

$$C_0 = \frac{1}{L_0(2\pi f_0)^2} \quad (8)$$

A etapa final do processo de síntese é a modelagem da ressonância série entre a C_s e a indutância das conexões (AZEVEDO, RODRIGUES, CERQUEIRA, 2013).

Os parâmetros resultantes da modelagem são apresentados na Tabela 5.1, o circuito resultante da síntese montado no *ATPDraw* é mostrado na Figura 5.7. Já as Figuras 5.8 e 5.9 mostram os resultados da modelagem comparados à medição em módulo e ângulo, respectivamente.

Tabela 5.1 – Parâmetros do modelo a partir da análise da impedância terminal na frequência.

Frequência (Hz)		R (Ω)	L (mH)	C (nF)
f ₁	644,2	1 784 k	-	-
	60,8	-	26 660	-
	287 k	-	-	1,83
f ₂	14,31 k	2,81 k	176,54	0,7014
f ₃	969 k	12,8	0,017	-

Figura 5.7 – Circuito sintetizado: modelo Impedância Terminal.

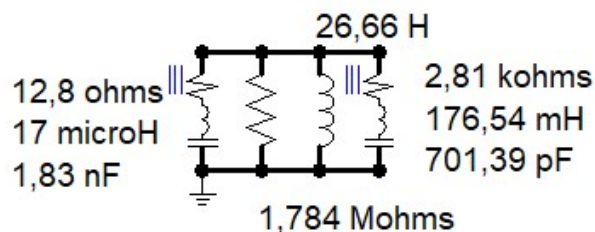


Figura 5.8 – Comparação entre módulo medição e simulação: modelo Impedância Terminal.

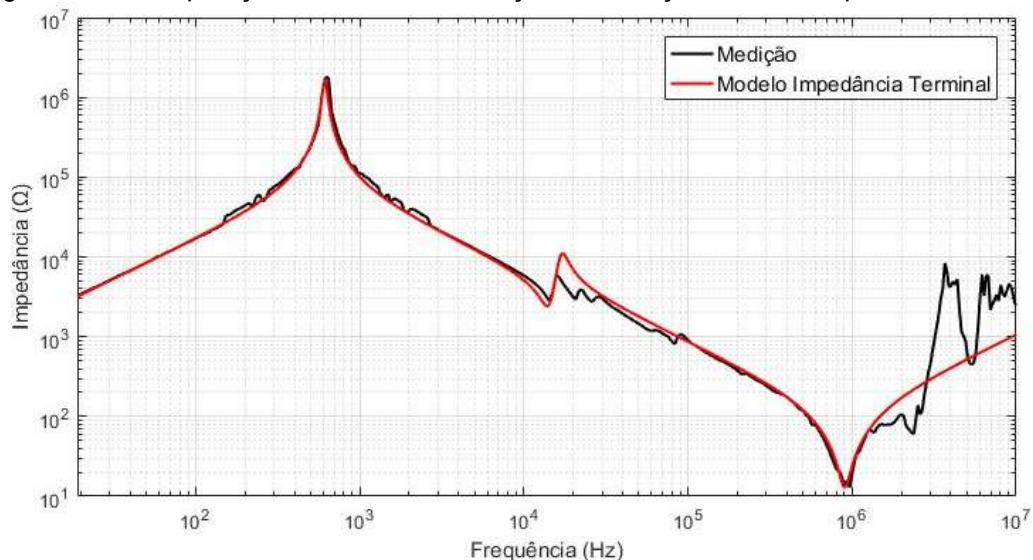
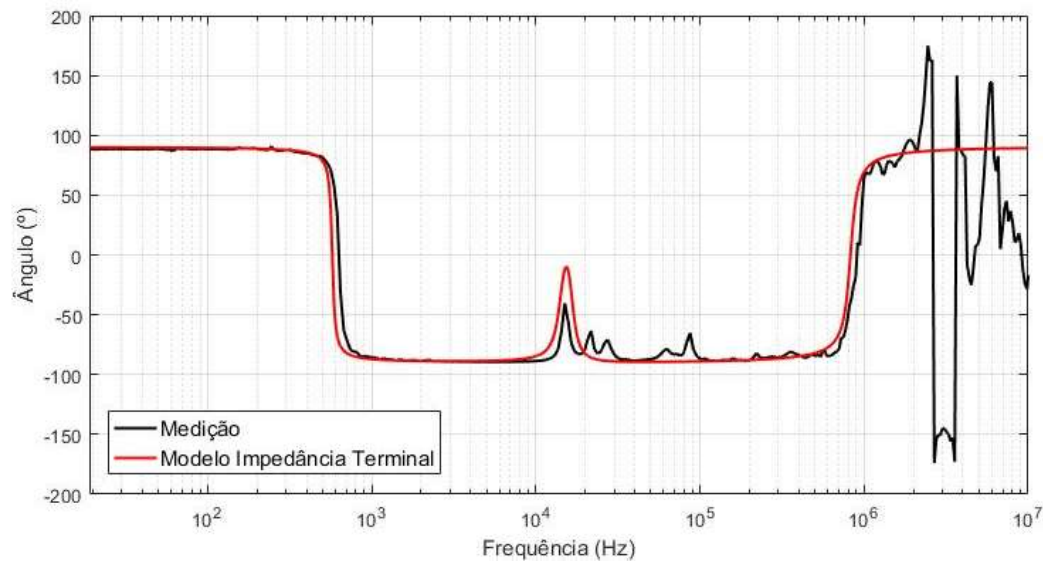


Figura 5.9 – Comparação entre ângulo medição e simulação: modelo Impedância Terminal.

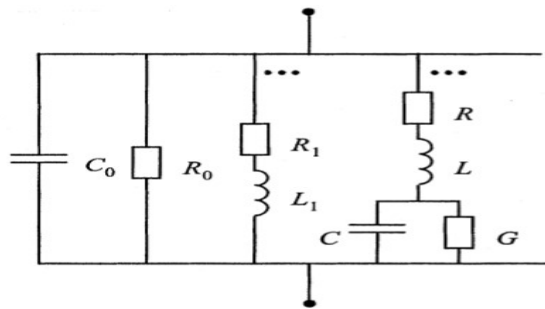


5.3. FUNÇÃO APROXIMADA ATRAVÉS DO *VECTOR FITTING*

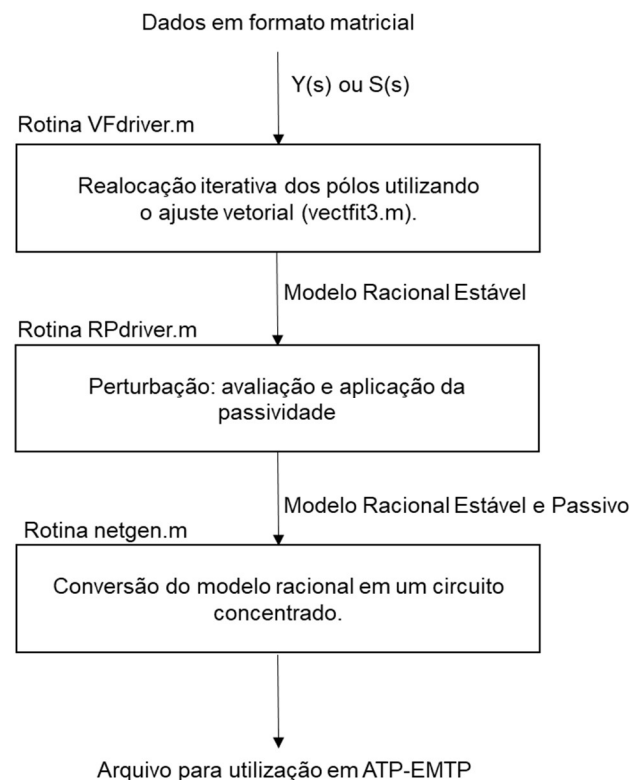
O *Vector Fitting* gera, de forma iterativa, uma função racional aproximada da curva medida. Gustavsen possui diversas publicações sobre o método, implementações e aplicações. Chega-se a um conjunto de polos e zeros que possuem comportamento na frequência próximo à medição. Para tanto determina-se o número de polos, iterações e o peso dado a cada faixa de frequência. O apêndice B mostra as equações utilizadas para a aproximação através do *Vector Fitting* (GUSTAVSEN, SEMLYEN, 1999).

Trata-se de um método consagrado e as rotinas são de domínio público disponíveis através da *Matrix Fitting Toolbox*. As rotinas *VFdriver* e *vectfit3* fazem o ajuste racional através da realocação dos polos. Já a rotina *RPdriver* é responsável pela aplicação da passividade.

Há a possibilidade de gerar um circuito RLC que represente a função para implementação nos programas do tipo *EMTP*, através da rotina *Netgen_ATP*. A Figura 5.10 mostra o circuito sintetizado da função racional aproximada utilizando o *Vector Fitting*. Os ramos RL representam os polos reais e os ramos RLC equivalem aos polos complexos conjugados (GUSTAVSEN, 2002). A Figura 5.11 mostra um fluxograma geral do programa *Vector Fitting*, com as entradas e saídas e principais rotinas.

Figura 5.10 – Circuito sintetizado utilizando o *Vector Fitting*.

Referência: GUSTAVSEN, 2002.

Figura 5.11 – Fluxograma geral do programa *Vector Fitting*.Referência: Adaptado de *User Manual Matrix Fitting Toolbox* (GUSTAVSEN, 2009).

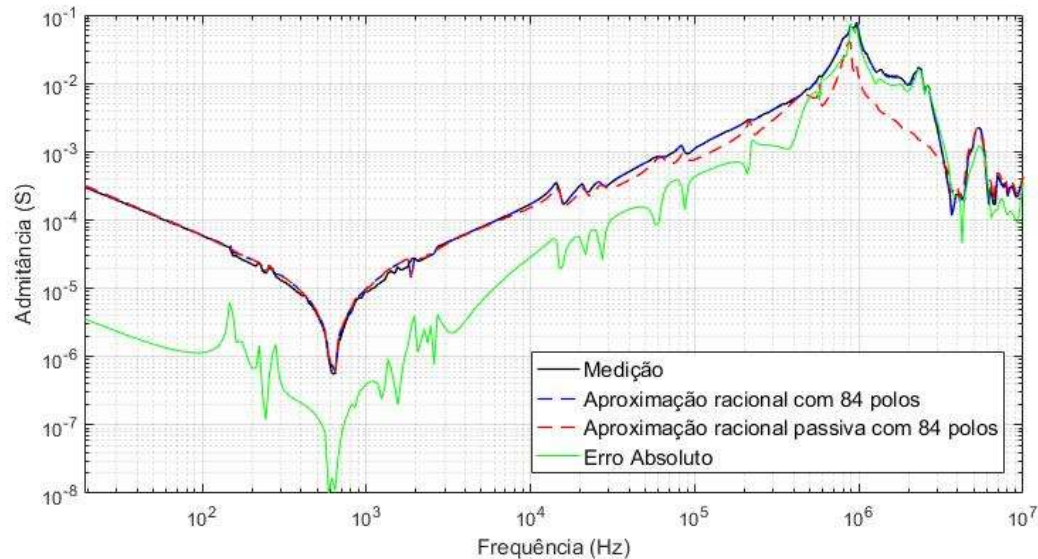
O *MatLab* foi utilizado para a implementação das rotinas do *Vector Fitting*. Como entrada de dados, utiliza-se a admitância. Sendo assim, para a modelagem do transformador pela sua impedância vista pelo lado de alta tensão inverteu-se elemento a elemento do vetor de impedância.

Através do parâmetro *weight* é possível ponderar as faixas de frequência. Com o objetivo de priorizar o ajustes das altas frequências ponderou-se as frequências de 20 Hz a 2 kHz com peso 1 e de 2 kHz a 10 MHz com peso 10.

Tentou-se o ajuste da função com várias ordens de aproximação – número de

polos. O resultado da aproximação com 84 polos – 2 polos reais e 41 polos complexos conjugados é mostrado na Figura 5.12.

Figura 5.12 – Curva aproximada através *Vector Fitting* com 84 polos.



Sem a aplicação da passividade, a função ajustada é muito próxima à curva medida, porém resulta em simulações no tempo com respostas instáveis. Há situações em que o uso de funções racionais aproximadas para a admitância de transformadores e equivalentes de rede pode provocar problemas de instabilidade em simulações no tempo, mesmo com os polos localizados no semi-plano esquerdo do plano s . Tais funções racionais violam o critério da passividade, que estabelece o sentido do fluxo de potência ativa em um sistema passivo (GUSTAVSEN, SEMLYEN, 2001).

Aplicando a passividade nota-se um maior erro na aproximação nas frequências mais altas, principalmente na faixa entre 1 MHz e 3 MHz, aproximadamente. O erro (gráfico em verde da Figura 5.12) refere-se à diferença entre as funções com e sem a aplicação da passividade.

O circuito, gerado através da rotina *Netgen_ATP*, que representa o modelo racional aproximado com 84 polos foi importado para o *ATPDraw* através dos recursos *Library/ \$include* – Figura 5.13 – e é apresentado no Apêndice C. Para simplificar (uma vez que os circuitos são iguais), apresentou-se nos Apêndices apenas uma fase. Os resultados da varredura na frequência do modelo comparados à medição, em módulo e ângulo, são mostrados nas Figuras 5.14 e 5.15, respectivamente. Nota-se o ajuste

do ângulo na faixa entre -90° e $+90^\circ$.

. Figura 5.13 – Circuito resultante do *Vector Fitting* importado para o ATPDraw.

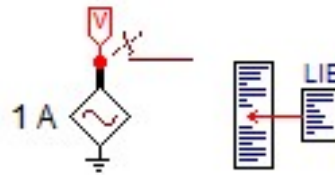


Figura 5.14 – Comparação entre o módulo da medição e simulação: varredura na frequência do circuito resultante do *Vector Fitting* aproximado com 84 polos.

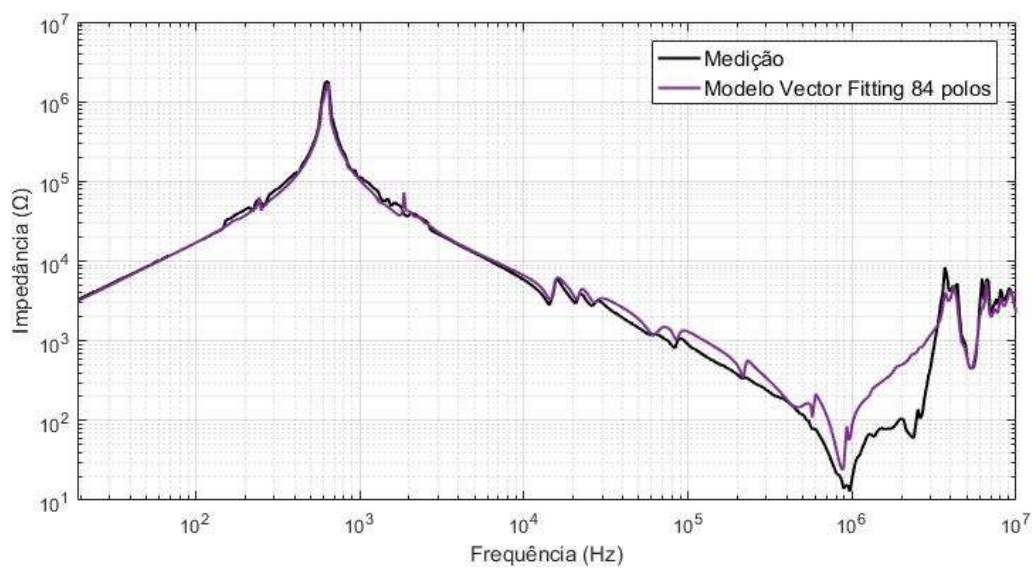
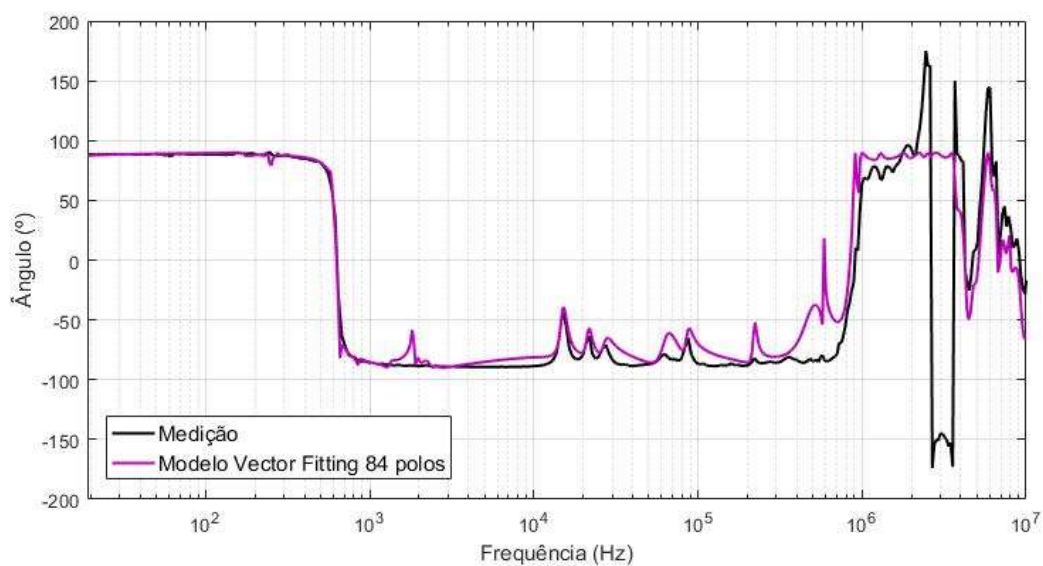


Figura 5.15 – Comparação entre o ângulo da medição e simulação: varredura na frequência do circuito resultante do *Vector Fitting* aproximado com 84 polos.



Os polos são alocados de forma a criar uma função que se aproxime da curva medida. Com um maior número de polos, há a tentativa de um ajuste mais próximo

da medição, o que causa o ajuste de possíveis interferências contidas na curva medida. A tentativa de ajustar o módulo causa variações no ângulo que destoam da medição.

Sendo assim, fez-se a aproximação através do *Vector Fitting* com um número menor de polos. A seguir são apresentados os resultados da aproximação com 15 polos – 1 polo real e 7 polos complexos conjugados. A síntese que representa o modelo racional aproximado com 15 polos é apresentado no Apêndice D. A Figura 5.16 mostra a curva aproximada com 15 polos e a Figura 5.17 destaca a faixa de 100 kHz a 10 MHz comparando a medição à curva aproximada com 84 e 15 polos.

Figura 5.16 – Curva aproximada através *Vector Fitting* com 15 polos.

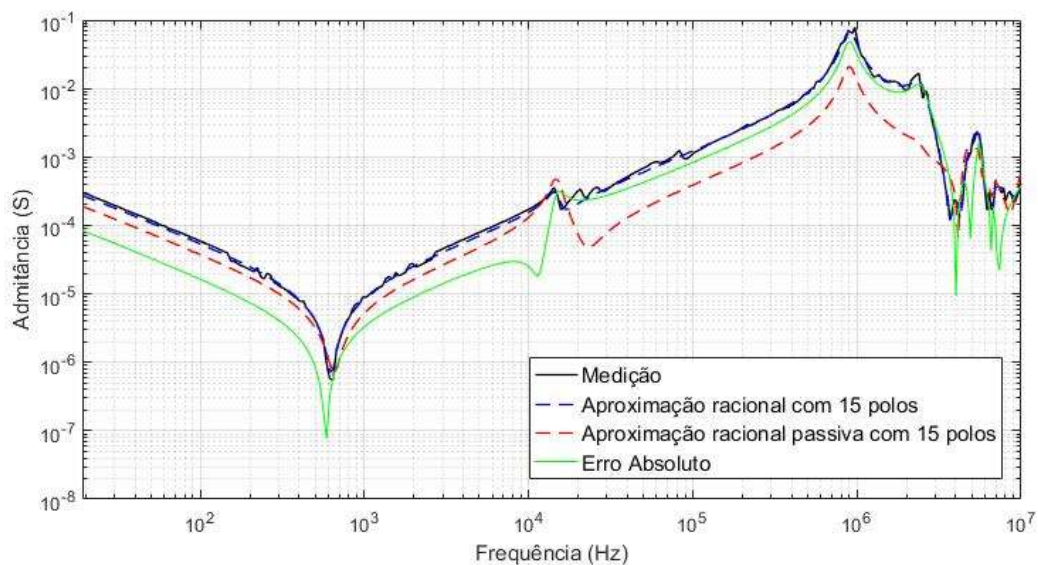
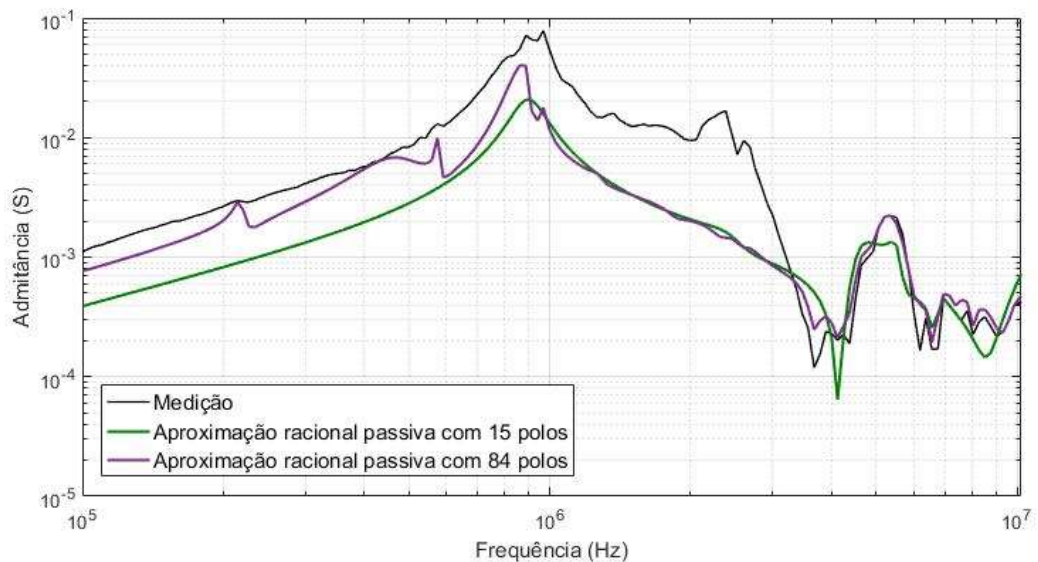


Figura 5.17 – Curva aproximada através *Vector Fitting* com 84 e 15 polos na faixa de frequência de 100 kHz a 10 MHz.



A função com 15 polos é de menor complexidade comparada à função com 84 polos, o que causa um ajuste mais simplificado, sem a tentativa de ajustar variações menores. As Figuras 5.18 e 5.19 mostram os resultados em módulo e ângulo, respectivamente, da varredura na frequência dos circuitos aproximados com 84 polos e com 15 polos.

Figura 5.18 – Comparação entre o módulo da medição e simulação: varredura na frequência do circuito resultante do *Vector Fitting* aproximado com 15 e 84 polos.

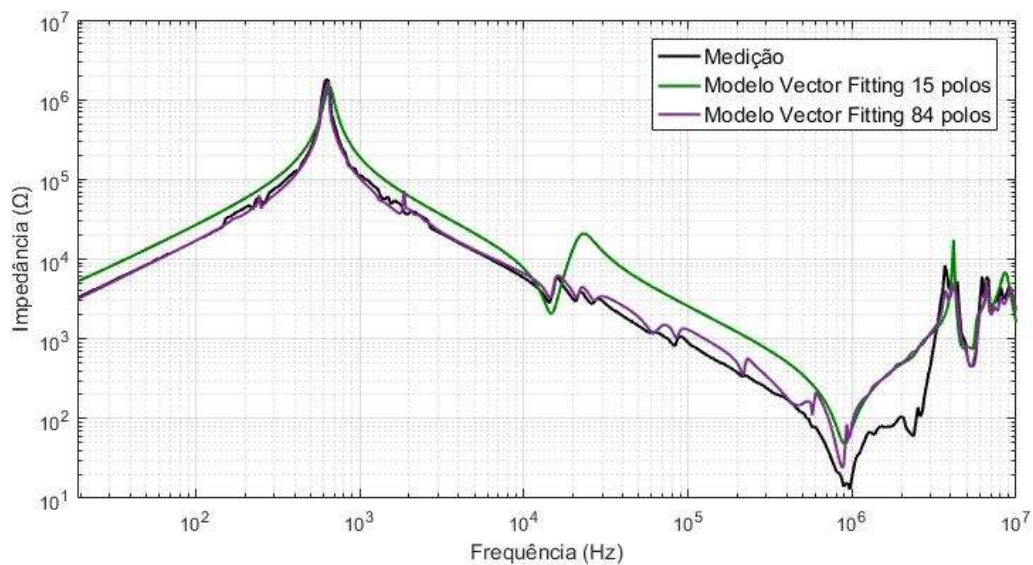
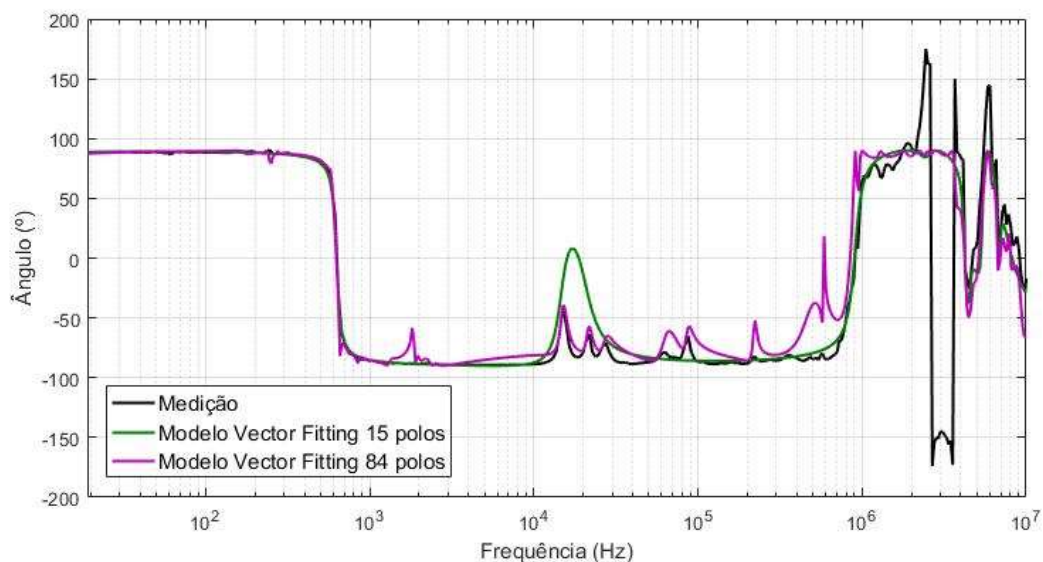


Figura 5.19 – Comparação entre o ângulo da medição e simulação: varredura na frequência do circuito resultante do *Vector Fitting* aproximado com 15 e 84 polos.



Com a aproximação utilizando 15 polos, não há o ajuste das ressonâncias séries (exceto da ressonância série de maior diferença em relação à frequência central em aproximadamente 14 kHz), entre 10 kHz e 100 kHz, entretanto o comportamento,

principalmente do ângulo, na faixa de frequência entre 100 kHz e 1 MHz aproxima-se mais da curva medida. Como o objetivo é o modelo em altas frequências optou-se por utilizar o modelo aproximado com 15 polos.

Não se conseguiu chegar a um ajuste racional passivo mais próximo da medição (utilizando a curva até 10 MHz) na faixa entre, aproximadamente, 1 MHz e 3 MHz, mesmo com um maior número de polos – 320 polos foi a ordem máxima utilizada na aproximação como tentativa de ajuste.

