

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**METODOLOGIA PARA MODELAGEM DE
TRANSFORMADORES DE POTENCIAL INDUTIVOS
E CAPACITIVOS PARA ESTUDOS DE
TRANSITÓRIOS EM ALTAS FREQUÊNCIAS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Matheus de Castro Camargo

Santa Maria, RS, Brasil

2015

PPGEE/UFSM

CAMARGO, Matheus de Castro

Mestre

2015

**METODOLOGIA PARA MODELAGEM DE
TRANSFORMADORES DE POTENCIAL INDUTIVOS E
CAPACITIVOS PARA ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS EM
ALTAS FREQUÊNCIAS**

Matheus de Castro Camargo

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação Engenharia Elétrica, Área de Sistemas de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica.**

Orientador: Ghendy Cardoso Júnior, Dr. Eng.

Coorientador: Lenois Mariotto, Dr. Eng.

Santa Maria, RS, Brasil

2015

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo autor.

de Castro Camargo, Matheus
Metodologia para Modelagem de Transformadores de
Potencial Indutivos e Capacitivos para Estudos de
Transitórios em Altas Frequências / Matheus de Castro
Camargo.-2015.
92 p.; 30cm

Orientador: Ghendy Cardoso Junior
Coorientador: Lenois Mariotto
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2015

1. Transformadores de Potencial 2. Transitórios
Eletromagnéticos 3. Modelagens para Altas Frequências I.
Cardoso Junior, Ghendy II. Mariotto, Lenois III. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Curso de Engenharia Elétrica**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**METODOLOGIA PARA MODELAGEM DE TRANSFORMADORES DE
POTENCIAL INDUTIVOS E CAPACITIVOS PARA ESTUDOS DE
TRANSITÓRIOS EM ALTAS FREQUÊNCIAS**

elaborado por
Matheus de Castro Camargo

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica

COMISSÃO EXAMINADORA:

Ghedy Cardoso Junior, Dr. Eng.
(Presidente/Orientador)

Lenois Mariotto, Dr. Eng. (UFSM)
(Coorientador)

Arnaldo Gakiya Kanashiro, Dr. Eng. (IEE/USP)

Tiago Bandeira Marchesan, Dr.Eng. (UFSM)

Santa Maria, 13 de novembro de 2015.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Nilton e Vera, minha irmã, Vanessa, e namorada, Clarissa, pelo incentivo e suporte à todas minhas decisões.

Aos professores Ghendy Cardoso Junior e Lenois Mariotto pela orientação, incentivo e colaboração ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao Gustavo Marchesan, pela colaboração e disposição de ajudar, e demais amigos e colegas do Centro de Estudos em Energia e Sistemas de Potência (CEESP) e da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

Um agradecimento especial à Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica, pela disponibilização dos equipamentos e acessórios utilizados nos ensaios de campo, bem como, pelo aporte de recursos financeiros no projeto de P&D CEEE-GT/9947883, que está sendo desenvolvido em uma parceria entre UFSM e CEEE-GT.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

METODOLOGIA PARA MODELAGEM DE TRANSFORMADORES DE POTENCIAL INDUTIVO E CAPACITIVOS PARA ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS EM ALTAS FREQUÊNCIAS

AUTOR: MATHEUS DE CASTRO CAMARGO

ORIENTADOR: GHENDY CARDOSO JUNIOR

COORIENTADOR: LENOIS MARIOTTO

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 13 de Novembro de 2015.

Esta dissertação propõe uma metodologia para a modelagem de Transformadores de Potencial Indutivos (TPIs) e Capacitivos (TPCs) para estudos de transitórios eletromagnéticos em altas frequências, na ordem de até 3 MHz. A obtenção dos modelos inicia através do ensaio de varredura em frequência dos TPs utilizando um *Sweep Frequency Response Analyzer* (SFRA) comercial por meio de conexões especiais de modo a obter as Matrizes de Admitâncias de curto-circuito. Os fabricantes do SFRA projetaram este equipamento com outro objetivo, o da realização de estudos de transferência de tensão, para detectar possíveis deformações mecânicas ou falhas internas em transformadores de potência. Desse modo, os dados obtidos dessa medição necessitam ser corrigidos e recalculados, através de uma rotina externa, a fim de representar adequadamente os valores das admitâncias próprias e mútuas desta Matriz. Uma vez corrigida, essa Matriz de Admitâncias servirá como entrada para inicializar o método do Ajuste Matricial (Matrix Fitting), que é uma ferramenta fundamental para aproximação da resposta em frequência por funções racionais modificadas que integra a rotina de Ajuste Vetorial, disponível livremente para fins não comerciais no MATLAB®. Como resultado, são obtidas sua função racional aproximada, em modelos de espaço de estados ou de polo-resíduo, e uma rede RLC equivalente complexa, propícia para o uso direto em programas de análises de transitórios eletromagnéticos, como o *Alternative Transients Program* (ATP). A validade dos modelos criados foi verificada por meio da comparação das respostas transitórias dos equivalentes gerados, através de simulações no EMTP/ATP, com os ensaios feitos em laboratório e em campo em TPIs e TPCs quando submetidos a uma excitação com uma função degrau.

Palavras-chave: Transformador de Potencial Indutivo, Transformador de Potencial Capacitivo, Transitórios Eletromagnéticos, Modelagem para Altas Frequências.

ABSTRACT

Master's Dissertation
Post-Graduate Program in Electrical Engineering
Federal University of Santa Maria

MODELING METHODOLOGY FOR INDUCTIVE AND CAPACITIVE VOLTAGE TRANSFORMERS FOR HIGH-FREQUENCY TRANSIENTS STUDIES

AUTHOR: MATHEUS DE CASTRO CAMARGO

ADVISOR: GHENDY CARDOSO JUNIOR

JOINT ADVISOR: LENOIS MARIOTTO

Defense Place and Date: Santa Maria, November 13th, 2015.

This dissertation proposes a modeling methodology for Inductive and Capacitive Voltage Transformers (IVT and CVT) for high-frequency electrical transients analysis, up to 3 MHz. The model construction starts from the VT's sweep frequency test, carried out by a commercial Sweep Frequency Response Analyzer (SFRA) with special connections, in order to obtain its short-circuit Admittance Matrix. The SFRA is designed for another purpose, to detect displacement of windings or fault in the magnetic core of power transformers based on voltage transfer analysis. Therefore, due to this fact, the measured data needs to be corrected and recalculated, through an external routine, to adequately represent the proper and mutual admittance values of the Matrix. After its correction, the Admittance Matrix serves as input data to the Matrix Fitting method, a frequency-response approximation tool by means of modified rational functions, which is part of the Vector Fitting (VF) routine, freely available for non-commercial purposes in MATLAB[®]. The results are an approximated rational function, in state-space or pole-residue model, and a RLC equivalent network proper to be used in electromagnetic transients analysis software, such as the Alternative Transients Program (ATP). The models validation is accomplished based on the comparison between the transient responses of the created model, through simulation in ATP/EMTP, and the IVTs and CVTs laboratory tests when both are submitted to a step function excitation.

Keywords: Inductive Voltage Transformer, Capacitive Voltage Transformer, Electromagnetic Transients, High-frequency Modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação do TPI e suas partes construtivas. Adaptado de Carvalho Junior (2008).	20
Figura 2.2 – Circuito equivalente tradicional para um TPI de dois enrolamentos (Moore et al., 2012).	22
Figura 2.3 – Modelo para TPI considerando suas capacitâncias (Moore et al., 2012).	22
Figura 2.4 – Partes integrantes de um TPC (Silva, 2010).	23
Figura 2.5 – Elementos constituintes de um TPC. Adaptado de Carvalho Júnior (2008).	24
Figura 2.6 – Circuito equivalente do TPC. Adaptado de Sule et al. (2006).	26
Figura 2.7 – Circuito elétrico equivalente do TPC apresentador por Sweetana e Flugum (1966). Retirado de Fernandes Junior (2003).	27
Figura 2.8 – Circuito equivalente do TPC proposto por Kezunovic et al. (1992). Retirado de Fernandes Junior (1999).	28
Figura 2.9 – Circuito equivalente simplificado do TPC proposto por Kezunovic et al. (1992). Retirado de Fernandes Junior (1999).	29
Figura 2.10 – Circuito equivalente do filtro supressor de ferroressonância proposto por Kojovic et al. (1994). Retirado de Fernandes Junior (1999).	30
Figura 2.11 – Circuito equivalente para altas frequências de um transformador de dois enrolamentos proposto por Chimklai e Martí (1995). Retirado de Fernandes Junior (1999).	31
Figura 2.12 – Representação de $Z_{short}(\omega)$ proposta por Chimklai e Martí (1995). Retirado de Fernandes Junior (1999).	31
Figura 2.13 – Representação aproximada de $Z_{short}(\omega)$ proposta por Chimklai e Martí (1995). Retirado de Fernandes Junior (1999).	32
Figura 2.14 – Divisão do modelo equivalente simplificado do TPC em blocos de impedâncias. Retirado de Fernandes Junior (1999).	33
Figura 3.1 – Representação de um Quadripolo e suas relações.	36
Figura 3.2 – Esquema para medição direta de Y_{11} e Y_{21} .	38
Figura 3.3 – Esquema para medição direta de Y_{22} e Y_{12} .	38
Figura 3.4 – Diagrama interno de um SFRA e sua conexão a um transformador. Adaptado de Holdyk et al. (2014).	39
Figura 3.5 – Esquema de conexão entre SFRA e TP para medição das relações de tensão: a) R_{11} e b) R_{12} .	41
Figura 4.1 – Fluxograma para medição da resposta em frequência do TP.	51
Figura 4.2 – Fluxograma para criação do circuito equivalente do TP.	54
Figura 4.3 – Resultado da aproximação da matriz de admitâncias TPI NUPEDDEE, em magnitude.	56
Figura 4.4 – Resultado da aproximação da matriz de admitâncias TPI NUPEDDEE, em fase.	56
Figura 4.5 – Resultado da aproximação da matriz de admitâncias TPI Passo Real, em magnitude.	57
Figura 4.6 – Resultado da aproximação da matriz de admitâncias TPI Passo Real, em fase.	58
Figura 4.7 – Resultado da aproximação da matriz de admitâncias TPC Canoas, em magnitude.	59
Figura 4.8 – Resultado da aproximação da matriz de admitâncias TPC Canoas, em fase.	59
Figura 4.9 – Esquema de validação dos modelos dos TPs.	60
Figura 4.10 – Análise comparativa entre as respostas do teste a degrau das tensões do terminal primário (a) e secundário (b) do TPI 13,8 kV real, em vermelho, e seu modelo, em preto.	61

Figura 4.11 – Análise comparativa entre as respostas do teste a degrau das tensões do terminal primário (a) e secundário (b) do TPI 138 kV real, em vermelho, e seu modelo, em preto.....	62
Figura 4.12 – Análise comparativa entre as respostas do teste a degrau das tensões do terminal primário (a) e secundário (b) do TPC 230 kV real, em vermelho, e seu modelo, em preto.	62
Figura 4.13 – Fluxograma da aplicação dos Modelos em simulações no ATPDraw.....	63
Figura 4.14 – Forma de onda padronizada 1,2/50 μ s para ensaio de impulso atmosférico. Retirado de Soares (2011).....	64
Figura 4.15 – Sistema teste para aplicação do modelo do TPI 13,8 kV.....	66
Figura 4.16 – Tensão nos terminais primário (a) e secundário (b) do TPI 13,8 kV sob descarga atmosférica.....	66
Figura 4.17 – Tensão nos terminais primário (a) e secundário (b) do TPI 13,8 kV na simulação de curto-circuito.....	67
Figura 4.18 – Tensão nos terminais primário (a) e secundário (b) do TPI 13,8 kV durante teste de chaveamento.....	68
Figura 4.19 – Tensão nos terminais primário (a) e secundário (b) do TPI 13,8 kV na verificação da relação de transformação.	69
Figura 4.20 – Sistema teste para aplicação do modelo do TPI 138 kV.....	70
Figura 4.21 – Tensão nos terminais primário (a) e secundário (b) do TPI 138 kV sob descarga atmosférica.....	70
Figura 4.22 – Tensão nos terminais primário (a) e secundário (b) do TPI 138 kV na simulação de curto-circuito.....	71
Figura 4.23 – Tensão nos terminais primário (a) e secundário (b) do TPI 138 kV durante teste de chaveamento.....	72
Figura 4.24 – Tensão nos terminais primário (a) e secundário (b) do TPI 138 kV na verificação da relação de transformação.	73
Figura 4.25 – Sistema teste para aplicação do modelo do TPC 230kV.	73
Figura 4.26 – Tensão nos terminais primário (a) e secundário (b) do TPC 230 kV sob descarga atmosférica.....	74
Figura 4.27 – Tensão nos terminais primário (a) e secundário (b) do TPC 230 kV na simulação de curto-circuito.....	75
Figura 4.28 – Tensão nos terminais primário (a) e secundário (b) do TPC 230 kV durante teste de chaveamento.....	76
Figura 4.29 – Tensão nos terminais primário (a) e secundário (b) do TPC 230 kV na verificação da relação de transformação.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Classificação das sobretensões por faixas de frequência.....	13
Tabela 4.2 - Dados de Placa TPI SIEMENS de 13,8 kV	48
Tabela 4.3 - Dados de Placa TPI ABB de 138 kV	49
Tabela 4.4 - Dados de Placa TPC ABB de 230 kV	49
Tabela 4.5 – Configurações editadas no Ajuste Matricial	52
Tabela 4.6 – Configuração do Ajuste Matricial para aproximação do TPI 13,8 kV	55
Tabela 4.7 – Configuração do Ajuste Matricial para aproximação do TPI 138 kV	57
Tabela 4.8 – Configuração do Ajuste Matricial para aproximação do TPC 230 kV	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Considerações gerais	13
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Geral	14
1.2.2	Específicos	14
1.3	Motivação	15
1.4	Estado da arte.....	16
1.5	Estrutura do trabalho.....	17
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE TRANSFORMADORES DE POTENCIAL.....	19
2.1	Considerações Gerais	19
2.2	Transformadores de Potencial Indutivos	19
2.2.1	Comportamento Transitório de Transformadores de Potencial Indutivos.....	21
2.2.2	Modelagens de Transformadores de Potencial Indutivos	21
2.3	Transformadores de Potencial Capacitivos	22
2.3.1	Comportamento Transitório de Transformadores de Potencial Capacitivos	25
2.3.2	Modelagens de Transformadores de Potencial Capacitivos	25
2.3.2.1	Modelo de Sule et al. (2006)	26
2.3.2.2	Modelo de Sweetana e Flugum (1966)	26
2.3.2.3	Modelo de Kezunovic et al. (1992).....	27
2.3.2.4	Modelo de Kojovic et al. (1994).....	29
2.3.2.5	Modelo de Martí et al. (1997)	30
2.3.2.6	Modelo de Fernandes Júnior (1999, 2003)	32
2.4	Considerações Finais.....	35
3	METODOLOGIA PROPOSTA	36
3.1	Considerações Gerais	36
3.2	SFRA e Medições no Domínio da Frequência	37
3.3	Cálculo da Matriz de Admitâncias	42
3.4	Aproximação Racional	43
3.4.1	Método do Ajuste Vetorial por Gustavsen e Semlyen (1999).....	43
3.4.1.1	Identificação dos polos.....	44

3.4.1.2	Identificação dos resíduos	46
3.4.1.3	Ferramenta de Ajuste Matricial.....	46
3.5	Considerações Finais	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1	Considerações Gerais	48
4.2	Criação dos Modelos.....	50
4.2.1	Criação do Modelo do TPI 13,8 kV	54
4.2.2	Criação do Modelo do TPI 138 kV	56
4.2.3	Criação do Modelo do TPC 230 kV	58
4.3	Validação dos Modelos	59
4.3.1	Validação do Modelo TPI 13,8 kV	60
4.3.2	Validação do Modelo TPI 138 kV	61
4.3.3	Validação do Modelo TPC 230 kV.....	62
4.4	Estudos de Caso	63
4.4.1	Aplicações no TPI 13,8 kV	65
4.4.1.1	Descarga Atmosférica	66
4.4.1.2	Curto-circuito.....	67
4.4.1.3	Chaveamento.....	67
4.4.1.4	Relação de Transformação	68
4.4.2	Aplicações no TPI 138 kV	69
4.4.2.1	Descarga Atmosférica	70
4.4.2.2	Curto-circuito.....	71
4.4.2.3	Chaveamento.....	71
4.4.2.4	Relação de Transformação	72
4.4.3	Aplicações no TPC 230 kV	73
4.4.3.1	Descarga Atmosférica	74
4.4.3.2	Curto-circuito.....	74
4.4.3.3	Chaveamento.....	75
4.4.3.4	Relação de Transformação	76
4.5	Considerações Finais.....	77
5	CONCLUSÕES.....	78
6	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	79

REFERÊNCIAS.....	80
Apêndice A – Guia para criação dos modelos dos TPs no ATPDraw.....	83

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) estão sujeitos à diversas perturbações que podem resultar em transitórios eletromagnéticos na rede, tais como descargas atmosféricas, curtos-circuitos, energização, chaveamentos e manobras. A manutenção do funcionamento de um SEP durante tais ocorrências depende da correta operação de seus sistemas de medição, proteção e controle.

Os Transformadores de Potencial Indutivos e Capacitivos (TPIs) e (TPCs) devem reproduzir com fidelidade, em seus terminais secundários, o comportamento da tensão elétrica presente no seu terminal de alta tensão. Sabe-se, porém, da dificuldade destes equipamentos em realizar tal tarefa quando submetidos à rápidas variações de tensão ocasionadas por fenômenos transitórios no sistema elétrico. A Tabela 1.1, do Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos, CIGRÉ (1990), classifica os tipos de sobretensões, por faixa de frequência.

Tabela 1.1 – Classificação das sobretensões por faixas de frequência.

Grupo	Faixa de frequência	Característica no domínio do tempo	Representação válida para
I	0,1 Hz a 3 kHz	Oscilações de baixa frequência	Sobretensões temporárias
II	50 Hz a 20 kHz	Surtos de frente lenta	Sobretensões de manobra
III	10 kHz a 3 MHz	Surtos de frente rápida	Sobretensões devido a surtos atmosféricos
IV	100 kHz a 50 MHz	Surtos de frente muito rápida	Sobretensões por reascendimento

Fonte: CIGRÉ (1990).

O modelo ideal de um TP seria aquele que fosse capaz de reproduzir todos os eventos transitórios em todas as faixas de frequência, o que, no atual momento de pesquisa, não se encontra disponível. Assim, dependendo do distúrbio a ser analisado, altera-se a forma de representação do modelo de tal equipamento. Enquanto que em estudos de manobras as

representações da impedância de curto-circuito, saturação do núcleo e perdas no ferro no modelo dos transformadores são determinantes, e os acoplamentos capacitivos de pouca relevância, em estudos de surtos de frente rápida essa lógica se inverte.

Nessa mesma linha de pensamento, corriqueiramente, os TPs são representados simplesmente por uma capacitância concentrada para a terra na determinação das amplitudes de sobretensões transitórias para estudos de proteção em SEP, apresentando resultados aceitáveis. Porém, para observar mais precisamente essas amplitudes, e até quantificar suas frequências típicas, na investigação de sobretensões transitórias de altas frequências, resultantes de manobras ou surtos com frequências de até 3 MHz, tal representação não tem a precisão desejada.

A ocorrência de fenômenos transitórios, aliadas às dificuldades na modelagem dos TPs, pode acarretar em falhas nos dispositivos de proteção, resultando em atuações indevidas como relatam Ajaei e Sanaye-Pasand (2008). A probabilidade de ocorrência desse problema aumenta à medida que são inseridos relés de atuação mais rápida e sensível nos SEP, uma vez que os antigos relés eletromecânicos, devido à sua resposta mais lenta, poderiam não ser sensibilizados por fenômenos muito rápidos.

Contudo, para simular e analisar previamente a resposta de TPs em um SEP frente à distúrbios, para prever os danos no sistema e evitar os prejuízos decorrentes, são necessários modelos adequados e confiáveis desses equipamentos para uma determinada faixa de frequência associada ao evento transitório a ser analisado.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

Propor uma metodologia para a modelagem de TPIs e TPCs para aplicação em estudos de transitórios eletromagnéticos em altas frequências.

1.2.2 Específicos

- Utilizar as medições de resposta em frequência dos TPs utilizando um *Sweep Frequency Response Analyzer* (SFRA) comercial com conexões especiais;
- Utilizar a aproximação racional, das Matrizes de Admitâncias e criar um circuito equivalente RLC;

- Utilizar o software ATPDraw, programa de pré-processamento gráfico vinculado ao Alternative Transients Program (ATP-EMTP) como ambiente de simulação;
- Validar os modelos a fim de certificar sua fidelidade;
- Analisar o comportamento dos modelos quando submetidos a mudanças bruscas e repentinas na tensão de alimentação, como, por exemplo, um degrau de tensão;
- Utilizar os modelos de TPs para simulações no ATPDraw, a fim de comprovar sua funcionalidade e analisar suas respostas em um SEP teste.

1.3 Motivação

O estudo da modelagem de TPIs e TPCs não é recente. Existem diversos modelos desses equipamentos disponíveis na literatura, com representações baseadas desde suas funções de transferência a até por circuitos elétricos equivalentes. Porém, esses modelos possuem limitações como restrição aos estudos de baixas e médias frequências, geralmente até 10 kHz, necessidade de saber os valores de todos seus parâmetros elétricos e acoplamentos mútuos, indutivos e capacitivos, além de suas características físicas e construtivas. Contudo, ao se analisar transitórios, os modelos devem considerar também comportamentos não lineares e efeitos dependentes da frequência.

Devido às limitações dos modelos disponíveis, o estudo do comportamento dos TPs para determinadas condições de fenômenos transitórios nos SEP não apresenta resultados completamente confiáveis, o que pode acarretar em erros no seu dimensionamento e, conseqüentemente, atuações indevidas. Esse fato pode ser comprovado, por exemplo, pelos registros de Alves et al. (2001) e de Moraes e Vasconcelos (1999) que relataram operações inesperadas da proteção contra sobretensões em diversos TPCs durante operações rotineiras de chaves seccionadoras e outras falhas desse equipamento que causaram saídas intempestivas de linhas de transmissão e danos em equipamentos auxiliares.