5.4. MODELO SATURABLE TRANSFORMER DO ATPDRAW ASSOCIADO A IMPEDÂNCIAS COMPLEMENTARES

Os modelos do *ATPDraw – Saturable Transformer*, *BCTRAN* e *Hybrid Transformer* – são válidos e apresentam bons resultados para análises de transitórios de baixas e médias frequências (BRONZEADO *et al*, 2017; MORK *et al*, 2007). Para a representação do transformador em altas frequências utilizou-se o *Saturable Transformer* associado a impedâncias complementares modeladas a partir das medições de impedância na frequência dos terminais 1 e 2.

A configuração do modelo, mostrada na Figura 5.20, foi feita a partir dos valores básicos de indutâncias dos enrolamentos (L) e das tensões nominais de cada lado (U), considerando-se a posição do tap. Além disso, define-se a indutância de magnetização – a partir da corrente (I_0) e do fluxo (F_0) do ramo de magnetização na frequência nominal – e a resistência de magnetização (R_m). Representa-se o modelo trifásico.

Figura 5.20 – Configuração do modelo *Saturable Transformer* do *ATPDraw*.

Component: SATTRAFO

Attributes Characteristic

	Prim.	Sec.
U [V]	525	138
R [ohm]	0	0
L [mH,ohm]	162.6	0.02

Coupling Y Y

Phase shift 0

I(0)= 55 Rm= 2300000 3-leg core

F(0)= 1969.4 RMS 3-winding

O valor de indutância associada ao núcleo corresponde à subida inicial (baixas frequências) da curva de impedância terminal. A descida da curva está associada ao valor da capacitância total equivalente vista de cada lado que será composta pelos valores de capacitâncias utilizadas.

A subida final (altas frequências) corresponde ao valor associado às buchas (L_{b1} e L_{b2}). De modo a compatibilizar mais a representação da bucha foi considerada uma capacitância do terminal da bucha para a terra (C_{1t} e C_{2t}) – valores obtidos dos relatórios de testes do fabricante – e estes pares $L_{b1}-C_{1t}$ e $L_{b2}-C_{2t}$ foram convertidos em parâmetros distribuídos para melhor representação da bucha.

As ressonâncias séries das curvas de impedância terminal foram modeladas através de circuitos RLC adicionados. A Figura 5.21 mostra o modelo ajustado. As Figuras 5.22 a 5.25 mostram o resultado na frequência em módulo e ângulo da modelagem comparado à medição dos terminais de alta e baixa tensão.

Figura 5.21 – Modelo ajustado a partir do *Saturable Transformer* associado a impedâncias complementares.

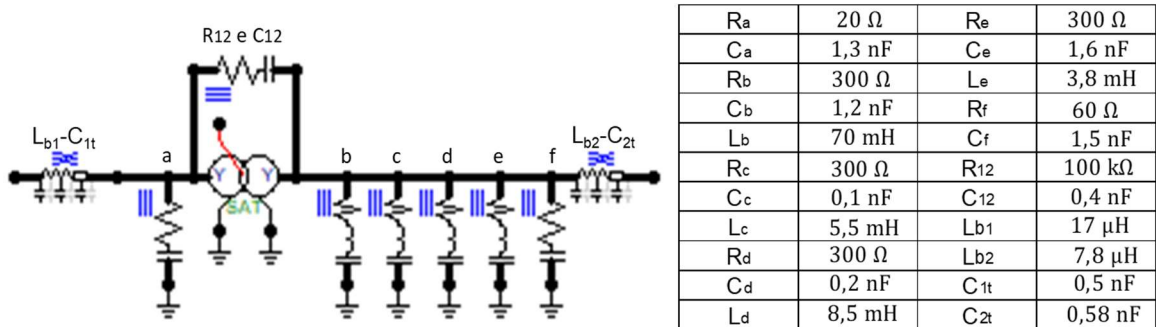


Figura 5.22 – Comparação entre o módulo da medição e simulação: modelo *Saturable* – Impedância do terminal de alta tensão.

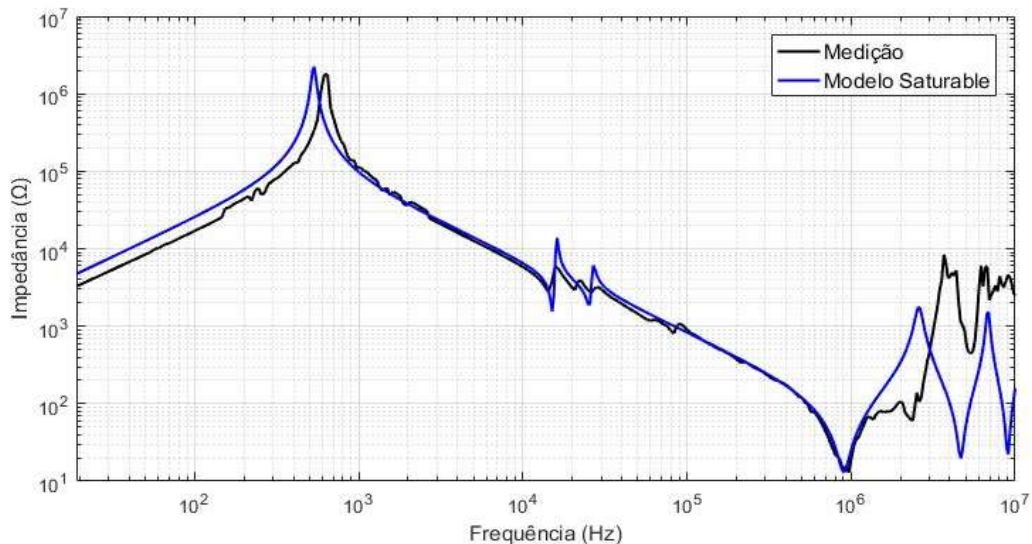


Figura 5.23 – Comparação entre o ângulo da medição e simulação: modelo *Saturable* – Impedância do terminal de alta tensão.

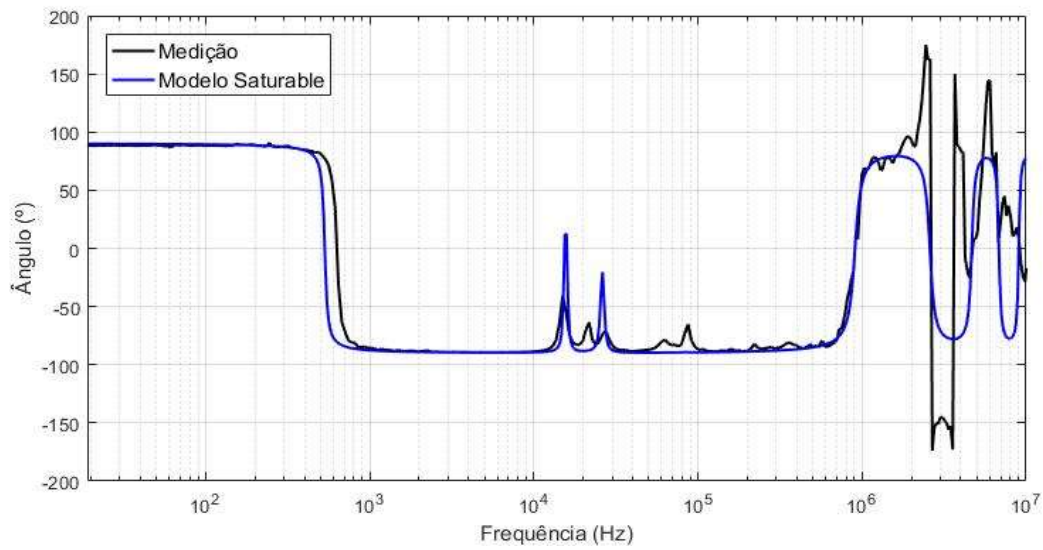


Figura 5.24 – Comparação entre o módulo da medição e simulação: modelo *Saturable* – Impedância do terminal de baixa tensão.

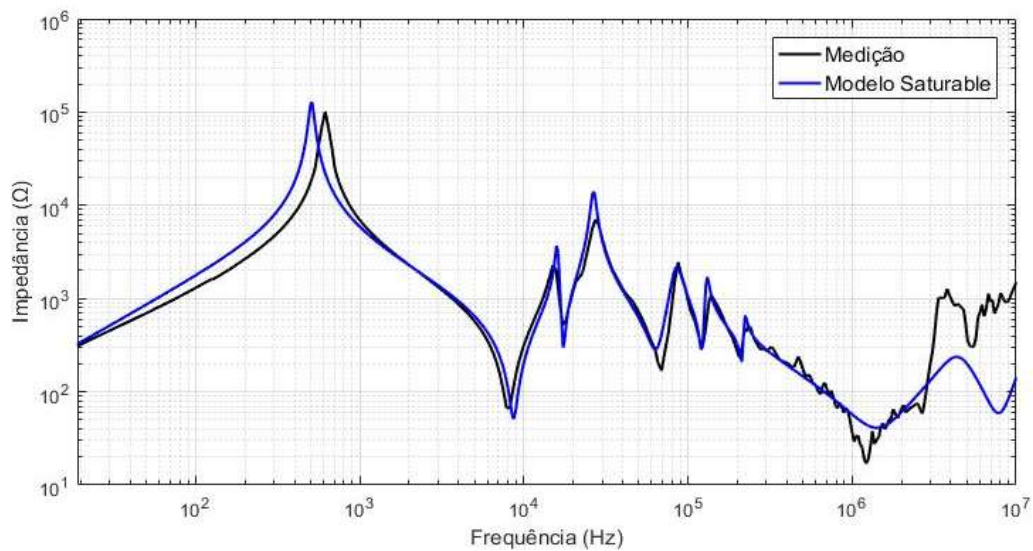
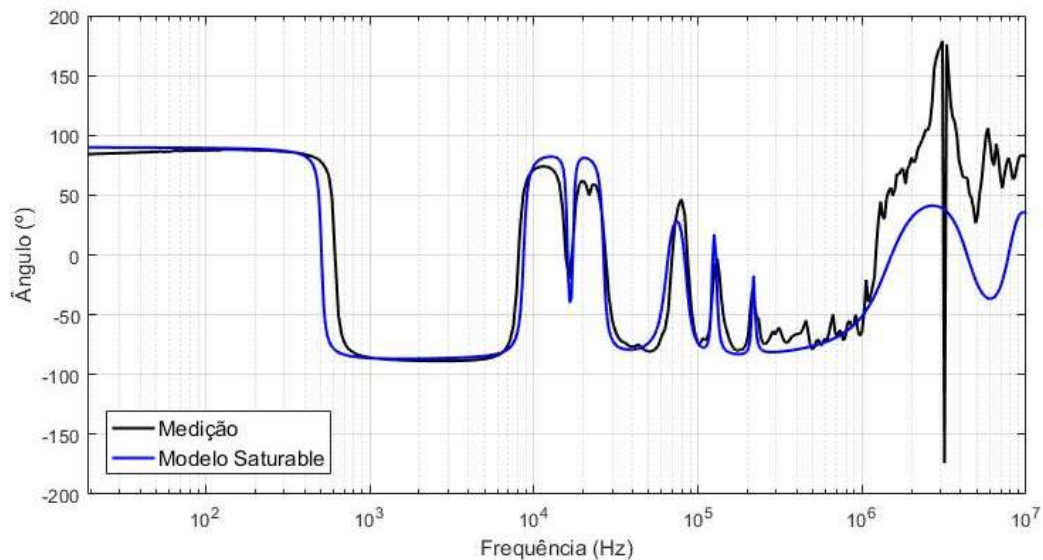


Figura 5.25 – Comparação entre o ângulo da medição e simulação: modelo *Saturable* – Impedância do terminal de baixa tensão.



5.5. PROPOSTA ASSOCIANDO OS MODELOS BASEADOS NA IMPEDÂNCIA TERMINAL À TRANSFERÊNCIA DE TENSÃO NA FREQUÊNCIA

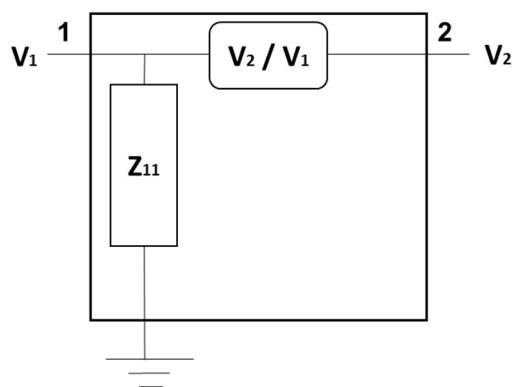
Uma alternativa para se determinar a transferência de surto de um terminal a outro é associando-se os modelos a partir das medições de impedância vista de um terminal à transferência de tensão na frequência.

Gustavsen e Mo (2007) propõem um modelo baseado na associação das medições de resposta em frequência para o *PSCAD / EMTDC*.

Utilizando o *ATPDraw / ATP*, transforma-se o sinal de tensão do terminal 1 do tempo para a frequência. Para tanto, utiliza-se a FFT. Multiplica-se o resultado pela transferência de tensão e encontra-se a tensão do terminal 2 no domínio da frequência. Realizando-se a FFT inversa, é possível encontrar a tensão no terminal 2 no domínio do tempo.

Trata-se de um modelo unilateral. Para se determinar a tensão transferida do terminal 1 para o terminal 2, utiliza-se a medição de impedância do terminal 1 e a relação de tensão V_2 / V_1 – representado na Figura 5.26. Já para a determinação da tensão transferida do terminal 2 para o terminal 1, utiliza-se a medição de impedância do terminal 2 e a relação de tensão V_1 / V_2 .

Figura 5.26 – Representação do método utilizando a impedância vista do terminal 1 e a transferência de tensão.



Todavia, para as simulações de transitórios gerados a partir da manobra de chaves seccionadoras na subestação, transferir a tensão obtida no terminal de alta tensão para o terminal de baixa tensão não irá necessariamente reproduzir a tensão que irá resultar no terminal de baixa tensão, uma vez que, a tensão neste terminal irá sofrer a ação da interação do surto que chega através do transformador com o que

esteja representado neste lado. Sendo assim, para a análise da tensão que é transferida para o lado de baixa tensão deve-se desenvolver um modelo de transformador que represente ambos os terminais de acordo com a transferência de tensão na frequência e modelar a subestação de 138 kV.

Para tanto, obtém-se a matriz de admitância do transformador. No Apêndice E são apresentados pontos importantes para montagem da matriz, as equações e os resultados dos elementos mútuos da matriz obtidos a partir das medições.

Devido às interferências nas medições de resposta em frequência, principalmente na medição do ângulo da transferência de tensão, não foi possível chegar a um ajuste através da matriz de admitância, pois não se obtém uma função racional aproximada da curva.

Em altas frequências, além da maior influência da impedância do arranjo de medição, há limitações quanto à instrumentação considerando os níveis de tensão aplicada, pois os valores de impedâncias e, conseqüentemente, os valores de tensões medidas são baixos, o que causa variações na curva de resposta em frequência. O *Vector Fitting* não se adequa pois exige uma curva de resposta em frequência com menor interferência, uma vez que, a rotina busca ajustar as pequenas variações na impedância.

5.6. COMPARAÇÃO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA ENTRE OS TRÊS MODELOS

Compararam-se os modelos Impedância Terminal, *Vector Fitting* e *Saturable Transformer* à curva de impedância terminal na frequência medida no final do espectro, na faixa de 100 kHz a 10 MHz. Nesta faixa, predomina a ressonância série entre o comportamento capacitivo em até, aproximadamente, 1 MHz e a indutância do arranjo de medição e conexões. As Figuras 5.27 e 5.28 comparam à medição aos três modelos em módulo e ângulo, respectivamente.

Figura 5.27 – Comparação entre o módulo da medição e simulação com os três modelos.

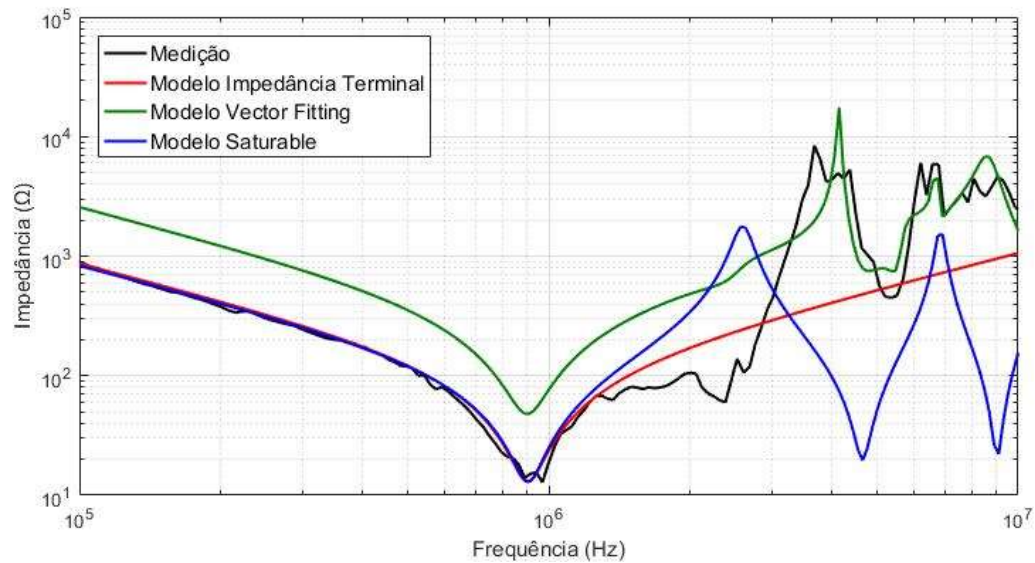
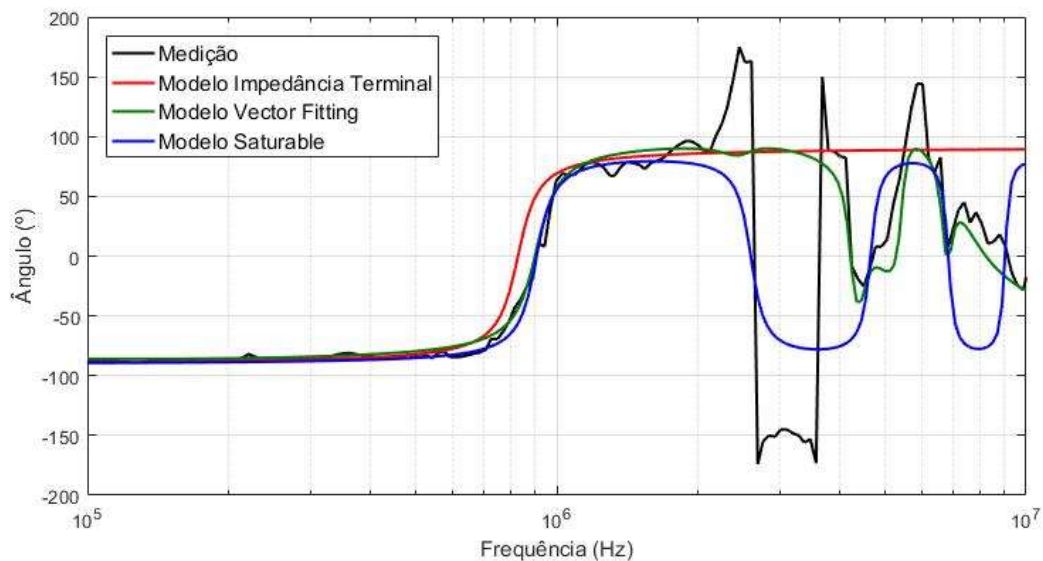


Figura 5.28 – Comparação entre o ângulo da medição e simulação com os três modelos.



O modelo Impedância Terminal e *Saturable Transformer* representam melhor a ressonância série do que o ajuste através do Vector Fitting com a aproximação através de 15 polos. Os modelos baseados nos pontos ressonantes possuem melhores resultados quando há uma ressonância bem definida e apresentam limitações quando há um número maior de ressonâncias e proximidade entre elas.

A partir de 1 MHz, conforme já mencionado no capítulo anterior, há maior interferência na medição de impedância terminal na frequência. O modelo do *Vector Fitting* é o que mais se aproxima da curva medida, porém o ajuste fica comprometido devido às variações existentes na curva medida. Com os modelos Impedância Terminal e *Saturable Transformer* não foi possível o ajuste a partir desta faixa. Obteve-

se no modelo Impedância Terminal apenas o comportamento indutivo, já o modelo *Saturable* apresenta oscilações devido à representação da bucha através de parâmetros distribuídos.

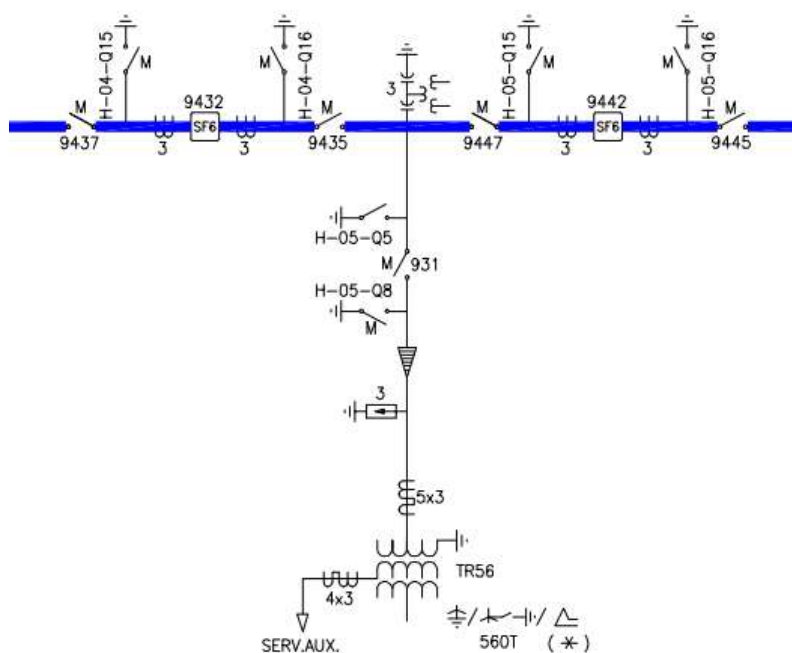
6. ANÁLISES E RESULTADOS

Na investigação de um problema no sistema elétrico, as etapas de simulação e medição, por serem complementares, devem estar associadas. A medição de resposta em frequência permite chegar a um modelo do transformador que viabiliza simulações mais próximas da realidade. Por outro lado, os resultados das simulações são de grande importância para a especificação e dimensionamento da instrumentação adequada para a medição de transitórios de tensão em campo, além de permitir a definição de uma sequência de manobras mais consistente com a operação.

Segundo Rocha *et al* (2011, p.101): “Medições de transitórios no campo são de fundamental importância para a validação dos modelos empregados nas simulações”. Com os resultados da medição de transitórios é possível validar a modelagem do fenômeno analisado e com isso o modelo do equipamento em análise, neste caso, o transformador de potência.

Realizou-se a simulação das manobras e compararam-se os resultados das simulações com as medições de transitórios de tensão feitas em campo. A Figura 6.1 mostra o diagrama unifilar do trecho manobrado da subestação.

Figura 6.1 – Diagrama unifilar do trecho manobrado da subestação.



A restrição operativa encontra-se na subestação de 500 kV, logo os resultados apresentados, tanto da simulação quanto da medição, referem-se ao terminal de alta tensão do transformador. Tratam-se dos valores de tensão transitória que chegam ao terminal do transformador a partir da manobra das chaves seccionadoras.

Consideraram-se os modelos de transformadores apresentados no capítulo anterior para os bancos TR52, TR54 e TR56. O banco TR58 possui suas unidades transformadoras de mesma especificação, porém de fabricante diferente. Logo, para este banco, foi utilizado o modelo disponibilizado pelo fabricante. Serão apresentados os resultados das simulações e das medições em campo, considerando uma janela de tempo de 50 μ s (intervalo de frequência entre 20 kHz e 10 MHz), da manobra da chave 9447 – chaves 9437, 9435, 9445 e 931 encontram-se fechadas – e da chave 9437 – chaves 9435, 9447, 9445 e 931 fechadas –, os disjuntores 9432 e 9442 estão abertos em ambos os casos.

6.1. SIMULAÇÕES

Realizaram-se, no *ATPDraw / ATP*, as simulações no domínio do tempo das manobras das chaves seccionadoras, que atualmente encontram-se restritas. A subestação de 500 kV foi representada pelo modelo JMarti, que leva em consideração a variação dos parâmetros com a frequência (MARTI, 1982) e o trecho aéreo (saída da subestação de 500 kV até os transformadores) modelado por parâmetros distribuídos e constantes.

Para as chaves seccionadoras e disjuntores utilizou-se o modelo de chave controlada por tempo. No modelo dos disjuntores, há uma capacitância série representando o capacitor de equalização.

Foi representada uma diferença máxima de tensão entre os terminais da chave através do carregamento do trecho em desenergização com mesma amplitude e polaridade oposta à do sistema associada à última reignição da manobra de abertura.

Utilizou-se nas simulações um passo de tempo (Δt) de 1 ns. Segundo o teorema da amostragem de *Nyquist-Shannon*, amostrando-se um sinal, no mínimo ao dobro de sua frequência, é possível reconstruí-lo. Desta forma, um sinal é apropriadamente amostrado se ele não possuir componentes em frequências acima de metade da frequência de amostragem (OGATA, 1998). Sendo assim, com um Δt

de 1 ns, é possível representar frequências até, no máximo, 500 MHz. A resposta em frequência do transformador e, conseqüentemente o seu modelo, foram realizados até 10 MHz, logo, realiza-se a análise das componentes de frequências de tensão transitória até esta frequência – 50 vezes menor que o máximo possível levando em consideração o intervalo de tempo de amostragem da simulação.

As Figuras 6.2 e 6.3 mostram o trecho da subestação simulado no *ATPDraw* e a diferença de tensão entre os polos da chave, respectivamente.

Figura 6.2 – Trecho da subestação simulado no *ATPDraw* utilizando o modelo *JMarti* – Simulação da manobra da chave 9447.

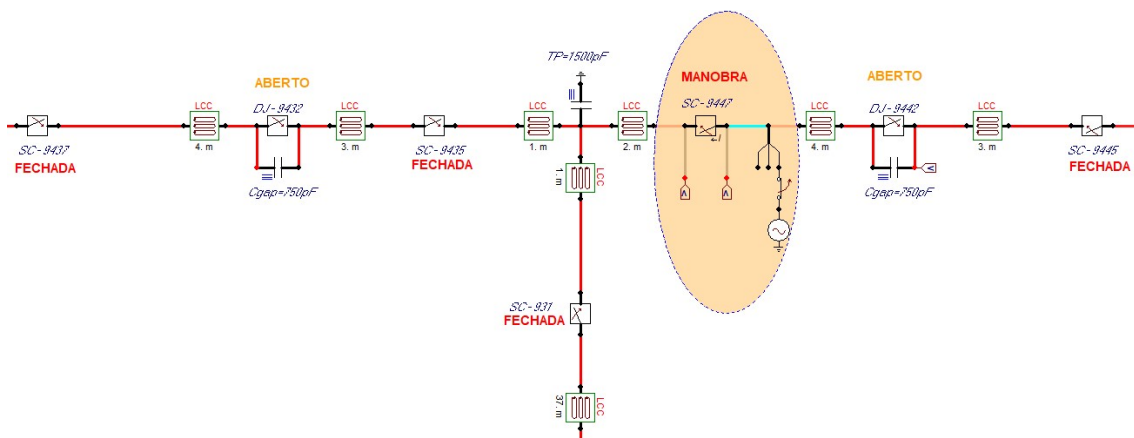
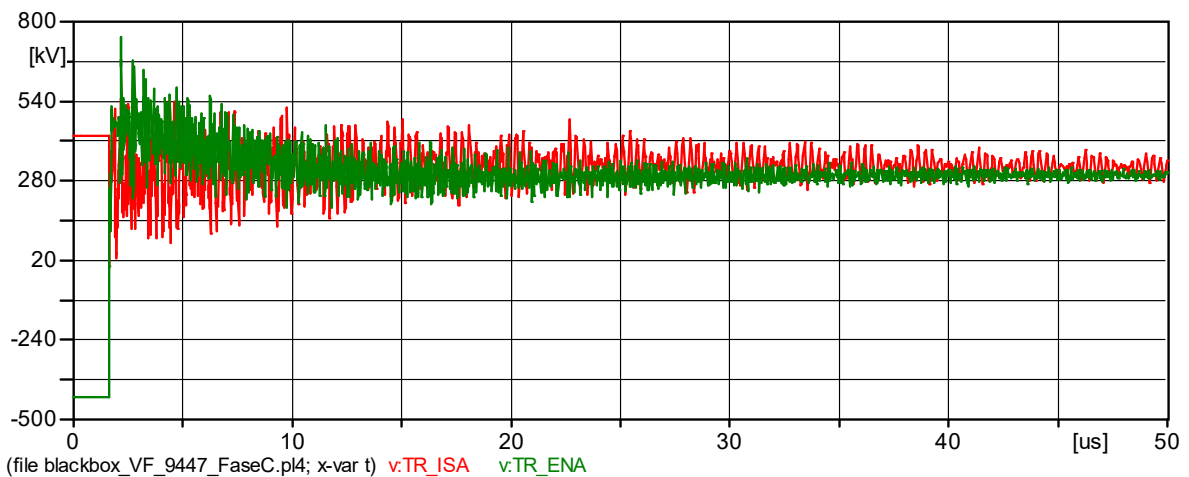


Figura 6.3 – Diferença de tensão simulada entre os polos da chave.



As Figuras 6.4 a 6.6 mostram os resultados da simulação da tensão transitória que chega ao terminal de alta tensão do transformador a partir da manobra da chave 9447 no tempo utilizando os modelos Impedância Terminal, *Vector Fitting* e *Saturable Transformer*, respectivamente, e a Figura 6.7 mostra os resultados dos três modelos simulados.

Figura 6.4 – Tensão - Manobra da chave 9447 – Simulação: modelo Impedância Terminal.

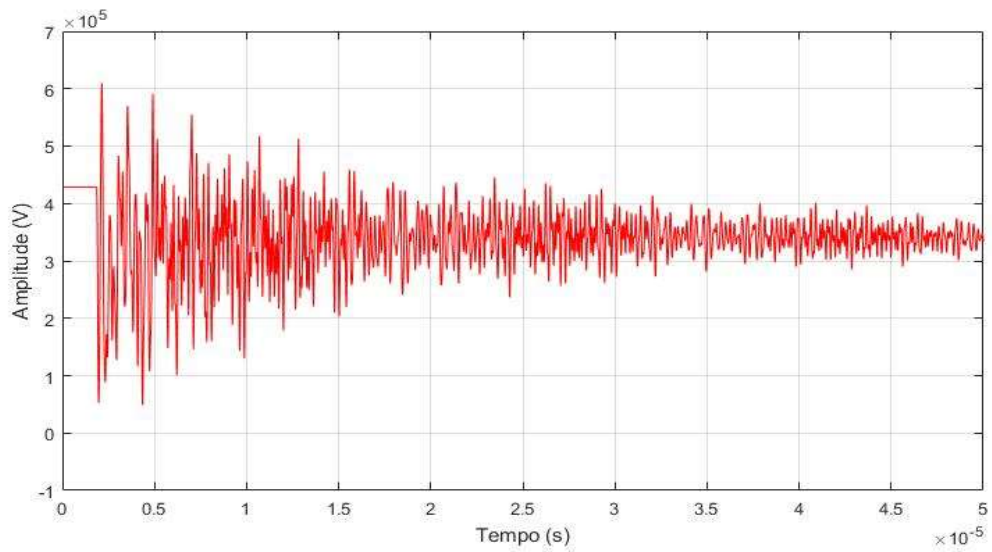
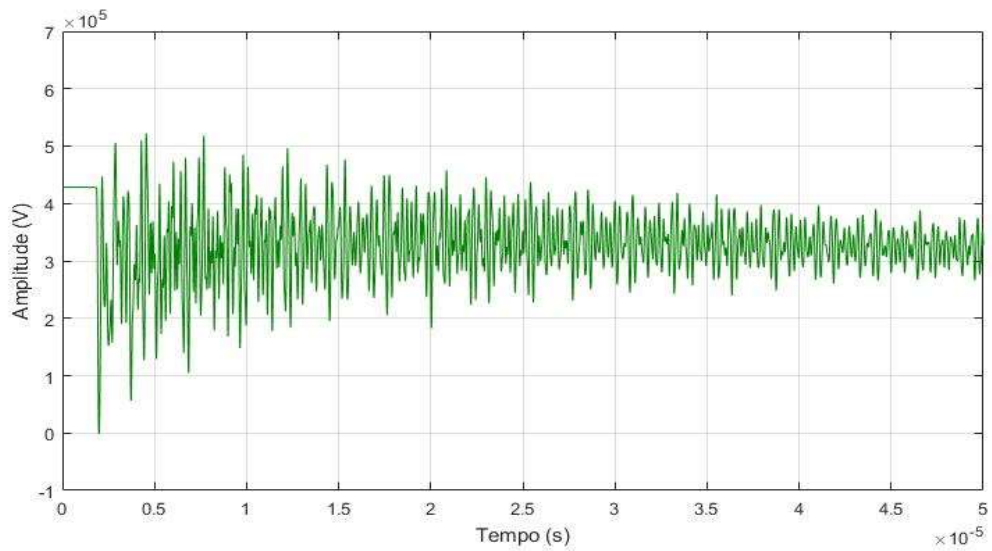
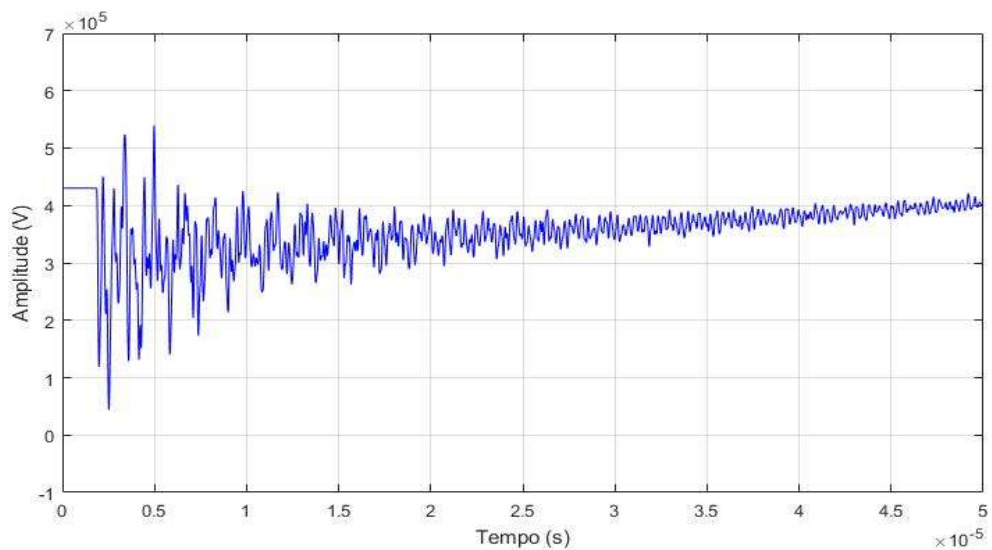
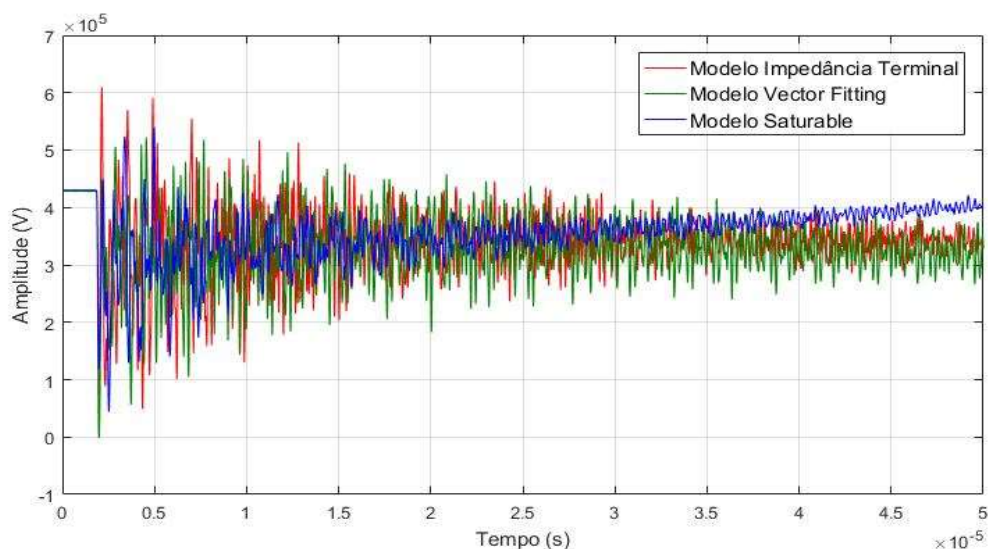
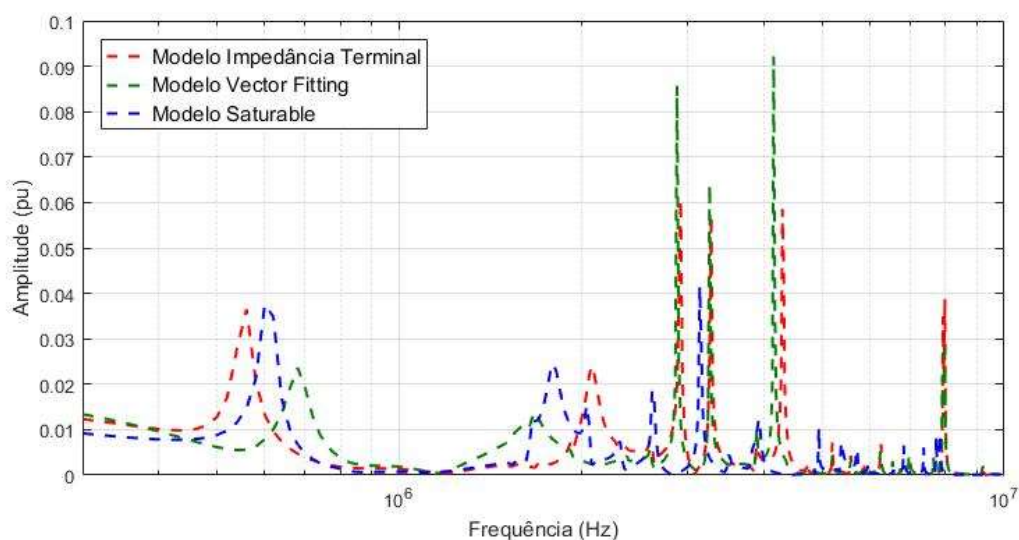
Figura 6.5 – Tensão - Manobra da chave 9447 – Simulação: modelo *Vector Fitting*.Figura 6.6 – Tensão - Manobra da chave 9447 – Simulação: modelo *Saturable*.

Figura 6.7 – Tensão - Manobra da chave 9447 – Simulação.



A Figura 6.8 mostra as componentes de frequência dos sinais de tensão transitória simulados com os três modelos de transformadores. O eixo vertical refere-se à amplitude em pu, utilizando como valor base a tensão de pico fase nominal levando em consideração a posição do tap – $525 / \sqrt{3} * \sqrt{2}$ kV. Utilizando a janela de tempo de $50 \mu\text{s}$, atinge-se frequência a partir de 20 kHz. Iniciou-se a escala de frequência em 300 kHz, pois a primeira componente de frequência de maior amplitude (no intervalo a partir de 20 kHz) encontra-se em, aproximadamente, 600 kHz.

Figura 6.8 – FFT da tensão - Manobra da chave 9447 – Simulação.



As componentes de frequência de maiores amplitudes encontram-se, aproximadamente, em 600 kHz, 1,8 MHz, 2,8 MHz, 3,2 MHz, 4 MHz e 8 MHz. Entre 2,5 MHz e 4,5 MHz o modelo *Vector Fitting* apresenta as maiores amplitudes entre os três modelos, com a maior amplitude – 0,092 pu (9,2 % acima da tensão de pico fase

nominal) – na frequência de 4,16 MHz. A Tabela 6.1 mostra as frequências e amplitudes aproximadas das principais componentes.

Tabela 6.1 – Principais componentes de frequência da simulação utilizando os três modelos – Manobra da chave 9447.

MODELOS	FREQUÊNCIA (MHz)	AMPLITUDE (pu)
Impedância Terminal	0,56	0,037
Vector Fitting	0,68	0,024
Saturable Transformer	0,60	0,038
Impedância Terminal	2,08	0,024
Vector Fitting	1,68	0,014
Saturable Transformer	1,80	0,025
Impedância Terminal	-	-
Vector Fitting	-	-
Saturable Transformer	2,04	0,015
Impedância Terminal	-	-
Vector Fitting	-	-
Saturable Transformer	2,32	0,008
Impedância Terminal	2,92	0,061
Vector Fitting	2,88	0,086
Saturable Transformer	2,62	0,029
Impedância Terminal	3,28	0,057
Vector Fitting	3,26	0,064
Saturable Transformer	3,14	0,042
Impedância Terminal	4,30	0,059
Vector Fitting	4,16	0,092
Saturable Transformer	3,94	0,012
Impedância Terminal	-	-
Vector Fitting	-	-
Saturable Transformer	4,94	0,010
Impedância Terminal	7,98	0,039
Vector Fitting	7,96	0,012
Saturable Transformer	7,82	0,009

De forma análoga, as Figuras 6.9 a 6.13 mostram os resultados da tensão transitória a partir da manobra da chave 9437 no tempo e na frequência para os três modelos.

Figura 6.9 – Tensão - Manobra da chave 9437 – Simulação: modelo Impedância Terminal.

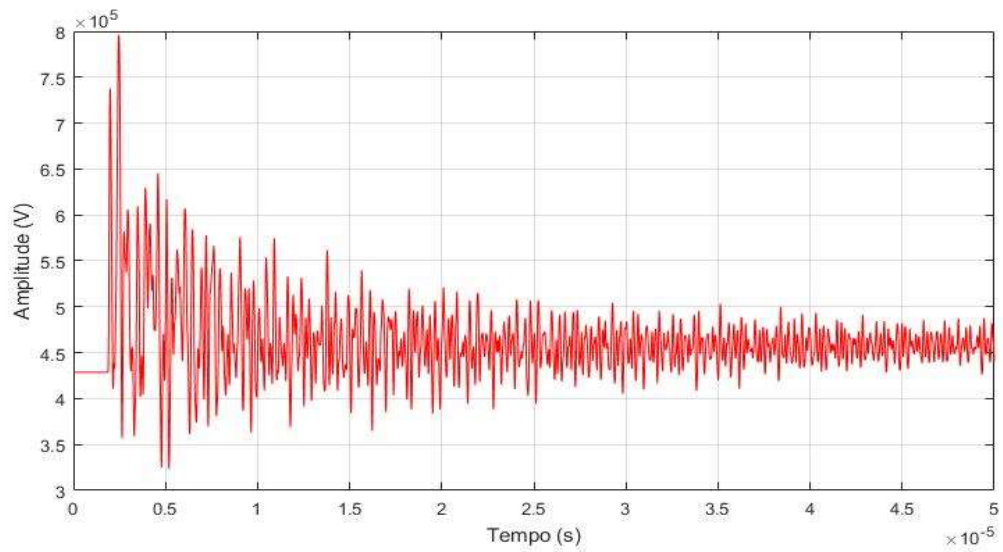
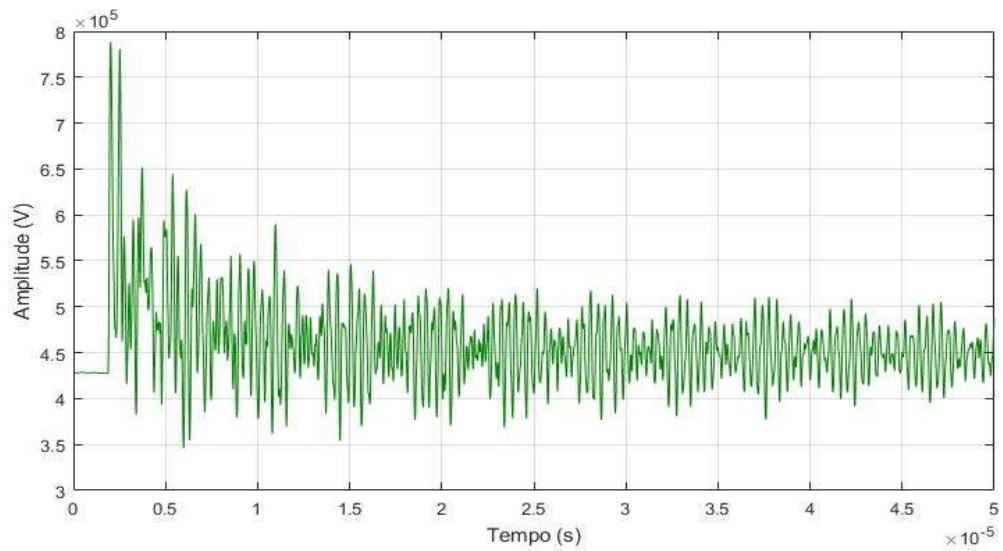
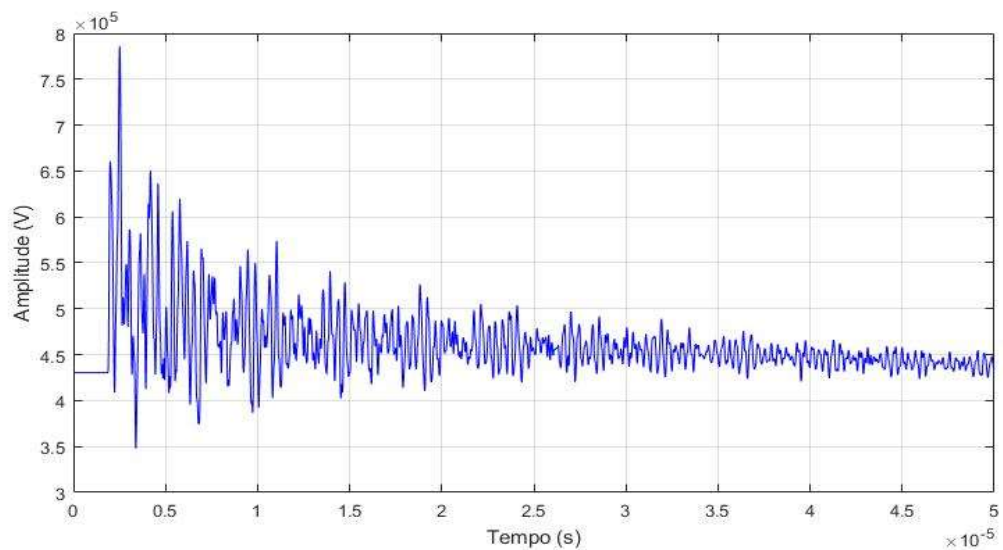
Figura 6.10 – Tensão - Manobra da chave 9437 – Simulação: modelo *Vector Fitting*.Figura 6.11 – Tensão - Manobra da chave 9437 – Simulação: modelo *Saturable*.

Figura 6.12 – Tensão - Manobra da chave 9437 – Simulação.

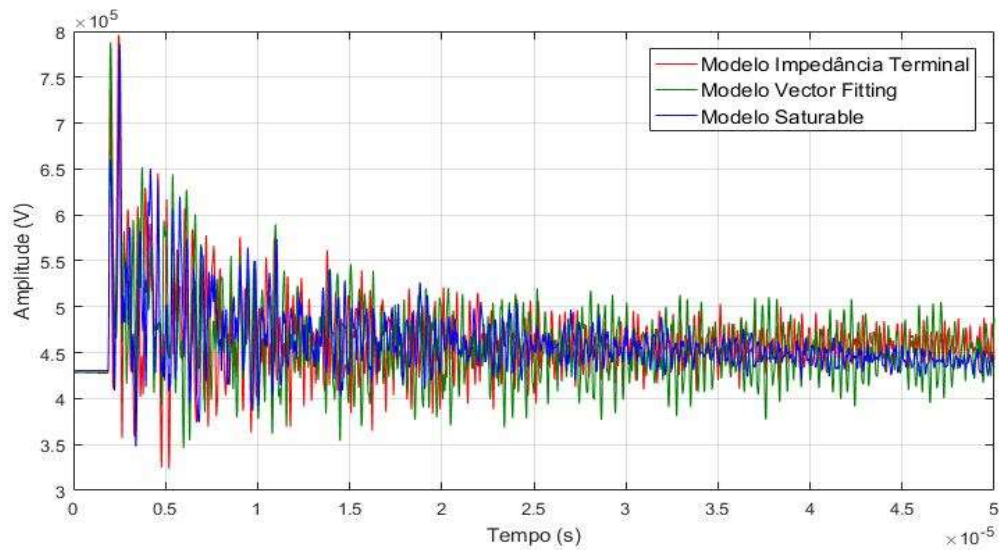
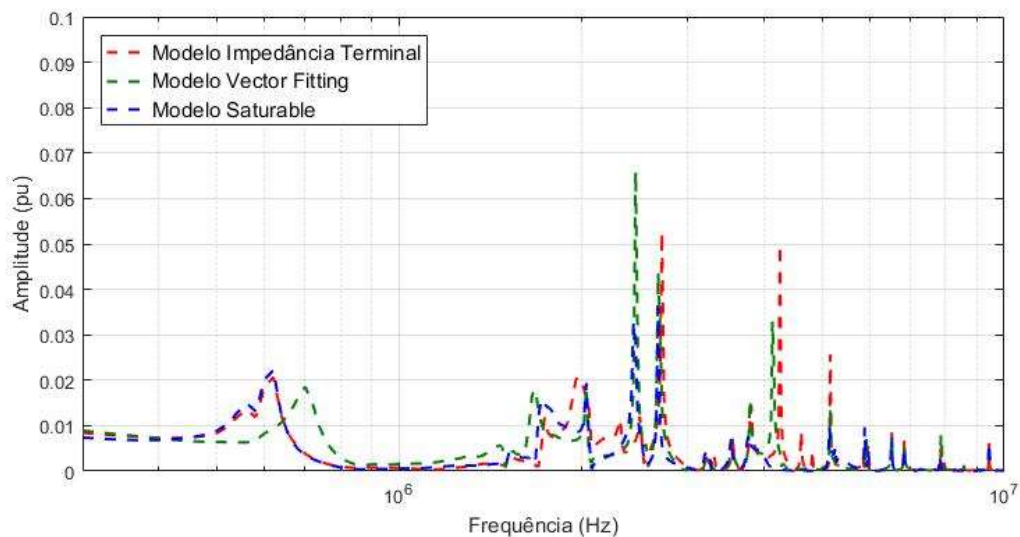


Figura 6.13 – FFT da tensão - Manobra da chave 9437 – Simulação.



As componentes de frequência de maiores amplitudes encontram-se, aproximadamente, em 560 kHz, 620 kHz, 1,7 MHz, 2 MHz, 2,5 MHz, 2,7 MHz, 3,8 MHz e 5 MHz. A componente de frequência 2,46 MHz possui a maior amplitude: 0,066 pu (6,6 % acima da tensão de pico fase nominal) utilizando o modelo *Vector Fitting*. A Tabela 6.2 mostra as frequências e amplitudes aproximadas das principais componentes.

Tabela 6.2 – Principais componentes de frequência da simulação utilizando os três modelos – Manobra da chave 9437.

MODELOS	FREQUÊNCIA (MHz)	AMPLITUDE (pu)
Impedância Terminal	0,56	0,014
Vector Fitting	-	-
Saturable Transformer	0,56	0,015
Impedância Terminal	0,62	0,021
Vector Fitting	0,70	0,019
Saturable Transformer	0,62	0,022
Impedância Terminal	1,74	0,012
Vector Fitting	1,68	0,018
Saturable Transformer	1,72	0,016
Impedância Terminal	1,98	0,021
Vector Fitting	2,04	0,019
Saturable Transformer	2,04	0,019
Impedância Terminal	2,32	0,012
Vector Fitting	-	-
Saturable Transformer	-	-
Impedância Terminal	2,50	0,012
Vector Fitting	2,46	0,066
Saturable Transformer	2,44	0,033
Impedância Terminal	2,72	0,053
Vector Fitting	2,68	0,044
Saturable Transformer	2,68	0,036
Impedância Terminal	3,82	0,015
Vector Fitting	3,80	0,016
Saturable Transformer	3,78	0,008
Impedância Terminal	4,26	0,050
Vector Fitting	4,14	0,033
Saturable Transformer	-	-
Impedância Terminal	5,16	0,026
Vector Fitting	5,16	0,013
Saturable Transformer	5,14	0,010

Quanto à comparação entre as manobras, as tensões transitórias de ambas apresentam resultados de simulação com componentes de frequência próximas. Observam-se componentes de menores amplitudes na manobra da chave 9437 devido à sua distância em relação ao transformador.

As principais componentes de frequência (na faixa entre 20 kHz e 10 MHz) estão entre, aproximadamente, 600 kHz e 8 MHz na manobra da chave 9447 e na

faixa de 560 kHz a 5 MHz para a chave 9437. As componentes de frequência com maior amplitude encontram-se entre 2,5 MHz e 4,5 MHz em ambas as manobras.

Quanto à comparação entre os modelos, os resultados das simulações são semelhantes para os três casos, as componentes de frequências são próximas, com algumas variações na amplitude de cada componente. O modelo *Saturable* possui as menores amplitudes dentre os três modelos a partir de, aproximadamente, 2,5 MHz. Nota-se, também, que a componente de frequência inferior a 1 MHz encontra-se deslocada na frequência no modelo *Vector Fitting*.

6.2. MEDIÇÕES EM CAMPO DE TRANSITÓRIOS DE TENSÃO

Um dos grandes desafios do Sistema Elétrico de Potência é medição de valores elevados de tensão em campo e tratando-se de frequências elevadas a medição torna-se ainda mais difícil.

A maioria dos sistemas de medição são projetados para serem utilizados em laboratórios ou fábricas – ambientes controlados. A maneira mais comum de se realizar uma medição de alta tensão é através da utilização de divisores de tensão capacitivos ou mistos. O manuseio, instalação e utilização deste equipamento em campo torna-se difícil devido ao seu dimensionamento. Além disso, é necessário garantir sua resposta para frequências elevadas (HAUSCHILD, LEMKE, 2014).

Devido às dificuldades de se medir sobretensões de altas frequências em campo, muitos dos estudos de transitórios eletromagnéticos possuem suas simulações levantadas apenas através de cálculos matemáticos.

O Cepel realizou as medições de tensão transitória através do tap capacitivo da bucha de alta tensão. As medições foram realizadas no transformador da Fase C do banco TR56 entre os dias 01 e 05 de março de 2018. Mediu-se o sinal de transitório de tensão que chega até o transformador a partir das manobras das chaves seccionadoras da subestação de 500 kV.