De forma a atender esses requisitos, este trabalho apresenta uma alternativa para a modelagem de TPIs e TPCs para estudos de transitórios que resultam em frequências na ordem de até 3 MHz.

1.4 Estado da arte

Atualmente, as pesquisas relacionadas aos TPs não têm mais o objetivo de desenvolver novas metodologias de modelagem para sua representação em estudos de SEP. Nos últimos anos, o foco nessa área tem se concentrado especialmente na correção, ou compensação, da tensão secundária desses equipamentos em situações de transitórios eletromagnéticos e em uma análise mais minuciosa sobre o fenômeno da ferroressonância.

As funções de proteção que consideram a estimação dos fasores das tensões do SEP, tal como a proteção de distância de linhas de transmissão, utilizam, como dado de entrada, a tensão secundária dos TPs. Dessa forma, oscilações nessa tensão durante regimes transitórios influenciam no desempenho do sistema de proteção, que, segundo Bainy et al. (2012), podem resultar em sobre ou subbalcance dos relés de distância. Assim, métodos para correção da tensão secundária de TPs e propostas de modificação nos algoritmos dos relés surgem como alternativa para minimizar operações equivocadas dos dispositivos de proteção e controle de SEP.

Um grande volume de trabalhos tem se concentrado no desenvolvimento de métodos para correção da tensão secundária de TPCs. Desses, Bainy et al. (2013), através de uma função compensadora, implementada em um *Digital Signal Processor* (DSP), possibilitou manter a magnitude unitária e ângulo de fase nulo da resposta em frequência do TPC na faixa de 10 Hz a 1 kHz. Zare et al. (2012) apresentou um circuito eletrônico, a ser conectado nos terminais de saída do TPC, responsável por emular tensões no divisor capacitivo e reator de compensação para várias condições de operação e de faltas. Essas tensões, por sua vez, são multiplicadas pela relação inversa de transformação do TPI intermediário e adicionadas à saída do TPC para corrigir a tensão desse terminal.

Outra abordagem para compensar a tensão secundária de TPCs foi proposta por Santos (2011), que introduziu um filtro digital corretor para a tensão secundária de TPCs. Implementado no *Real Time Digital Simulator* (RTDSTM), esse filtro é projetado a partir de um modelo de TPC, que tem seus parâmetros estimados pelo programa TPCalc 1.1 desenvolvido pelo Grupo de Sistemas Elétricos (GSE) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), e de sua relação de transformação de tensão. Com procedimento similar a esse, Silva (2010) apresenta um filtro digital recursivo, cujos parâmetros são obtidos da função de transferência e resposta em frequência do modelo de um TPC, para correção da sua tensão secundária em tempo real.

Paralelamente a essas soluções, que necessitam de dispositivos auxiliares para corrigir distorções nas tensões de TPCs, existem aquelas que buscam resolver o problema por meio de

algoritmos computacionais. Seguindo essa linha, Saleh et al. (2009) desenvolveram uma Rede Neural Artificial (RNA) para restaurar a tensão primária do TPC a partir de sua tensão secundária distorcida. Essa RNA é treinada para atingir a função de transferência inversa do TPC de modo que um conjunto de sinais de tensão do TPC, dados de entrada, produza um conjunto desejado de saídas, no caso, sinais de tensão corrigidos. Por outro lado, Kang et al. (2009) propuseram um algoritmo de compensação para a tensão secundária de TPCs que, ao eliminar os efeitos das características do núcleo de ferro do TPC, aumenta a exatidão de sua resposta. Tal método, a partir da medição da tensão secundária, estima a tensão no divisor capacitivo e reator de compensação e, então, a adiciona para compensar a distorção na tensão.

Quanto aos estudos mais recentes do fenômeno da ferroressonância, o interesse maior não reside sobre o comportamento específico dos TPs, que tem sua representação mais direcionada à representação do núcleo e sua saturação, mais sim na análise das condições de operação do sistema de maneira mais ampla. Com essas características, Tygai e Besarab (2014) desenvolveram um modelo matemático de um TPI, que leva em conta sua estrutura e fenômeno de histerese, direcionado para pesquisas de ferroressonâncias a partir de chaveamentos no SEP. Outro trabalho nessa área é o de Abdul-Malek et al. (2013), que analisa técnicas de mitigação dos efeitos da ferroressonância, motivado por falhas de TPIs em uma subestação de Selangor, Malásia. Nesse estudo, o TPI é modelado com base nas características não lineares de seu núcleo magnético e ramo magnetizante. Porém, não considera as impedâncias dos enrolamentos.

Por outro lado, em relação ao desenvolvimento de novas metodologias de modelagem de TPs para análises de transitórios eletromagnéticos, que apresentem inovações expressivas, a literatura não tem se atualizado. Em relação aos TPCs, este trabalho considera as propostas de Sule et al. (2006), pela representação do TPC por sua função de transferência, e Fernandes Júnior (2003), por considerar a representação de elementos não lineares no modelo, como as mais relevantes entre as últimas publicações. Quanto aos TPIs, por analisar o comportamento em frequências maiores e incluir elementos capacitivos concentrados no modelo, o trabalho de Moore et al. (2012) é destacado.

1.5 Estrutura do trabalho

A dissertação inicia com uma fundamentação teórica sobre Transformadores de Potencial Indutivos e Capacitivos no Capítulo 2. Essa seção ainda engloba o comportamento

característico desses equipamentos sob eventos transitórios e alguns de seus modelos disponíveis na literatura.

No Capítulo 3 é proposta a metodologia tema deste trabalho, apresentando detalhadamente os processos para medição da resposta em frequência dos TPs, o cálculo de suas matrizes de admitâncias, a aproximação racional das matrizes e obtenção do circuito equivalente.

O Capítulo 4 contém os resultados do emprego dessa metodologia em três TPs, sendo discutidos, separadamente, as etapas de criação, validação e aplicação de cada modelo.

Nos Capítulos 5 e 6 são apresentados, respectivamente, as conclusões desta dissertação e sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, o Anexo A expõe um guia para a criação de um bloco para representação do modelo do TP no ATPDraw e sua consecutiva aplicação em simulações.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE TRANSFORMADORES DE POTENCIAL

2.1 Considerações Gerais

Devido a motivações técnicas, econômicas e de segurança, os instrumentos elétricos utilizados nos Sistemas de Proteção, Medição e Controle dos SEP não são, geralmente, projetados para suportarem altas tensões e correntes elétricas. Porém, nas subestações, onde grande parte desses instrumentos é empregada, os níveis de tensão elétrica estão usualmente na faixa de quilovolts. Sendo assim, são necessários equipamentos capazes de reduzir essa alta tensão para o nível de alimentação dos equipamentos auxiliares.

A readequação dessas grandezas elétricas é realizada pelos Transformadores de Instrumentos. Esses transformadores podem ser divididos em duas classes: Transformadores de Potencial (TP) e Transformadores de Corrente (TC). Assim, os TPs e TCs proporcionam isolamento galvânica e possibilitam a padronização de tensões e correntes nominais de instrumentos e relés.

Os Transformadores de Potencial têm seu terminal primário conectado em paralelo com o SEP, normalmente através da ligação entre fase e terra. Enquanto isso, em seu terminal secundário, a tensão, comumente, é de 115 V ou $\frac{115}{\sqrt{3}}$ V. Essa tensão reduzida na saída dos TPs permite que os instrumentos de medição e proteção, como voltímetros e relés de tensão, sejam projetados com tamanhos reduzidos e menor nível de isolamento, o que resulta na diminuição de seus custos.

De acordo com a tensão aplicada nos terminais do enrolamento primário, o que está diretamente relacionado ao custo do transformador, e da necessidade, ou não, da comunicação através do sistema Carrier, os TPs podem ser divididos em Transformadores de Potencial Indutivo (TPIs) e Transformadores de Potencial Capacitivo (TPCs).

2.2 Transformadores de Potencial Indutivos

Os Transformadores de Potencial Indutivos são similares aos transformadores de potência convencionais, exceto pelo fato de que os TPIs são designados para cargas de baixa

potência. Os TPIs são, normalmente, empregados em níveis de tensão de até 138 kV, faixa em que seu custo de produção é inferior ao do TPC.

Basicamente, os TPIs são constituídos de dois enrolamentos, primário e secundário, envolvidos em um núcleo de ferro-silício. Seu princípio de funcionamento baseia-se na conversão eletromagnética entre seus enrolamentos. O terminal primário é conectado diretamente à alta tensão do SEP, enquanto que os instrumentos são ligados em seu terminal secundário, de baixa tensão.

Conforme regulamentado pela NBR 6855 (1992) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), os TPIs podem ser classificados, segundo a ligação para a qual são projetados, em três grupos:

- Grupo 1 – enquadram os TPIs projetados para ligação entre fases;
- Grupo 2 – TPIs projetados para ligação entre fase e neutro de sistemas com aterramento eficaz;
- Grupo 3 – englobam TPIs projetados para ligação entre fase e neutro, porém de sistemas em que a eficácia do aterramento não é garantida.

A Figura 2.1, de Carvalho Junior (2008), traz uma representação do TPI com a indicação de seus elementos.

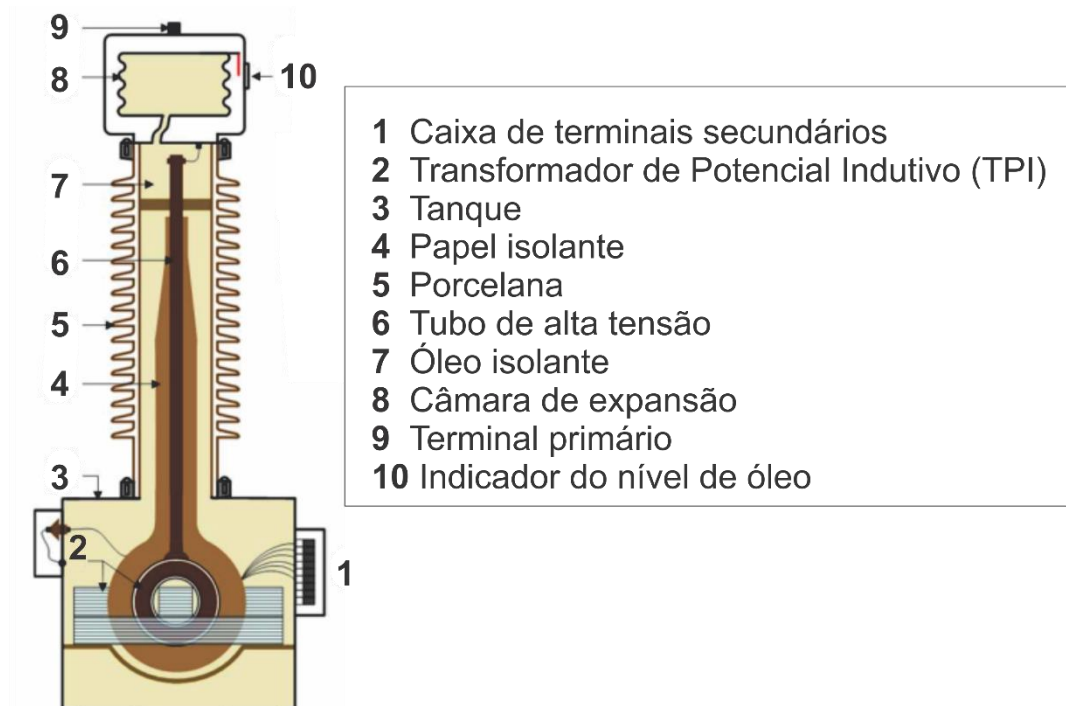


Figura 2.1 – Representação do TPI e suas partes construtivas. Adaptado de Carvalho Junior (2008).

A construção do TPI depende, principalmente, dos fatores de classe de exatidão, potência de saída, isolamento e projeto mecânico. A potência aparente de saída do TPI raramente excede 300 VA e, portanto, não representa problema quanto à sua refrigeração. Sua isolamento é projetada para suportar sobretensões, incluindo os impulsos de tensão do sistema, e pode apresentar maior volume do que de seus próprios enrolamentos.

2.2.1 Comportamento Transitório de Transformadores de Potencial Indutivos

Em condições normais de operação, negligenciando as pequenas quedas de tensão em seus enrolamentos, o TPI deve reproduzir, sem erros, a tensão de seu terminal primário em seu secundário, com valor reduzido proporcionalmente à relação de transformação de tensão. Porém, em condições de repentina diminuição na tensão elétrica, como em consequência de faltas no sistema, por exemplo, essa condição pode não ser satisfeita. Isso se deve à inserção de componentes transitórias na onda da tensão elétrica.

Um súbito aumento da tensão no terminal de alta tensão do TPI pode levar à saturação do seu núcleo magnético, elevando a corrente desse terminal em algumas vezes seu valor nominal. Esse incremento no valor da corrente causa, conseqüentemente, um aumento na queda de tensão no enrolamento, o que resulta em uma tensão distorcida e com valor RMS abaixo do ideal no terminal secundário do TPI.

Por outro lado, em casos de interrupção de tensão ao TPI, o fluxo magnético do seu núcleo não cessa instantaneamente, sendo sustentado, por alguns instantes, pelo seu fluxo residual.

2.2.2 Modelagens de Transformadores de Potencial Indutivos

O modelo equivalente tradicional para análises de baixas frequências de um TPI é similar à representação de transformadores de potência na frequência fundamental ou em transitórios de baixa frequência. Entretanto, especial atenção deve ser dada à alta indutância do enrolamento primário, assim como para características de saturação e curva de histerese do núcleo. A Figura 2.2, de Moore et al. (2012), representa o circuito equivalente para um TPI de dois enrolamentos.

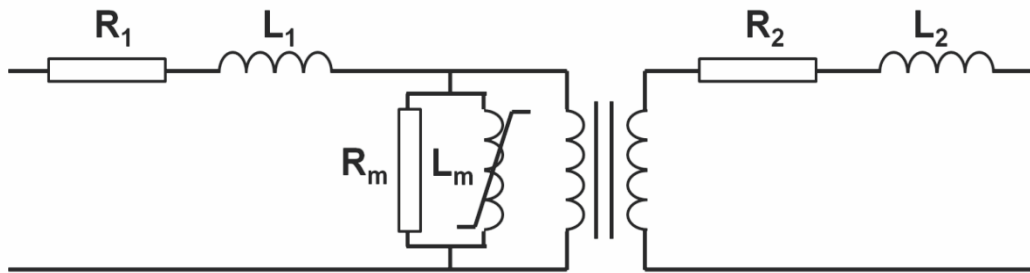


Figura 2.2 – Circuito equivalente tradicional para um TPI de dois enrolamentos (Moore et al., 2012).

Cada um dos terminais é representado por sua impedância de curto-circuito, sendo compostas pelas resistências, R_1 e R_2 , e as indutâncias de dispersão, L_1 e L_2 . A representação do núcleo do transformador é feita através do ramo de magnetização, onde a resistência R_m representa as perdas no núcleo e o indutor não linear L_m reproduz suas características de saturação e indutância de magnetização.

Por outro lado, para sua modelagem em frequências de até 10 kHz, a representação da ressonância do TPI é fundamental. Segundo Moore et al. (2012), tal ressonância é tipicamente modelada através da inclusão de elementos capacitivos concentrados, indicando as capacitâncias do próprio enrolamento e entre enrolamentos. Sendo assim, a Figura 2.3 exibe um modelo para a representação de TPIs em frequências mais altas, formulada a partir do circuito equivalente da Figura 2.2 e com parâmetros referidos na base de um dos enrolamentos.

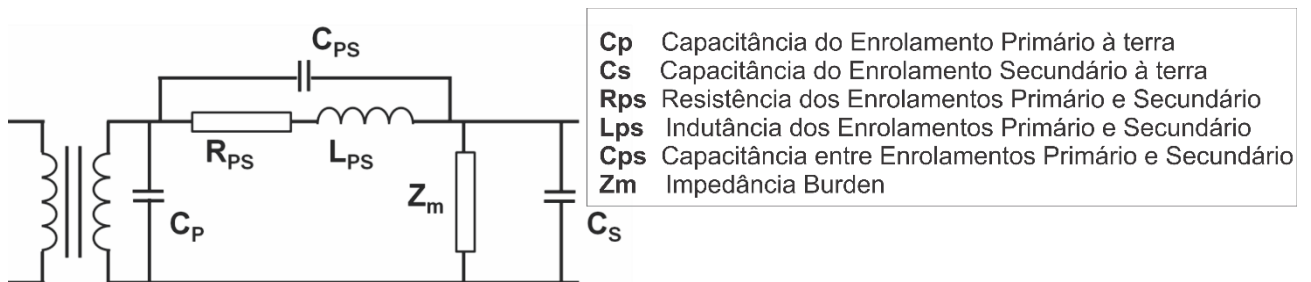


Figura 2.3 – Modelo para TPI considerando suas capacitâncias (Moore et al., 2012).

2.3 Transformadores de Potencial Capacitivos

Para tensões mais elevadas, a utilização de Transformadores de Potencial Indutivos (TPIs) (eletromagnéticos convencionais), têm limitações técnicas de isolamento. A alternativa

utilizada para tensões fase-neutro superiores a $\frac{138}{\sqrt{3}}$ kV é o uso de Transformadores de Potencial Capacitivos (TPCs).

Os TPCs têm as mesmas aplicações de um TPI, porém, quando integrados com o sistema *Power Line Carrier* (PLC), ainda podem apresentar a possibilidade de servir como caminho para dados de comunicação e telecomando.

Basicamente, o TPC é composto de duas partes: um divisor de tensão capacitivo e uma unidade eletromagnética. A Figura 2.4, retirada de Silva (2010) esquematiza o TPC e seus elementos integrantes.

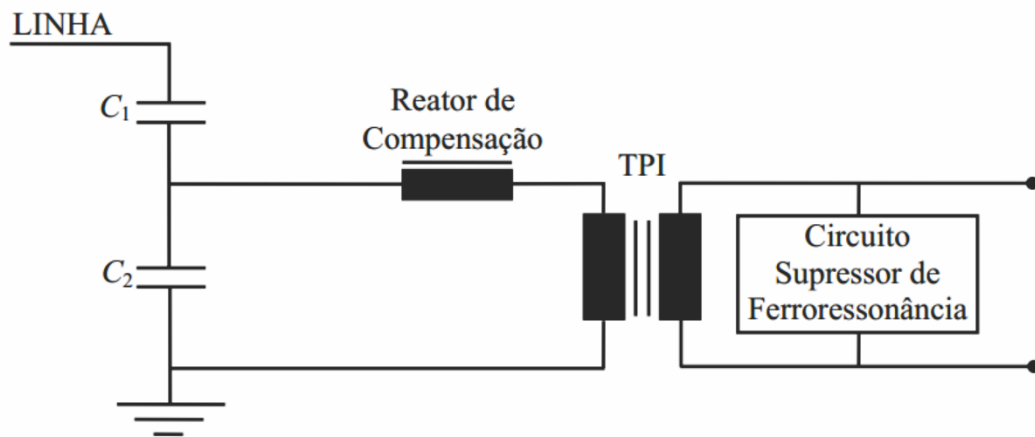


Figura 2.4 – Partes integrantes de um TPC (Silva, 2010).

No TPC, diferentemente do TPI, a alta tensão do SEP não é conectada diretamente ao elemento transformador, e sim a uma coluna de capacitores. Essa coluna é composta de duas cadeias de capacitores ligados em série, C_1 e C_2 , que formam um divisor de tensão capacitivo com finalidade de criar uma derivação com tensão intermediária.

À derivação intermediária, é conectada a unidade eletromagnética, que é constituída por um TPI, um reator de compensação e um sistema de proteção contra ferroressonância. O TPI é responsável por rebaixar a tensão em níveis compatíveis com os suportados pelos instrumentos. O reator de compensação é empregado com o objetivo de regular a defasagem imposta pelo divisor capacitivo e minimizar a impedância equivalente da fonte na frequência fundamental, reduzindo, assim, a queda de tensão sob tal faixa de operação. A reatância desse compensador (X_L) é ajustada de acordo com a combinação das reatâncias dos capacitores C_1 e C_2 , conforme a equação (2.1).

$$X_L = \frac{X_{C1} \cdot X_{C2}}{X_{C1} + X_{C2}} \quad (2.1)$$

Tanto o reator de compensação quanto o TPI têm núcleos de ferro, que, além de introduzir perdas no cobre e no núcleo, podem gerar fenômenos de ferroressonância devido às suas não linearidades. Por isso, de modo a controlar possíveis oscilações de tensão causadas por tais ressonâncias, é inserido, geralmente no secundário do transformador abaixador, um circuito supressor de ferroressonância (CSF). O CSF pode ser de dois tipos: passivo, quando constituído de resistores; ou ativo, composto por dispositivos semicondutores ou por capacitores e indutores de núcleo de ferro conectados em paralelo e sintonizados na frequência fundamental.

A coluna capacitiva do TPC é envolta por isoladores de porcelana, enquanto que seus componentes eletromagnéticos estão abrigados em um tanque hermeticamente fechado. A conexão do terminal de alta tensão é feita no topo da coluna capacitiva, e os terminais da baixa tensão estão dispostos na lateral do tanque. A Figura 2.5 apresenta, com detalhes, a disposição dos elementos do TPC.

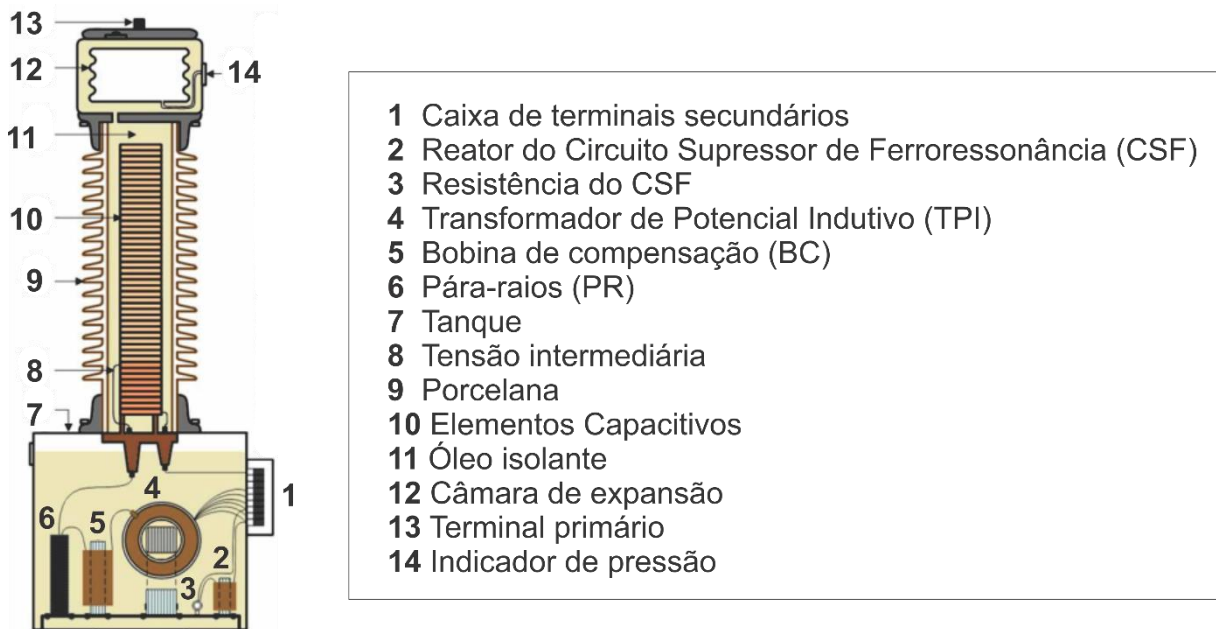


Figura 2.5 – Elementos constituintes de um TPC. Adaptado de Carvalho Júnior (2008).

No projeto construtivo do TPC, atenção especial deve ser dada à coluna capacitiva, devido à possibilidade de erros na sua relação de transformação quando a relação entre as capacitâncias C_1 e C_2 diferir de seu valor original. Na prática, sabe-se que o valor da capacitância pode mudar em função da temperatura, contaminação no óleo isolante, entre

outros. Caso alguma das pilhas capacitivas sofra maior interferência de temperatura e, por consequência, maior variação de capacitância em relação à outra, a relação entre C_1 e C_2 mudará. Além disso, pelo fato de a coluna capacitiva ser formada pela ligação em série de diversos capacitores, caso algum desses componentes falhe e fique em curto-circuito, a relação entre C_1 e C_2 também diferirá do valor original.

2.3.1 Comportamento Transitório de Transformadores de Potencial Capacitivos

Assim como os TPIs, os TPCs também devem reproduzir, além da resposta em regime permanente, os efeitos transitórios presentes no circuito de alta tensão de maneira mais íntegra possível em seu terminal secundário. Porém, a resposta transitória do TPC é influenciada diretamente por todos os componentes que o compõem.

Quando sujeitos à bruscas reduções de tensão, o terminal secundário do TPC não reproduz instantaneamente a tensão de entrada em consequência dos indutores, capacitores e elementos não lineares que o constituem. Esses elementos, armazenadores de energia, não podem mudar imediatamente sua carga ou fluxo, e acabam, então, gerando componentes transitórios na tensão.

Estudos realizados por Sweetana (1971), e revisados por Costello e Zimmerman (2012), apontaram os principais fatores que influenciam o comportamento transitório do TPC. Segundo esses trabalhos, respostas transitórias mais severas ou de maior duração estão associadas às faltas que ocorrem quando a forma de onda da tensão primária passa por zero. Por outro lado, o aumento no valor da coluna capacitiva equivalente e o emprego de transformadores intermediários com alta relação de transformação, acarretam em transitório de menor magnitude, porém de maior duração. O emprego de circuito supressor de ferroressonância ativo, por conter capacitores e indutores, implica em transitórios mais graves do que sua forma passiva. Por fim, em relação às cargas ligadas ao secundário do TPC, comumente chamadas de Burden, uma melhor resposta transitória dependerá de quanto maior forem seu carregamento e fator de potência.

2.3.2 Modelagens de Transformadores de Potencial Capacitivos

A resposta transitória de TPCs tem influência direta na operação de sistemas de proteção dos SEP e, por isso, deve ser minuciosamente investigada. Os modelos propostos para analisar seu comportamento, em regime permanente e transitório, disponíveis na literatura, são

formulados com base na representação por Função de Transferência ou por circuitos elétricos equivalentes. A seguir são brevemente apresentadas algumas das propostas que mais contribuíram para a evolução da modelagem de TPCs.

2.3.2.1 Modelo de Sule et al. (2006)

Seguindo a linha de pesquisa da representação por funções de transferência, Sule et al. (2006) desenvolveram um modelo computacional, em MATLAB®, válido para avaliar transitórios de até 10 kHz em TPCs. A proposta faz uso do circuito equivalente representado na Figura 2.6, onde todos seus parâmetros são referidos ao terminal primário.

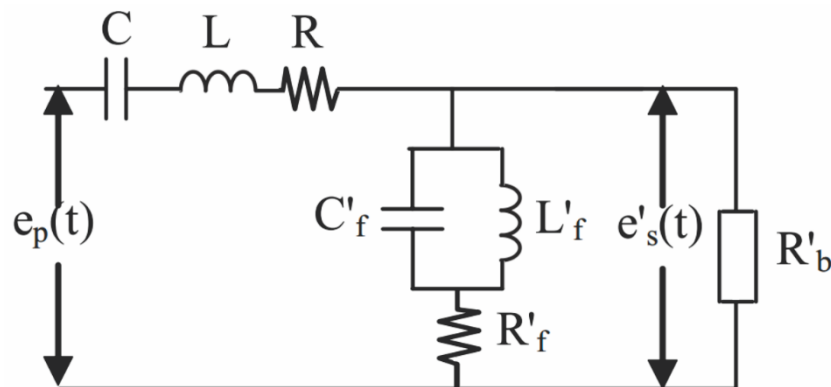


Figura 2.6 – Circuito equivalente do TPC. Adaptado de Sule et al. (2006).

Os elementos $e_p(t)$, R , L , C , R'_f , L'_f , C'_f , R'_b e $e'_s(t)$ representam, respectivamente, tensão do terminal primário; a resistência e indutância equivalente do reator de compensação; capacitância equivalente da coluna capacitiva; resistência, indutância e capacitância do circuito supressor de ferroressonância referidos ao lado primário; burden resistiva referida ao lado primário; e tensão secundária referida ao terminal de alta tensão. Os valores desses parâmetros foram obtidos de relatórios técnicos, por inspeção e por computação. Por fim, ao representar a função de transferência do circuito equivalente do TPC na forma de espaço de estados, o programa desenvolvido aplica o método numérico Runge-Kutta de quinta ordem para plotar as respostas transitórias do TPC.

2.3.2.2 Modelo de Sweetana e Flugum (1966)

A utilização de circuitos elétricos equivalentes para a representação de TPCs é a proposta mais utilizada pelos pesquisadores. Seguindo essa metodologia, a concepção de

modelagem de TPC proposta por Sweetana e Flugum (1966), considerando apenas estudos no domínio do tempo, foi a primeira a ter destaque. A Figura 2.7 mostra o circuito elétrico equivalente apresentado pelos autores.

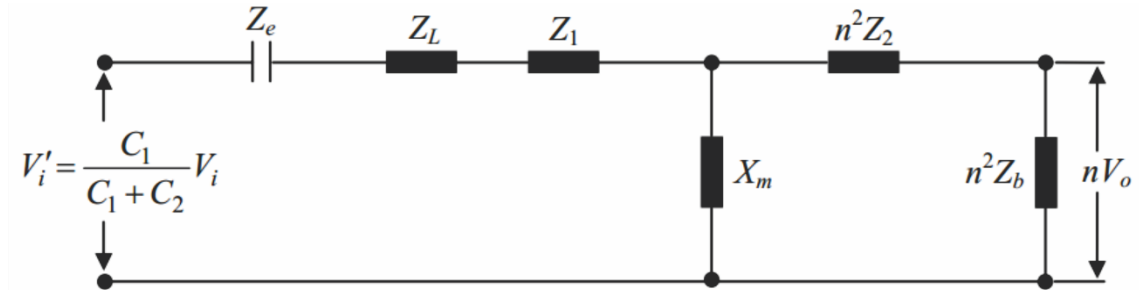


Figura 2.7 – Circuito elétrico equivalente do TPC apresentador por Sweetana e Flugum (1966). Retirado de Fernandes Junior (2003).

Na figura acima, os parâmetros Z_e , Z_L , Z_1 , Z_2 , X_m e Z_b representam, respectivamente, a impedância equivalente da coluna capacitiva, impedância do reator de compensação, impedâncias de curto-circuito do terminal primário e secundário, reatância de magnetização do TPI intermediário e a impedância da carga. Além de utilizar tal modelo para análise de resposta transitória e testes de ferroressonância, os autores ainda propuseram fórmulas teóricas para avaliar erros de relação e de fase dos TPCs. No entanto, esse modelo proposto faz uso apenas de elementos lineares, não levando em conta efeitos como a saturação do núcleo do TPI, por exemplo.

2.3.2.3 Modelo de Kezunovic et al. (1992)

De modo a melhorar a representação dos TPCs por circuitos elétricos equivalentes, pesquisadores começaram a incluir estudos no domínio da frequência em suas técnicas de modelagem. Foi assim que Kezunovic et al. (1992), através de medições técnicas dos parâmetros e análise da resposta em frequência, desenvolveram um modelo digital de TPC para transitórios eletromagnéticos. A Figura 2.8 apresenta o circuito equivalente geral do TPC.

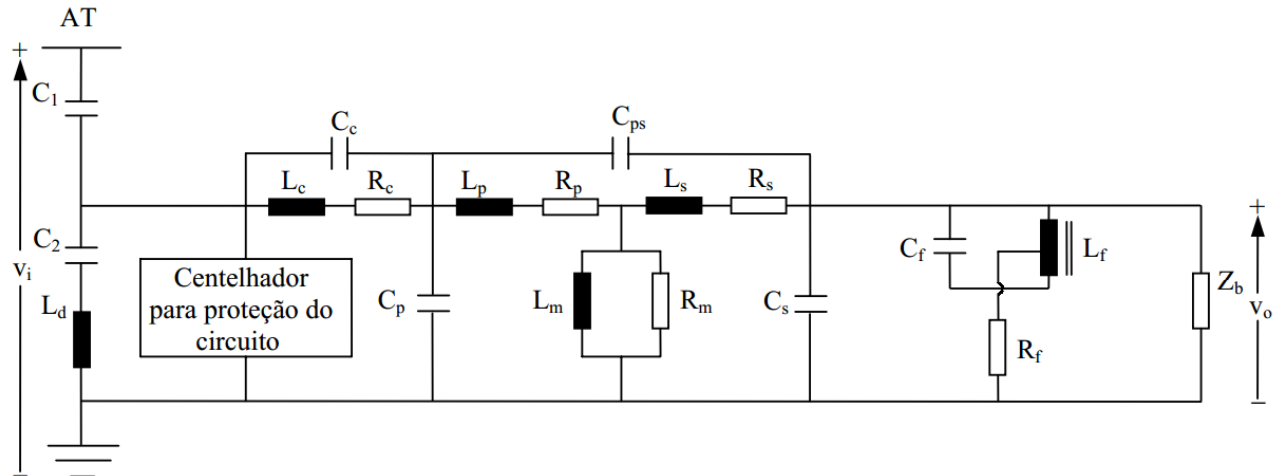


Figura 2.8 – Circuito equivalente do TPC proposto por Kezunovic et al. (1992). Retirado de Fernandes Junior (1999).

Esse modelo contempla as principais partes integrantes do TPC, representando sua coluna capacitiva (C_1 e C_2), circuito de proteção, reator de compensação (R_c , L_c e C_c), TPI intermediário (R_p , L_p , C_p , C_{ps} , R_s , L_s , C_s , L_m e R_m), circuito supressor de ferroressonância (R_f , L_f e C_f) e bobina de drenagem (L_d). A proposta de reprodução do circuito supressor de ferroressonância dá-se a partir de um reator (L_f) com núcleo de ferro, não saturável, conectado em paralelo com um capacitor (C_f), a serem sintonizados na frequência fundamental, e um resistor de amortecimento (R_f). As medições dos parâmetros elétricos do modelo partem do ensaio de curto-circuito do TPI, onde são estimadas as resistências e indutâncias dos enrolamentos primário e secundário. As capacitâncias parasitas dos enrolamentos são calculadas a partir dos valores de suas indutâncias de dispersão e frequências de ressonância, enquanto que a capacitância parasita do reator de compensação é definida através da medição de sua impedância em função da frequência.

Baseado nesse modelo geral, os autores, através de estudos de sensibilidade, identificaram a influência dos parâmetros na curva de resposta em frequência do transformador. Assim, ao desconsiderar alguns dos elementos de pouca influência nessa resposta, os autores buscaram diminuir a complexidade do modelo, que resultou no circuito equivalente simplificado da Figura 2.9.

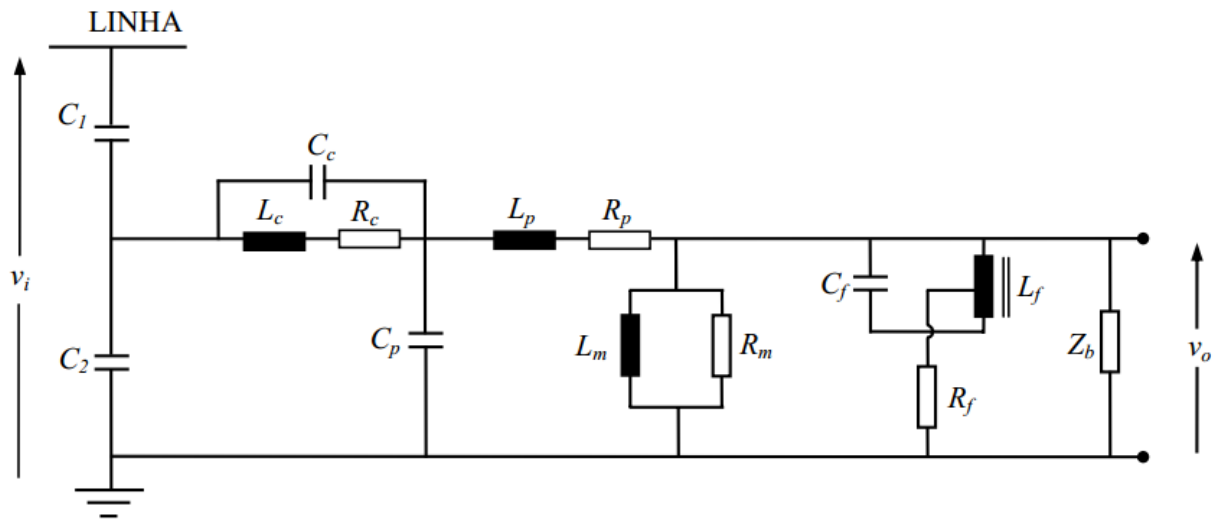


Figura 2.9 – Circuito equivalente simplificado do TPC proposto por Kezunovic et al. (1992). Retirado de Fernandes Junior (1999).

Esse modelo, embora represente mais detalhadamente cada elemento do TPC, apresenta algumas dificuldades e limitações, como a não representação de elementos não lineares e a necessidade de medições internas ao TPC para a determinação dos valores dos seus parâmetros. Além do mais, a validação do modelo, realizada pela comparação da resposta em frequência entre as medições em laboratório e da simulação, é comprovada para frequências de até 1 kHz, aproximadamente.

2.3.2.4 Modelo de Kojovic et al. (1994)

Consciente da dificuldade de acesso aos elementos internos do TPC, especialmente quando esses já estão instalados em subestações, Kojovic et al. (1994) desenvolveram um método para medição em campo da resposta em frequência do TPC a partir do seu terminal secundário. Dessa forma, não seria necessária a desmontagem do TPC nem o acesso a seus componentes internos.

O circuito equivalente do TPC adotado foi o mesmo circuito simplificado proposto por Kezunovic et al. (1992). Porém, Kojovic et al. (1994) optaram por representar o circuito supressor de ferroressonância de outra maneira. Conforme mostra o circuito equivalente da Figura 2.10, os autores propuseram incluir o acoplamento mútuo (M) do reator L_f do modelo de Kezunovic et al. (1992).

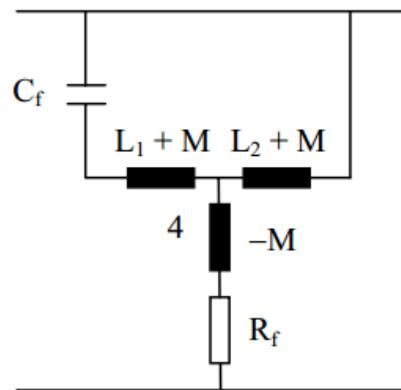


Figura 2.10 – Circuito equivalente do filtro supressor de ferroressonância proposto por Kojovic et al. (1994). Retirado de Fernandes Junior (1999).

Nessa modelagem, os valores dos parâmetros do circuito equivalente do TPC são estimados através de um método de ajuste de curvas aplicado à amplitude da resposta em frequência utilizando o MATLAB[®]. Conforme analisa Fernandes Júnior (2003), o trabalho de Kojovic et al. (1994) limita-se à validação no domínio da frequência, faltando sua validação no domínio do tempo.

2.3.2.5 Modelo de Martí et al. (1997)

Martí et al. (1997) desenvolveram um modelo de TPC para estudos de transitórios a partir de uma melhor representação de seu TPI. Esse transformador intermediário é representado por um circuito equivalente a parâmetros concentrados de um transformador monofásico de dois enrolamentos para altas frequências, exibido na Figura 2.11, proposto por Chimklai e Martí (1995). Nessa representação, estão inclusas diversas capacitâncias parasitas do transformador, como as dos próprios enrolamentos (C_H e C_L), entre enrolamentos (C_{PS}) e dos enrolamentos à terra (C_p e C_s). Além disso, ainda conta com elementos dependentes de frequência, como a impedância de dispersão ($Z_{disp}(\omega)$) e ramo de magnetização do núcleo ($Z_m(\omega)$).

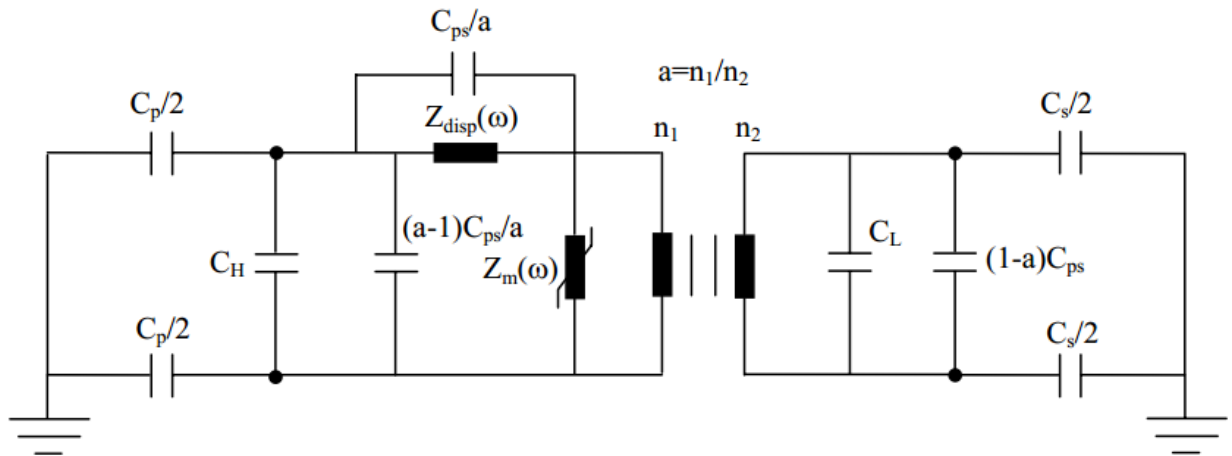


Figura 2.11 – Circuito equivalente para altas frequências de um transformador de dois enrolamentos proposto por Chimklai e Martí (1995). Retirado de Fernandes Junior (1999).

Chimklai e Martí (1995) indicaram que a impedância $Z_{disp}(\omega)$ em paralelo com C_{PS}/a , referida no trabalho como $Z_{short}(\omega)$, equivale à impedância de curto-circuito medida a partir dos testes de curto-circuito. Além disso, afirmam que essa impedância e todas as outras capacitâncias do circuito equivalente podem ser obtidas diretamente através de simples medições. Para melhor representar a impedância $Z_{short}(\omega)$, que é composta de vários picos ressonantes, os autores propuseram implementar uma série de blocos RLC, conforme ilustra a Figura 2.12, onde cada bloco representaria um pico de ressonância.

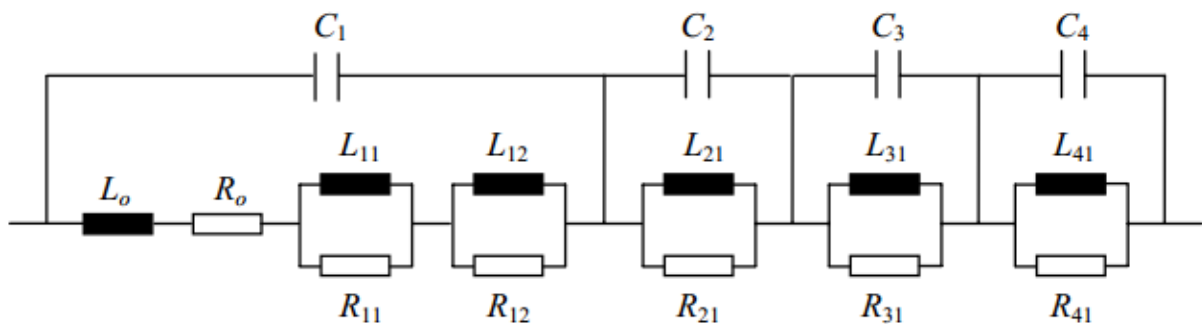


Figura 2.12 – Representação de $Z_{short}(\omega)$ proposta por Chimklai e Martí (1995). Retirado de Fernandes Junior (1999).

Caso seja de interesse representar apenas a primeira região de ressonância da resposta em frequência dessa impedância de curto-circuito, para transitórios acima de alguns quilohertz, Chimklai e Martí (1995) propuseram o circuito da Figura 2.13 como uma aproximação ao circuito anterior. Assim, R_0 e L_0 seriam calculados na frequência fundamental, e C_1 estimado para a frequência da ocorrência do primeiro pico ressonante.