Os níveis de tensão não são compatíveis com o sistema de medição. Logo, para atenuação do sinal, utilizou-se uma unidade de baixa tensão (ligada ao tap da bucha) e um atenuador (conectado à saída da unidade de baixa tensão). Para transmissão do sinal utilizou-se fibra óptica, que se trata de um meio imune à

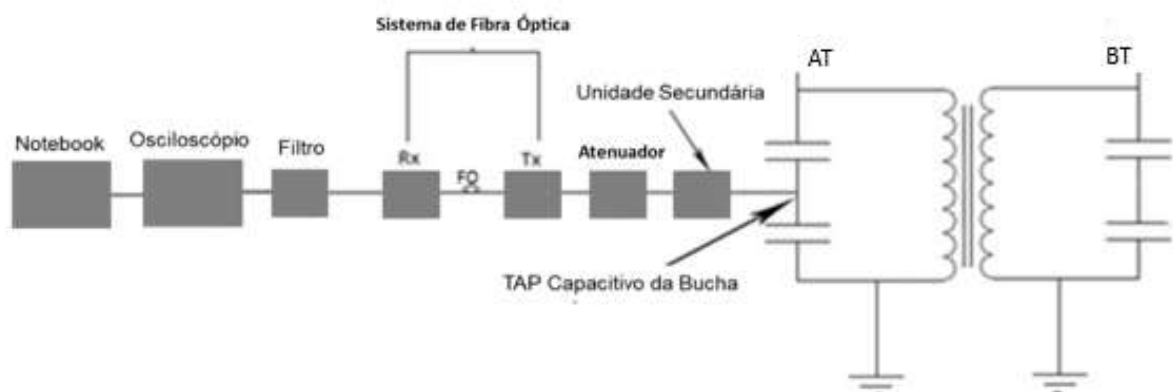
interferência eletromagnética. A Figura 6.14 mostra a unidade secundária, o atenuador e o transmissor de fibra óptica conectados ao tap capacitivo da bucha de alta tensão.

Figura 6.14 – Unidade secundária, atenuador e transmissor de fibra óptica conectados o tap capacitivo da bucha de alta tensão.



Após o receptor da fibra óptica, utilizou-se um filtro passa alta com o objetivo de retirar a frequência de operação do sinal medido. Por tratar-se de sinais com componentes de frequências altas, sem filtrar a componente de 60 Hz perde-se resolução. Por fim, há um osciloscópio e um notebook para visualização e análise do sinal medido. A Figura 6.15 representa o sistema de medição de transitório de tensão.

Figura 6.15 – Sistema de medição integrado ao tap capacitivo da bucha de alta tensão.



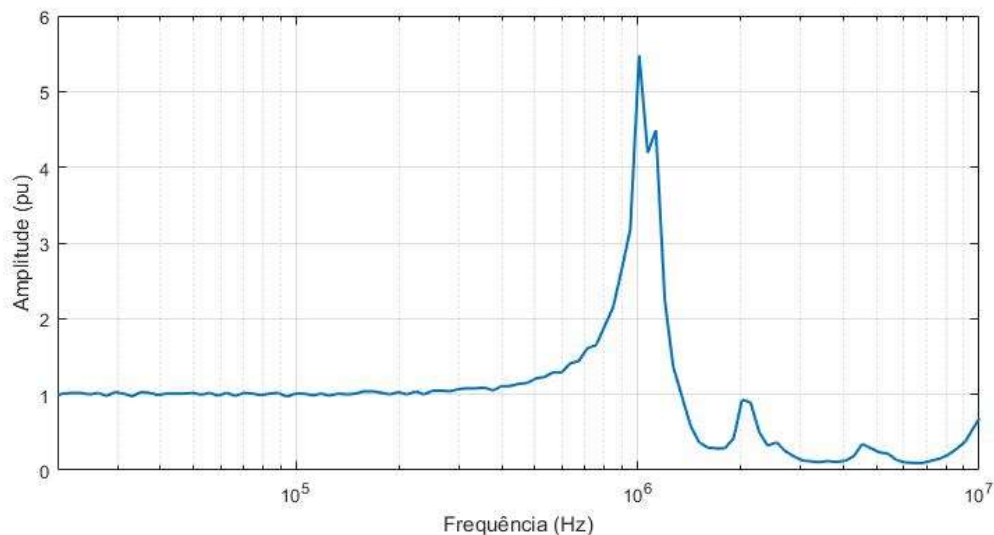
O sinal medido foi atenuado, aproximadamente, 377 mil vezes. Sendo assim, os resultados de medição tiveram que ser multiplicados por este fator de escala.

Outro aspecto que deve ser levado em consideração é a resposta em frequência do sistema de medição. As características do sistema de medição e o

condicionamento para as medições implica na correção dos sinais registrados para inferir o sinal que chega à bucha de alta tensão.

Para tanto, foi feita a caracterização do atenuador, do filtro e do conjunto tap, unidade de baixa tensão e fibra óptica. A caracterização foi feita de maneira separada, em três etapas, e o resultado na frequência do sistema de medição é mostrado na Figura 6.16, onde a escala vertical, em pu, refere-se à frequência nominal. Há estudos em andamento no Cepel que objetivam uma maior confiabilidade na medição da resposta em frequência do sistema de medição de transitórios de tensão no final do espectro.

Figura 6.16 – Caracterização do sistema de medição na frequência.



Manobrou-se uma das chaves com o sistema de medição desconectado do tap da bucha e mediu-se o sinal irradiado e a interferência através do terra. Porém, a interferência foi medida em momentos distintos das manobras, logo, há falta de sincronismo nas medições e não se pode associar essa interferência a todas as manobras.

Além disso, não é possível identificar o caminho pelo qual a interferência acessa o sistema de medição e o ponto da medição no qual ela atua. Sendo assim, não se sabe a amplitude da interferência.

Acredita-se que a blindagem da unidade secundária, do atenuador e do transmissor da fibra óptica – instrumentos do sistema de medição mais susceptíveis às interferências – irá minimizar de forma significativa a interferência eletromagnética

no sinal medido. As próximas medições realizadas em campo já serão realizadas com estes instrumentos blindados.

Utilizou-se nas medições Δt de 6,4 ns, o que faz possível a representação de componentes de frequências até, aproximadamente, 78 MHz. A resposta em frequência do sistema de medição foi realizada até 10 MHz, logo, realiza-se a análise das componentes de frequências de tensão transitória medida até esta frequência – 7,8 vezes menor que o máximo possível levando em consideração o intervalo de tempo de amostragem da medição.

Serão apresentados os resultados de medição das tensões transitórias a partir da manobra das chaves 9447 e 9437. As manobras referem-se às aberturas das chaves, uma vez que, apresentaram amplitudes maiores que as manobras de fechamento das mesmas. Para análise das componentes na frequência, serão levados em consideração os impulsos de amplitudes maiores que, aproximadamente, 50 % do máximo de tensão da manobra.

Ao se realizar a abertura de uma chave seccionadora, a partir do momento em que ocorre a separação elétrica dos contatos, o lado que fica desconectado do sistema mantém a tensão da rede que decairá lentamente. Enquanto isso no lado ligado ao sistema, a tensão continua a variar conforme a frequência da fonte. A velocidade de operação dos contatos da chave é pequena, logo a diferença de potencial entre os mesmos acaba por superar a rigidez dielétrica provocando um reacendimento do arco elétrico. O meio isolante entre os contatos da chave seccionadora, no caso o SF₆, 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 (ROCHA, *et al*, 2011).

No caso do fechamento, enquanto seus contatos se aproximam, o campo elétrico entre eles aumenta, até que uma descarga elétrica aconteça, assim 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 (ROCHA, *et al*, 2011).

A seguir são apresentados os resultados de medição de tensão a partir da manobra da chave 9447: a Figura 6.17 representa a manobra de abertura da chave, a Figura 6.18 e 6.19 mostram a tensão a partir da manobra no tempo e na frequência, respectivamente, ainda sem a correção do sistema de medição.

Na Figura 6.18 é possível perceber as menores amplitudes de tensão no início da manobra – onde há uma menor distância a ser rompida para formação do arco elétrico – e as maiores amplitudes no final da manobra – com uma maior distância entre os contatos da chave. A Figura 6.19 apresenta os impulsos de amplitudes maiores que, aproximadamente, 50 % do máximo de tensão da manobra: 22 impulsos com amplitude superior a 100 kV.

Figura 6.17 – Representação da manobra de abertura da chave 9447.

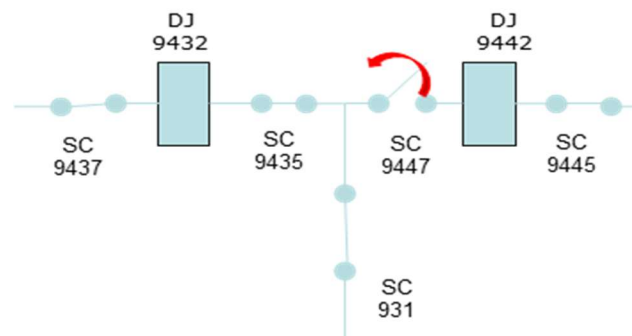


Figura 6.18 – Tensão no tempo a partir da manobra da chave 9447 – Medição.

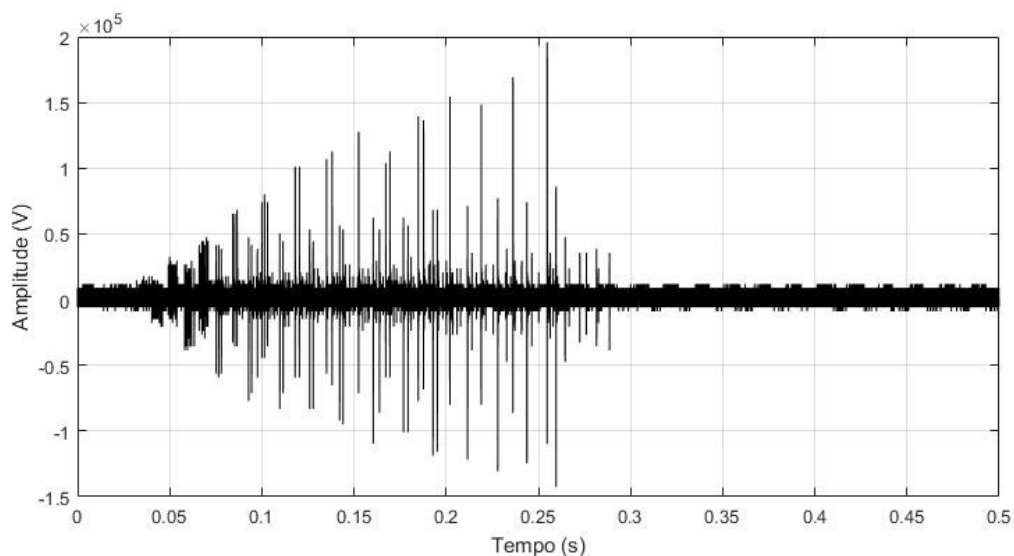
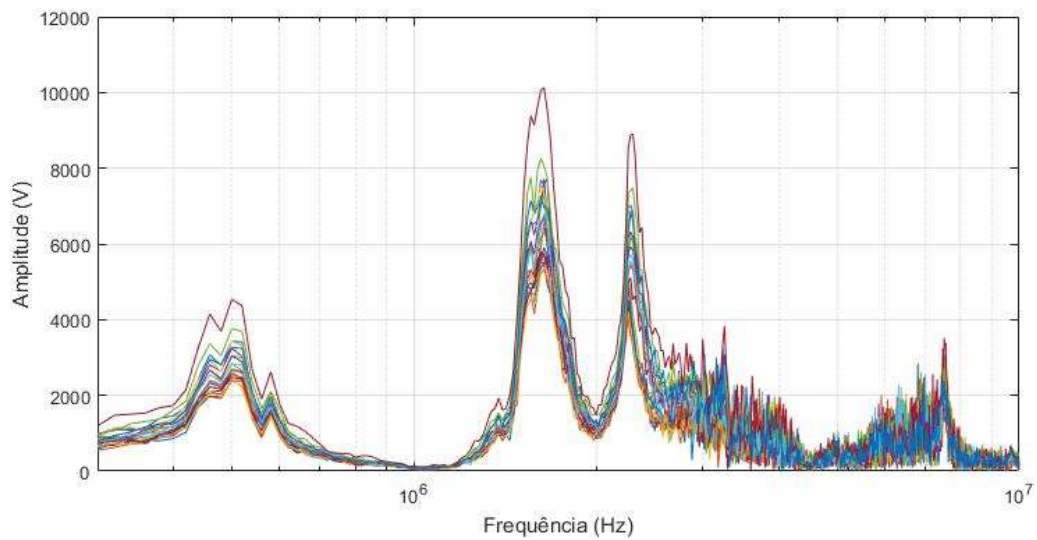


Figura 6.19 – FFT da tensão a partir da manobra da chave 9447 – Medição.



A Figura 6.20 mostra o impulso de tensão de maior amplitude no tempo corrigido de acordo com a resposta do sistema de medição. As componentes na frequência do sinal são apresentadas na Figura 6.21, com a escala em pu referente ao valor da tensão de pico fase nominal.

Figura 6.20 – Impulso máximo positivo de tensão a partir da manobra da chave 9447 no tempo – Medição.

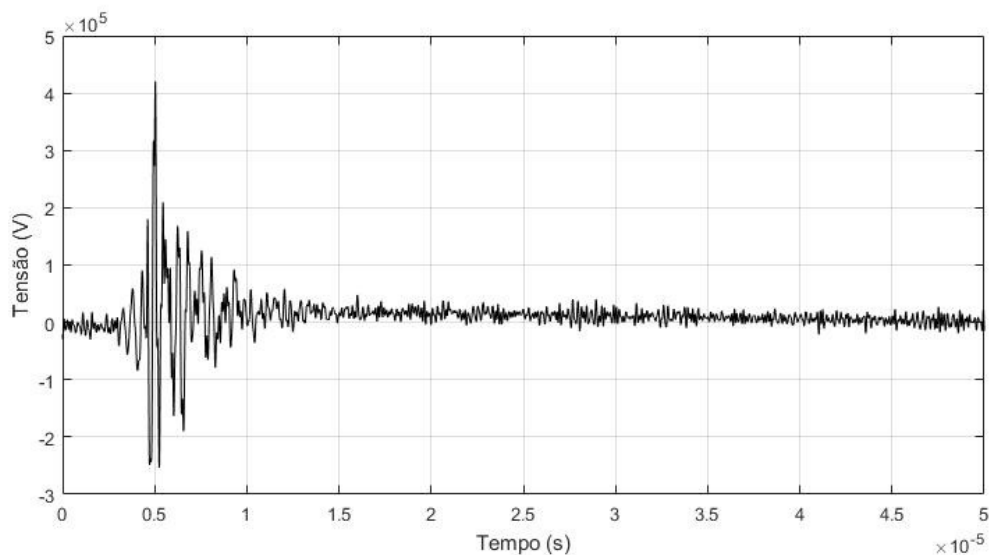
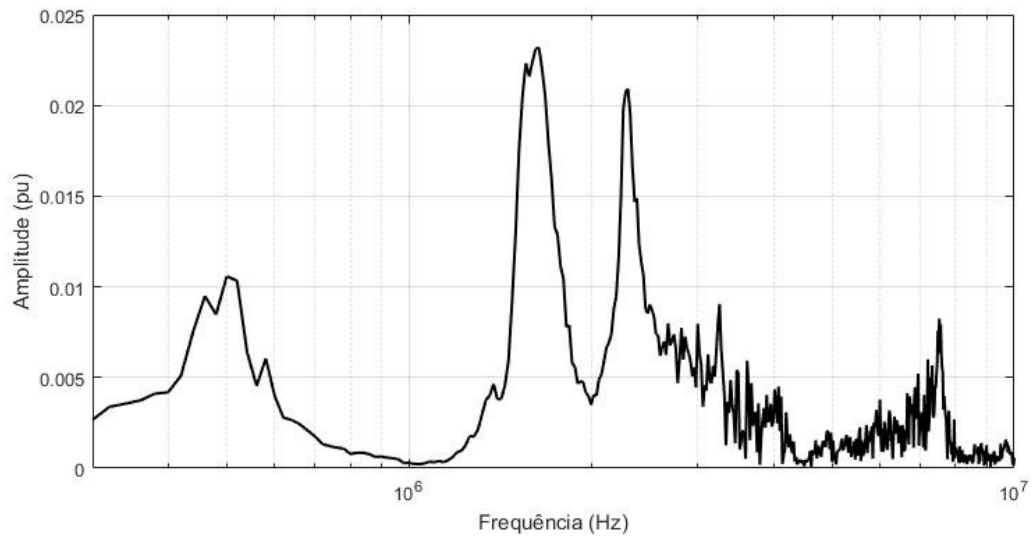


Figura 6.21 – FFT do impulso de tensão máximo positivo a partir da manobra da chave 9447 – Medição.



De maneira análoga, as Figuras 6.22 a 6.26 apresentam os resultados da medição de tensão a partir da manobra da chave 9437. A Figura 6.23 apresenta os 19 impulsos que possuem amplitude maior que 80 kV.

Figura 6.22 – Representação da manobra de abertura da chave 9437.

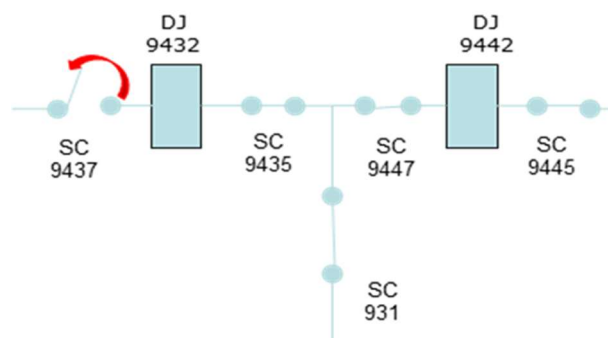


Figura 6.23 – Tensão no tempo a partir da manobra da chave 9437 – Medição.

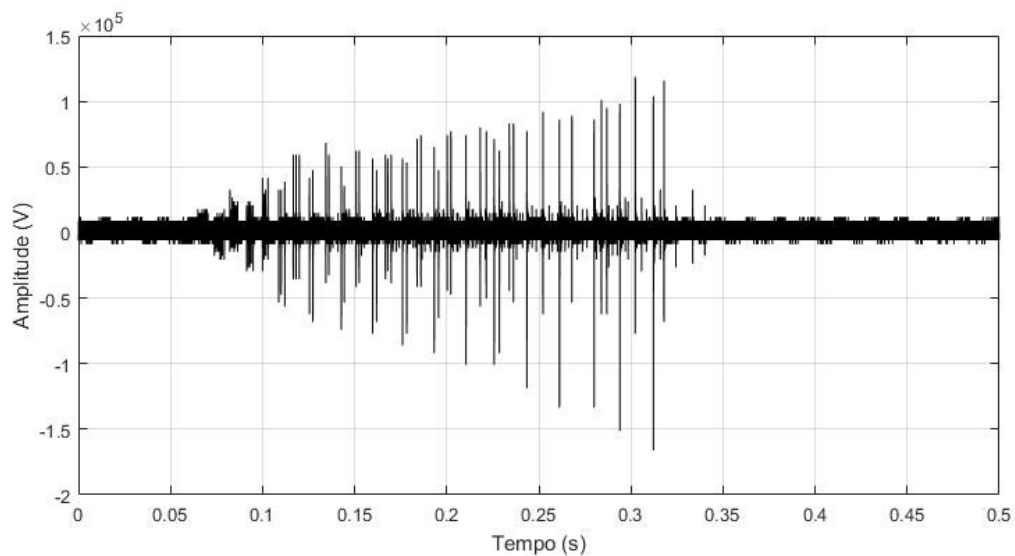


Figura 6.24 – FFT da tensão a partir da manobra da chave 9437 – Medição.

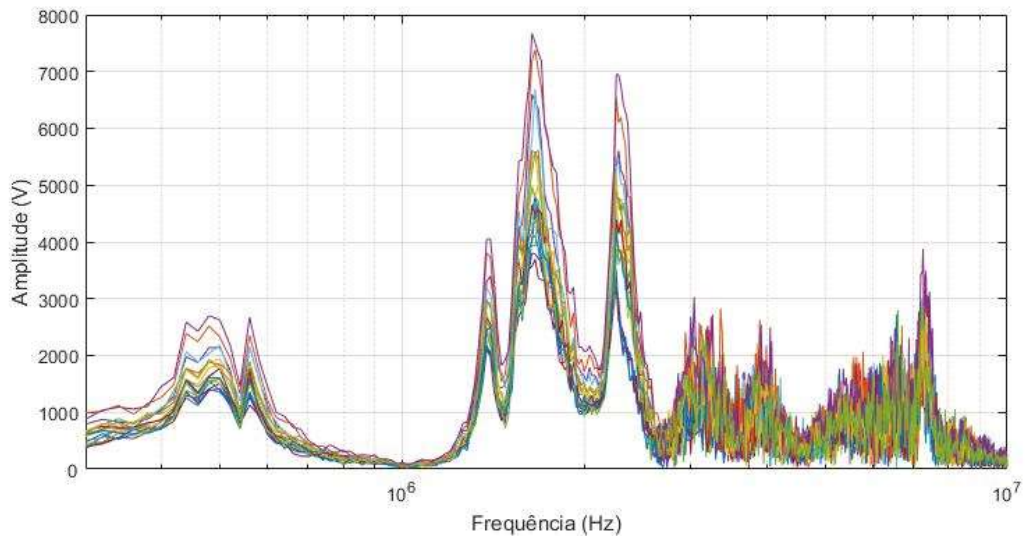


Figura 6.25 – Impulso máximo negativo de tensão a partir da manobra da chave 9437 no tempo – Medição.

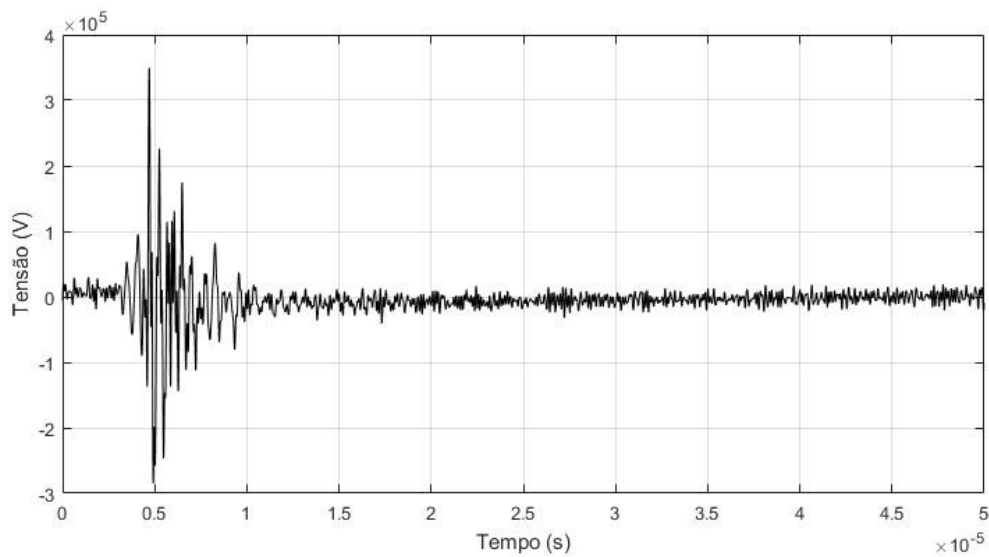
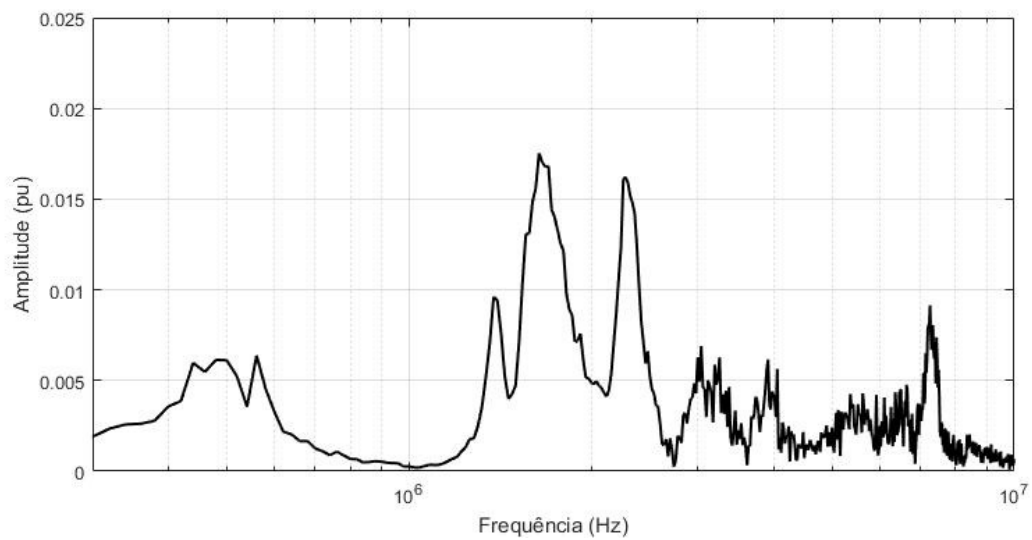


Figura 6.26 – FFT do impulso de tensão máximo negativo a partir da manobra da chave 9437 – Medição.



A Figura 6.27 compara a tensão transitória medida a partir da manobra das duas chaves na frequência e a Tabela 5.3 mostra as amplitudes e frequências das principais componentes dos sinais.

Figura 6.27 – FFT do impulso de tensão de maior amplitude a partir da manobra das chaves 9447 e 9437 – Medição.

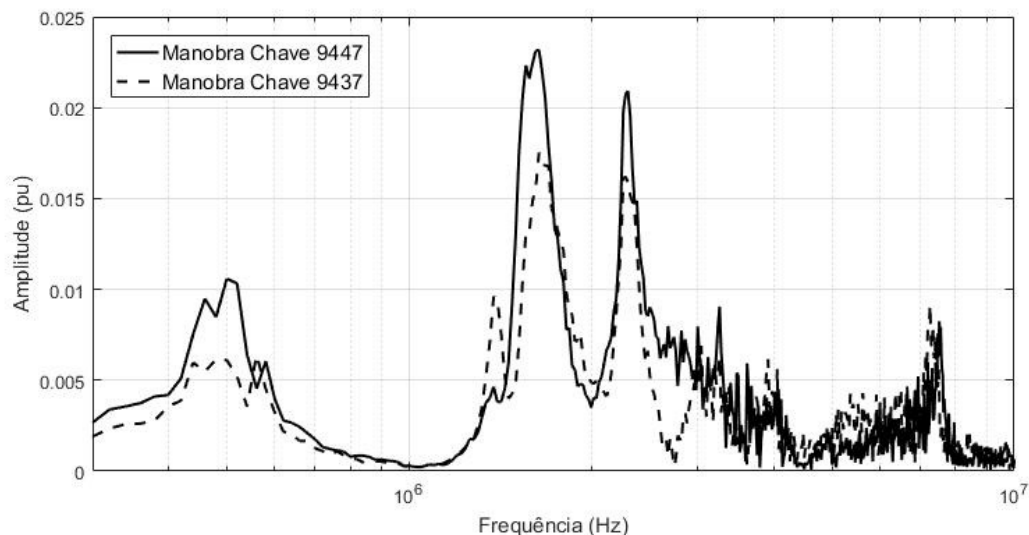


Tabela 6.3 – Principais componentes de frequência da tensão transitória medida – Manobra das chaves 9447 e 9437.

CHAVE	FREQUÊNCIA (MHz)	AMPLITUDE (pu)
9447	0,50	0,011
9437		0,006
9447	0,56	0,006
9437		0,006
9447	1,38	0,005
9437		0,010
9447	1,64	0,023
9437		0,018
9447	2,30	0,021
9437		0,016
9447	3,26	0,009
9437		0,007
9447	3,62	0,006
9437		0,006
9447	7,52	0,008
9437		0,009

Como esperado, devido à posição das chaves em relação ao transformador medido, as amplitudes de tensão originadas a partir da manobra da chave 9447 são

maiores. Ambas as manobras apresentam a componente de maior amplitude na frequência de 1,64 MHz com amplitudes máximas de 0,033 pu e 0,025 pu para as chaves 9447 e 9437, respectivamente.