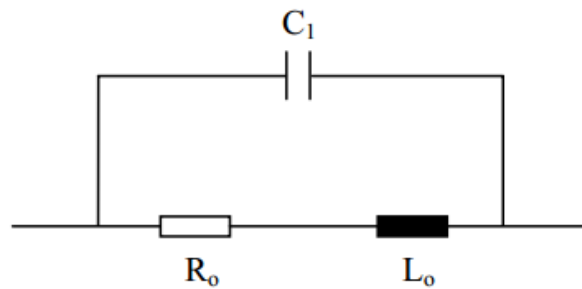


Figura 2.13 – Representação aproximada de $Z_{short}(\omega)$ proposta por Chimklai e Martí (1995). Retirado de Fernandes Júnior (1999).

Assim, a partir do modelo bem fundamentado de seu transformador intermediário, Martí et al. (1997) desenvolveram um modelo completo de TPC combinando, ao TPI, a coluna capacitiva, reator de compensação e circuito supressor de ferroressonância. Entretanto, os autores não especificam a forma de modelagem desses outros componentes. Ademais, esse modelo concentra todos os efeitos dependentes da frequência no ramo de $Z_{short}(\omega)$, negligenciando sua influência nas capacitâncias parasitas ao considerá-las constantes na frequência.

2.3.2.6 Modelo de Fernandes Júnior (1999, 2003)

Fundamentado nas propostas de modelagem de Kezunovic et al. (1992) e Kojovic et al. (1994), Fernandes Júnior (1999) propôs uma metodologia para determinação dos valores dos componentes do circuito elétrico equivalente do TPC a partir de sua curva de resposta em frequência. Esse novo procedimento faz uso do circuito equivalente simplificado do TPC proposto por Kezunovic et al. (1992), Figura 2.9, e do circuito supressor de ferroressonância apresentado por Kojovic et al. (1994), Figura 2.10.

A fim de desenvolver uma expressão analítica do modelo, Fernandes Júnior (1999) dividiu o circuito equivalente em cinco blocos específicos de impedâncias, conforme ilustra a Figura 2.14.

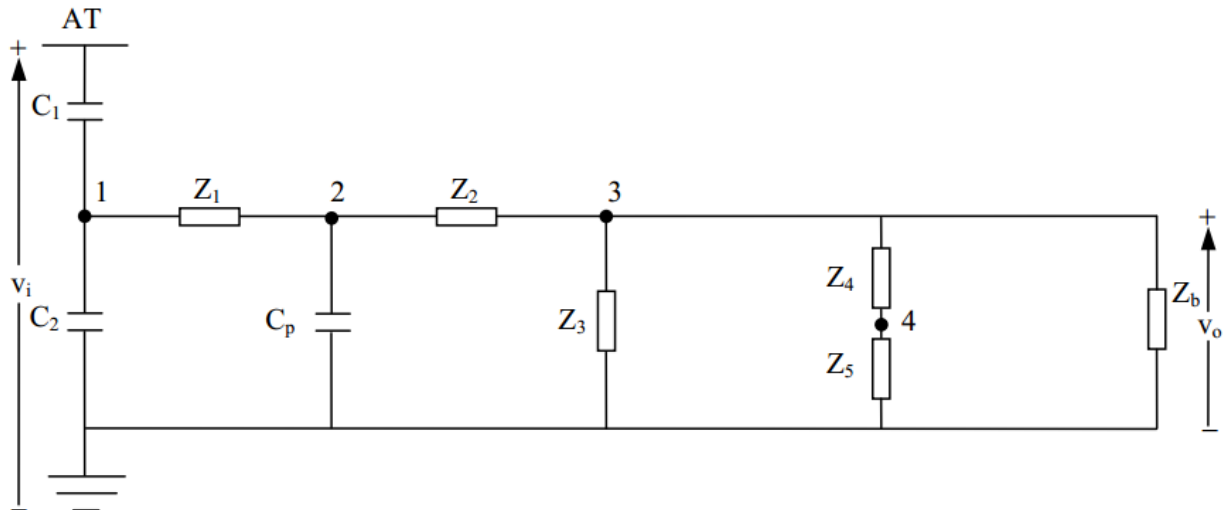


Figura 2.14 – Divisão do modelo equivalente simplificado do TPC em blocos de impedâncias. Retirado de Fernandes Junior (1999).

Cada bloco de impedâncias, equacionados abaixo, é considerado no domínio da frequência, sendo $s = j\omega$. Nas equações, o sinal // representa a ligação em paralelo entre os elementos, $L_{f1} = L_1 + M$ e $L_{f2} = L_2 + M$.

$$Z_1 = (R_c + sL_c) // (1/sC_c) \quad (2.2)$$

$$Z_2 = R_p + sL_p \quad (2.3)$$

$$Z_3 = R_m // sL_m \quad (2.4)$$

$$Z_4 = (sL_{f1} + 1/sC_f) // sL_{f2} \quad (2.5)$$

$$Z_5 = R_f - sM \quad (2.6)$$

Baseado no arranjo desses blocos de impedância, o autor calculou a função de transferência do módulo da relação de tensão do circuito, em que todos seus coeficientes dependem dos parâmetros elétricos do circuito equivalente do TPC. A essa equação resultante, Fernandes Júnior (1999) aplicou o método dos mínimos quadrados, em conjunto com a ferramenta de otimização de Levenberg-Marquardt, para aproximar a curva da resposta em frequência do TPC. O objetivo dessa aproximação é a estimação de todos os parâmetros ($C_1, C_2, R_c, L_c, C_c, C_p, R_p, L_p, R_m, L_m, L_{f1}, C_f, L_{f2}, R_f$ e M) componentes do circuito equivalente simplificado adotado.

A validação da proposta foi realizada comparando as respostas de frequência obtidas pela medição em laboratório com as simulações do modelo no MICROTRAN[®]. Pequenos erros de amplitude e fase na faixa entre 10 Hz e 10 kHz foram verificados. Contudo, essa proposta de estimação é limitada aos parâmetros lineares do modelo, não sendo analisados elementos não lineares.

Posteriormente, Fernandes Júnior (2003), em sua tese de doutorado, buscando aprimorar sua modelagem, propôs algumas mudanças em seu trabalho, aplicando análises no domínio da frequência e do tempo. Com estudos no domínio da frequência, através de medições de amplitude e fase da resposta em frequência até 10 kHz do TPC, o autor buscou estimar os valores dos parâmetros lineares e capacitâncias parasitas do modelo. Por outro lado, através da pesquisa no domínio do tempo, o autor modelou os elementos não lineares do TPC, como o TPI, reator de compensação, circuito supressor de ferroressonância e elemento limitador de tensão.

Em sua nova abordagem, Fernandes Júnior (2003) segue os passos de seu estudo anterior, descritos previamente, até o momento da aproximação da resposta em frequência do TPC pela função de transferência do modelo equivalente. Agora, ao invés de implementar a aproximação por mínimos quadrados, que apresentava problemas de convergência em algumas situações, foram testados dois métodos baseados no método de Newton: Levenberg-Marquardt e Newton Completo. Em que, após uma análise comparativa, por ser de execução mais rápida, foi dada preferência ao emprego do método de Levenberg-Marquardt.

Além dessa alteração, o levantamento dos dados necessários à modelagem passa a ser realizado de duas maneiras: obtenção da resposta em frequência da relação de tensão do TPC e medições das curvas de saturação dos componentes que contém núcleo de ferro. Sendo a primeira responsável por gerar os dados de entrada na estimação dos parâmetros lineares do circuito, e a segunda para a representação de seus elementos não lineares.

Desse modo, Fernandes Júnior (2003) melhorou a convergência do processo de estimação dos elementos lineares do circuito equivalente e, ao incluir elementos não lineares, como as características do TPI, reator de compensação, para-raios do circuito de proteção e circuito supressor de ferroressonância, tornou seu modelo mais realista frente a simulações digitais no domínio do tempo. Porém, apesar de tais aprimoramentos, o modelo é válido somente para frequências de até 10 kHz.

2.4 Considerações Finais

Conforme apresentado, apesar de diversas propostas, ainda não existe uma metodologia unânime de modelagem para TPIs e TPCs para análise de transitórios eletromagnéticos em altas frequências. Os modelos disponíveis na literatura apresentam limitações, tais como restrição aos estudos em baixas e médias frequências, geralmente até 10 kHz, necessidade de saber os valores de todos seus parâmetros elétricos e acoplamentos mútuos, indutivos e capacitivos, além de suas características físicas e construtivas.

Contudo, ao se analisar transitórios eletromagnéticos, os modelos devem considerar também comportamentos não lineares e efeitos dependentes da frequência. De modo a suprir essa necessidade, esse trabalho apresenta uma alternativa de modelagem de TPIs e TPCs para estudos de transitórios eletromagnéticos que resultam em frequências de até 3 MHz.

3 METODOLOGIA PROPOSTA

3.1 Considerações Gerais

A modelagem matemática de qualquer processo consiste em um sistema de equações, acompanhadas de determinados dados de entrada, cuja solução seja representativa de seu sistema. Esse modelo de processos ou equipamentos é aplicado no estudo de seus fenômenos, monitoramento de seus estados e simulação de seu desempenho quando exposto a diversas condições de operação.

Ao tratar de equipamentos elétricos, como transformadores, a literatura remete a três principais grupos de modelagem: Caixa Branca, Caixa Preta e Caixa Cinza. O método Caixa Branca requer características específicas do instrumento a ser modelado, como conhecimentos detalhados de sua geometria interna e propriedades físicas dos materiais que o compõem. No entanto, tais informações são, geralmente, restritas aos fabricantes, o que pode tornar essa opção inviável. Essa limitação é justamente o que explica a maior difusão da modelagem por Caixa Preta na literatura. Nessa proposta, em que não são necessárias informações de seu interior, o equipamento é representado através do seu comportamento visto a partir de seus terminais, ou seja, da análise de seus dados de entrada e saída. Por fim, categoriza-se como Caixa Cinza aquele método que, a partir de algum conhecimento prévio do equipamento, utiliza informações auxiliares no processo de identificação de seus parâmetros.

O presente trabalho faz uso do conceito de modelagem Caixa Preta, em que, ao referir o transformador de potencial como um quadripolo, busca-se representar seu comportamento visto a partir de seus terminais para uma determinada faixa de frequência. Um quadriplo é uma rede de duas portas, ou, em outras palavras, um circuito de dois terminais, entrada e saída, conforme mostra a Figura 3.1.

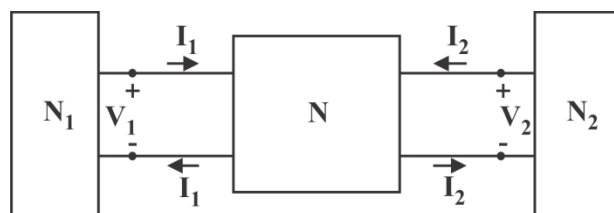


Figura 3.1 – Representação de um Quadripolo e suas relações.

O circuito, dependendo da escolha entre tensão ou corrente como variável independente, pode ser representado por diferentes maneiras. Nesse trabalho, optou-se por expressar as correntes I_1 e I_2 em termos de V_1 e V_2 , conforme as equações (3.1) e (3.2) respectivamente.

$$I_1 = Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 \quad (3.1)$$

$$I_2 = Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 \quad (3.2)$$

Ao relacionar as variáveis dessa forma, diz-se que o quadripolo está representado pelos seus parâmetros de Admitância, também sendo conhecidas como admitâncias de curto-circuito pelo fato de serem medidas em uma porta enquanto a outra é curto-circuitada. Quando representados na forma matricial, esses elementos constituem a Matriz Admitância de Curto-circuito, de acordo com a equação (3.3).

$$Y = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Nessa matriz, os elementos são conhecidos como:

- Y_{11} , admitância de entrada com a saída em curto;
- Y_{12} , transadmitância com a entrada em curto;
- Y_{21} , transadmitância com a saída em curto;
- Y_{22} , admitância da saída com a entrada em curto.

Estabelecidos o tipo de metodologia de modelagem e a representação do transformador por sua matriz de admitâncias de curto-circuito, a proposta deste trabalho pode ser introduzida. A fim de explicar mais detalhadamente a metodologia proposta, dividiu-se a obtenção do modelo em três etapas, descritas a seguir.

3.2 SFRA e Medições no Domínio da Frequência

A primeira etapa do processo de modelagem consiste na obtenção da matriz de admitâncias de curto-circuito, de ordem 2×2 , do transformador de potencial a ser representado para uma ampla faixa de frequências. O método direto para obter tais parâmetros, conforme comentando, é através da aplicação de testes de curto-circuito no equipamento. Nesse procedimento, sinais puramente senoidais, com frequências variando dentro de uma faixa de

interesse, são aplicados a um terminal do transformador enquanto o outro enrolamento é aterrado e posto em curto-circuito. Esse processo de varredura de frequências é conhecido pela sigla FRA, que, do inglês, significa *Frequency Response Analysis*. A Figura 3.2, em conjunto com as equações (3.4) e (3.5), mostra o processo de obtenção dos elementos Y_{11} e Y_{21} quando o enrolamento secundário está em curto-circuito. Por outro lado, a Figura 3.3 e as equações (3.6) e (3.7), para o cálculo de Y_{22} e Y_{12} , retratam o caso em que o terminal primário está em curto-circuito.

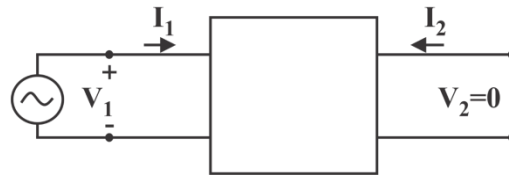


Figura 3.2 – Esquema para medição direta de Y_{11} e Y_{21} .

$$Y_{11} = \frac{I_1}{V_1} \quad (3.4)$$

$$Y_{21} = \frac{I_2}{V_1} \quad (3.5)$$

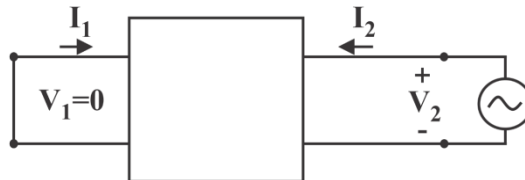


Figura 3.3 – Esquema para medição direta de Y_{22} e Y_{12} .

$$Y_{22} = \frac{I_2}{V_2} \quad (3.6)$$

$$Y_{12} = \frac{I_1}{V_2} \quad (3.7)$$

A medição desses elementos deve ser realizada para um amplo espectro de frequências, uma vez que essa é uma das principais características da modelagem a ser desenvolvida. Tradicionalmente, a aquisição de tais dados é realizada por instrumentos de alta precisão, com destaque para o analisador de rede vetorial, *Vector Network Analyzer* (VNA) em inglês. No entanto, o VNA é um equipamento de elevado preço e de complicado manuseio, que, por vezes,

requer a adaptação de equipamentos externos para realizar suas medições. Nesse contexto, o presente trabalho utiliza um instrumento de medição de resposta em frequência por varredura (SFRA – *Sweep Frequency-Response Analyzer*) como uma alternativa, econômica e de mais fácil aplicação, à utilização do VNA no processo de obtenção da matriz de admitâncias de curto-circuito de transformadores de potencial.

Os equipamentos SFRA são projetados com o intuito de detectar possíveis deformações mecânicas em transformadores de potência através da análise de sua relação de tensões. Assim, sendo originalmente concebido para outro propósito, esse instrumento não apresenta a possibilidade de medição direta da corrente elétrica em seus enrolamentos, cujo valor é necessário para o cálculo das admitâncias. No entanto, essa medição pode ser realizada de forma indireta, através de um resistor shunt interno de $50\ \Omega$ do equipamento. Esse procedimento é explicado a partir da Figura 3.4, uma adaptação da imagem original publicada por Holdyk et al. (2014), que ilustra o diagrama interno do SFRA, dentro das linhas pontilhadas, conectado a um transformador.

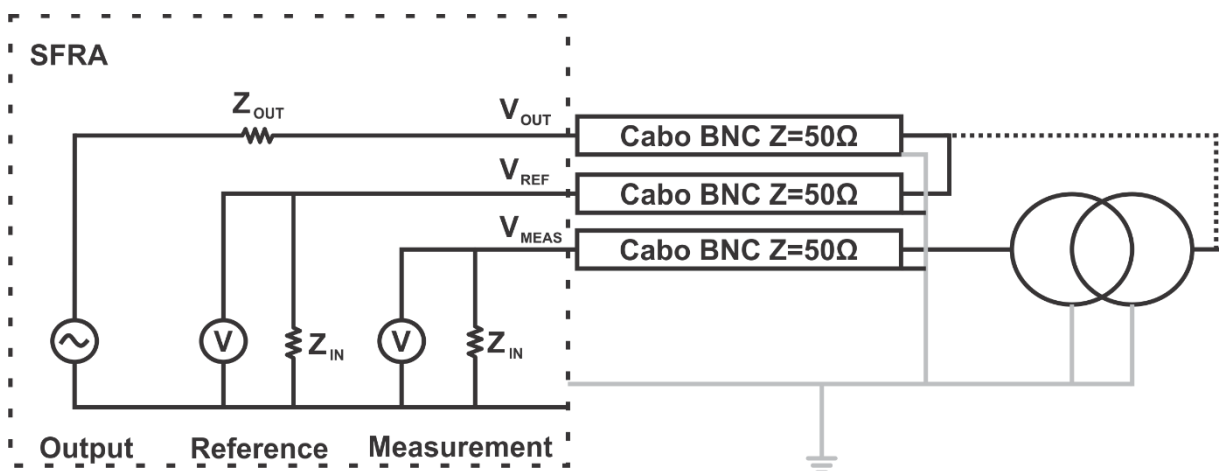


Figura 3.4 – Diagrama interno de um SFRA e sua conexão a um transformador. Adaptado de Holdyk et al. (2014).

O equipamento é composto de um terminal conectado à fonte de tensão, denominado *Output* (V_{OUT}), por onde é injetado o sinal de tensão, e dois terminais de entrada, *Reference* e *Measurement*. Enquanto que os terminais *Output* e *Reference* estão interconectados, medindo diretamente a tensão do terminal selecionado do transformador, o terminal *Measurement* mede a tensão do outro terminal. Ressalta-se que, em todas as medições do ensaio, é requerida a utilização de cabos padrão, coaxiais BNC de $50\ \Omega$, para o devido casamento de impedâncias com a impedância de entrada do SFRA (Z_{IN}). Assim, o cálculo indireto da corrente de entrada

do SFRA pode ser realizado através da impedância de entrada do equipamento (Z_{IN}) e a tensão no terminal *Measurement* (V_{MEAS}), conforme equação (3.8).

$$I_{MEAS} = \frac{V_{MEAS}}{Z_{IN}} = \frac{V_{MEAS}}{50} \quad (3.8)$$

Além disso, normalmente, o SFRA não fornece o valor da tensão medida. Através da injeção de tensão no seu terminal *Output*, o equipamento disponibiliza apenas a relação de tensão, $R(s)$, entre seus terminais *Measurement* e *Reference*, conforme equação (3.9).

$$R(s) = \frac{V_{MEAS}(s)}{V_{REF}(s)} \quad (3.9)$$

Todavia, de forma a contornar tal empecilho, Holdyk et al. (2014), ao estabelecer conexões especiais entre o SFRA e um transformador de potência, propôs um novo procedimento para a obtenção da matriz de admitâncias de curto-circuito. Essa técnica foi adaptada ao instrumento utilizado no presente trabalho, de maneira a medir as relações de tensão de transformadores de potencial, a ser representada por uma matriz de ordem 2x2 análoga à matriz de admitâncias.

A Figura 3.5 mostra as conexões especiais entre o equipamento SFRA e um TP genérico para medição das relações de tensão R_{11} e R_{12} , onde os termos *Measurement*, *Reference* e *Output* representam os terminais disponíveis no SFRA, enquanto que, no esquema do TP, H representa terminal primário, X terminal secundário e, para a notação da matriz admitância (2x2), $H_1 = 1$, $H_2 = 2$.

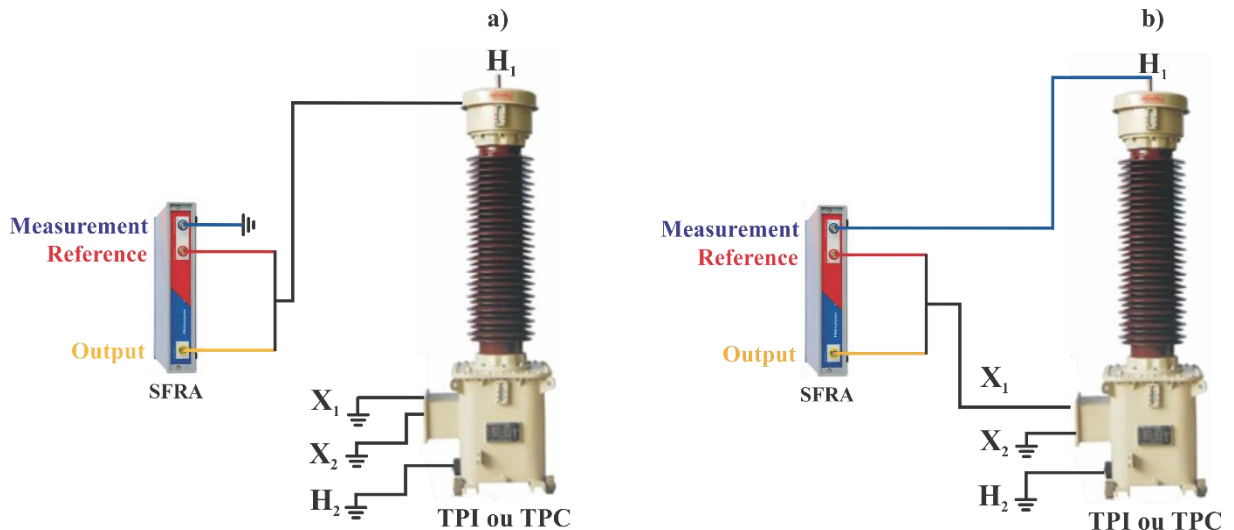


Figura 3.5 – Esquema de conexão entre SFRA e TP para medição das relações de tensão: a) R11 e b) R12.

A partir da Figura 3.5a, a medição da relação de tensão V_{22} pode ser realizada pela troca da conexão entre os terminais H1 e X2, ficando X1 ligado às saídas *Reference* e *Output* do SFRA e o terminal H1 aterrado. Já a obtenção de V_{21} , a partir da Figura 3.5b, passa pela inversão das ligações dos terminais H1 e X1, ficando o terminal X1 ligado à *Measurement* e H1 conectado à *Reference* e *Output*. Além de seguir esse esquema de conexões, ao ensaiar os elementos da diagonal principal, é importante unir as blindagens dos cabos do SFRA sem aterrâ-las. O aterramento só deve ser realizado na medição dos elementos fora da diagonal principal.

Nesse trabalho, essas medições foram realizadas por um SFRA comercial, pertencente à CEEE-GT, o FRAnalyzer fabricado pela empresa OMICRON electronics. A aquisição dos dados, após a conexão do equipamento ao TP, é realizada através da comunicação do SFRA com um computador através do software FRAnalyzer, desenvolvido pela própria empresa. Nesse ambiente computacional, o programa permite ao usuário, entre outros fatores, determinar o número de amostras, a serem aferidas no domínio da frequência, o modo de distribuição dessas amostras (linear ou logaritmicamente) e a faixa de frequências a ser varrida.

Deve-se ressaltar que o sucesso dessa proposta é totalmente dependente do resultado das medições recentemente descritas. Ao final dessa etapa, tem-se a matriz R de relações de tensão em função da frequência, de ordem 2×2 , conforme equação (3.10).

$$R(s) = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

3.3 Cálculo da Matriz de Admitâncias

Assim, através das relações de tensão obtidas no emprego do SFRA com conexões especiais, juntamente com a medição indireta da corrente elétrica no terminal, a matriz de admitâncias do TP a ser modelado pode ser calculada. Os passos para a construção dessa matriz, implementados em MATLAB[®], são descritos a seguir.

Os elementos da matriz $R(s)$ são disponibilizados, pelo SFRA, em um arquivo de extensão “.csv”. Esses elementos são expressos na forma polar, ou seja, em valores de magnitude (“ V_{ji} ”, em decibéis) e fase (“ F_{ji} ”, em graus). A partir desses dados, além da conversão da magnitude de logaritmo para linear, é necessário transformar essa relação de tensões para a forma retangular, a ser chamada de “ T_{ji} ”. As equações (3.11) e (3.12) realizam, consecutivamente, essas conversões para os elementos da diagonal principal (“ T_{ii} ”) e para os elementos fora da diagonal (“ T_{ji} ”).

$$T_{ii} = 10^{(V_{ii}/20)} e^{j.(F_{ii}.\pi/180)} \quad (3.11)$$

$$T_{ji} = 10^{(V_{ji}/20)} e^{j.(F_{ji}.\pi/180)} \quad (3.12)$$

A partir daí, os elementos da matriz de admitâncias $Y(s)$ podem ser corretamente calculados. Os componentes da diagonal principal, chamados de admitâncias próprias, são ajustados pela equação (3.13).

$$Y_{ii}(s) = \frac{V_{MEAS}(s)}{Z_{IN}(V_{REF}(s) - V_{MEAS}(s))} \quad (3.13)$$

Visto que, normalmente, o SFRA não disponibiliza diretamente as tensões medidas, somente a relação $Mag_{db} = 20 * \log_{10}(V_{MEAS}(s)/V_{REF}(s))$, pode-se manipular a equação (3.13) dividindo seu numerador e denominador por “ $V_{REF}(s)$ ”, obtendo a equação (3.14) a seguir.

$$Y_{ii}(s) = \frac{V_{MEAS}(s)/V_{REF}(s)}{Z_{IN}(1 - (V_{MEAS}(s)/V_{REF}(s)))} \quad (3.14)$$

Por fim, designando “ T_{ii} ” igual à relação $V_{MEAS}(s)/V_{REF}(s)$, com valores já convertidos conforme processo da equação (3.11), e assumindo o valor de 50Ω da impedância interna do instrumento, “ Z_{IN} ”, os valores das admitâncias próprias são obtidos através da equação (3.15).

$$Y_{ii}(s) = \frac{T_{ii}(s)}{50(1 - T_{ii}(s))} \quad (3.15)$$

O procedimento de correção para as admitâncias mútuas entre os terminais j e i , representadas pelos elementos fora da diagonal principal da matriz de admitâncias, é apresentado na equação (3.16).

$$Y_{ji}(s) = - \left(\frac{V_{MEAS}(s)}{Z_{IN} \cdot V_{REF}(s)} + Y_{jj} \frac{V_{MEAS}(s)}{V_{REF}(s)} \right) \quad (3.16)$$

De maneira similar ao que foi feito com as equações (3.13) e (3.14), e assumindo o valor de 50Ω para “ Z_{IN} ”, as admitâncias mútuas resultam da equação (3.17).

$$Y_{ji}(s) = - \left(\frac{T_{ji}(s)}{50} + Y_{jj} \cdot T_{ji} \right) \quad (3.17)$$

3.4 Aproximação Racional

Os passos descritos até agora permitem a criação da Matriz de Admitâncias do TP ensaiado, representando-o matematicamente para determinada faixa de frequências. O objetivo desta última etapa é a obtenção de um circuito equivalente cuja matriz de admitâncias nodal corresponda à essa matriz do transformador original. Para isso, a matriz resultante do estágio anterior é submetida a uma aproximação de respostas em frequência por meio de funções racionais. Essa atividade é realizada pelo método do Ajuste Matricial desenvolvido por Gustavsen (2009), que é uma rotina adaptada do Ajuste Vetorial proposta por Gustavsen e Semlyen (1999).

3.4.1 Método do Ajuste Vetorial por Gustavsen e Semlyen (1999)

O método do Ajuste Vetorial aproxima a resposta em frequência, $f(s)$, por funções racionais expressas em frações parciais, conforme equação (3.18). Nessa equação, as variáveis

reais “d” e “h” são opcionais, enquanto que “c” e “a”, que podem ser escalares reais ou pares complexos conjugados, representam, respectivamente, os resíduos e polos das frações.

$$f(s) = \sum_{n=1}^N \frac{c_n}{s - a_n} + d + sh \quad (3.18)$$

O problema consiste em estimar todos esses coeficientes a fim de que a aproximação por mínimos quadrados de $f(s)$ seja satisfeita em todo o intervalo de frequência estipulado. As variáveis da equação acima são determinadas pelo método de ajuste vetorial como um problema linear de dois estágios, ambos com polos conhecidos.

3.4.1.1 Identificação dos polos

O primeiro estágio inicia com a estimação de valores iniciais para os polos da equação (3.18), a serem simbolizados por \bar{a}_n . Posteriormente define-se uma função desconhecida, $\sigma(s)$, que escalona a função objetivo pelo produto $\sigma(s) \cdot f(s)$. A essa função desconhecida, também é introduzida uma aproximação racional. Assim, a partir dessas suposições, chega-se à equação (3.19).

$$\begin{bmatrix} \sigma(s) \cdot f(s) \\ \sigma(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N \frac{c_n}{s - \bar{a}_n} + d + sh \\ \sum_{n=1}^N \frac{\tilde{c}_n}{s - \bar{a}_n} + 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Nota-se que as funções $\sigma(s)$ e $\sigma(s) \cdot f(s)$ compartilham dos mesmo polos e que a possibilidade de ambiguidade na solução de $\sigma(s)$ foi eliminada ao aproximá-la à 1 em frequências muito altas. Ao multiplicar a segunda linha da equação (3.19) por $f(s)$, obtém-se a relação da equação (3.20), que também por ser expressa pela equação (3.21).

$$\left(\sum_{n=1}^N \frac{c_n}{s - \bar{a}_n} + d + sh \right) = \left(\sum_{n=1}^N \frac{\tilde{c}_n}{s - \bar{a}_n} + 1 \right) f(s) \quad (3.20)$$

$$(\sigma f)_{aproximado}(s) = \sigma_{aproximdo}(s) \cdot f(s) \quad (3.21)$$

Assim, a equação (3.20) é linear em relação às suas variáveis c_n , d , h e \tilde{c}_n e forma, para todos os pontos da faixa de frequência especificada, um sistema sobredeterminado de equações do tipo $A \cdot x = b$, em que as variáveis estão alocadas no vetor solução x , a ser resolvido como um problema de mínimos quadrados. Dessa mesma equação (3.20), ao reescrever $(\sigma f)_{aproximado}(s)$ e $\sigma_{aproximdo}(s)$ na forma fracional apresentada, respectivamente, pelas equações (3.22) e (3.23), deriva-se uma função racional aproximada para $f(s)$, expressa pela equação (3.24).

$$(\sigma f)_{aproximado}(s) = h \frac{\prod_{n=1}^{N+1} (s - Z_n)}{\prod_{n=1}^N (s - \bar{a}_n)} \quad (3.22)$$

$$\sigma_{aproximado}(s) = \frac{\prod_{n=1}^N (s - \tilde{Z}_n)}{\prod_{n=1}^N (s - \bar{a}_n)} \quad (3.23)$$

$$f(s) = \frac{(\sigma f)_{aproximado}(s)}{\sigma_{aproximdo}(s)} = h \frac{\prod_{n=1}^{N+1} (s - Z_n)}{\prod_{n=1}^N (s - \tilde{Z}_n)} \quad (3.24)$$

A equação (3.24) revela o cancelamento dos polos estimados inicialmente para $f(s)$, em consequência da atribuição dos mesmos polos iniciais para as funções $(\sigma f)_{aproximado}(s)$ e $\sigma_{aproximdo}(s)$. Essa mesma equação ainda mostra que os polos de $f(s)$ são equivalentes aos zeros de $\sigma_{aproximdo}(s)$. Assim, através do cálculo dos zeros de $\sigma_{aproximdo}(s)$, obtém-se um conjunto de polos propício para aproximar a função $f(s)$ original.

Os zeros de $\sigma_{aproximdo}(s)$ são calculados como os autovalores da matriz H , definida pela equação (3.25), em que A é uma matriz diagonal contendo os polos iniciais estimados, b é um vetor coluna composto apenas pelo valor 1 e \tilde{c}^T é um vetor linha com valores dos resíduos da função σ .

$$H = A - b\tilde{c}^T \quad (3.25)$$

3.4.1.2 Identificação dos resíduos

Os resíduos c_n são calculados a partir da expressão (3.20). Os valores calculados para os zeros de $\sigma_{aproximado}(s)$, além de, obviamente, zerarem os valores de \tilde{c}_n , são utilizados como um novo conjunto de polos \bar{a}_n para a função $(\sigma f)_{aproximado}(s)$. Esse processo resulta na aproximação dada pela equação (3.26).

$$\left(\sum_{n=1}^N \frac{c_n}{s - \bar{a}_n} + d + sh \right) \approx f(s) \quad (3.26)$$

Em seguida, determina-se, novamente através do problema linear sobredeterminado da forma $A \cdot x = b$, o vetor solução x . Porém, agora, esse vetor apresentará os valores de c_n , d e h .

3.4.1.3 Ferramenta de Ajuste Matricial

A ferramenta do Ajuste Matricial é de domínio público e está livremente disponível para fins não-comerciais no programa MATLAB[®]. Esse arquivo contém os códigos-fonte das rotinas necessárias para a criação de modelos racionais a partir de dados no domínio da frequência, com a possibilidade de edição de algumas configurações a fim de se melhorar sua resposta, e exemplos de aplicação. Entre esses códigos, destaque deve ser dado ao “VFdriver”, que é responsável pelo gerenciamento da aproximação racional. Em sua versão mais recente, a ferramenta apresenta a rotina “RPdriver” que tem a função de forçar a passividade do modelo gerado através da perturbação dos autovalores de suas matrizes de resíduos.

A matriz de admitâncias de curto-circuito, calculada na seção anterior, é fornecida como dado de entrada à essa ferramenta de Ajuste Matricial. Como resultado desse processo, têm-se uma função racional aproximada, expressa na forma de espaço de estados ou modelo de polos e resíduos, e seu circuito equivalente RLC, disponibilizado sob a forma de um arquivo texto. Esse arquivo RLC, gerado pela rotina “netgen_ATP” da ferramenta, é próprio para aplicação em programas de análises de transitórios eletromagnéticos, tal como o *Alternative Transients Program* (ATP).

3.5 Considerações Finais

Esse capítulo descreveu a metodologia proposta para a modelagem para TPC e TPI. O procedimento começa com a medição da resposta em frequência do TP a ser modelado. Esse ensaio é realizado com um SFRA comercial, que por não ser originalmente concebido para essa função, precisa de conexões especiais entre seus terminais e o TP. O resultado do ensaio representa as relações de tensão entre os terminais medidos, tendo seus valores expressos na forma polar, através de magnitude (em decibel) e fase (em graus).

Os dados de relação de transformação obtidos pelo SFRA são importados ao MATLAB, onde são manipulados a fim de corretamente calcular a matriz de admitâncias de curto-circuito representativa do TP em questão. Essa matriz é, então, aplicada à ferramenta de Ajuste Matricial, que fornece, como resultados, sua matriz aproximada e um circuito equivalente RLC próprio para utilização em programas de análises de transitórios eletromagnéticos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Considerações Gerais

A metodologia proposta para a modelagem de transformadores de potencial indutivos e capacitivos, descrita na seção anterior, é posta em prática nesse capítulo. Assim, são desenvolvidos modelos para três transformadores de potencial, sendo dois TPIs e um TPC.

O primeiro TPI modelado, produzido pela SIEMENS, tem classe de tensão de 13,8 kV e foi disponibilizado pelo Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica (NUPEDEE) da UFSM. Os dados de placa desse transformador estão listados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Dados de Placa TPI SIEMENS de 13,8 kV

Característica	Valor
Tensão Primária (kV)	$\frac{13,8}{\sqrt{3}}$
Tensão Secundária (V)	$\frac{115}{\sqrt{3}}$
Relação de Transformação	120:1
Frequência (Hz)	60
Classe de Exatidão	0,3WX-0,6Y

Os outros dois transformadores de potencial modelados, fabricados pela ABB, pertencem à CEEE-GT e tiveram suas respostas em frequência medidas durante visitas técnicas. Tratam-se de um TPI de classe de tensão 138 kV, localizado na sede da CEEE-GT em Salto Do Jacuí-RS, e um TPC de 230 kV, que se encontra no depósito de equipamentos da CEEE-GT em Canoas-RS. As principais características desses TPI e TPC são apresentadas, respectivamente, na Tabela 4.3 e Tabela 4.4.

Tabela 4.3 - Dados de Placa TPI ABB de 138 kV

Característica	Valor
Tensão Primária (kV)	$\frac{138}{\sqrt{3}}$
Tensão Secundária (V)	$\frac{100}{\sqrt{3}}$
Relação de Transformação	1380:1
Frequência (Hz)	60
Classe de Exatidão	0,3 P 400

Tabela 4.4 - Dados de Placa TPC ABB de 230 kV

Característica	Valor
Tensão Primária (kV)	$\frac{230}{\sqrt{3}}$
Tensão Secundária (V)	X1-X3 115 X2-X3 $\frac{115}{\sqrt{3}}$
Tensão Intermediária (kV)	$\frac{23}{\sqrt{3}}$
Relação de Transformação	1154,7 - 1380:1
Capacitâncias (μF)	C1 0,0129 C2 0,1160
Frequência (Hz)	60
Classe de Exatidão	0,3

A medição da resposta em frequência de todos os TPs foi realizada com um SFRA comercial da empresa OMICRON electronics, disponibilizado pela CEEE-GT. O gerenciamento da aquisição dos dados desse ensaio é realizado por meio do programa FRAnalyzer, software desenvolvido pela mesma companhia do SFRA utilizado.

A validação dos modelos é realizada a partir da análise comparativa entre as respostas resultantes da aplicação de uma função ao degrau de tensão realizado na prática no TP e a resposta do seu modelo sob as mesmas condições através de simulação no ATP-EMTP. Para comprovar a validade de sua resposta na análise de transitórios, os modelos gerados são

aplicados em equivalentes reais de SEP, onde são simulados eventos de descarga atmosférica, curto-circuito e chaveamentos.

4.2 Criação dos Modelos

A medição da resposta em frequência do TP através do emprego do SFRA comercial é a etapa fundamental para a criação de seu modelo caixa preta. No entanto, previamente a qualquer medição, recomenda-se que o SFRA seja devidamente calibrado. Para isso, cada cabo de medição, do tipo BNC de 50 Ω , deve ser ligado a cada uma das três saídas do SFRA (*Output*, *Measurement* e *Reference*). Em seguida, os outros terminais desses três cabos, juntamente com suas blindagens, devem ser colocados em curto-circuito. Após a conexão do SFRA com um computador, o equipamento de medição é ligado e, através do software FRAnalyzer, sua calibração é executada. Salienta-se que este procedimento deverá ser repetido caso ocorra, de forma involuntária, o desligamento do SFRA ou o fechamento do programa.

Feita a calibração do SFRA, um novo arquivo deve ser criado no software FRAnalyzer, onde o gerenciamento das aquisições é realizado. Nesse programa, antes da realização de qualquer medição, devem ser configuradas as opções do ensaio em frequência, definindo a faixa de frequências a ser verificada, o número total de amostras e o modo de distribuição (linear ou logaritmicamente) desses pontos na frequência. Somente após esta etapa é que são realizadas as conexões especiais entre o SFRA e TP, conforme mostrado no Capítulo 3, seção 3.2, para a medição da matriz de relações de tensão do referido TP.

Uma vez realizadas as quatro medições, um arquivo em formato “.csv” é gerado pelo programa FRAnalyzer contendo os valores das relações de tensão, que são apresentados em valores de magnitude (em decibel) e fase (em graus), para toda a faixa de frequência determinada. O fluxograma da Figura 4.1 esquematiza o procedimento da criação de modelos até esse passo.

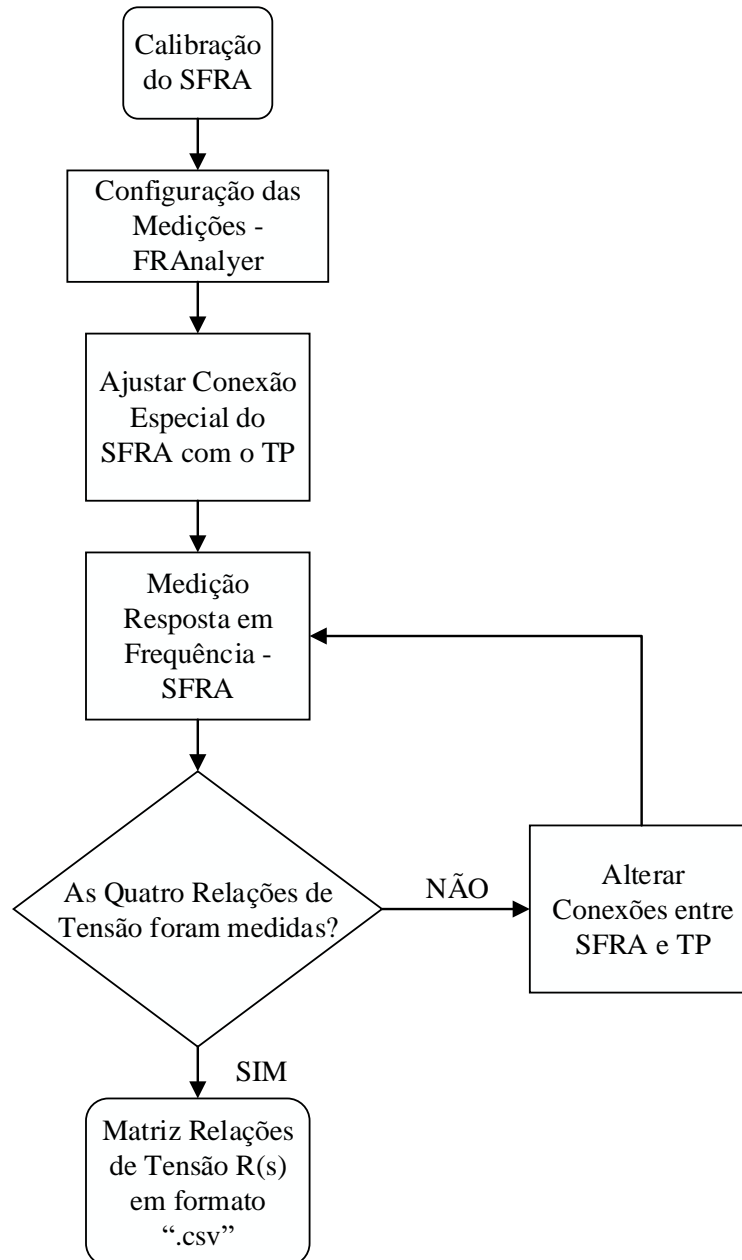


Figura 4.1 – Fluxograma para medição da resposta em frequência do TP.

Realizadas as medições, o arquivo “.csv” é, então, importado pelo MATLAB[®], onde os dados são utilizados para calcular, como descrito na seção 3.3, a matriz de admitâncias do referido TP. Essa matriz, por sua vez, deve ser submetida à aproximação racional pelo método de Ajuste Matricial, introduzido na seção 3.4.

O Ajuste Matricial é aplicado à matriz de admitâncias através de sua ferramenta disponível para MATLAB[®], que, conforme já mencionado, é um conjunto de arquivos das rotinas responsáveis pela aproximação racional e alguns exemplos de aplicação. O código para a modelagem dos TPs foi desenvolvido a partir do exemplo “ex1_Y.m”, arquivo integrante dessa ferramenta, que foi tomado como diretriz para aplicação das rotinas de aproximação.

O código principal para a criação dos modelos dos TPs faz uso de três importantes rotinas auxiliares: VFdriver, RPdriver e netgen_ATP. Cada uma dessas rotinas tem seu próprio código-fonte, que contém configurações com valores padrão, conforme detalha Gustavsen (2009). Essas configurações, porém, podem ser editadas, de maneira a selecionar aquelas que resultam em uma melhor aproximação racional. A Tabela 4.5 mostra uma breve descrição sobre as configurações das rotinas VFdriver e RPdriver que tiveram seu valor alterado do original para a aproximação da resposta dos três TPs analisados nesse trabalho. Recomenda-se, caso seja necessário um melhor entendimento dessas configurações, ou ter detalhes de outras opções, a leitura do guia da ferramenta do Ajuste Matricial, elaborado por Gustavsen (2009), que está disponível na internet.