Os resultados de medição das duas manobras apresentam componentes de frequências próximas. As componentes encontram-se entre 500 kHz e 7,5 MHz, aproximadamente. Nota-se maior interferência no espectro de frequência a partir, principalmente, de 2,5 MHz, aproximadamente. Sendo assim, a partir desta frequência, torna-se difícil identificar as demais componentes de frequência.

6.3. VALIDAÇÃO DOS MODELOS DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA EM ALTAS FREQUÊNCIAS

Para validação dos modelos compararam-se os resultados das simulações com as medições de transitórios de tensão em campo.

As medições de transitórios de tensão foram realizadas com a subestação de 138 kV conectada ao terminal de baixa tensão do transformador. Já nas simulações, não se representou a subestação de 138 kV. Os modelos foram obtidos considerando o terminal de baixa tensão em aberto. Nos modelos Impedância Terminal e *Vector Fitting* a síntese representa a impedância vista do terminal de alta tensão para o terra e no modelo *Saturable* conectou-se uma resistência ao terminal de baixa tensão que representa a impedância característica da bucha, admitindo-se que o surto segue sem reflexões.

Não se mediu a componente de 60 Hz. Sendo assim, para ser possível a comparação entre medição e simulação no domínio do tempo, retirou-se a amplitude referente à frequência de operação dos resultados de tensão transitória simulados.

A simulação possui o passo de tempo 6,4 vezes menor que o passo de tempo da medição, conseqüentemente, é possível representar componentes de frequências 6,4 vezes maiores.

As Figuras 6.28 a 6.30 mostram a comparação dos resultados de medição e simulação da tensão transitória a partir da manobra da chave 9447 no tempo e as Figuras 6.31 a 6.34 mostram os resultados as componentes de frequência, para os três modelos.

Figura 6.28 – Tensão - Manobra da chave 9447 – Modelo Impedância Terminal x Medição.

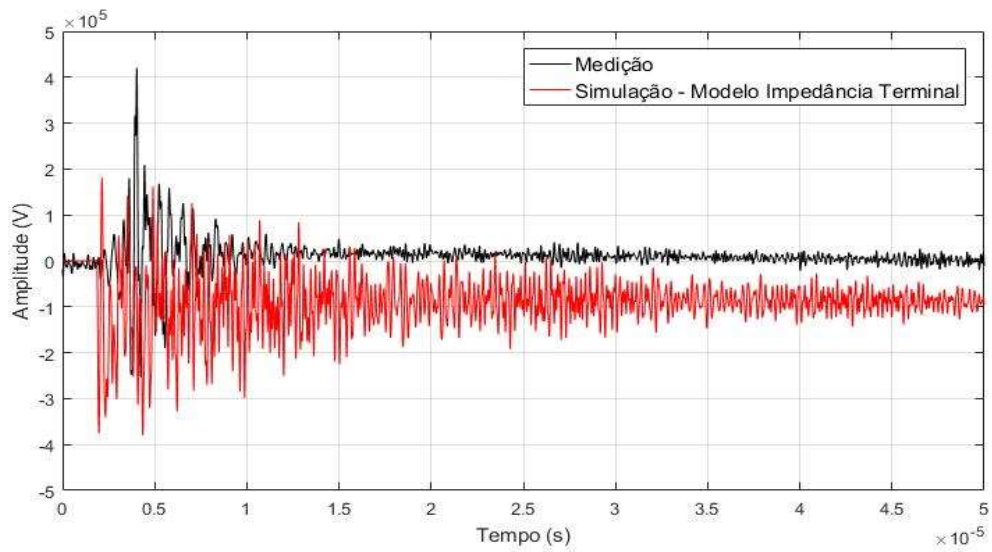
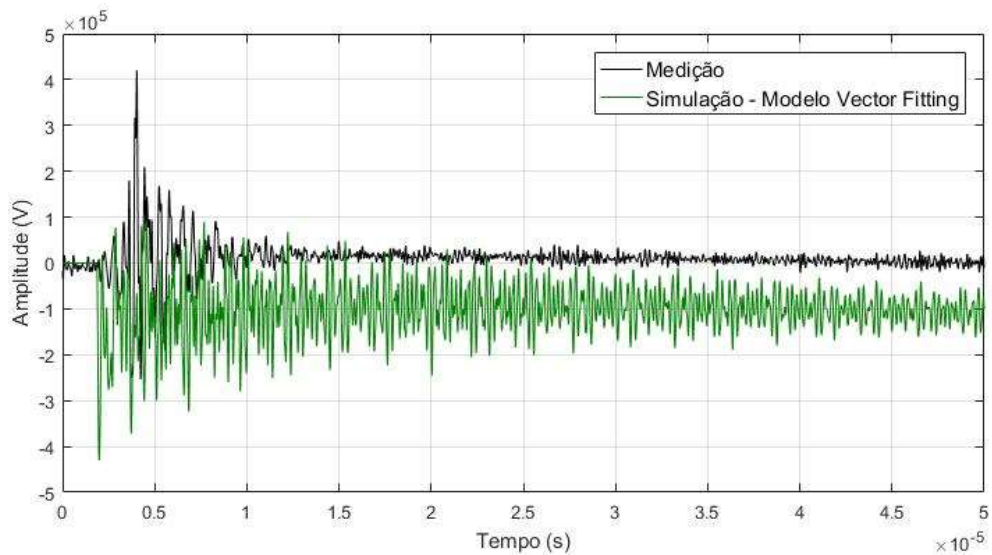
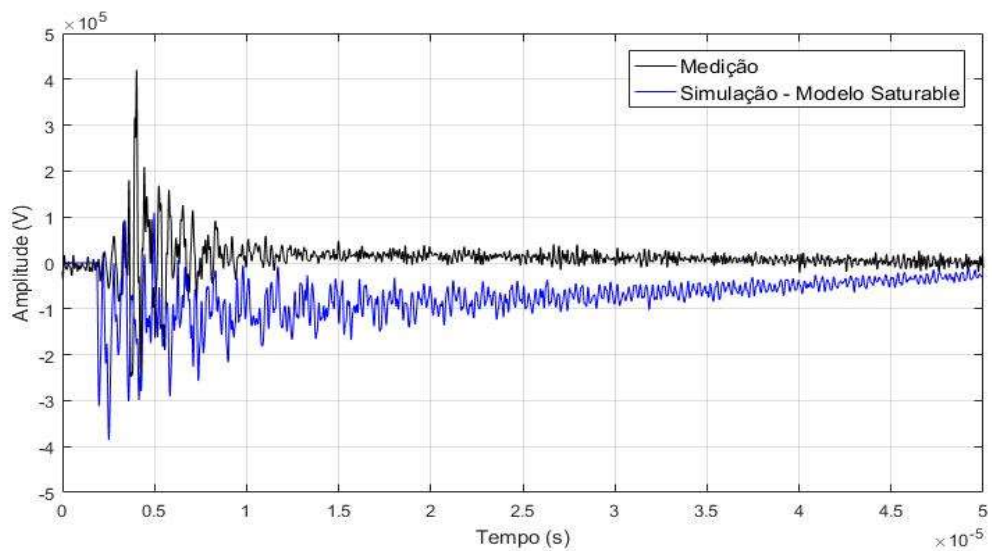
Figura 6.29 – Tensão - Manobra da chave 9447 – Modelo *Vector Fitting* x Medição.Figura 6.30 – Tensão - Manobra da chave 9447 – Modelo *Saturable* x Medição.

Figura 6.31 – FFT da tensão - Manobra da chave 9447 – Modelo Impedância Terminal x Medição.

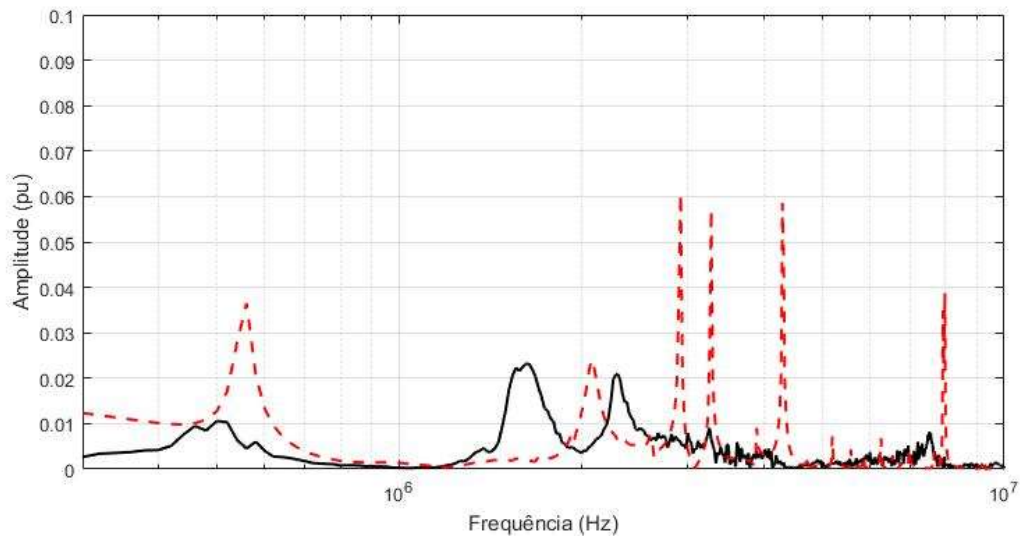
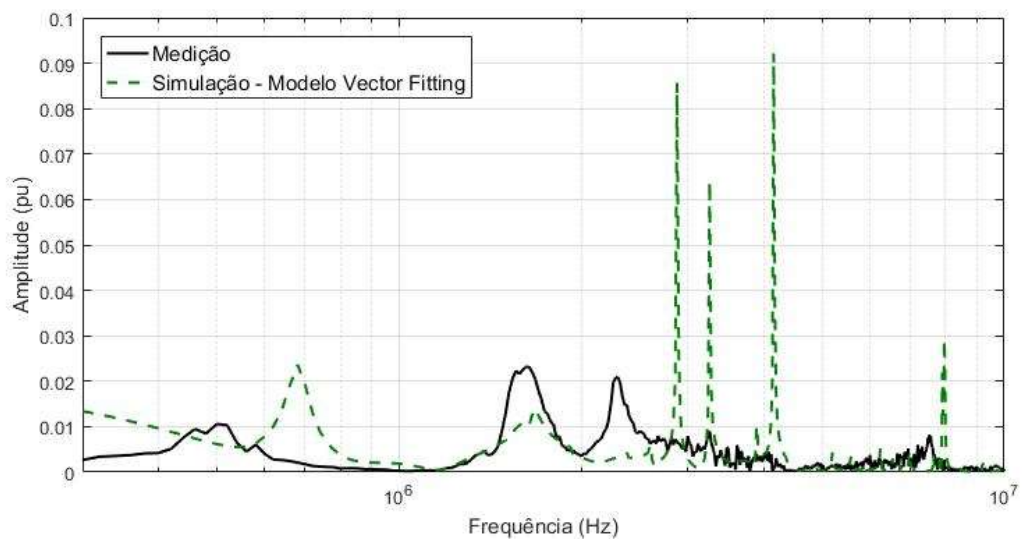
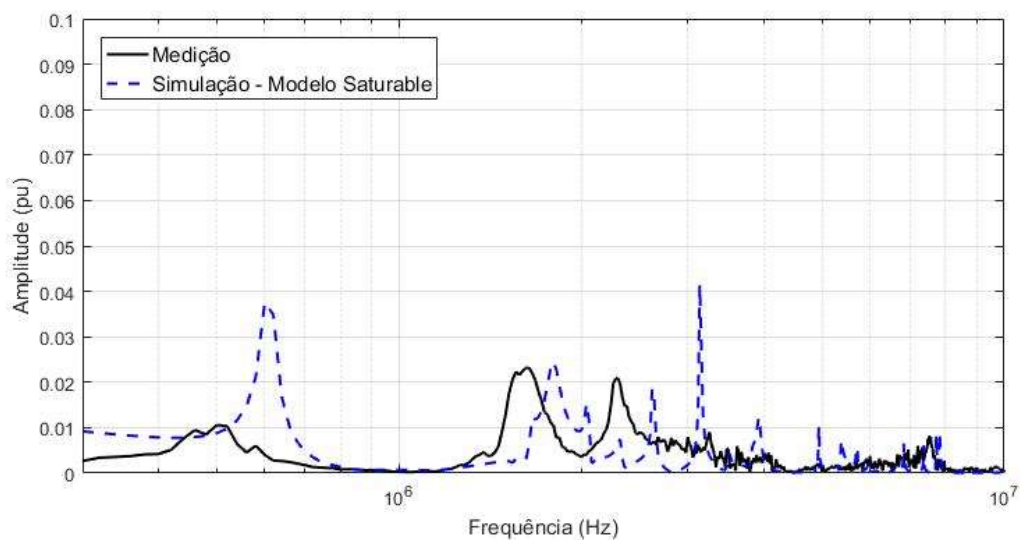
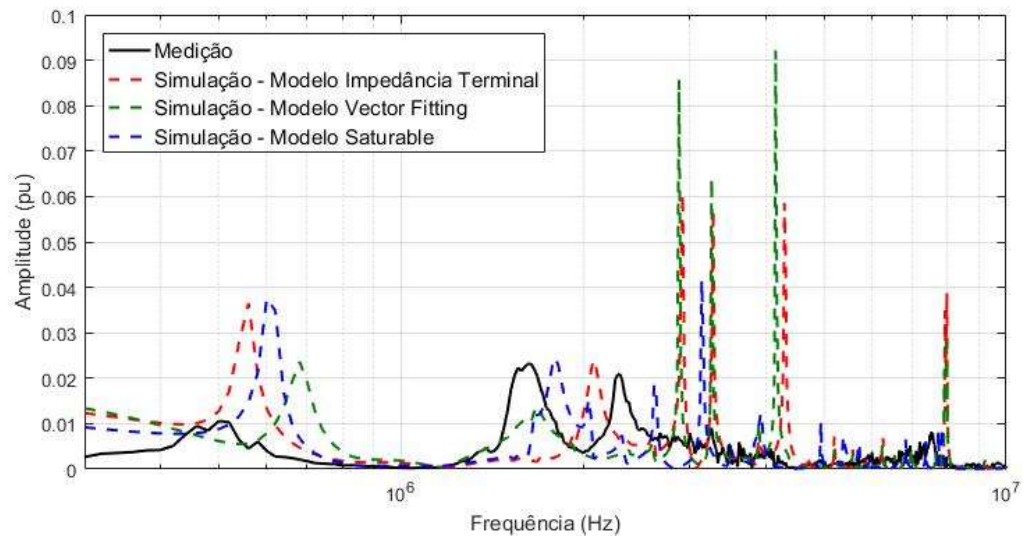
Figura 6.32 – FFT da tensão - Manobra da chave 9447 – Modelo *Vector Fitting* x Medição.Figura 6.33 – FFT da tensão - Manobra da chave 9447 – *Saturable Transformer* x Medição.

Figura 6.34 – FFT da tensão - Manobra da chave 9447 – Simulação x Medição.



As Figuras 6.35 a 6.41 mostram a comparação dos resultados da medição e simulação da tensão transitória a partir da manobra da chave 9437 no tempo e na frequência para os três modelos.

Figura 6.35 – Tensão - Manobra da chave 9437 – Modelo Impedância Terminal x Medição.

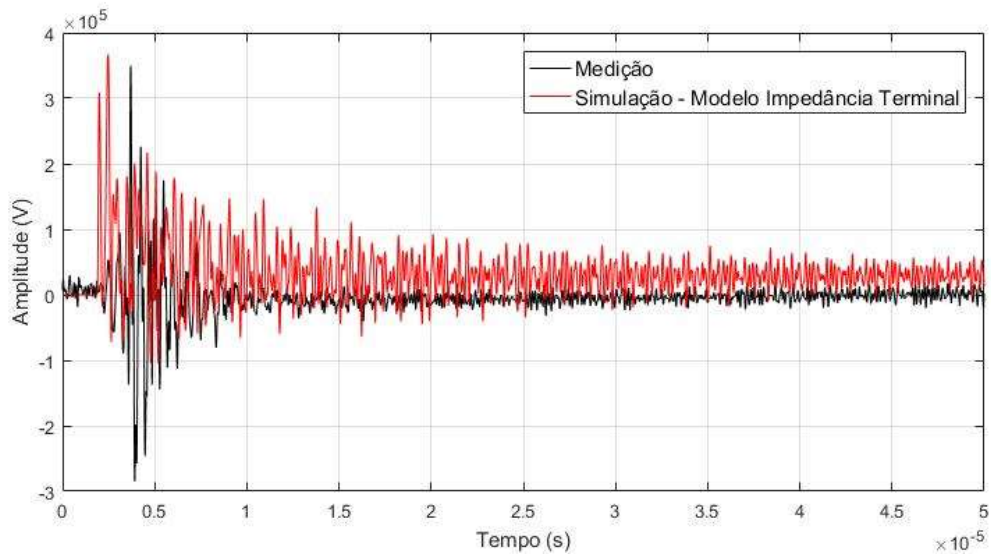


Figura 6.36 – Tensão - Manobra da chave 9437 – Modelo *Vector Fitting* x Medição.

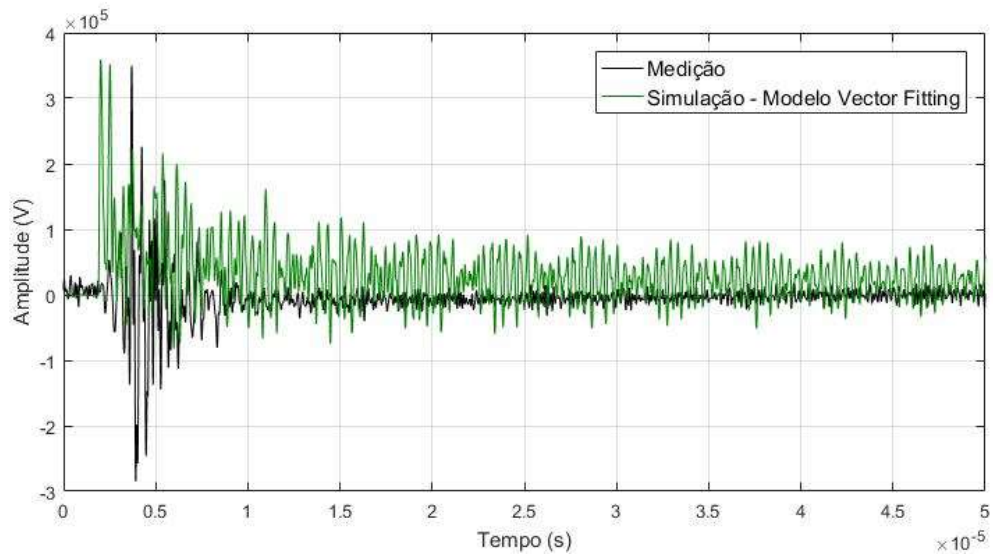


Figura 6.37 – Tensão - Manobra da chave 9437 – Modelo *Saturable* x Medição.

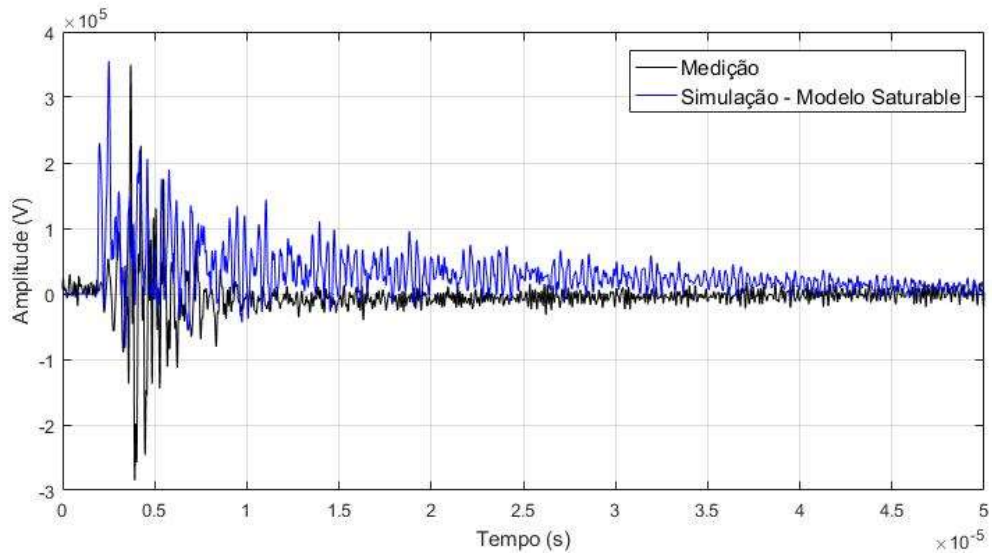


Figura 6.38 – FFT da tensão - Manobra da chave 9437 – Modelo Impedância Terminal x Medição.

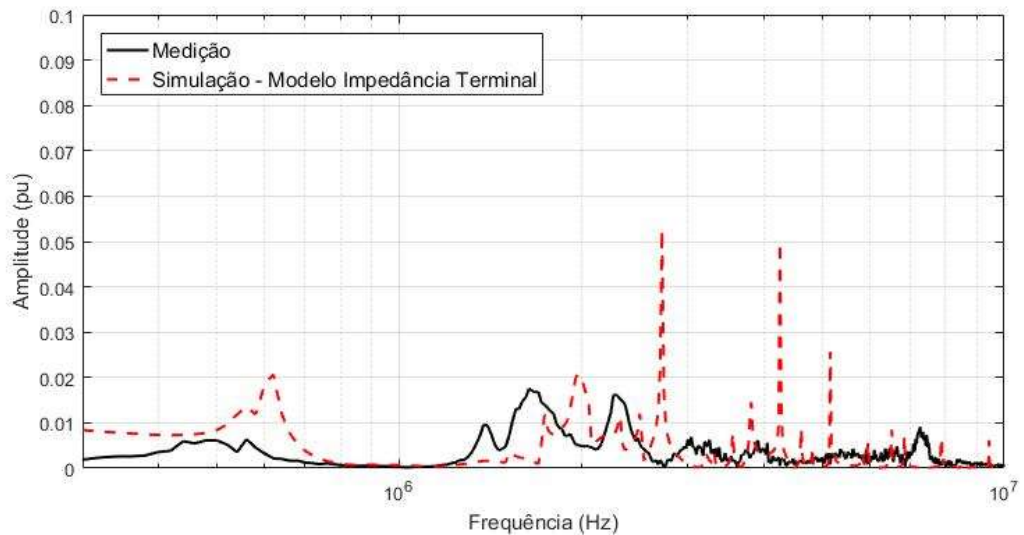


Figura 6.39 – FFT da tensão - Manobra da chave 9437 – Modelo *Vector Fitting* x Medição.

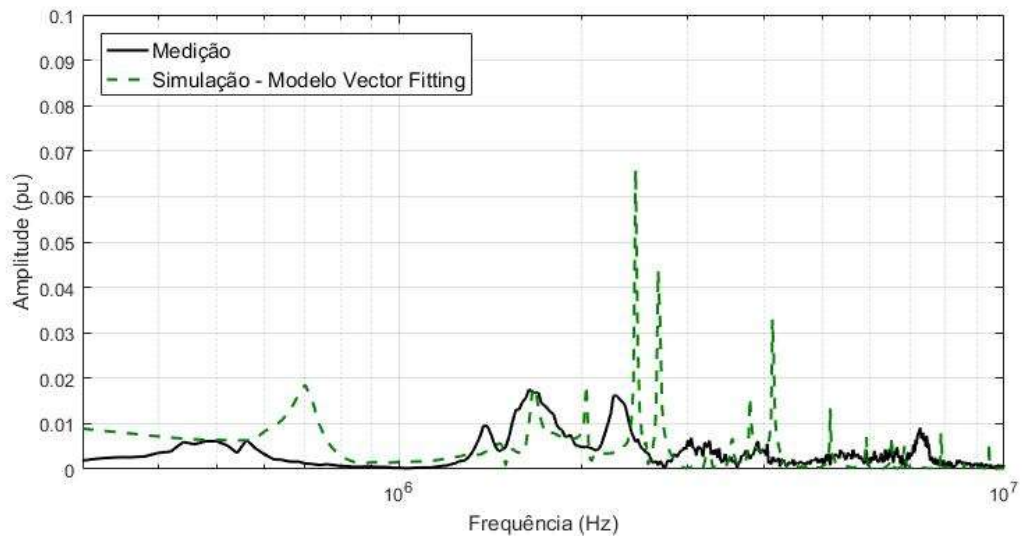


Figura 6.40 – FFT da tensão - Manobra da chave 9437 – Modelo *Saturable* x Medição.

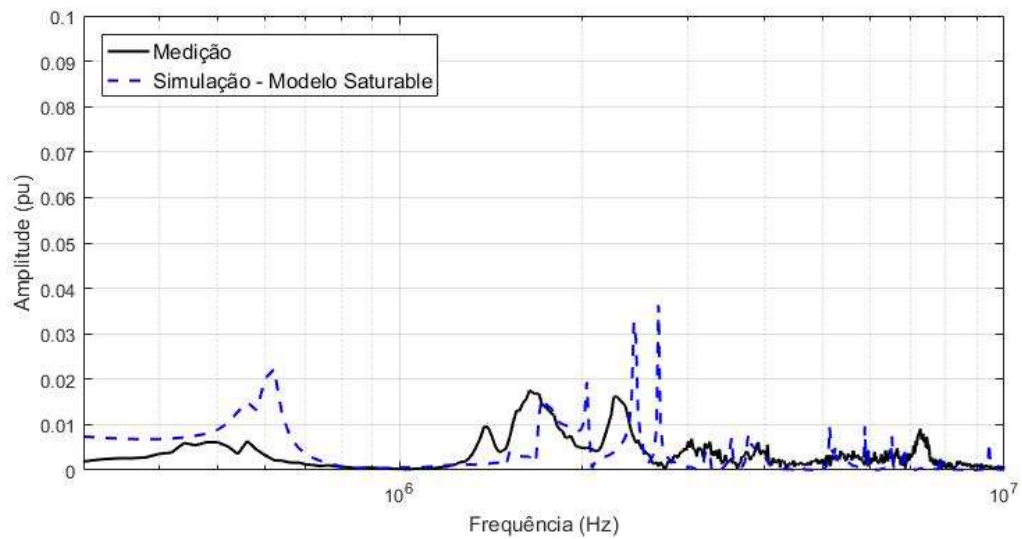
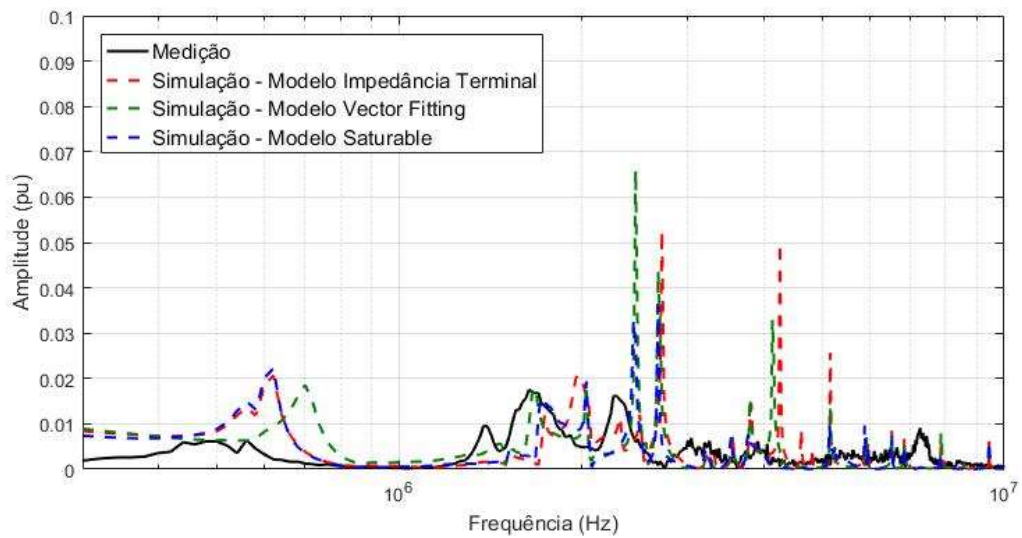


Figura 6.41 – FFT da tensão - Manobra da chave 9437 – Simulação x Medição.