Tabela 4.5 – Configurações editadas no Ajuste Matricial

Parâmetro	Função
opts.Niter1	Número de iterações do Ajuste Vetorial para aproximação da soma dos elementos da matriz. Obtém conjunto inicial de pólos com pouco esforço computacional.
opts.Niter2	Número de iterações do Ajuste Vetorial para aproximar a matriz inteira.
opts.N	Ordem da aproximação.
opts.poletype	Distribuição, linear ou logaritmica, dos pares complexos conjugados na frequência.
opts.weightparam	Atribuição de pesos às linhas da matriz.
opts.remove_Hfpoles	Opção de remover pólos em frequências abaixo de um valor estipulado.
opts.asymp	Definição da função racional aproximada entre estritamente própria, própria ou imprópria.
RPdriver	Habilitar a rotina que testa a passividade da função.

Cada vez que o código é executado no MATLAB®, os dados originais da matriz de entrada, os resultados da sua aproximação, e o erro são apresentados ao usuário através de

gráficos da magnitude e fase dos elementos da matriz para a faixa de frequências em análise. A partir da seleção do conjunto de configurações das rotinas e do resultado da aproximação, define-se como bom resultado aquele que apresenta boa similaridade entre as curvas da função de entrada e de sua função aproximada.

Ao encontrar uma função resultante satisfatória, a própria ferramenta do Ajuste Matricial do MATLAB[®], a partir da função racional aproximada, cria um circuito equivalente formado por um complexo circuito de elementos resistivos, indutivos e capacitivos que representa o modelo do TP. Essa rede RLC é apresentada na forma de um arquivo texto, em formato “.txt”, e será utilizado no ATPDraw para os estudos de transitórios eletromagnéticos. No entanto, para poder ser diretamente aplicado como qualquer outro elemento elétrico do ATPDraw, esse circuito precisa ser incorporado a um bloco personalizado no ATP, cujo passo a passo para a criação e aplicação é apresentado no Apêndice A deste trabalho. O fluxograma da Figura 4.2 ilustra essa segunda etapa da criação dos modelos.

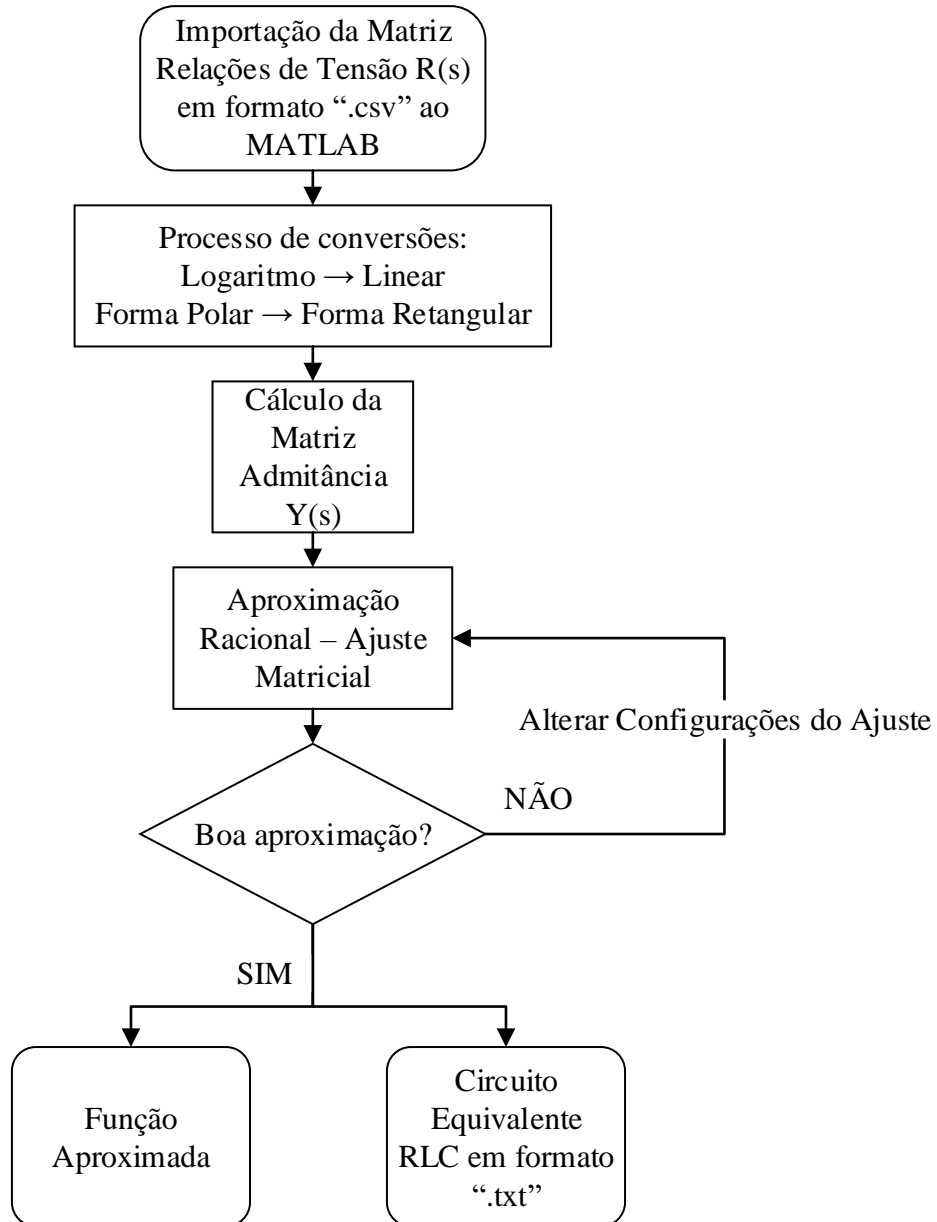


Figura 4.2 – Fluxograma para criação do circuito equivalente do TP.

A seguir são especificadas, para cada um dos transformadores de potencial ensaiados, as características adotadas na medição da resposta em frequência com o SFRA, definidas no programa FRAnalyzer, e na aproximação de sua Matriz de Admitâncias no MATLAB®, segundo as opções apresentadas na Tabela 4.5.

4.2.1 Criação do Modelo do TPI 13,8 kV

A medição da resposta em frequência do TPI de 13,8 kV através do SFRA foi configurada, no FRAnalyzer, com uma varredura de 150 amostras logaritmicamente distribuídas em uma faixa de frequências de 20 Hz a 3 MHz. Os dados desse processo foram

importados para o MATLAB®, onde a matriz de admitâncias do TPI foi calculada e, posteriormente, sujeita à aproximação racional pela ferramenta do método de Ajuste Matricial. A Tabela 4.6 mostra os parâmetros editados na rotina do MATLAB® no processo de aproximação.

Tabela 4.6 – Configuração do Ajuste Matricial para aproximação do TPI 13,8 kV

Parâmetro	Configuração
opts.Niter1	15
opts.Niter2	40
opts.N	140
opts.poletype	Logcmplx
opts.weightparam	2
opts.remove_Hfpoles	1
opts.asymp	3
RPdriver	Habilitado

Definidos os valores desses parâmetros, a rotina de aproximação matricial foi executada no MATLAB®, gerando sua função aproximada e seu circuito equivalente RLC. O resultado desse processo pode ser visualizado na Figura 4.3, que apresenta valores de magnitude, e na Figura 4.4, que exhibe os dados de fase. A Figura 4.3 mostra apenas três curvas pelo fato de a matriz de admitâncias calculada ser simétrica, o que torna desnecessário calcular duas vezes a aproximação para o elemento fora da diagonal principal da matriz.

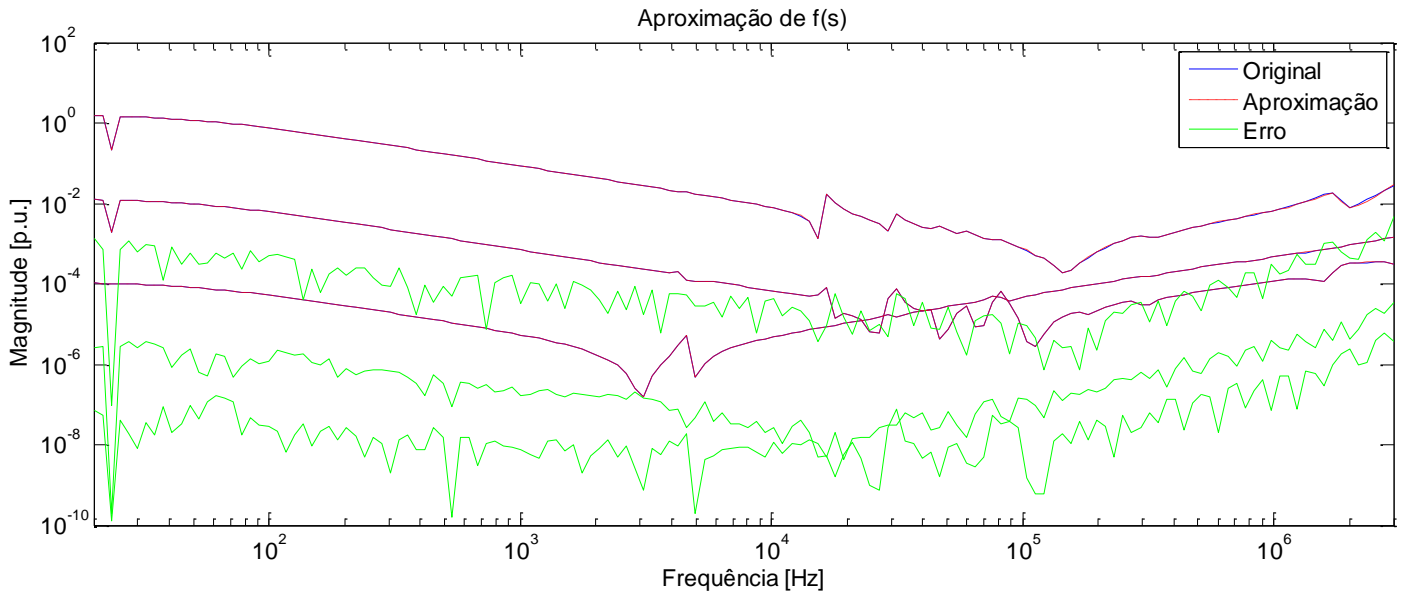


Figura 4.3 – Resultado da aproximação da matriz de admitâncias TPI NUPEDDEE, em magnitude.

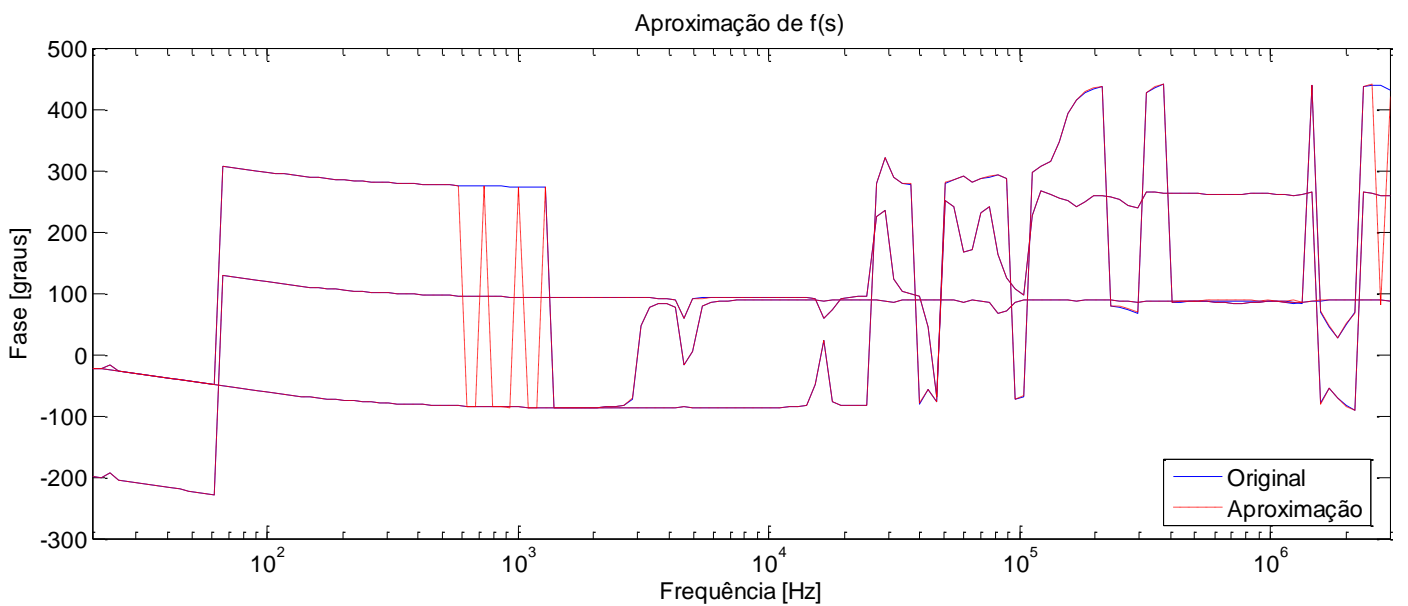


Figura 4.4 – Resultado da aproximação da matriz de admitâncias TPI NUPEDDEE, em fase.

4.2.2 Criação do Modelo do TPI 138 kV

A varredura da resposta em frequência do TPI de 138 kV foi realizada pela medição de 150 amostras logaritmicamente distribuídas em uma faixa de frequências entre 20 Hz e 3 MHz. Importados para o MATLAB®, esses dados serviram como base para o cálculo da matriz de admitâncias do TPI. Nesse mesmo ambiente computacional, a aproximação racional dessa matriz foi realizada pela ferramenta do método de Ajuste Matricial com as devidas edições de parâmetros descritas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Configuração do Ajuste Matricial para aproximação do TPI 138 kV

Parâmetro	Configuração
opts.Niter1	15
opts.Niter2	40
opts.N	140
opts.poletype	Logcmplx
opts.weightparam	2
opts.remove_Hfpoles	1
opts.asymp	3
RPdriver	Desabilitado

Os resultados da aproximação da magnitude e fase dos dados da matriz de admitâncias do TPI de Passo Real são exibidos, respectivamente, pela Figura 4.5 e Figura 4.6.

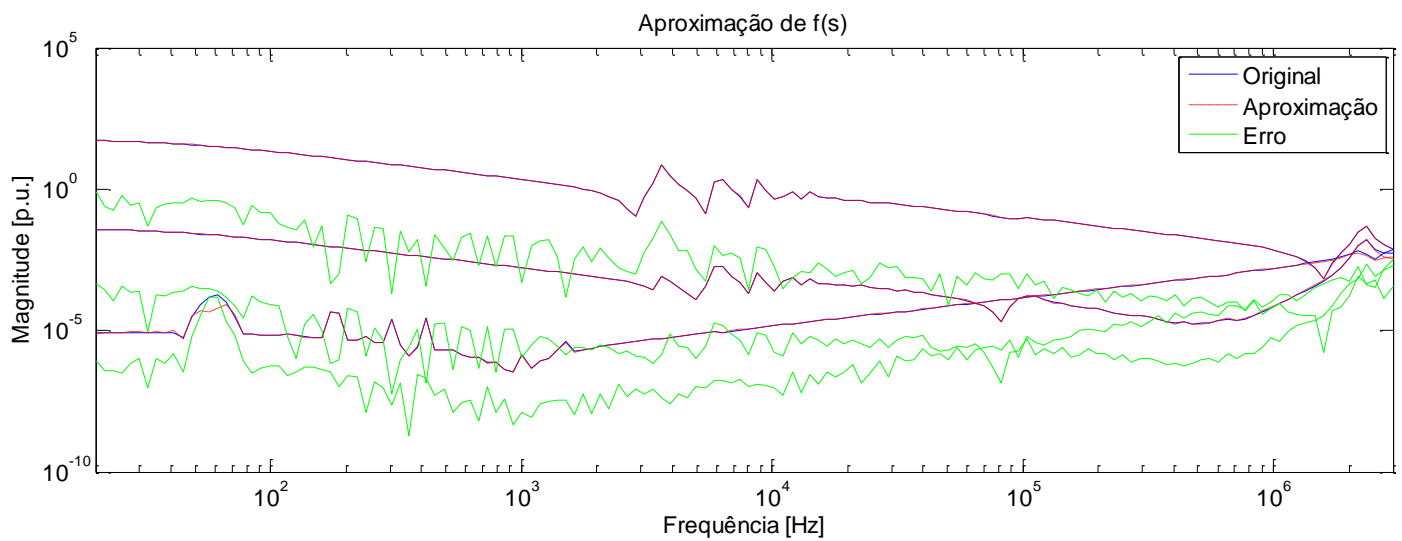


Figura 4.5 – Resultado da aproximação da matriz de admitâncias TPI Passo Real, em magnitude.

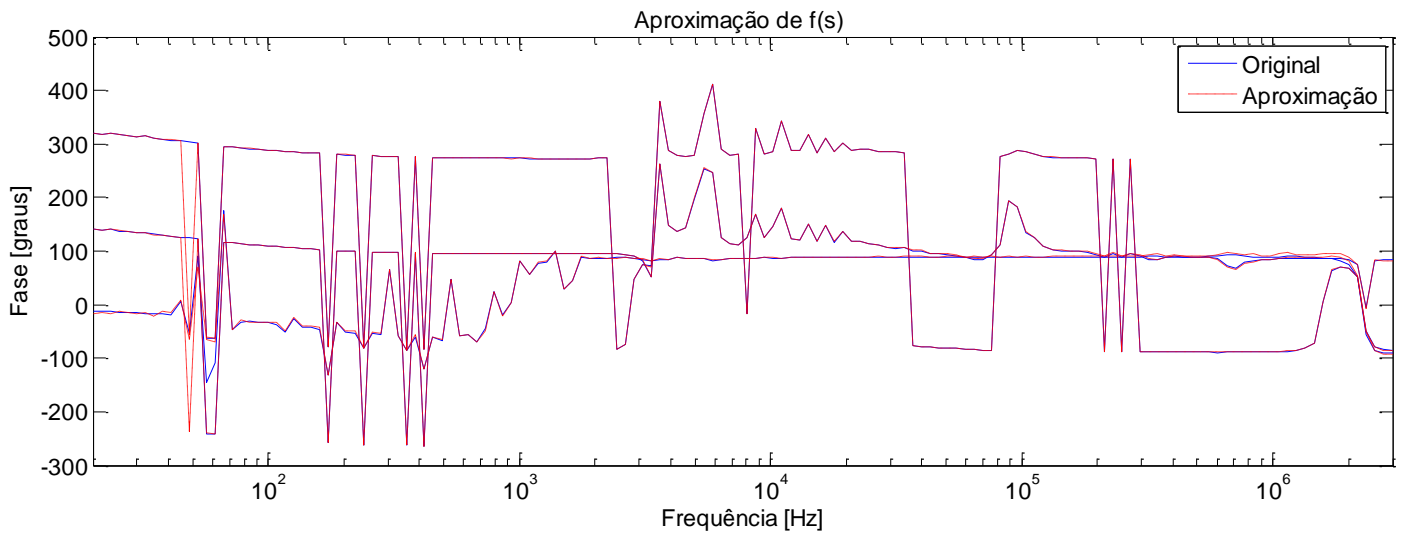


Figura 4.6 – Resultado da aproximação da matriz de admitâncias TPI Passo Real, em fase.

4.2.3 Criação do Modelo do TPC 230 kV

Neste trabalho, foram utilizados, para as medições práticas, os terminais de alta tensão H1-H2 e de baixa tensão X1-X3 no TPC 230 kV de Canoas já que, conforme expresso na Tabela 4.4, este TPC apresenta dois terminais secundários. Sendo assim, o modelo do TPC de Canoas de 230 kV foi gerado a partir da medição da resposta em frequência de 400 amostras, logaritmicamente distribuídas entre 20 Hz e 3 MHz, pelo SFRA. Esses dados foram utilizados para o cálculo, no MATLAB®, da matriz de admitâncias desse TPC. Em seguida, essa matriz foi sujeita à aproximação racional utilizando como a configuração da Tabela 4.8 como parâmetros.

Tabela 4.8 – Configuração do Ajuste Matricial para aproximação do TPC 230 kV

Parâmetro	Configuração
opts.Niter1	15
opts.Niter2	40
opts.N	140
opts.poletype	Logcmplx
opts.weightparam	2
opts.remove_Hfpoles	1
opts.asymp	3
RPdriver	Habilitado

Os gráficos da Figura 4.7 e Figura 4.8 mostram, respectivamente, o resultado da aproximação dessa matriz para seus valores de magnitude e fase.

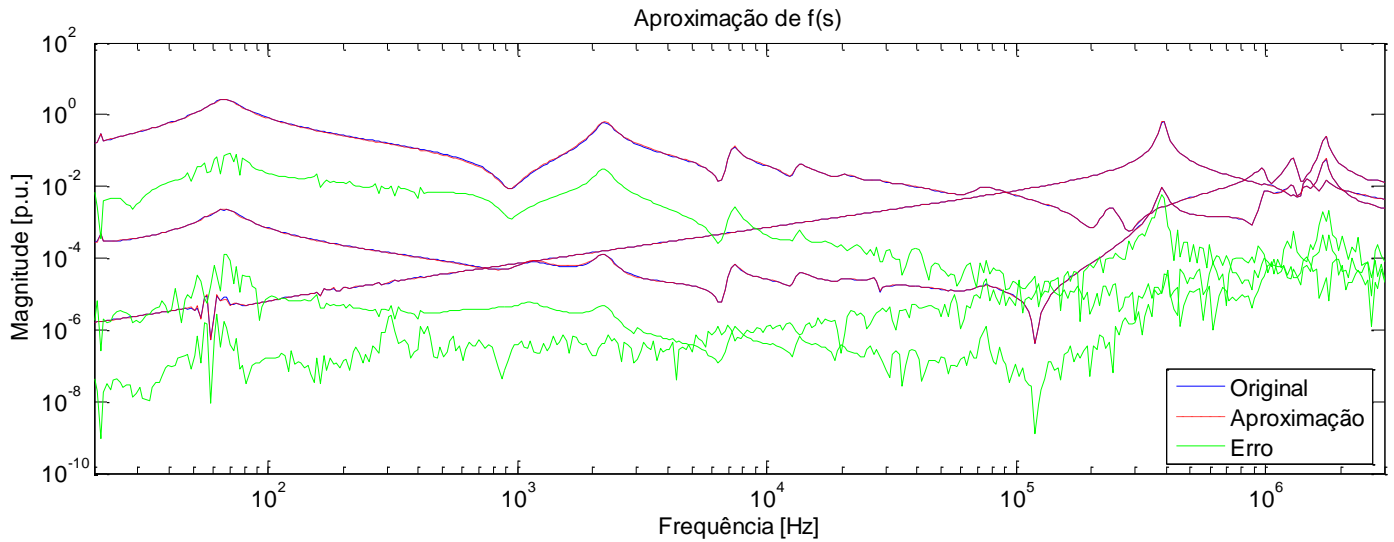


Figura 4.7 – Resultado da aproximação da matriz de admitâncias TPC Canoas, em magnitude.

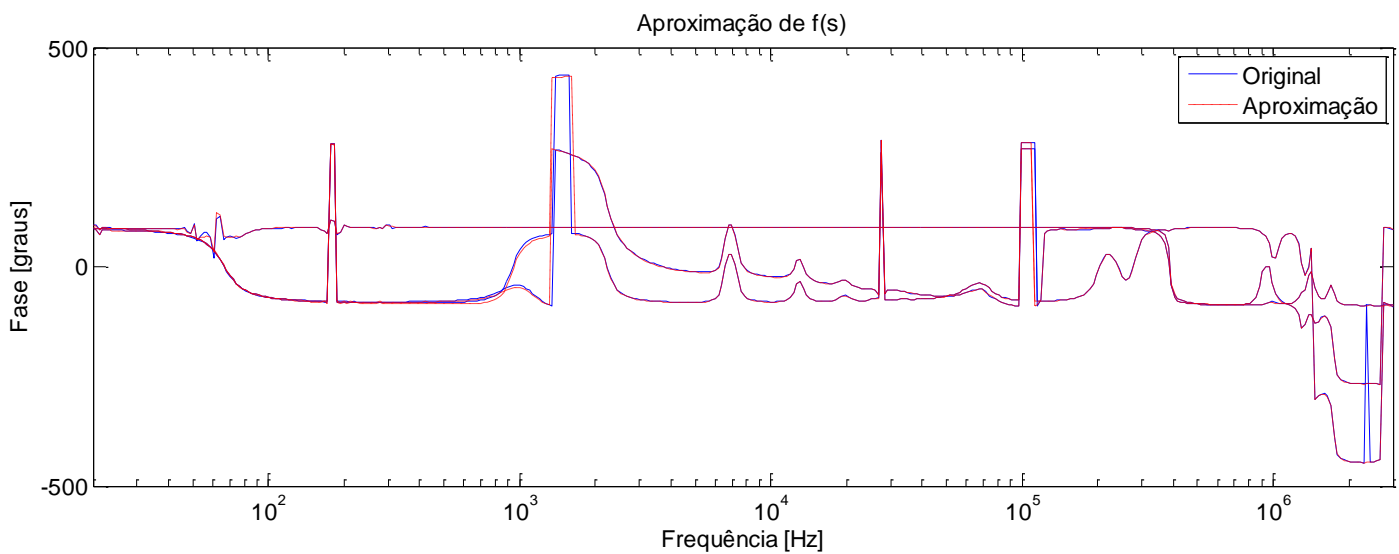


Figura 4.8 – Resultado da aproximação da matriz de admitâncias TPC Canoas, em fase.

4.3 Validação dos Modelos

Após a criação do modelo do TP, é necessário comprovar a sua capacidade de representar com fidelidade o comportamento do transformador real. A metodologia utilizada para avaliar os modelos foi a aplicação de um degrau de tensão nos terminais primário do TP real e de seu respectivo modelo. Dessa forma, a validação dos modelos dá-se, então, pela

comparação entre as respostas, das tensões dos terminais primário e secundário, do ensaio no TP real e da simulação do modelo no ATPDraw.

Nos testes práticos, a injeção do degrau de tensão é realizada por um gerador de funções enquanto que um osciloscópio monitora as tensões nos dois terminais. Por outro lado, na simulação do teste no ATPDraw, um degrau de mesmas características é aplicado através de uma fonte de tensão no modelo do TP. A Figura 4.9 mostra, esquematicamente, esse processo de validação.

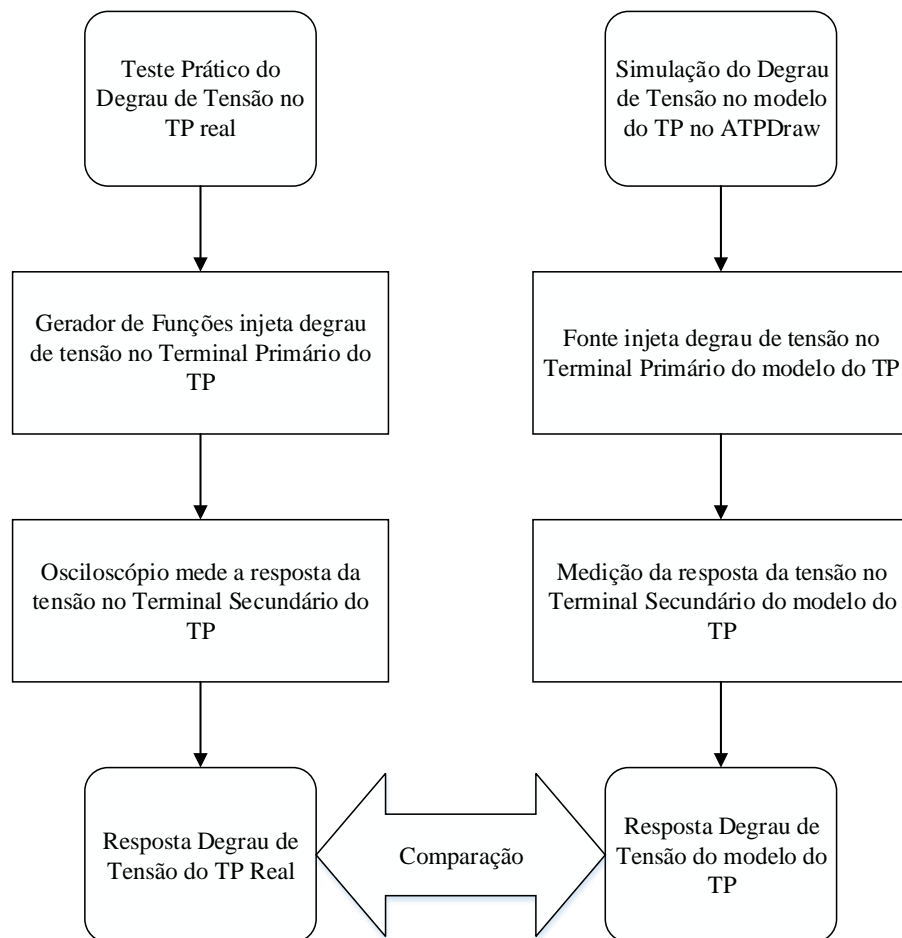


Figura 4.9 – Esquema de validação dos modelos dos TPs.

Os resultados e detalhes dos testes de validação para os três modelos criados são apresentados abaixo.

4.3.1 Validação do Modelo TPI 13,8 kV

Segundo o procedimento já descrito, um degrau de tensão de amplitude 2 V, com um tempo de subida de 0,2 μ s, foi aplicado nos terminais primários do TPI NUPEDDEE 13,8 kV real

e de seu modelo. Os valores das tensões primárias e secundárias dessas duas aplicações, obtidos pelo osciloscópio e resultado de simulação, foram salvos para uma análise em conjunto. A comparação entre as respostas do TPI real, em vermelho, e do modelo, em preto, a esse degrau de tensão são apresentadas na Figura 4.10, mostrando as tensões nos terminais primário (Figura 4.10a) e secundário (Figura 4.10b).

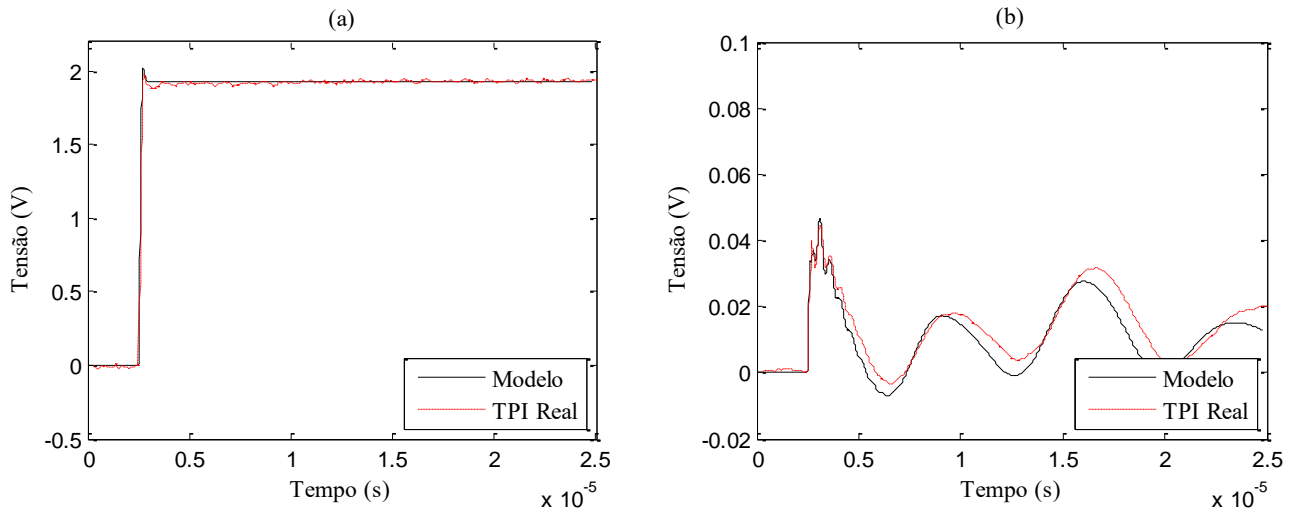


Figura 4.10 – Análise comparativa entre as respostas do teste a degrau das tensões do terminal primário (a) e secundário (b) do TPI 13,8 kV real, em vermelho, e seu modelo, em preto.

Pela análise da figura acima, percebe-se que o modelo do TPI 13,8 kV consegue reproduzir, especialmente em altas frequências, as respostas de ambos terminais do TPI real quando submetido ao degrau de tensão.

4.3.2 Validação do Modelo TPI 138 kV

O processo de validação do modelo do TPI 138 kV de Passo Real se deu pela injeção de um degrau de 20 V, e tempo de subida de 30 ns, de amplitude nos terminais primários do TPI real e de seu modelo. No entanto, durante a realização dos ensaios práticos, os resultados das tensões medidas pelo osciloscópio não foram salvos, sendo apenas armazenada uma gravação da tela do equipamento. Sendo assim, para poder representar os valores do ensaio prático em conjunto com os dados de simulação, de forma a melhor analisar os resultados, foram tomados, a partir da imagem do osciloscópio, alguns pontos através do programa DIgSILENT PowerFactory[®]. A Figura 4.11 mostra a comparação entre esses resultados do TPI real, em vermelho, e de seu modelo, em preto, para as tensões nos terminais primário (Figura 4.11a) e secundário (Figura 4.11b).

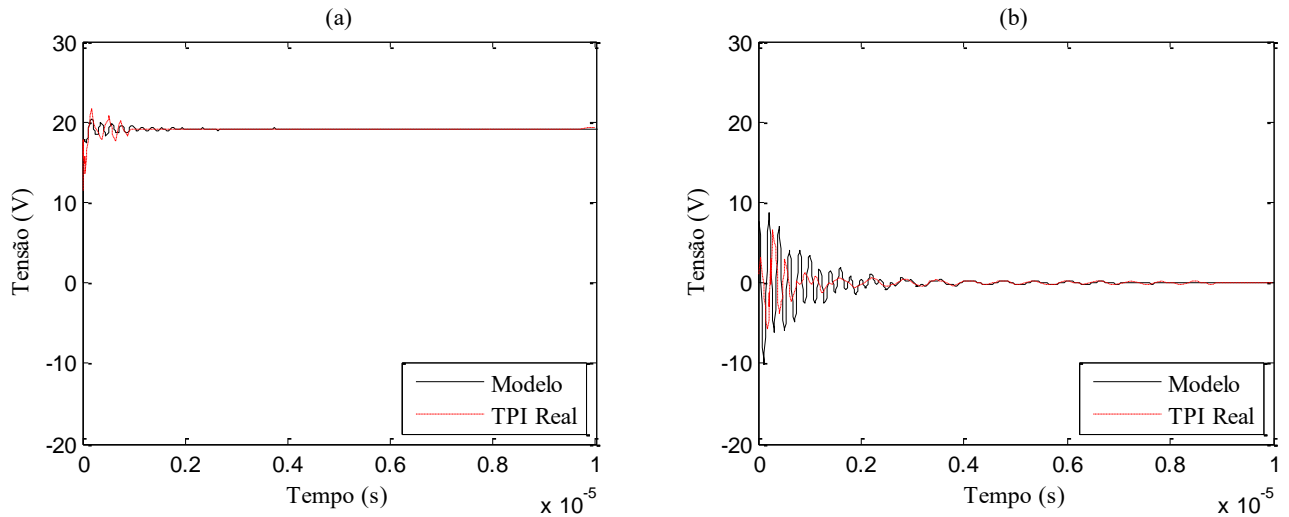


Figura 4.11 – Análise comparativa entre as respostas do teste a degrau das tensões do terminal primário (a) e secundário (b) do TPI 138 kV real, em vermelho, e seu modelo, em preto.

As curvas que representam a resposta do TPI real, devido ao fato mencionado, são apenas aproximações grosseiras de sua resposta original. Porém, mesmo assim, através da Figura 4.11, verifica-se que o modelo apresenta boa representação de seu TPI original.

4.3.3 Validação do Modelo TPC 230 kV

O degrau de tensão aplicado no terminal primário do TPC 230 kV de Canoas e de seu modelo teve amplitude de 20 V e um tempo de subida de 0,2 μ s. Os dados das respostas dos terminais primários e secundários foram devidamente salvos e são apresentados na Figura 4.12, onde as curvas em vermelho referem-se à resposta do TPC real e as em preto de seu modelo para as tensões nos terminais primário (Figura 4.12a) e secundário (Figura 4.12b).

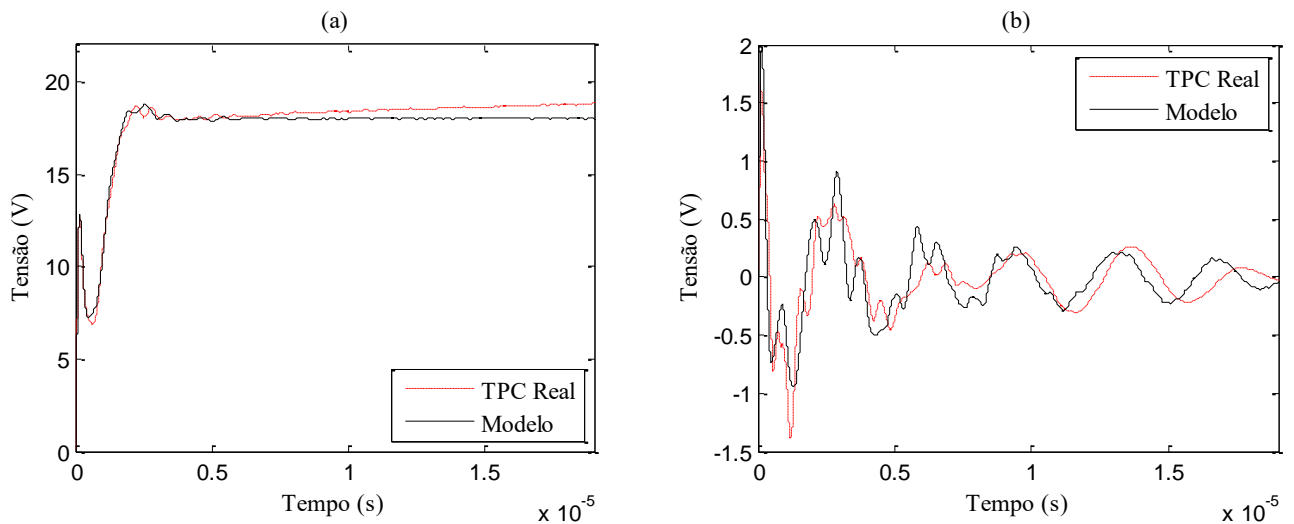


Figura 4.12 – Análise comparativa entre as respostas do teste a degrau das tensões do terminal primário (a) e secundário (b) do TPC 230 kV real, em vermelho, e seu modelo, em preto.

O resultado expresso na figura acima revela uma boa concordância entre as respostas do TPC real e de seu modelo. Entretanto, nota-se, também, que uma pequena discrepância entre suas amplitude e fases começa a aparecer a partir de 10 μ s. Tal diferença pode ser explicada pela não linearidade existente em baixas frequências em TPCs com núcleo de ferro embutido no secundário do transformador intermediário, o que não pode ser representado pelo modelo.

4.4 Estudos de Caso

Após comprovadas suas capacidades de reproduzir o comportamento dos equipamentos originais, os modelos dos TPs são, enfim, aplicados à SEPs. A partir de sistemas testes, são simulados, no ATPDraw, eventos de descarga atmosférica, curto-circuito e chaveamento para verificar a funcionalidade dos modelos na análise de transitórios eletromagnéticos. O comportamento dos modelos sob a frequência da rede, através da simulação de suas relações de tensão, também é analisado, mesmo que os modelos sejam desenvolvidos propriamente para estudos de eventos em maiores frequências. O fluxograma da Figura 4.13 ilustra o procedimento para a aplicação dos modelos.

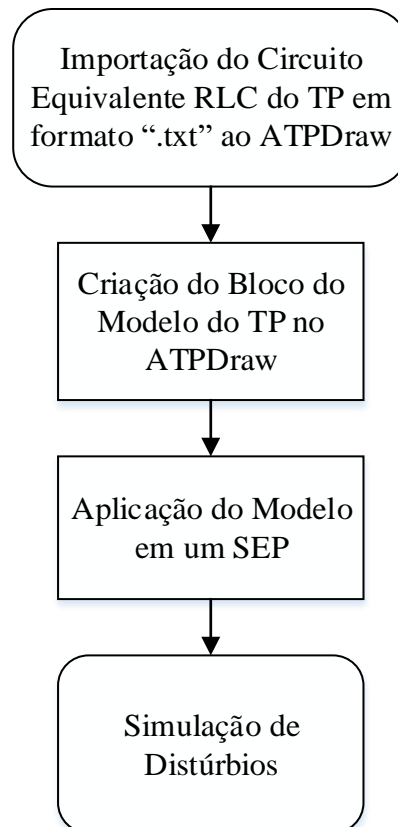


Figura 4.13 – Fluxograma da aplicação dos Modelos em simulações no ATPDraw

O procedimento detalhado da criação e aplicação dos modelos dos TPs no ATPDraw está apresentado no Apêndice A deste trabalho. Os SEPs utilizados nas simulações foram escolhidos de acordo com a classe de tensão de cada TP e são representados através de seus equivalentes Thévenin de rede. Junto a esse equivalente elétrico, são adicionados, em todas as simulações com os SEPs testes, um resistor de $1\text{ M}\Omega$ conectado ao terminal secundário do bloco do TP, a fim para possibilitar a medição da tensão no terminal, e um modelo de para-raios. Complementarmente a isso, ainda são inseridos uma linha de transmissão (com extensão de 100 metros e parâmetros de $1\ \Omega/\text{m}$, $1\text{ mH}/\text{m}$ e $0,1\ \mu\text{F}/\text{m}$) e uma carga ($100\text{ k}\Omega$) com fator de potência unitário, valores que não interferem nos resultados, que ajudam a garantir a convergência das simulações no ATPDraw. As simulações dos eventos transitórios analisados, descritos a seguir, têm as mesmas características para os três modelos de TP.

O primeiro evento a ser simulado é o da descarga atmosférica, causa mais comum de transitórios impulsivos em SEPs. Esse fenômeno pode ser modelado por ondas de tensão ou de corrente e suas características são definidas por seus formatos de onda e tempos de subida e decaimento. A forma de onda exponencial dupla $1,2/50\ \mu\text{s}$ da Figura 4.14 é uma representação padronizada pela ABNT NBR IEC 60060-1 (2013 apud CAGIDO, 2014, p. 45) para testes laboratoriais de isolamento a impulsos atmosféricos. Esse sinal é assim conhecido por ter seu valor ampliado de zero até o valor de pico em $1,2\ \mu\text{s}$, o chamado tempo de frente ou de subida, e decai a um valor médio do seu pico em $50\ \mu\text{s}$, denominado tempo de cauda.

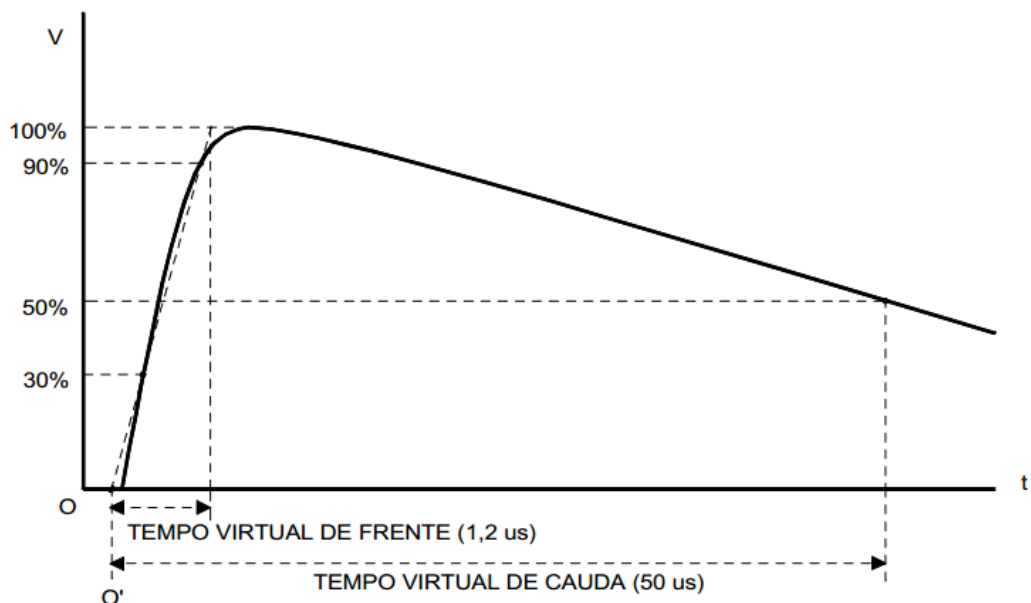


Figura 4.14 – Forma de onda padronizada $1,2/50\ \mu\text{s}$ para ensaio de impulso atmosférico. Retirado de Soares (2011).