Nas comparações no domínio do tempo é possível perceber que as oscilações possuem maiores amplitudes nos resultados das simulações. Entretanto, em relação ao pico máximo do sinal, principalmente na manobra da chave 9437, os resultados de simulação e medição possuem amplitudes bem próximas. Há oscilações de frequências mais altas nos resultados das simulações. O que é ratificado nos resultados no domínio da frequência em que as componentes de frequências mais altas possuem maiores amplitudes nas simulações comparados aos resultados de medições. Os picos máximos semelhantes nos sinais no domínio tempo encontram-se em frequências diferentes comparando os resultados das simulações e medições. Além da amplitude maior, as componentes de frequência da simulação encontram-se deslocadas em relação à medição.

As simulações são, em geral, mais conservativas pela dificuldade de se representar todas as perdas associadas às medições em campo e por se representar a máxima diferença de tensão entre os terminais da chave. Acredita-se que a representação do trecho aéreo (saída da subestação até o terminal do transformador) através o modelo JMarti irá amortecer a amplitude das componentes de frequências mais altas nos resultados das simulações. Para tanto, necessita-se de parâmetros relacionados aos cabos e distâncias do trecho aéreo, informações solicitadas à empresa de energia responsável pela subestação.

Os três modelos apresentam respostas semelhantes entre si e se aproximam da medição até, aproximadamente, 2,5 MHz. Deve-se levar em consideração que, a partir desta frequência, o nível de interferência na medição tanto de impedância na frequência quanto de transitório de tensão é maior e a resposta do sistema de medição fica comprometida.

O modelo *Vector Fitting* apresenta a componente inferior a 1 MHz deslocada na frequência e a componente próxima a 2,5 MHz com amplitude maior em comparação à medição e aos outros modelos. O resultado das simulações das tensões transitórias a partir das manobras de chaves seccionadoras com o modelo *Saturable* é o que mais se aproximou da medição. Até 2,5 MHz, aproxima-se mais, de uma forma geral, comparando a frequência e amplitude das principais componentes de frequência e de 2,5 MHz a 10 MHz possui as componentes de menor amplitude.

O modelo utilizando o *Vector Fitting* é o que mais sofre a influência das interferências, uma vez que, os modelos Impedância Terminal e *Saturable Transformer* baseiam-se nos pontos ressonantes e o *Vector Fitting* gera uma função que responde na frequência de forma aproximada à curva medida. Acredita-se que, com uma medição de impedância terminal na frequência com menor interferência, principalmente nas frequências mais altas, o resultado da modelagem utilizando o *Vector Fitting* irá melhorar de forma significativa.

Fez-se a aproximação através do *Vector Fitting* até 2,5 MHz. As Figuras 6.42 e 6.43 destacam a medição em módulo e ângulo, respectivamente, nesta faixa. A Figura 6.44 mostra o ajuste até 2,5 MHz utilizando 15 polos e o circuito da síntese é apresentado no Apêndice F. As respostas em frequência do circuito sintetizado comparado à medição são mostrados nas Figuras 6.45 e 6.46 em módulo e ângulo, respectivamente.

Figura 6.42 – Módulo da impedância do terminal de alta tensão na frequência, destacando a faixa até 2,5 MHz.

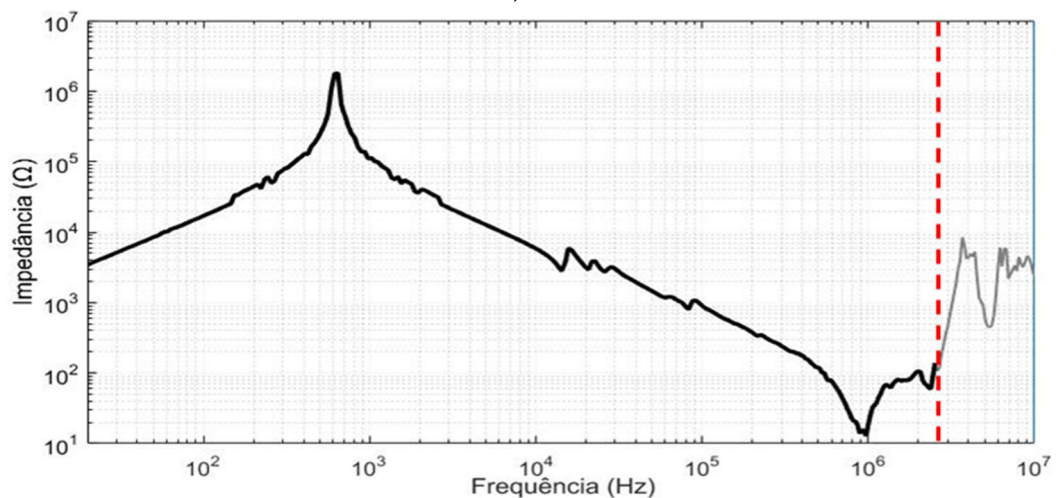


Figura 6.43 – Ângulo da impedância do terminal de alta tensão na frequência, destacando a faixa até 2,5 MHz.

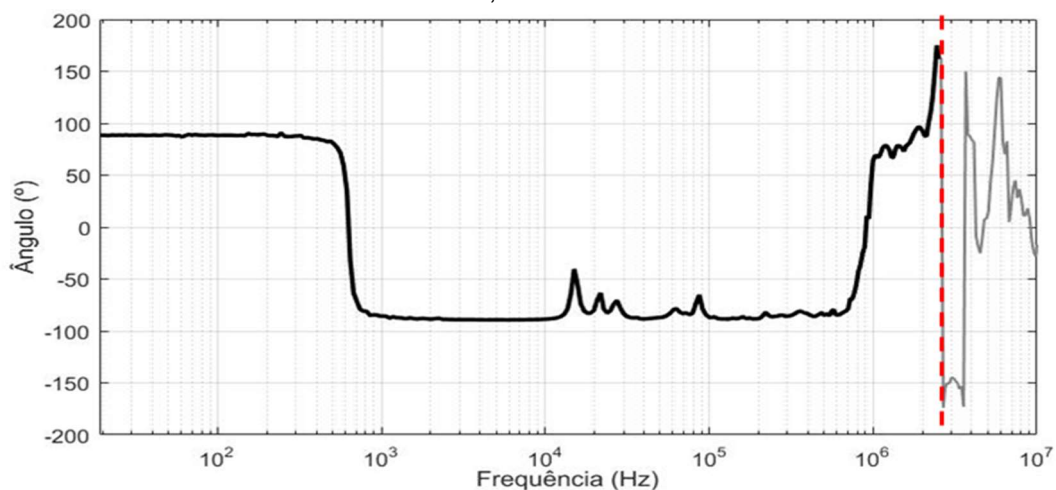


Figura 6.44 – Curva aproximada através do *Vector Fitting* até 2,5 MHz.

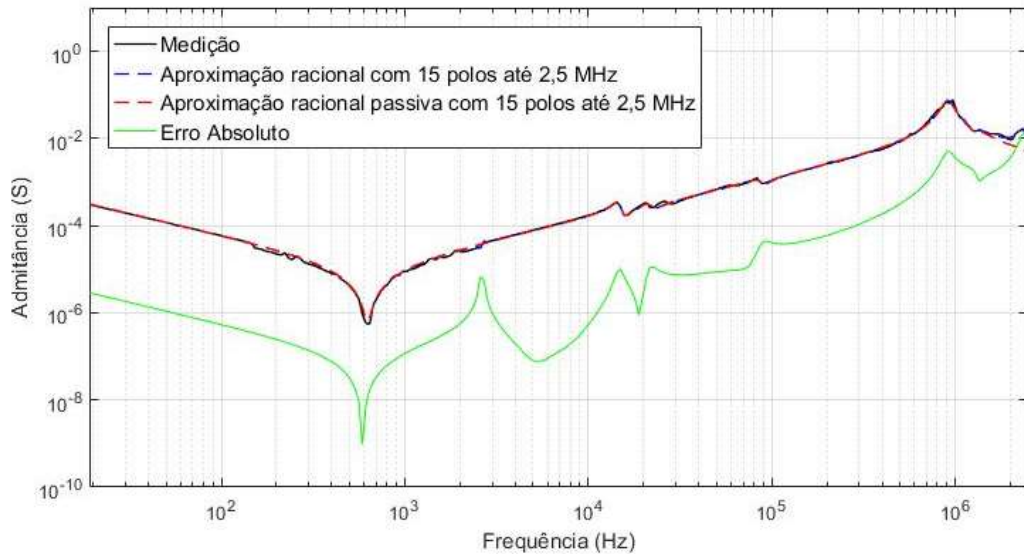


Figura 6.45 – Comparação entre o módulo da medição e simulação: varredura na frequência do circuito resultante do *Vector Fitting* aproximado com 15 polos até 2,5 MHz.

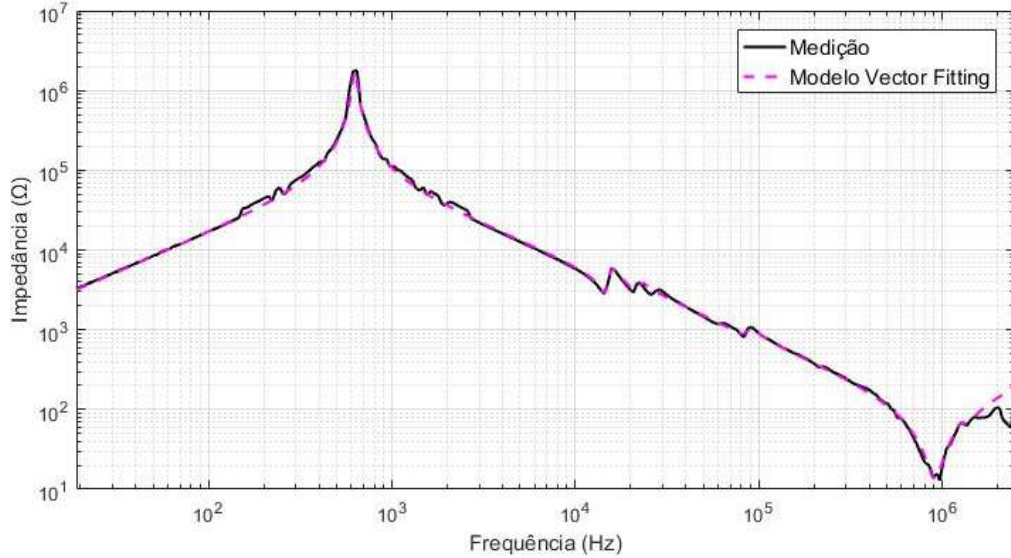
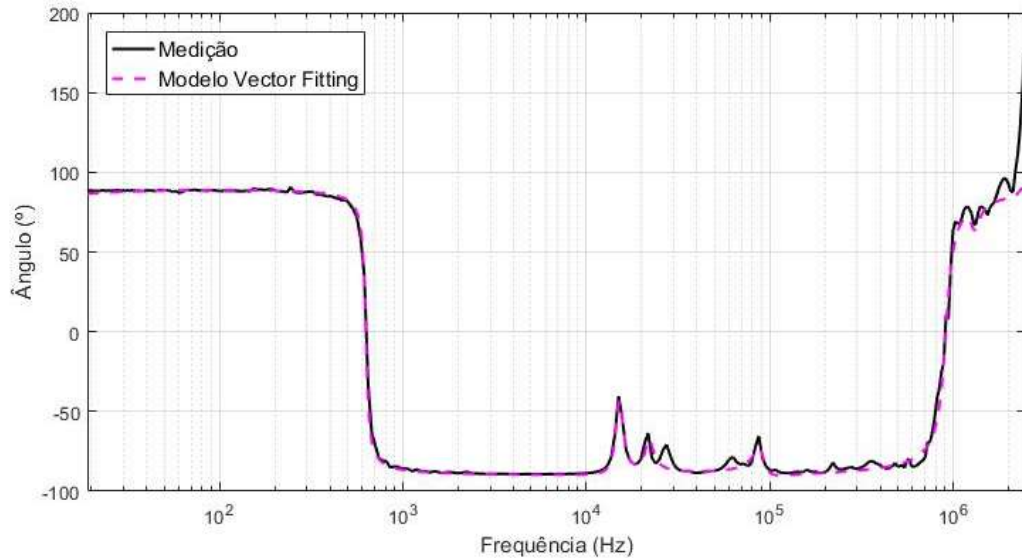


Figura 6.46 – Comparação entre o ângulo da medição e simulação: varredura na frequência do circuito resultante do *Vector Fitting* aproximado com 15 polos até 2,5 MHz.



A aproximação utilizando o *Vector Fitting* até 2,5 MHz apresenta um melhor ajuste à curva medida do que o ajuste utilizando a curva até 10 MHz (Figuras 5.16, 5.18 e 5.19) devido às interferências no final do espectro.

A Figura 6.47 mostra a comparação entre a FFT da medição de tensão a partir da manobra da chave 9437 com o resultado da simulação utilizando o ajuste através do *Vector Fitting* até 10 MHz e até 2,5 MHz e a Figura 6.48 compara o resultado da modelagem através do *Vector Fitting* até 2,5 MHz com os modelos Impedância Terminal e *Saturable Transformer*.

Figura 6.47 – FFT da tensão até 2,5 MHz - Manobra da chave 9437– Modelo *Vector Fitting* até 2,5 MHz e até 10 MHz x Medição.

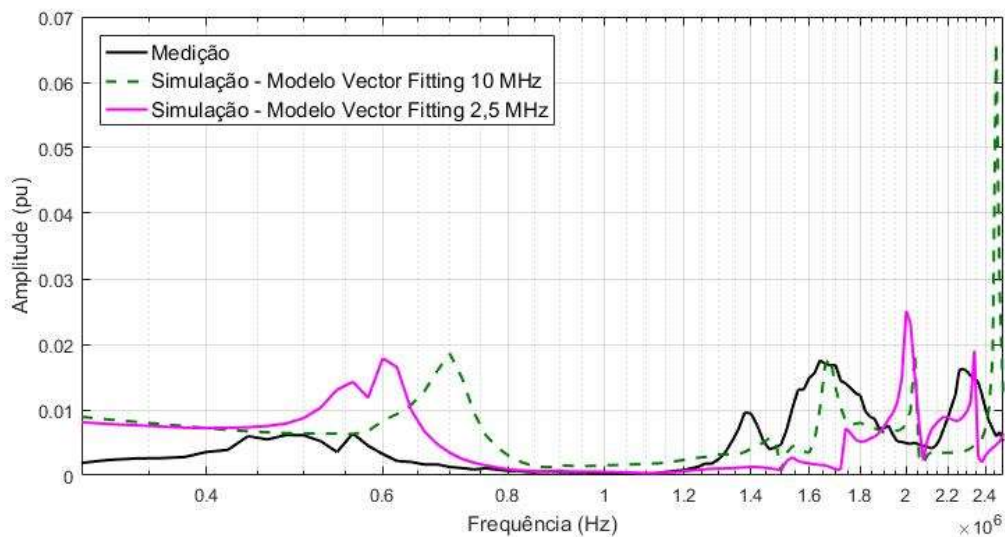
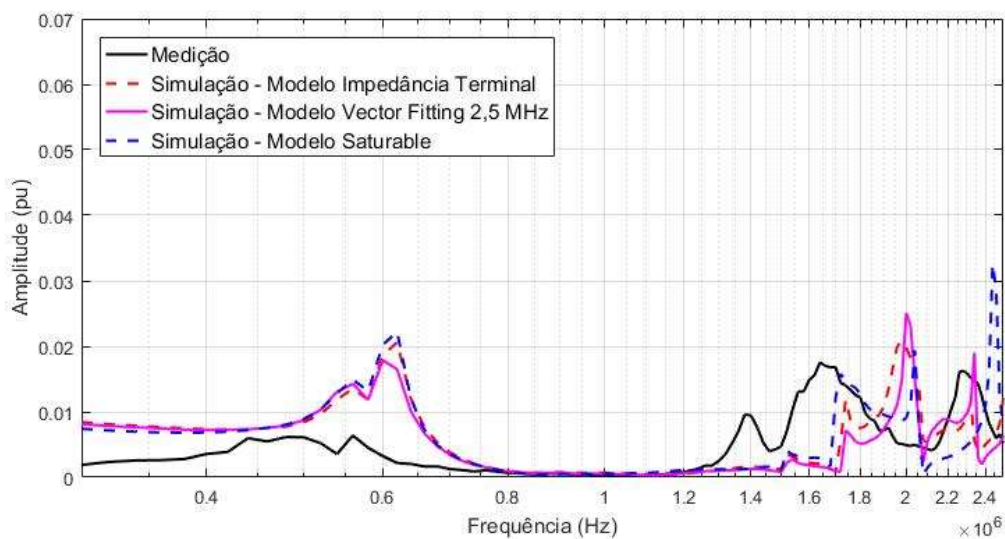


Figura 6.48 – FFT da tensão até 2,5 MHz - Manobra da chave 9437– Modelo *Vector Fitting* até 2,5 MHz, Modelo Impedância Terminal e Modelo *Saturable* x Medição.



Percebe-se que o resultado utilizando o *Vector Fitting* até 2,5 MHz aproxima-se mais da medição da tensão transitória a partir da manobra da chave 9437 em comparação com o ajuste até 10 MHz e em comparação e com os modelos Impedância Terminal e *Saturable Transformer*.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho apresenta a representação do transformador de potência em altas frequências, uma vez que, para avaliar a interação entre as solicitações de transitórios eletromagnéticos e o equipamento, o modelo do transformador na frequência de operação não é suficiente. Entretanto, a modelagem de todos os elementos que caracterizam o transformador em altas frequências não se torna prática.

Através da metodologia *black-box*, baseada em medições de impedância terminal na frequência com acesso aos terminais externos chegou-se a três modelos do transformador de potência. As medições em campo, realizadas pelo Cepel, possibilitaram a modelagem e a validação dos modelos.

7.1. CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES

O objeto em estudo está em operação em uma subestação de grande importância para o suprimento de energia elétrica de uma determinada região e o modelo do transformador impacta nos resultados das simulações que faz parte da investigação de um problema real do Sistema Elétrico de Potência.

Realizou-se a medição de resposta em frequência na faixa de 20 Hz a 10 MHz no transformador da fase A do banco TR52 e validaram-se os modelos através de medições de transitórios de tensão no transformador da fase C do banco TR56, de 20 kHz a 10 MHz (com componentes de frequência de maior amplitude a partir de, aproximadamente, 550 kHz).

Identificou-se que na faixa de frequência de maior interesse (entre 100 kHz e 10 MHz) há a predominância da ressonância série entre o comportamento capacitivo e a indutância ligado ao arranjo de medição e conexões.

Os modelos Impedância terminal e *Vector Fitting* levam em consideração um ponto de acesso. Já o modelo Saturable Transformer considera dois pontos de acesso, todavia não se leva em consideração a transferência de tensão medida entre os terminais. Quanto à análise da curva de impedância na frequência, os modelos Impedância Terminal e Saturable Transformer levam em consideração os pontos

ressonantes. Já a modelagem através do Vector Fitting gera de forma iterativa uma função racional que se aproxima da curva medida.

As simulações com os três modelos apresentam respostas semelhantes entre si e próximas à medição até, aproximadamente, 2,5 MHz. A partir desta faixa de frequência os resultados da modelagem e a validação através da medição de transitórios ficam comprometidos devido à:

- a) maior influência do arranjo nas medições de resposta em frequência;
- b) maior interferência nas componentes de frequência das medições dos sinais de tensão transitória;
- c) influência do sistema de medição de transitório.

Com o modelo através da Impedância Terminal não é possível modelar o transformador a partir de mais de um ponto de acesso. Utilizando o *Saturable Transformer* há a possibilidade da conexão ao terminal de baixa tensão, contando que seja levada em consideração a curva de transferência de tensão na frequência. Além do número de pontos de acesso, os métodos possuem limitação quanto ao número de ressonâncias e à proximidade entre elas.

Todavia, a análise dos pontos ressonantes pode ser considerada uma alternativa para transformadores já instalados nas subestações, uma vez que, para se obter um bom resultado através do *Vector Fitting* exige-se medições de resposta em frequência que não são simples de serem realizadas em campo. Constatou-se a influência das interferências nas medições de resposta em frequência na modelagem, pequenas variações na curva impactam no ajuste do modelo.

Outra conclusão deste trabalho, é que a caracterização no domínio da frequência voltada para a modelagem exige uma medição com maior precisão se comparada à medição com o objetivo de subsidiar os processos de transporte e manutenção. A influência da impedância do arranjo nas medições de resposta em frequência é maior com o aumento da frequência. Além disso, há pontos que devem ser levados em consideração, como:

- a) as medições devem ser feitas do terminal para o referencial de terra;
- b) os terminais que não são levados em consideração como pontos de acesso devem permanecer inalterados e, se possível, em sua condição de operação.

Por fim, a caracterização do equipamento no domínio da frequência com menores interferências leva a modelos com maior precisão e em uma faixa mais ampla de frequência. Novas medições de resposta em frequência estão programadas para serem realizadas no transformador de potência em estudo. Conclusões deste trabalho serão levadas em consideração.

Sendo assim, será possível a comparação com os resultados de modelagem e simulação realizados até o momento e a:

- a) Análise das medições de resposta em frequência realizadas com cabos coaxiais e o HFCT ao invés das fitas e o medidor RLC;
- b) Avaliação da influência da compensação do efeito do cabo coaxial na modelagem;
- c) Validação das possibilidades de montagem da matriz de admitância considerando as condições de medição e as possibilidades de cálculo através de aproximações;
- d) Análise relacionando o número de pontos de acessos à precisão do modelo;
- e) Avaliação da influência do terciário.

Para tanto, deve-se modelar o transformador a partir de: um ponto de acesso – através da medição de admitância própria e da impedância própria – e dois pontos de acesso – através da matriz de admitância medida e calculada; matriz de impedância medida e calculada através da associação das medições em curto-circuito e em aberto e da transferência de tensão.

7.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante disso, aponta-se a necessidade de estudos a respeito dos métodos de medição e técnicas de processamento de sinais ligados à resposta em frequência com a finalidade da modelagem, objetivando chegar a modelos que representem os equipamentos elétricos com maior precisão, aumentando a confiabilidade dos resultados das simulações.

Destaca-se como continuação deste trabalho, a utilização de cabo coaxial para medição de resposta em frequência e a associação de técnicas para eliminar seu efeito para mitigação de interferências nas medições de resposta em frequência.

Sugere-se a construção da matriz de admitância do transformador, considerando dois (H1 e X1), três (H1, X1 e Y1) e quatro (H1, X1, Y1 e Y2) pontos de acesso e uma análise de custo-benefício relacionando o número de pontos de acessos à precisão do modelo.

Quanto à simulação, aponta-se a modelagem do arco ligado à manobra das chaves seccionadoras e o modelo de aterramento como pontos a serem estudados. Além disso, acredita-se que a representação do trecho aéreo com o modelo JMarti irá amortecer as amplitudes das componentes de frequências mais altas.

A medição de transitórios eletromagnéticos em campo ainda apresenta desafios. Sugere-se estudos buscando e avaliando alternativas quanto ao método de medição, quanto à resposta do sistema de medição na frequência e em relação à avaliação das interferências.

Uma outra linha de estudo possível é a análise dos efeitos dos transitórios nos enrolamentos do transformador. Para tanto, acredita-se ser necessário informações do projeto do transformador associadas às medições de resposta em frequência.

Para atenuação e filtragem de solicitações transitórias de altas frequências, sugere-se o estudo de circuitos de amortecimentos – *snubber* – como forma de mitigação.

7.3. PUBLICAÇÕES E ATIVIDADES NA ÁREA

Este trabalho contou com o financiamento do CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – e do Cepel. O estudo de caso trata-se de uma subestação de uma das empresas de Energia do grupo Eletrobrás.

Artigo publicado e apresentado no VII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE 2018, em Maio de 2018:

REMA, Gabriela Sampaio. BONATTO, Benedito Donizeti. SOUZA, Dickson Silva de. VASQUES, Carlos Magno Rodrigues. AZEVEDO, Rogério Magalhães de. LIMA, Antonio Carlos Siqueira de. MARTINS, Helvio Jailson Azevedo. DELGADO, Rômulo dos Santos. ***Modeling the Terminal Impedance of Power Transformers for Studies of Fast Front Electromagnetic Transients.*** VII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, SBSE 2018. Niterói - RJ.

Artigo aceito para apresentação no IX Workshop Internacional sobre Transformadores de Potência, Equipamentos, Subestações e Materiais – Workspot 2018, em Novembro de 2018:

REMA, Gabriela Sampaio. BONATTO, Benedito Donizeti. SOUZA, Dickson Silva de. VASQUES, Carlos Magno Rodrigues. AZEVEDO, Rogério Magalhães de. LUZ, Guilherme Sarcinelli. SIXEL, Davi. LIMA, Antonio Carlos Siqueira de. MARTINS, Helvio Jailson Azevedo. DELGADO, Rômulo dos Santos. SANTOS, Luiz Eduardo. **Modelagem de Transformadores de Potência para Análise de Transitórios Eletromagnéticos de Frente Rápida - Comparação entre Simulação e Medições em Campo.** Artigo aceito para apresentação no IX Workshop Internacional sobre Transformadores de Potência, Equipamentos, Subestações e Materiais, IX Workspot 2018. Foz do Iguaçu - PR.

Artigo submetido à *International Conference on Power Systems Transients – IPST 2019*:

REMA, Gabriela Sampaio. SOUZA, Dickson Silva de. VASQUES, Carlos Magno Rodrigues. AZEVEDO, Rogério Magalhães de. LUZ, Guilherme Sarcinelli. BONATTO, Benedito Donizeti. LIMA, Antonio Carlos Siqueira de. DELGADO, Rômulo dos Santos. MARTINS, Helvio Jailson Azevedo. SIXEL, Davi. **Black-Box Modeling of Power Transformers at High Frequencies.**

Resumo submetido ao XXV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE 2019:

REMA, Gabriela Sampaio. BONATTO, Benedito Donizeti. SOUZA, Dickson Silva de. VASQUES, Carlos Magno Rodrigues. AZEVEDO, Rogério Magalhães de. LUZ, Guilherme Sarcinelli. SIXEL, Davi. MARTINS, Helvio Jailson Azevedo. DELGADO, Rômulo dos Santos. **Validação do Modelo de Transformador de Potência em Altas Frequências com base em Medições em Campo.**

Atividades na área realizadas durante o mestrado:

Bolsista de Pesquisa no Cepel / LabDig. Início em Dezembro de 2016 e conclusão prevista para Dezembro de 2018.

Docência ensino superior: professora das disciplinas de Eletricidade Básica e Física III (Eletrostática e Eletrodinâmica) na Faculdade de Engenharia de Resende para turmas de repetição dos cursos de engenharia elétrica/eletrônica, de produção, mecânica e civil. 4 h/a semanas de Agosto de 2016 a Agosto de 2017.

Palestra ministrada com o tema Modelagem de Sistemas Elétricos. I Semana das Engenharias do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ – Campus Angra dos Reis). Maio de 2018.

Seminário: Minha Tese em 3 Minutos no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel. Apresentação: Resposta em Frequência e Modelagem de Transformadores de Potência. Premiação 1º Lugar. Dezembro de 2017.

Participação em Curso e Workshops:

Workshop *High Frequency Transformer Modeling and Its Application in Power System Transients Studies*. Abril de 2018.

Curso sobre Técnicas de Medição em Ensaios de Alta Tensão (MEAT). Agosto de 2017.

Workshop Técnicas de Monitoramento e Diagnóstico de Equipamentos Elétricos. Agosto de 2017.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 6939: Coordenação do Isolamento – Procedimento. Novembro, 2000.
- AJUZ, Ary D'. FONSECA, Cláudio dos S. CARVALHO, F.M. Salgado. AMON FILHO, Jorge. DIAS, L. E. Nora. PEREIRA, Marco Polo. ESMERALDO, Paulo Cesar V. VAISMAN, Roberto. FRONTIN, Sérgio de O. “Transitórios elétricos e coordenação de isolamento – aplicação em sistemas de potência de alta tensão”, Rio de Janeiro: FURNAS Centrais Elétricas. Niterói: Universidade Federal Fluminense / EDUFF. 1987.
- Azevedo, Rogério Magalhães. Rodrigues, Marcelo Guimarães. Cerqueira, Walter. “Um Método Prático para Representação de Transformadores de Potência Baseado em Medições de Resposta em Frequência”. Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – Cepel. XV Eriac – Encontro Regional Ibero-americano do Cigré. Brasil, Maio de 2013.
- BRONZEADO, H. S., JESUS, N. C., COGO, J. R., DUARTE, L. M. “Análise Comparativa entre Modelos de Transformadores para Estudos de Energização”. XVII eriac – Encontro Regional Ibero-americano do Cigré. CE-C4. Paraguay, Maio de 2017.
- Cigré Working Group 02: Internal overvoltages. Of Study Committee 33 (Overvoltages and Insulation Coordination). “Guidelines for Representation of Network Elements when Calculating Transients”. Paris, 1990.
- D. Deschrijver, M. Mrozowski, T. Dhaene, and D. De Zutter, “Macromodeling of Multiport Systems Using a Fast Implementation of the Vector Fitting Method”, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 18, no. 6, pp.383-385, June 2008.
- FEITOSA, José Mauro da Silva. FERREIRA, Antonio Galvão. FRANÇA, Wilson Jorge. CARVALHO, Francisco M. Salgado. CHAGAS, Fernando Antonio. “Relatório sobre os Ensaios para Medição de Transitórios gerados pela Operação de Chaves Seccionadoras na Subestação Blindada Isolada a SF₆”. FURNAS Centrais Elétricas.
- FRONTIN, Sergio O. “Equipamentos de Alta Tensão – Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas”. 1ª ed. Brasília, 2013.
- GUSTAVSEN, Bjorn. “A Filtering Approach for Merging Transformer High-Frequency Models With 50/60-Hz Low-Frequency Models”, IEEE Transactions of Power Delivery, v. 30, n. 03, pp.1420-1428, June 2015.
- GUSTAVSEN, Bjorn. “A Hybrid Measurement Approach for Wideband Characterization and Modeling of Power Transformers”, IEEE Transactions of Power Delivery, v. 25, n. 03, pp.1932-1939, July 2010.

GUSTAVSEN, Bjorn. "Computer Code for Rational Approximation of Frequency Dependent Admittance Matrices", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 17, n. 4, pp.1093-1098, October 2002.

GUSTAVSEN, Bjorn. "Fast passivity enforcement for pole-residue models by perturbation of residue matrix eigenvalues", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 23, no. 4, pp.2278-2285, October 2008.

GUSTAVSEN, Bjorn. "Frequency-Dependent Modeling of Power Transformers With Ungrounded Windings", IEEE Transactions of Power Delivery, v. 19, n. 03, pp.1328-1334, July 2004.

GUSTAVSEN, Bjorn. "Improving the pole relocating properties of vector fitting", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 21, no. 3, pp.1587-1592, July 2006.

GUSTAVSEN, Bjorn. "Matrix Fitting Toolbox – User's Guide and Reference". Sintef Energy Research. 2009.

GUSTAVSEN, Bjorn. "Wide Band Modeling of Power Transformers", IEEE Transactions of Power Delivery, v. 19, n. 01, pp.414-422, January 2004.

GUSTAVSEN, Bjorn. Mo, O., "Interfacing Convolution Based Linear Models to an Electromagnetic Transients Program" in Proc. Int. Conf. Power Systems Transients, Lyon, France, Jun. 4-7, 2007.

GUSTAVSEN, Bjorn. PORTILLO, Alvaro. RONCHI, Rodrigo. MJELVE, Asgeir. "High-Frequency Resonant Overvoltages in Transformer Regulating Winding Caused by Ground Fault Initiation on Feeding Cable", IEEE Transactions on Power Delivery, pp.1-9, 2017.

GUSTAVSEN, Bjorn. SEMLYEN, Adam. "Enforcing Passivity for Admittance Matrices Approximated by Rational Functions", IEEE Transactions on Power Systems, v. 16, n. 1, pp. 97-104, February 2011.

GUSTAVSEN, Bjorn. SEMLYEN, Adam. "Rational Approximation of Frequency Domain Responses by Vector Fitting", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 14, n. 3, pp.1052-1059, July 1999.

GUSTAVSEN, Bjorn. SEMLYEN, Adam. "Simulation of Transmission Line Transients using Vector Fitting and Modal Decomposition", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 13, n. 2, pp.605-614, April 1998.

H. W. Dommel. "Electromagnetic Transients Program Reference Manual". Department of Electrical Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, 1996.

HAUSCHILD, Wolfgang. LEMKE, Eberhard. High-Voltage Test and Measuring Techniques. Ed.: Springer. 2014.

JURISIC, Bruno. POUJADE, Paul. XEMARD, Alain. UGLESIC, Ivo. PALADIAN, Françoise. "Application of wide band transformer models" in Proc. Int. Conf. Power Systems Transients in Seoul, Republic of Korea, 2017.

JURISIC, Bruno. UGLESIC, Ivo. XEMARD, Alain. PALADIAN, Françoise. GUUINI, Philippe. "Difficulties in high frequency transformer modelling" in Proc. Int. Conf. Power Systems Transients in Cavtat, Croatia, 2015.

JURISIC, Bruno. XEMARD, Alain. MOREAU, O. UGLESIC, Ivo. PALADIAN, Françoise. LALLECHERE, S. "Comparison of transformer models on a practical case of lightning overvoltages" in International Colloquium on Lightning and Power Systems – Cigré, Paris, 2016.

LÓPEZ, Zaid Luna. GÓMEZ, Pablo. ESPINO-CORTÉS, Fermín P. PEÑA-RIVERO, Raúl. "Modeling of Transformer Windings for Fast Transient Studies: Experimental Validation and Performance Comparison", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 32, n. 4, pp.1852-1860, August 2017.

MAMEDE, João Filho. "Manual de Equipamentos Elétricos". 3 ed. Ed.: LTC, Rio de Janeiro, 2011.

MARCHESAN G., MORAIS A. P., MARIOTTO L., CAMARGO M. C., MARCHESAN A. C., "High-frequency Transformer Modeling for Transient Overvoltage Studies" in Proc. Int. Conf. Power Systems Transients in Cavtat, Croatia, 2015.

MARTI, J.R. "Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 101, n. 1, pp.147-157, January, 1982.

MARTINS, Helvio Jailson Azevedo. "Diagnóstico de Transformadores de Potência através de Metodologias no Domínio da Frequência". Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFRJ/COPPE. Rio de Janeiro, 2007.

MORCHED, A., MARTÍ, L., OTTEVANGERS, J. "A High Frequency Transformer Model for the EMTP", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 8, n. 3, pp.1615-1626, July 1993.

MORK, Bruce A. GONZALEZ, Francisco. ISHCENKO, Dmitry. STUEHM, Don L. MITRA, Joydeep. "Hybrid Transformer Model for transient Simulation – Part I: Development and Parameters e Part II: Laboratory Measurements and Benchmarking", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 22, n. 1, pp.248-262, January 2007.

OGATA, Katsuhiko. "Engenharia de Controle Moderno". 3ª edição. Ed. LTC. 1998.

REMA, Gabriela Sampaio. BONATTO, Benedito Donizeti. SOUZA, Dickson Silva de. VASQUES, Carlos Magno Rodrigues. AZEVEDO, Rogério Magalhães de. LIMA, Antonio Carlos Siqueira de. MARTINS, Helvio Jailson Azevedo. DELGADO, Rômulo dos Santos. Modeling the Terminal Impedance of Power Transformers for Studies of Fast Front Electromagnetic Transients. VII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, SBSE 2018. Niterói – RJ, Maio de 2018.

ROCHA, Angélica da Costa Oliveira, e outros. “Interação entre transformadores e o sistema elétrico com foco nos transitórios eletromagnéticos de alta frequência” – Nota Técnica – Grupo de Trabalho conjunto JWG A2/C4-03 – CIGRÉ, Brasil. Maio, 2011.

Rotina para aproximação racional de funções através do ajuste vetorial. Endereço eletrônico. Disponível em: <<https://www.sintef.no/projectweb/vectfit/downloads/>>.

SEMLYEN, Adam. GUSTAVSEN, Bjorn. “A half-size singularity test matrix for fast and reliable passivity assessment of rational models”, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 24, no. 1, pp.345-351, January 2009.

SOYSAL, A. Oguz. “A Method for Wide Frequency Range Modeling of Power Transformer and Rotating Machines”, IEEE Transactions on Power Delivery, v.6, pp.560 - 566, October 1991.

SUÑÉ, Jaime, e outros. “Guia de Manutenção para Transformadores de Potência” – Nota Técnica – Grupo de Trabalho A2.05 – CIGRÉ, Brasil. Novembro, 2013.

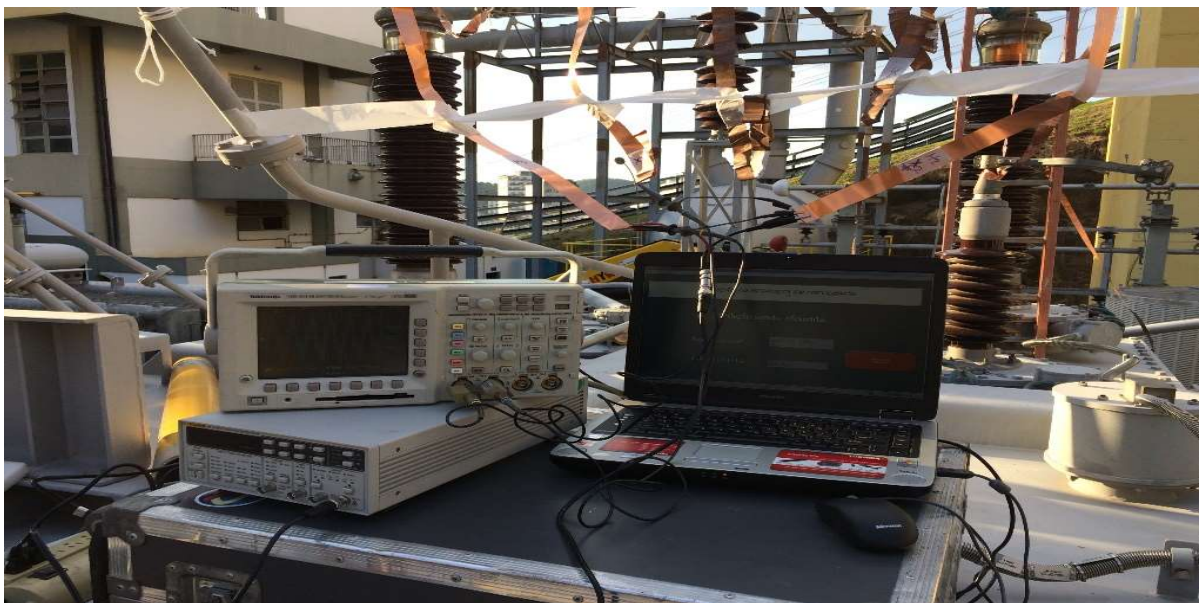
VASQUES, Carlos Magno Rodrigues. “Interação entre Autotransformadores de Potência e Solicitações de Alta Frequência do Sistema Elétrico”. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFRJ/COPPE. Rio de Janeiro, 2011.

YU, Yang. ZANJI, Wang. CHONG, Shao. “A Circuit Model in a Wide Frequency Range for Power Transformer and Analysis of Its characteristics”, Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific, pp.1-5.

APÊNDICE A – MEDIÇÕES EM CAMPO DE TRANSFERÊNCIA DE TENSÃO NA FREQUÊNCIA

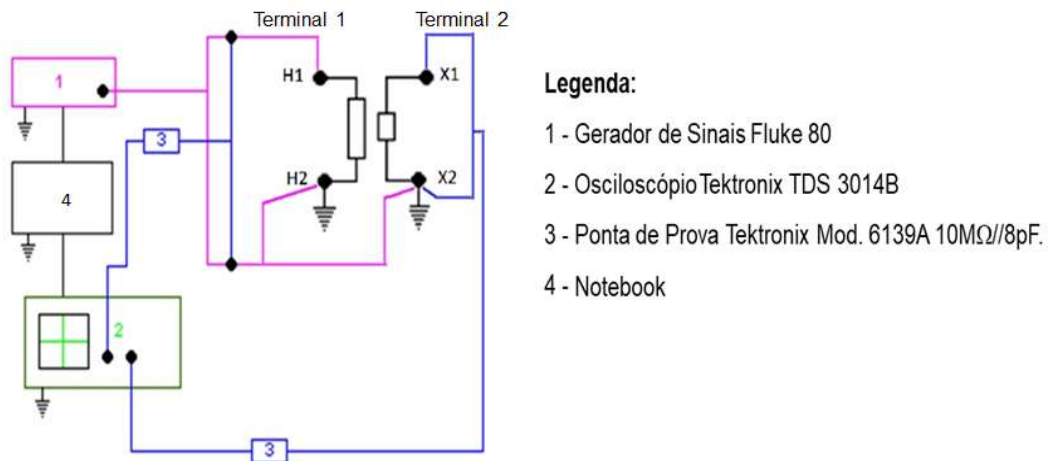
Utilizou-se o método de aplicação do sinal de tensão senoidal variando com a frequência. Mediu-se o sinal aplicado e o transferido. O sinal medido possui a mesma frequência e amplitudes e fases diferentes do sinal aplicado. Para aplicação e medição dos sinais utilizou-se, respectivamente, um gerador e um osciloscópio, mostrados na Figura A.1.

Figura A.1 – Instrumentação da medição de transferência de tensão na frequência montada em campo.



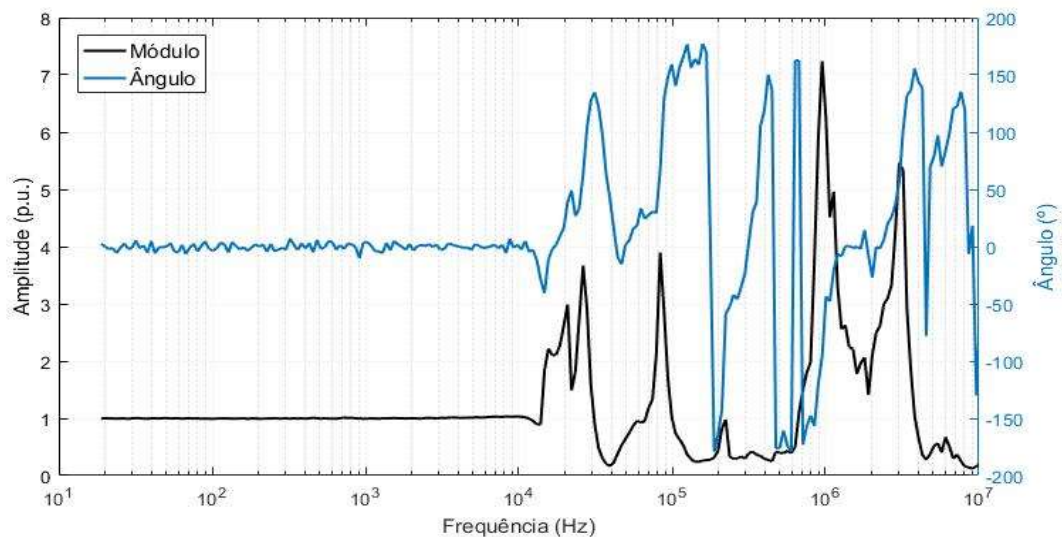
A Figura A.2 mostra o diagrama representativo da aplicação de tensão no terminal 1 – alta tensão. Aplica-se e mede-se a tensão do terminal para o referencial de terra.

Figura A.2 – Diagrama representativo da medição de transferência de tensão entre os terminais 1 e 2 (aplicação terminal 1).



Nos gráficos de transferência de tensão é apresentada a relação entre o valor de tensão de saída e tensão de entrada ($V_{saída} / V_{entrada}$) em função da frequência. A relação $V_{saída} / V_{entrada}$ é, normalmente, normalizada tendo como base a relação nominal do transformador (MARTINS, 2007). Ou seja, tem-se $(V_{saída} / V_{entrada}) / (V_{saída60Hz} / V_{entrada60Hz})$. O resultado de tensão transferida do terminal 1 para o terminal 2, em módulo e ângulo, é mostrado na Figura A.3.

Figura A.3 – Medição da transferência de tensão entre os terminais 1 e 2 (aplicação no terminal 1).



Nota-se que, até a frequência de, aproximadamente, 11 kHz, a relação de transformação nominal é mantida. A partir desta frequência, há pontos de amplificação e atenuação. A amplificação máxima acontece na frequência de, aproximadamente, 950 kHz, onde a relação é amplificada em mais de sete vezes em relação ao valor nominal.

A Figura A.4 mostra o diagrama representativo da aplicação de tensão no

terminal 2. O resultado de tensão transferida do terminal 2 para o terminal 1, em módulo e ângulo, é apresentado na Figura A.5.

Figura A.4 – Diagrama representativo da medição de transferência de tensão entre os terminais 2 e 1 (aplicação terminal 2).

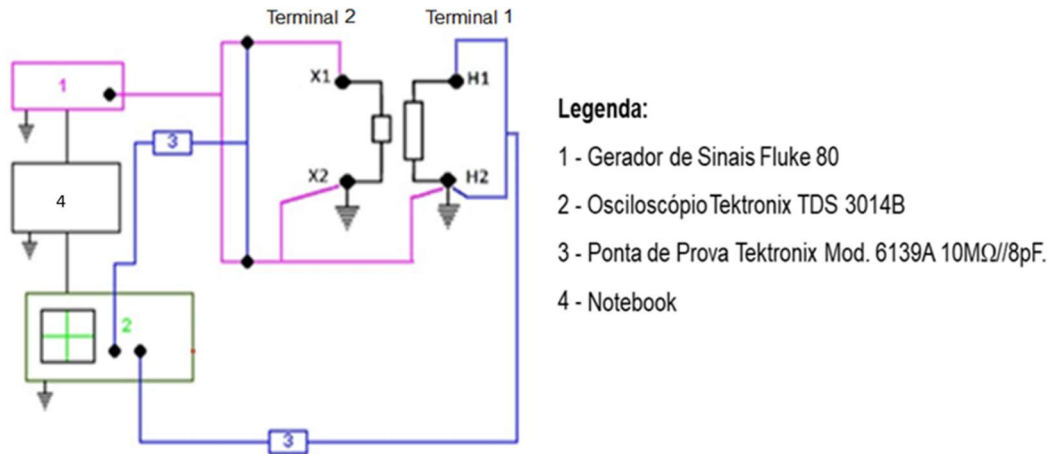
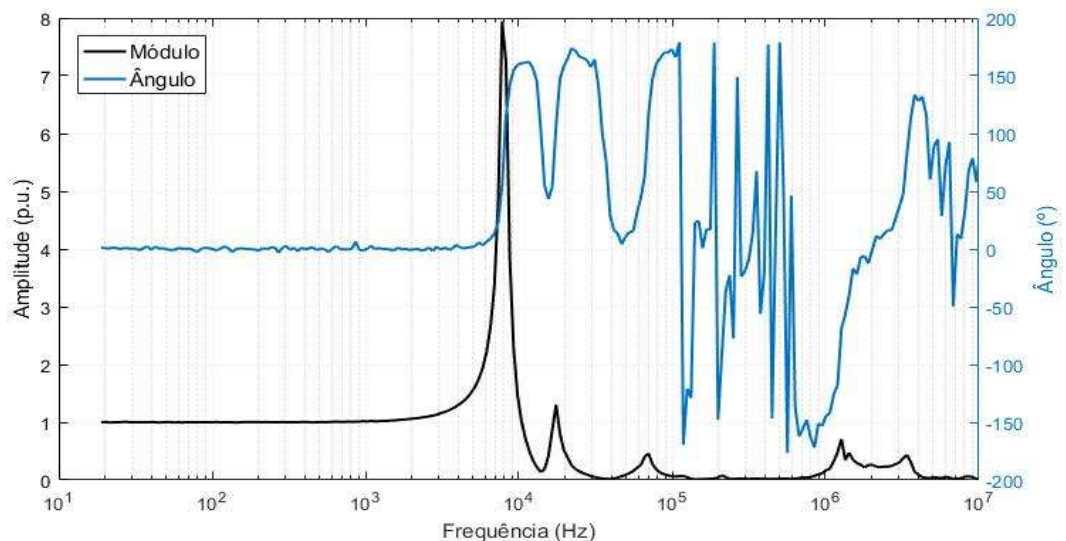


Figura A.5 – Medição da transferência de tensão entre os terminais 2 e 1 (aplicação no terminal 2).



A relação de transformação nominal é mantida até a frequência de, aproximadamente, 3 kHz. Na frequência, aproximada, de 8 kHz, a relação é amplificada em, praticamente, 8 vezes em relação ao valor nominal.

Nota-se, em ambas as medições, a interferência na medição do ângulo da transferência de tensão. Quanto à medição do módulo, o resultado com aplicação no terminal 2 e medição no terminal 1 apresenta menos interferência devido a relação de transformação.

Compara-se a impedância terminal na frequência com a relação de

transferência de tensão. As Figuras A.6 e A.7 mostram a relação da impedância terminal com a transferência de tensão dos terminais 1 e 2, respectivamente.

Figura A.6 – Relação entre a impedância e transferência de tensão – Terminal 1.

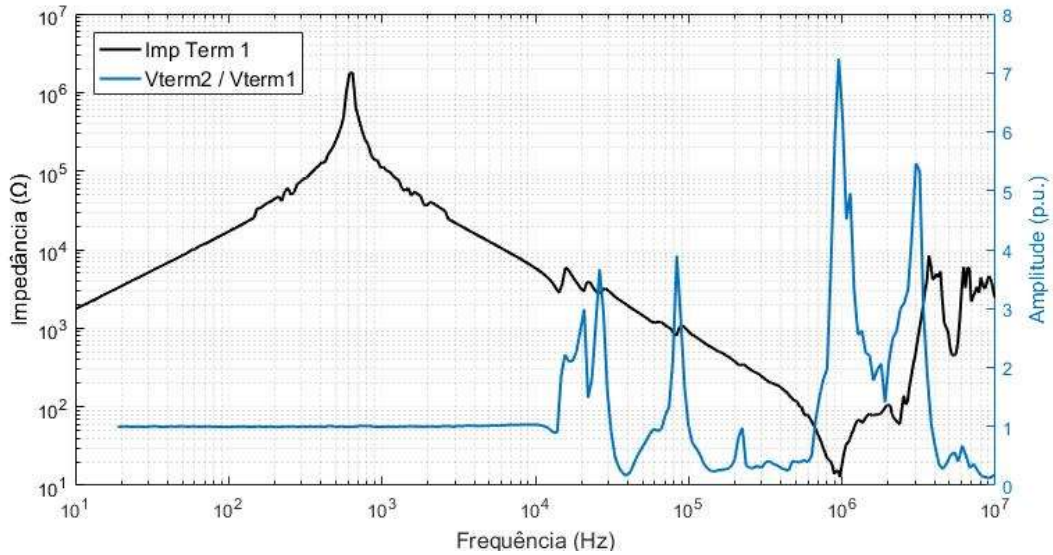
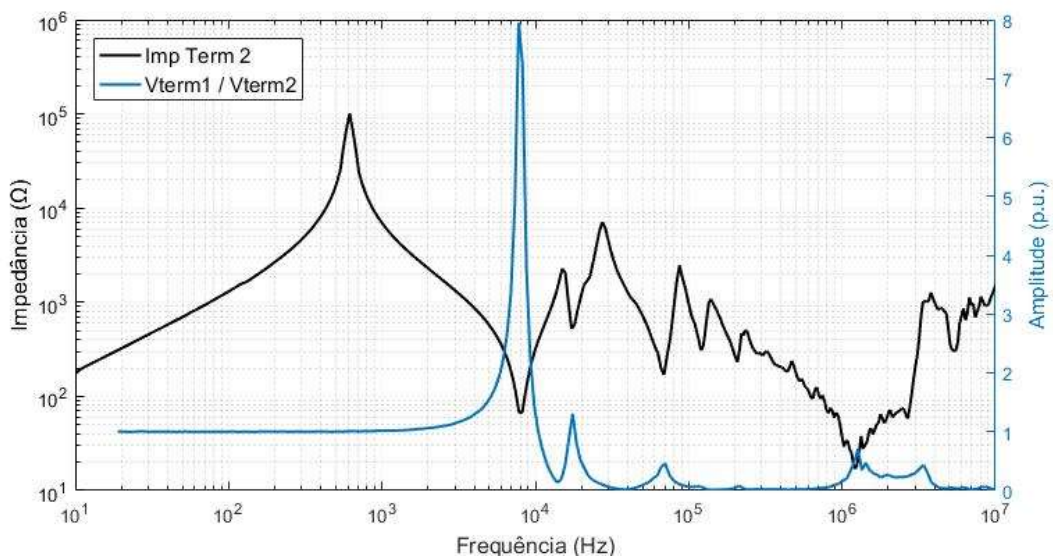


Figura A.7 – Relação entre a impedância e transferência de tensão – Terminal 2.



Na frequência em que há mínimas impedâncias, há maior transferência de tensão entre os terminais. O que pode ser observado relacionando as ressonâncias paralelas da curva de transferência de tensão com as ressonâncias séries da curva de impedância terminal. A ressonância paralela da curva de impedância terminal não gera alterações na curva de transferência de tensão, pois encontra-se em baixas frequências – relação nominal de transformação é mantida.

APÊNDICE B – EQUAÇÕES APROXIMAÇÃO ATRAVÉS DO VECTOR FITTING (GUSTAVSEN, SEMLYEN, 1999)

Para um função $f(s)$ com valores tomados em pontos $s_n = jw_n$, onde $(1 \leq n \leq N_s)$, consideremos uma aproximação de $f(s)$ por uma função racional imprópria da forma:

$$f(s) = \sum_{k=1}^N \frac{c_k}{s-a_k} + d + se \quad (9)$$

onde N é o número de polos da aproximação (que como máximo pode ser igual ao número de pontos N_s), a_k são os polos, c_k são os resíduos, e opcionalmente d e e são números reais. Por serem os polos as incógnitas localizadas no denominador, este problema é intrinsecamente não-linear e para linearizá-lo, se eliminam os polos a_k como incógnitas, designando um conjunto de polos iniciais.

Multiplicando $f(s)$ na Equação 9 por uma função de escalamento $\sigma(s)$ com sua própria aproximação racional, que atenda as seguintes condições:

$$\sigma(s) \cong \sum_{k=1}^N \frac{\tilde{c}_k}{s-a_k} + 1 \quad (10)$$

$$\sigma(s) \cdot f(s) \cong \sum_{k=1}^N \frac{c_k}{s-a_k} + d + se \quad (11)$$

Sendo \tilde{c}_k um conjunto de resíduos desconhecido. Como $\sigma(s)$ e $\sigma(s) \cdot f(s)$ compartilhem o mesmo conjunto de polos iniciais, substitui-se 10 e 11, obtendo a seguinte Equação 12:

$$\left(\sum_{k=1}^N \frac{c_k}{s-a_k} + d + se \right) - \left(\sum_{k=1}^N \frac{\tilde{c}_k}{s-a_k} + 1 \right) f(s) \approx f(s) \quad (12)$$

sendo as incógnitas os valores de c_k , \tilde{c}_k , d e e . A Equação 12 é linear em suas incógnitas e pode ser resolvida para os m pontos $f(s)$ em cada frequência s_k mediante um sistema linear de m equações da forma $A \cdot x = b$:

$$A_n = \left[\frac{1}{s_n-a_1} \dots \frac{1}{s_n-a_1} \quad 1 \quad s_n \quad \frac{-f(s_n)}{s_n-a_1} \dots \frac{-f(s_n)}{s_n-a_N} \right] \quad (13)$$

$$x = [c_1 \dots c_n \quad d \quad e \quad \tilde{c}_1 \dots \tilde{c}_N]^T \quad b_n = f(s_n)$$

onde A_n representa uma linha da matriz A , x o vetor das incógnitas e b_n representa um elemento do vetor coluna b .

Sendo $N \leq N_s$, o número de equações do sistema é maior que o número de incógnitas, sendo, portanto, um sistema sobredeterminado que deve ser resolvido pelo método dos mínimos quadrados.

Para pares conjugados de polos complexos da forma a_k e a_{k+1} , tal que $a_k^* = a_{k+1}$:

$$\begin{aligned} a_k &= a' + ja'' & a_{k+1} &= a' - ja'' \\ c_k &= c' + jc'' & c_{k+1} &= c' - jc'' \\ A_{n,k} &= \frac{1}{s_n - a_k} + \frac{1}{s_n - a_k^*} & A_{n,k+1} &= \frac{j}{s_n - a_k} + \frac{j}{s_n - a_k^*} \end{aligned}$$

Segura-se que as entradas do vetor x sejam valores reais dividindo cada equação em suas partes real e imaginária:

$$A = \begin{bmatrix} Re(A) \\ Im(A) \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} Re(b) \\ Im(b) \end{bmatrix}$$

Já calculados os valores das incógnitas c_k , \tilde{c}_k , d e e , devem-se calcular os valores do conjunto de polos melhorado.

Representando $\sigma(s) \cdot f(s)$ e $\sigma(s)$ na forma de frações parciais com polos e zeros:

$$\sigma(s) = \prod_{k=1}^N \frac{(s - \bar{z}_k)}{(s - a_k)} \quad (14)$$

$$\sigma(s) \cdot f(s) = \frac{\prod_{k=1}^{N+1} (s - z_k)}{\prod_{k=1}^N (s - a_k)} \quad (15)$$

usando 14 e 15, se calcula $f(s)$:

$$f(s) = \frac{\prod_{k=1}^{N+1} (s - z_k)}{\prod_{k=1}^N (s - \bar{z}_k)} \quad (16)$$

Os polos de $f(s)$ são iguais aos zeros de $\sigma_{fit}(s)$; resolvendo um problema de auto-valores, se calculam os zeros de $\sigma_{fit}(s)$ e obtem-se um conjunto de polos melhorado \bar{a} para a função $f(s)$:

$$\bar{a} = eig(A - b\tilde{c}^T) \quad (17)$$

para polos unicamente reais:

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & a_N \end{bmatrix}_{NxN} \quad b = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}_{Nx} \quad c = \begin{bmatrix} \tilde{c}_1 \\ \tilde{c}_2 \\ \vdots \\ \tilde{c}_N \end{bmatrix}_{Nx}$$

para polos imaginários, trocamos cada polo real a_k , temos b e \bar{c}_k pelas seguintes sub-matrizes:

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} a' & a'' \\ -a'' & a' \end{bmatrix} \quad \hat{b} = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \hat{c} = [\bar{c}' \quad \bar{c}'']$$

Para reforçar que os polos identificados sejam estáveis, polos instáveis identificados com $Re(a_k) > 0$ podem ser virados à metade esquerda do plano complexo “ s ”, o que equivale a mudar a fase do sistema mantendo sua magnitude constante.

Depois de cada iteração se trocam os polos prescritos com os novos polos identificados; este processo é repetido iterativamente até que a condição de convergência da função de mínimos quadrados é alcançada. Finalmente, os resíduos são calculados resolvendo a Equação 9 com os polos identificados ao resolver a Equação 17.

APÊNDICE C – CIRCUITO APROXIMADO ATRAVÉS DO VECTOR

FITTING COM 84 POLOS

\$VINTAGE, 1

```

C <BUS1><BUS2><BUS3><BUS4>< OHM      ><   milliH   ><   microF   >
C
C (A, A)
X ___ A          5.76574537e+02
X ___ A          2.00000000e-10
X ___ A          1.34180145e+02  2.63296250e+04
X ___ A          -1.37637480e+04 -1.77778417e+02
X ___ AX 3 ___ A  4.15093793e+09 -3.09017129e+09
X 3 ___ A        -6.17042778e+09
X 3 ___ A          -1.19922675e-07
X ___ AX 5 ___ A  4.20703139e+07  1.36891635e+07
X 5 ___ A        -4.75120222e+07
X 5 ___ A          7.16112354e-06
X ___ AX 7 ___ A  -1.47300973e+08  7.85425742e+07
X 7 ___ A        2.31034114e+08
X 7 ___ A          2.29814666e-06
X ___ AX 9 ___ A  3.52363219e+06  4.79938724e+06
X 9 ___ A        -1.98779398e+07
X 9 ___ A          7.11331256e-05
X ___ AX B ___ A  -4.61145897e+06 -4.58784487e+07
X B ___ A        1.76400875e+09
X B ___ A          -7.29091947e-06
X ___ AX D ___ A  5.15288673e+07 -3.27607963e+07
X D ___ A        -3.17410614e+08
X D ___ A          -1.90308907e-06
X ___ AX F ___ A  1.03455771e+06 -1.42500303e+07
X F ___ A        -1.32148539e+09
X F ___ A          -4.13807684e-06
X ___ AX11 ___ A  7.70603792e+07 -1.55505968e+07
X11 ___ A        -1.64339241e+08
X11 ___ A          -1.20477164e-06
X ___ AX13 ___ A  1.47103805e+08 -4.47771441e+06
X13 ___ A        -1.56277604e+08
X13 ___ A          -1.91724814e-07
X ___ AX15 ___ A  -1.46377513e+06 -9.40090788e+04
X15 ___ A        2.45105090e+06
X15 ___ A          -4.94430450e-05
X ___ AX17 ___ A  -6.46516700e+09  9.36655067e+06
X17 ___ A        6.46700433e+09
X17 ___ A          2.23889610e-10
X ___ AX19 ___ A  -1.06433930e+07  3.17387970e+05
X19 ___ A        1.20605332e+07
X19 ___ A          2.38501164e-06
X ___ AX1B ___ A  -1.00913001e+05  3.82365493e+04

```

X1B__A	1.34967573e+06		
X1B__A			1.26418880e-04
X__AX1D__A	5.69450433e+07	1.46256558e+06	
X1D__A	-6.64404824e+07		
X1D__A			3.95966847e-07
X__AX1F__A	-7.99886304e+11	5.51648625e+08	
X1F__A	7.99986380e+11		
X1F__A			8.62021698e-13
X__AX21__A	1.70336666e+04	6.70897358e+02	
X21__A	-3.72307696e+05		
X21__A			1.65163943e-04
X__AX23__A	5.71188742e+04	8.64174382e+02	
X23__A	-3.40013094e+05		
X23__A			5.38253911e-05
X__AX25__A	3.52101992e+05	1.07890689e+03	
X25__A	-4.52799518e+05		
X25__A			7.27262505e-06
X__AX27__A	3.87736876e+04	6.40270675e+01	
X27__A	-5.75431921e+04		
X27__A			3.31742457e-05
X__AX29__A	7.53660755e+04	1.07245422e+02	
X29__A	-1.22305077e+05		
X29__A			1.24508535e-05
X__AX2B__A	8.02373184e+03	1.11025023e+01	
X2B__A	-4.03448220e+04		
X2B__A			3.81995898e-05
X__AX2D__A	7.84267091e+02	2.73972511e-01	
X2D__A	-2.13196877e+03		
X2D__A			2.63761727e-04
X__AX2F__A	-5.93618143e+01	2.32577181e+00	
X2F__A	6.19824063e+05		
X2F__A			3.22214632e-05
X__AX31__A	1.66964634e+02	5.15153601e-02	
X31__A	-7.80963452e+02		
X31__A			5.33560449e-04
X__AX33__A	-3.80459292e+03	-2.64411541e-01	
X33__A	4.39559571e+03		
X33__A			-1.61457459e-05
X__AX35__A	-3.28056517e+03	5.27124635e-01	
X35__A	6.23152022e+03		
X35__A			2.48233183e-05
X__AX37__A	-1.79427837e+04	-4.16878203e+00	
X37__A	8.97499569e+04		
X37__A			-2.93016470e-06
X__AX39__A	5.40738785e+04	-3.49549214e+00	
X39__A	-8.16699512e+04		
X39__A			-7.21438885e-07
X__AX3B__A	7.83167275e+04	3.89869849e+00	
X3B__A	-1.24170361e+05		
X3B__A			4.33991288e-07

X___AX3D__A	2.30074738e+05	1.13258142e+01	
X3D__A	-3.84628481e+05		
X3D__A			1.33601919e-07
X___AX3F__A	-4.22966899e+02	-1.85229126e-01	
X3F__A	-8.36927920e+03		
X3F__A			-2.06099311e-05
X___AX41__A	4.95691198e+05	-5.56879269e+00	
X41__A	-5.28348120e+05		
X41__A			-2.06871136e-08
X___AX43__A	1.84107030e+06	1.24893491e+02	
X43__A	-7.91073072e+06		
X43__A			8.63854257e-09
X___AX45__A	-1.26537819e+03	6.14737253e-01	
X45__A	1.26812626e+05		
X45__A			1.82808018e-06
X___AX47__A	1.81417424e+03	5.88774483e-02	
X47__A	-4.30792410e+03		
X47__A			9.26478459e-06
X___AX49__A	-1.68808049e+02	-4.65186175e-02	
X49__A	-1.65000856e+04		
X49__A			-1.70386941e-05
X___AX4B__A	5.70878790e+03	-3.23970531e-01	
X4B__A	-3.12959160e+04		
X4B__A			-1.43968889e-06
X___AX4D__A	-5.05669460e+03	-3.75939877e-01	
X4D__A	1.03922632e+05		
X4D__A			-1.19363621e-06
X___AX4F__A	-3.89088477e+04	-1.39528360e+00	
X4F__A	1.78184892e+05		
X4F__A			-2.23512206e-07
X___AX51__A	2.10275392e+04	2.42265519e-01	
X51__A	-3.42178582e+04		
X51__A			3.86584562e-07
X___AX53__A	1.22226011e+02	-1.56639388e-02	
X53__A	-2.30352982e+03		
X53__A			-1.11488096e-05

\$VINTAGE, 0

APÊNDICE D – CIRCUITO APROXIMADO ATRAVÉS DO VECTOR FITTING COM 15 POLOS

```

VINTAGE, 1
C <BUS1><BUS2><BUS3><BUS4>< OHM >< milliH >< microF >
C
C (A, A)
X ___ A 1.31414720e+03
X ___ A 2.00000000e-10
X ___ A 1.67084940e+03 4.17502911e+04
X ___ AX 2 ___ A 5.76425540e+03 1.49501875e+02
X 2 ___ A -6.14257285e+04
X 2 ___ A 7.00628655e-04
X ___ AX 4 ___ A 6.85828230e+01 5.05331108e-02
X 4 ___ A -4.10592276e+03
X 4 ___ A 6.08854081e-04
X ___ AX 6 ___ A -8.11625430e+03 -9.67274245e-01
X 6 ___ A 5.50362104e+04
X 6 ___ A -3.63482369e-06
X ___ AX 8 ___ A 2.20217200e+04 4.08620499e-01
X 8 ___ A -2.87616543e+04
X 8 ___ A 6.96878051e-07
X ___ AX A ___ A -9.39887572e+04 -1.39338838e+00
X A ___ A 1.19786909e+05
X A ___ A -1.27604148e-07
X ___ AX C ___ A 2.86180778e+07 -3.54454455e+01
X C ___ A -2.86970525e+07
X C ___ A -4.30943635e-11
X ___ AX E ___ A 3.14511674e+05 3.90779506e-01
X E ___ A -3.17051561e+05
X E ___ A 4.02753609e-09
$VINTAGE, 0

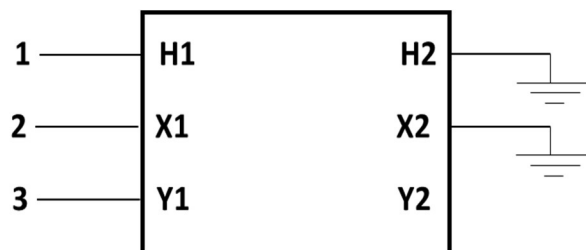
```

APÊNDICE E – MATRIZ DE ADMITÂNCIA

Para que seja possível uma análise do modelo do transformador a partir de mais de um terminal, deve-se montar a matriz de admitância ou impedância. Para entrada no *Vector Fitting*, como já mencionado, os dados devem estar em admitância. Gustavsen mede todos os elementos da matriz de admitância utilizando um analisador de rede (GUSTAVSEN, 2002, 2004). Medindo-se impedância, deve-se inverter toda a matriz. Na medição de impedância, os outros terminais encontram-se em aberto. Já as medições de admitância devem ser feitas com os outros terminais curtos-circuitados e aterrados. A quantidade de termos da matriz vai depender da quantidade de pontos de acesso – terminais levados em consideração.

Considerando três terminais e medindo-se impedância deve-se ter a configuração mostrada na Figura D.1. Mede-se a impedância do terminal ao referencial de terra. A matriz 3x3 e as equações de tensão em cada um dos terminais são mostradas, respectivamente, em 18, 19, 20 e 21.

Figura D.1 – Condição dos terminais considerando três pontos de acesso.



$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$V_1 = Z_{11} \cdot I_1 + Z_{12} \cdot I_2 + Z_{13} \cdot I_3 \quad (19)$$

$$V_2 = Z_{21} \cdot I_1 + Z_{22} \cdot I_2 + Z_{23} \cdot I_3 \quad (20)$$

$$V_3 = Z_{31} \cdot I_1 + Z_{32} \cdot I_2 + Z_{33} \cdot I_3 \quad (21)$$

Na medição de impedância, os terminais encontram-se em aberto. Logo, não há circulação de corrente. A partir dessa consideração, é possível encontrar os valores de impedâncias próprias – elementos da diagonal principal da matriz de impedância – e mútuas através das Equações 19, 20 e 21.

Tem-se que, na medição de impedância vista pelo terminal 1, não há corrente circulando nos terminais 2 ($I_2 = 0$) e 3 ($I_3 = 0$); logo, baseando-se na Equação 19, Z_{11} é dada pela Equação 22. De forma análoga, baseando-se nas Equações 20 e 21, respectivamente, Z_{22} e Z_{33} são dadas pelas Equações 23 e 24..

$$\frac{V_1}{I_1} = Z_{11} \quad (22)$$

$$\frac{V_2}{I_2} = Z_{22} \quad (23)$$

$$\frac{V_3}{I_3} = Z_{33} \quad (24)$$

Utilizando os valores de impedâncias próprias descritos acima, a transferência de tensão entre os terminais e associando as equações de tensão nos terminais, chega-se aos valores de impedância mútuas, mostrados nas Equações de 25 a 30. Considera-se as matrizes simétricas, ou seja, $Z_{ij} = Z_{ji}$. Logo, de maneira prática, basta encontrar os termos triangulares superiores ou inferiores.

$$Z_{11} \cdot \frac{V_2}{V_1} = Z_{21} \quad (25)$$

$$Z_{22} \cdot \frac{V_1}{V_2} = Z_{12} \quad (26)$$

$$Z_{22} \cdot \frac{V_3}{V_2} = Z_{32} \quad (27)$$

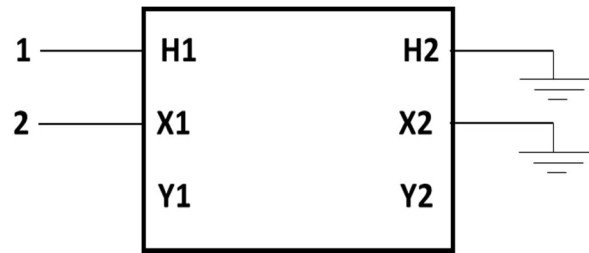
$$Z_{33} \cdot \frac{V_2}{V_3} = Z_{23} \quad (28)$$

$$Z_{11} \cdot \frac{V_3}{V_1} = Z_{31} \quad (29)$$

$$Z_{33} \cdot \frac{V_1}{V_3} = Z_{13} \quad (30)$$

Considerando-se, agora, dois terminais como pontos de acesso (Figura D.2) possui-se a matriz de impedância mostrada em 31.

Figura D.2 – Condição dos terminais considerando dois pontos de acesso.



$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (31)$$

Utilizando as medições de impedância terminal e transferência de tensão entre os terminais 1 e 2 chega-se aos valores de impedâncias mútuas através das Equações 15 e 16. Os resultados de Z_{21} e Z_{12} são mostrados, respectivamente, nas Figuras D.3 e D.4.

Figura D.3 – Impedância mútua Z_{21} calculada através da medição de impedância terminal e transferência de tensão.

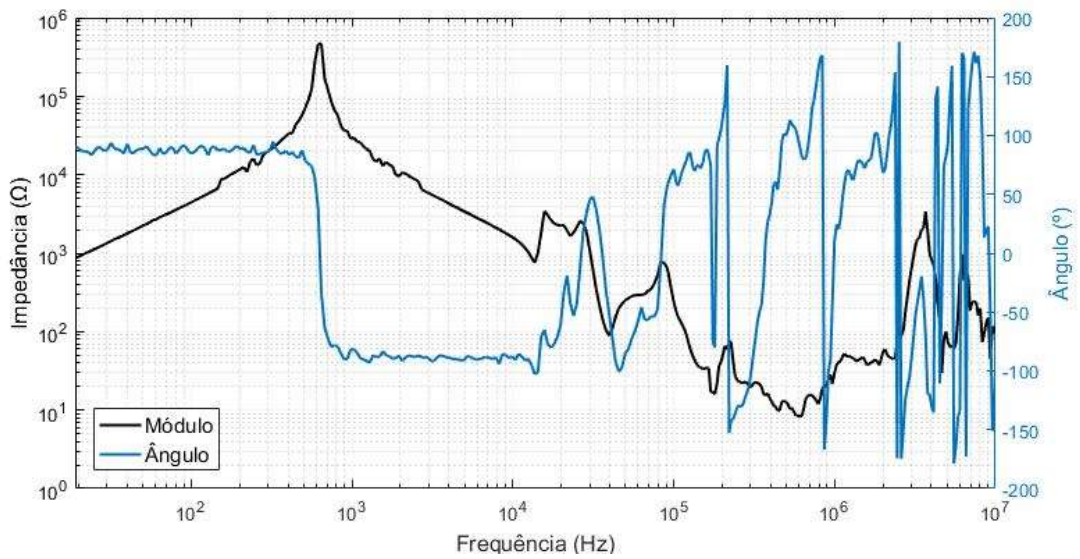
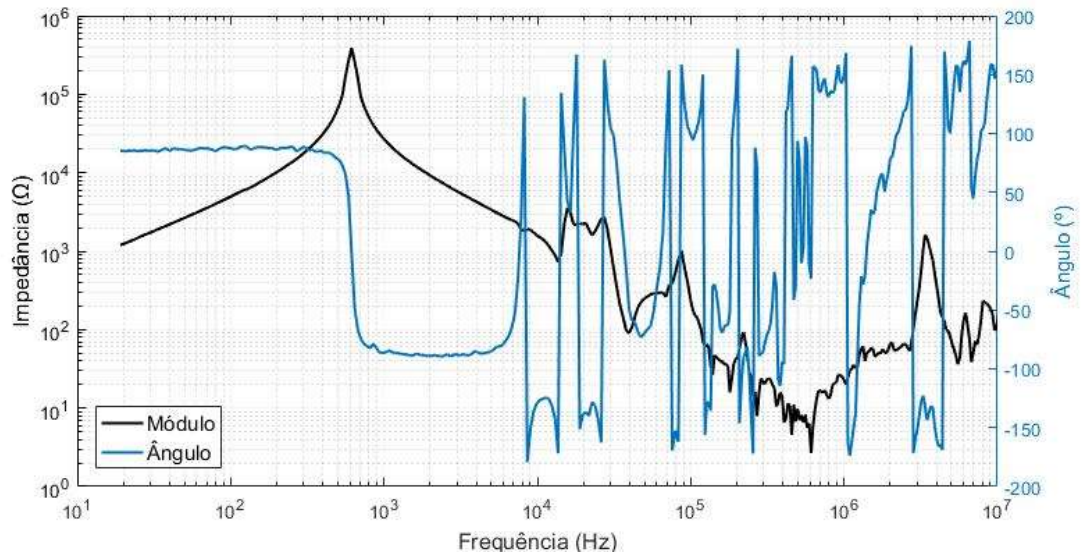


Figura D.4 – Impedância mútua Z_{12} calculada através da medição de impedância terminal e transferência de tensão.



É possível perceber a semelhança entre as curvas dos termos mútuos, o que comprova a simetria da matriz. Porém há muita interferência na medição, principalmente, do ângulo de fase da transferência de tensão, o que deixa inviável a modelagem através do *Vector Fitting*, pois a função diverge, e não se obtém uma representação racional da curva.

Para o cálculo dos termos mútuos pode-se utilizar, também, um método híbrido – associando-se as medições em aberto e em curto-circuito. Tem-se $Y = Z^{-1}$ mostrado na Equação 32, considerando-se $Z_{12} = Z_{21}$. O termo Y_{11} é equacionado em 33 e encontra-se o termo Z_{12} através da Equação 34, sendo possível, assim, completar a matriz de admitância.

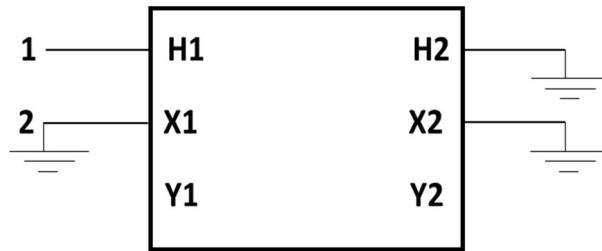
$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{22} & -Z_{12} \\ -Z_{12} & Z_{11} \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{Z_{11} \cdot Z_{22} - Z_{12}^2} \quad (32)$$

$$Y_{11} = \frac{Z_{22}}{Z_{11} \cdot Z_{22} - Z_{12}^2} \quad (33)$$

$$Z_{12} = \sqrt{Z_{11} \cdot Z_{22} - \frac{Z_{22}}{Y_{11}}} \quad (34)$$

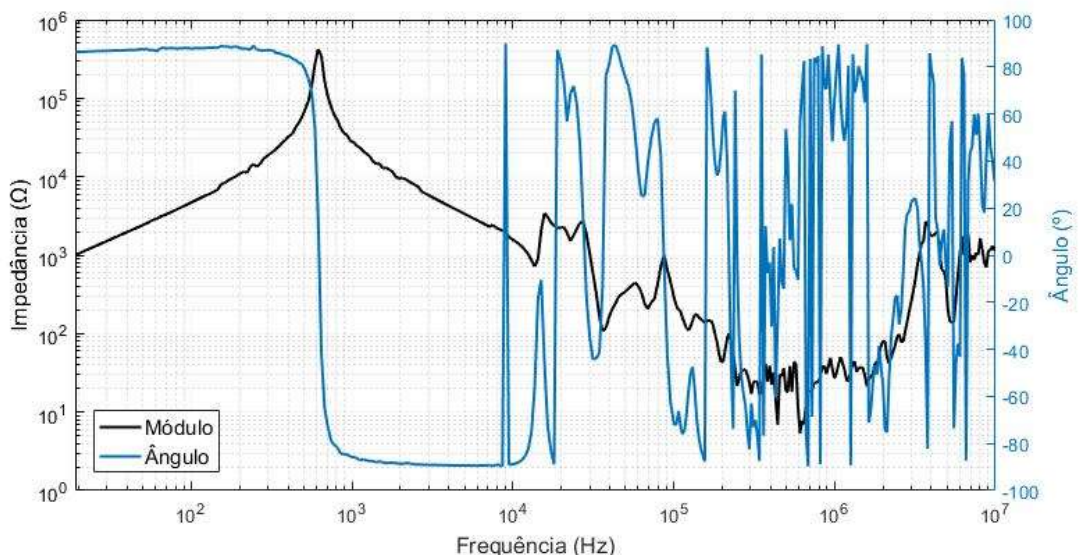
A Figura D.5 representa a condição dos terminais para a medição da impedância vista pelo terminal 1 com os outros terminais curtos-circuitados e aterrados considerando dois pontos de acesso.

Figura D.5 – Medição da impedância vista do terminal 1 com os outros terminais curtos-circuitados e aterrados considerando dois pontos de acesso.



Calculou-se o termo mútuo a partir do método híbrido. Com a ressalva de que a medição de impedância com os terminais curtos-circuitados e aterrados não foi feita conforme Figura D.5. Aterrou-se também o terminal Y, ou seja, houve alteração na condição de um terminal que não estava sendo levado em consideração como ponto de acesso. A Figura D.26 mostra o resultado do termo mútuo calculado através do método híbrido. Também pelo nível de interferência, principalmente do ângulo de fase não foi possível o ajuste através do *Vector Fitting*.

Figura D.6 – Impedância mútua calculada através do método híbrido – medição de impedância com os terminais abertos e curtos-circuitados e aterrados.



APÊNDICE F – CIRCUITO APROXIMADO ATRAVÉS DO VECTOR FITTING COM 15 POLOS – 2,5 MHz

```

$VINTAGE, 1
C <BUS1><BUS2><BUS3><BUS4>< OHM >< milliH >< microF >
C
C (A, A)
X ___ A 4.94876053e+11
X ___ A 2.00000000e-10
X ___ A 1.83266530e+02 2.65304842e+04
X ___ AX 2 ___ A 4.01500393e+09 -4.49259674e+08
X 2 ___ A -1.78204786e+10
X 2 ___ A -6.27745758e-09
X ___ AX 4 ___ A 1.30356181e+04 5.27596046e+02
X 4 ___ A -3.14341426e+05
X 4 ___ A 2.11171754e-04
X ___ AX 6 ___ A 3.20715841e+04 6.18580998e+02
X 6 ___ A -3.57484176e+05
X 6 ___ A 8.01265842e-05
X ___ AX 8 ___ A -6.86529966e+03 3.37487631e+01
X 8 ___ A 4.12722007e+04
X 8 ___ A 8.03520567e-05
X ___ AX A ___ A 1.21909103e+01 1.54261144e-02
X A ___ A 6.12862931e+03
X A ___ A 1.97649253e-03
X ___ AX C ___ A 1.07257797e+03 2.45237456e-01
X C ___ A -6.13825319e+03
X C ___ A 4.95287857e-05
X ___ AX E ___ A -9.67799373e+03 -1.64130053e+00
X E ___ A 9.00300298e+04
X E ___ A -2.47274611e-06
$VINTAGE, 0

```