Nas simulações realizadas neste trabalho, a fonte do impulso da descarga atmosférica é modelada através do equivalente Norton formado por uma fonte de corrente em paralelo com uma impedância de surto. A fonte de corrente do tipo 13, disponível na biblioteca do ATPDraw, que aproxima, com mesmas características, o impulso padronizado através de uma dupla rampa, foi utilizada. Definiu-se o valor de 10 kA para a amplitude desse impulso de corrente, uma vez que, segundo Diesendorf (1974 apud ARAÚJO, 2010, p. 67), 65% das descargas atmosféricas com características semelhantes à do impulso padronizado possuem uma corrente elétrica menor ou igual a esse valor. Por outro lado, a impedância de surto é representada por um resistor de 300 Ω , valor referenciado por Rocha (2009).

A ocorrência de um curto-circuito trifásico é o segundo distúrbio a ser analisado. Tal falta, inserida no ponto de conexão do TP com o SEP teste, é resultante da ligação do terminal primário do TP à uma impedância de falta de 100 Ω através do acionamento de uma chave controlada por tempo.

Na sequência, investiga-se o comportamento dos TPs quando o SEP em que são empregados sofre uma sequência de interrupções ou chaveamentos. Também fazendo uso de uma chave controlada por tempo, esse teste busca retratar a desconexão e reconexão de uma linha de transmissão disposta entre o equivalente elétrico do sistema e o local de aplicação do TP.

Por fim, é verificado o comportamento do modelo sob a frequência da rede, 60 Hz. Esse teste é realizado ao aplicar a tensão nominal primária no terminal de cada TP e medir sua resposta no terminal secundário, verificando, assim, a relação de transformação do equipamento.

Os resultados desses testes, divididos pela aplicação de cada modelo, são apresentados a seguir.

4.4.1 Aplicações no TPI 13,8 kV

O modelo do TPI NUPEDEE 13,8 kV foi aplicado a um sistema teste baseado naquele proposto em McGraw-Edison Company (1971). O diagrama unifilar da Figura 4.15 representa esse sistema, onde foram adicionados uma linha de transmissão e uma carga com fator de potência unitário, e apresenta os valores das impedâncias, em ohms e referidos à tensão de 12,47 kV, de seus principais componentes.

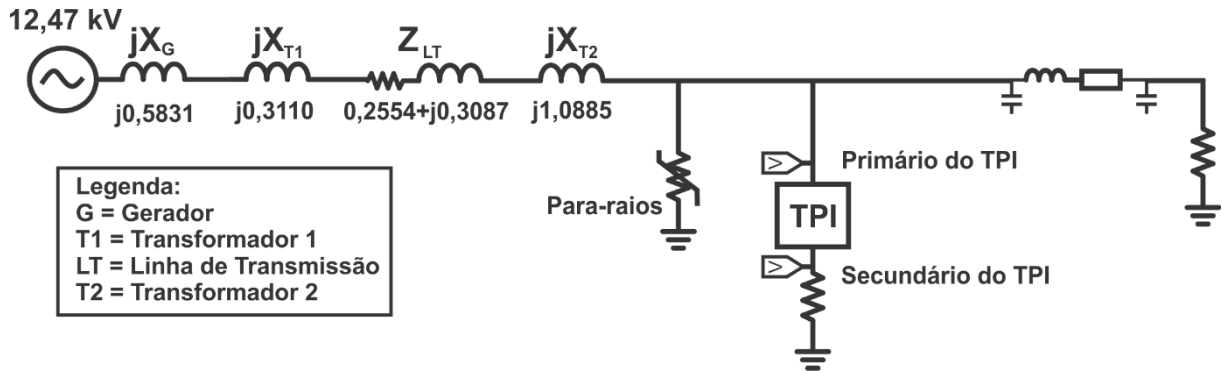


Figura 4.15 – Sistema teste para aplicação do modelo do TPI 13,8 kV.

4.4.1.1 Descarga Atmosférica

A fonte da descarga atmosférica, com amplitude de 10 kA, é aplicada no nó do terminal primário do TPI em 10 ms, sendo extinta após 100 μ s. A Figura 4.16 expressa, em valores fase-terra, a influência da descarga nas tensões nos terminais primário (Figura 4.16a) e secundário (Figura 4.16b) do TPI.

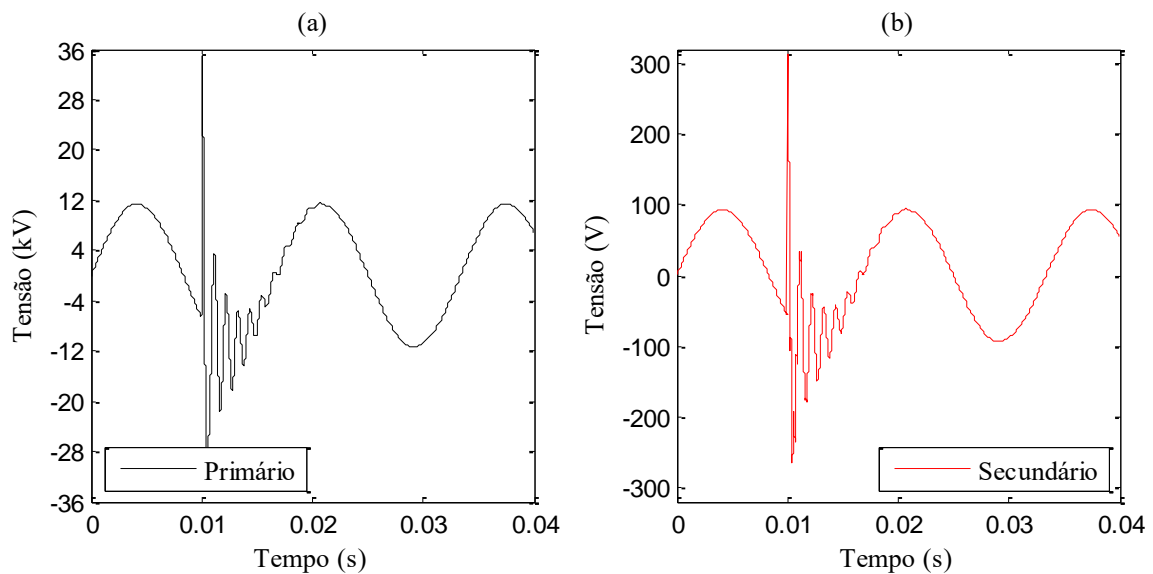


Figura 4.16 – Tensão nos terminais primário (a) e secundário (b) do TPI 13,8 kV sob descarga atmosférica.

Analisando a resposta da tensão no terminal secundário do modelo do TPI frente ao distúrbio inserido pela descarga atmosférica em seu terminal primário, verifica-se que o modelo reproduz adequadamente o comportamento da tensão primária, com seu valor corretamente reduzido pela relação de transformação do equipamento.

4.4.1.2 Curto-circuito

O curto-circuito é introduzido no sistema através da conexão do nó do terminal primário do TPI a uma impedância de falta de 100Ω por meio de uma chave controlada por tempo. Esse evento é inserido no sistema em 10 ms, sendo eliminado após 5 ms. A Figura 4.17 mostra, em valores fase-terra, o comportamento das tensões nos terminais primário (Figura 4.17a) e secundário (Figura 4.17b) do TPI resultantes deste teste.

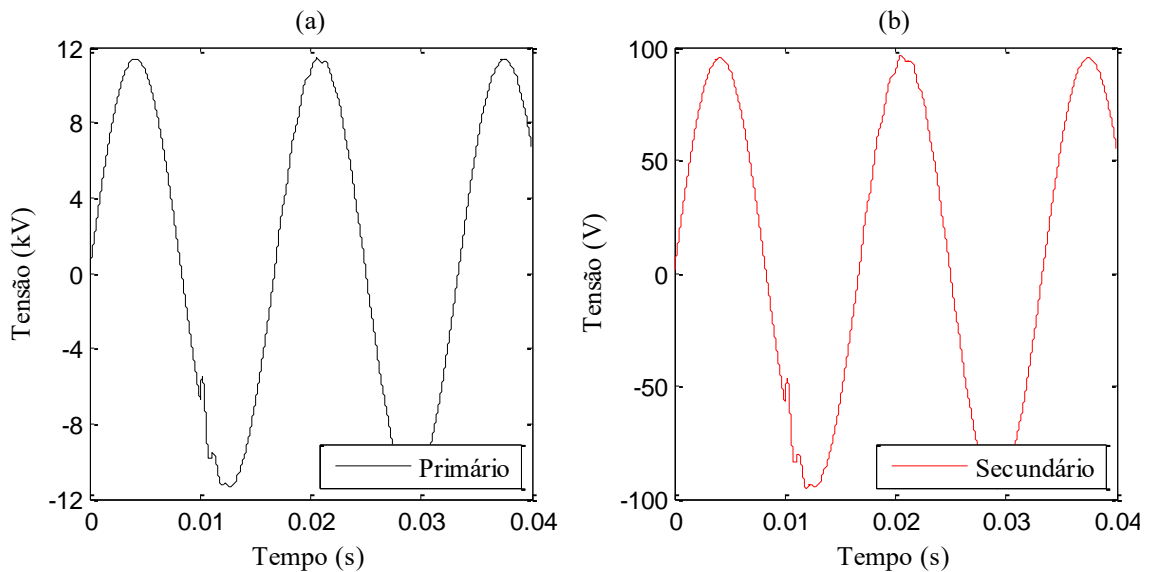


Figura 4.17 – Tensão nos terminais primário (a) e secundário (b) do TPI 13,8 kV na simulação de curto-circuito.

Observando as formas de onda das tensões da figura acima, percebe-se que, assim como no teste da descarga atmosférica, o modelo do TPI consegue reproduzir corretamente as alterações na tensão de seu terminal primário em seu terminal secundário mesmo na ocorrência do curto-circuito.

4.4.1.3 Chaveamento

Simulando uma interrupção momentânea da alimentação do TP, uma chave é inserida entre o nó do terminal primário do TP e o equivalente elétrico do SEP teste. Essa chave tem seu tempo de abertura configurado para 10 ms, mantém o sistema seccionado por 10 ms, e volta a conduzir a partir dos 20 ms de simulação. A Figura 4.18 representa o comportamento da tensão nos terminais primário (Figura 4.18a) e secundário (Figura 4.18b) do TPI resultantes dessa simulação.

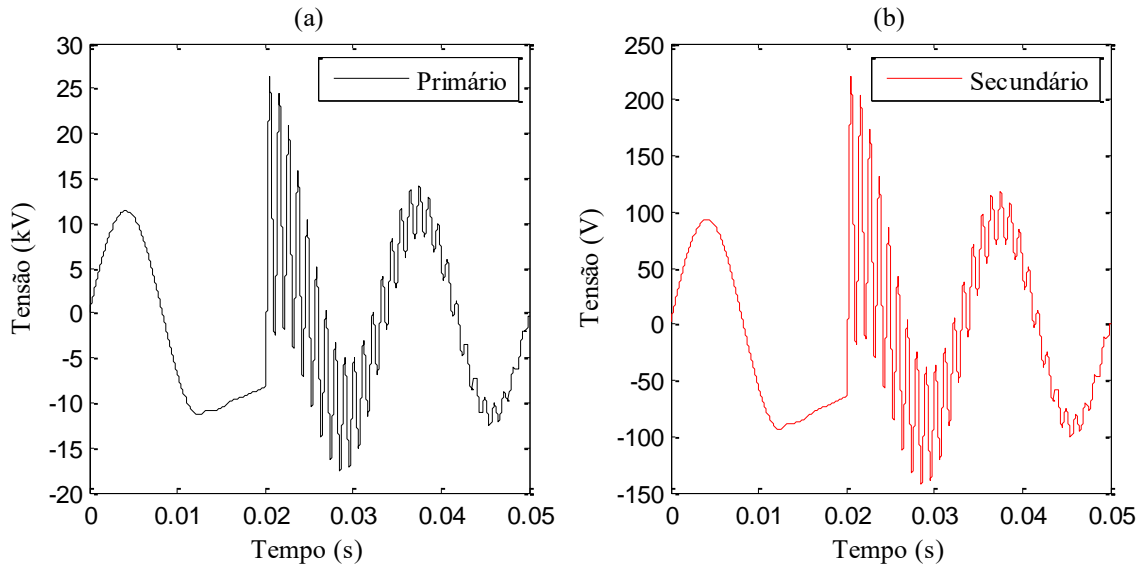


Figura 4.18 – Tensão nos terminais primário (a) e secundário (b) do TPI 13,8 kV durante teste de chaveamento.

Embora apresentem uma oscilação após a realimentação, percebe-se que, após um pequeno transitório, as formas de onda da tensão de ambos terminais seguem o comportamento senoidal da onda em regime permanente. Uma possível causa para essa oscilação pode ser a saturação do núcleo do TPI para a falta em questão, uma vez que este tipo de TPI, conforme sua classe de tensão e exatidão, é característico de TP aplicado em medição e não em proteção. De qualquer forma, observa-se que o modelo é capaz de reproduzir o comportamento do TP, que chega a atingir, durante esse teste, uma tensão duas vezes maior do que seu valor nominal.

4.4.1.4 Relação de Transformação

A fim de avaliar sua representatividade também em baixas frequências, verificou-se um a relação de transformação do modelo do TPI em 60 Hz. Utilizando apenas o bloco do TPI e uma fonte de tensão, que aplica a tensão nominal de 13,8 kV no terminal primário do modelo, esse teste busca, ao medir a tensão secundária, verificar a relação de transformação do equipamento conforme mostra a Tabela 4.2. A Figura 4.19 mostra, em valores por fase, a tensão nominal aplicada ao terminal primário do modelo (Figura 4.19a) e sua correspondente no terminal secundário (Figura 4.19b) do modelo.

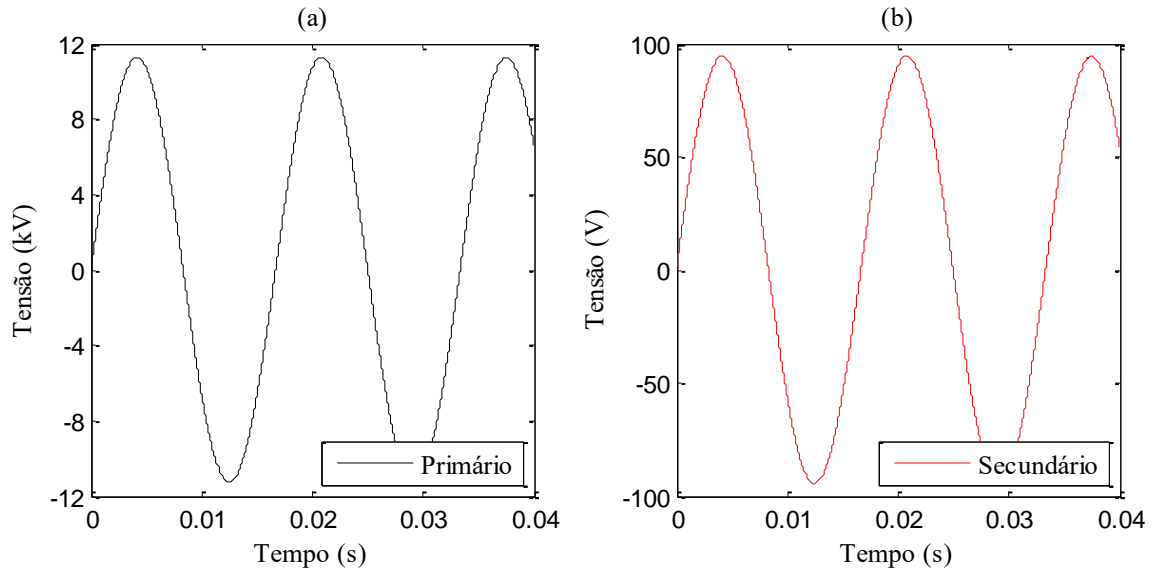


Figura 4.19 – Tensão nos terminais primário (a) e secundário (b) do TPI 13,8 kV na verificação da relação de transformação.

De forma a facilitar a avaliação do resultado pelo auxílio dos gráficos acima, considerou-se as tensões em seus valores de pico por fase. A tensão de pico por fase medida no terminal secundário do TPI, referente à aplicação de $\frac{13,8\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ kV no primário, é de 94,375 V. Essa tensão secundária representa um erro de 0,51% dos $93,8971 \text{ V} \left(\frac{115\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right)$ especificados nos dados de placa do TPI real. Por essa análise, pode-se dizer, então, que o modelo do TPI apresenta resultados bastante satisfatórios até para simulações em baixas frequências.

4.4.2 Aplicações no TPI 138 kV

O modelo do TPI 138 kV de Passo Real foi aplicado a um equivalente elétrico de um SEP real, obtido a partir do programa ANAFAS[®], do Sistema Interligado Nacional (SIN) na barra de 138 kV da subestação Santa Maria 1 (SM1), cidade localizada no estado do Rio Grande do Sul. A Figura 4.20 representa o sistema utilizado através de seu diagrama unifilar, onde foram adicionados uma linha de transmissão e uma carga com fator de potência unitário.

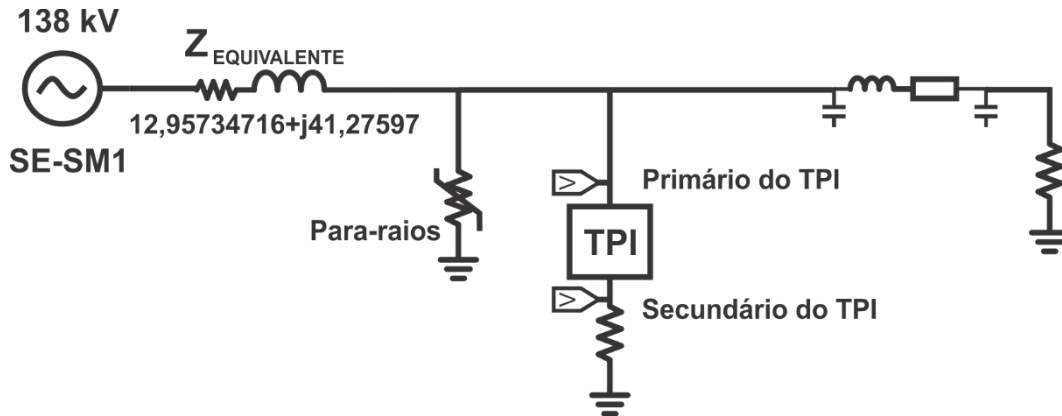


Figura 4.20 – Sistema teste para aplicação do modelo do TPI 138 kV.

4.4.2.1 Descarga Atmosférica

A descarga atmosférica, representada pelo impulso de corrente elétrica de 10 kA, foi injetada no nó do terminal primário do TPI. O sinal do distúrbio, com duração de 100 μ s, é aplicado no sistema em 10 ms. A Figura 4.21 mostra a tensão no terminal primário (Figura 4.21a) do modelo e sua resposta no terminal secundário (Figura 4.21b).

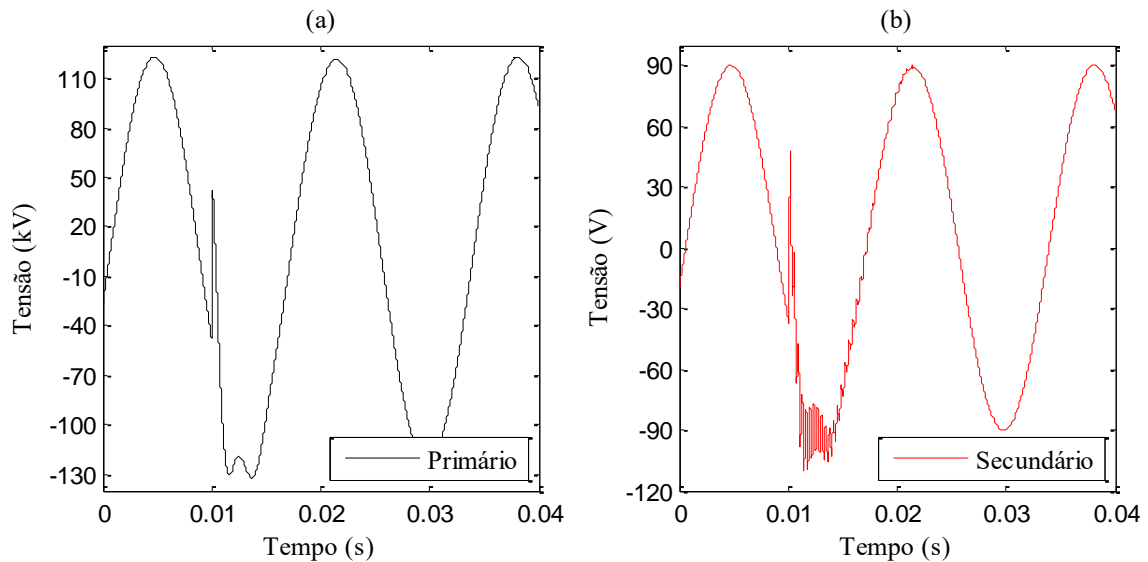


Figura 4.21 – Tensão nos terminais primário (a) e secundário (b) do TPI 138 kV sob descarga atmosférica.

Verifica-se, na onda de tensão primária, que a descarga, pela atuação do para-raios, não eleva muito a tensão no ponto, embora seu efeito seja muito rápido. Essa mudança brusca de tensão é refletida no terminal secundário, que segue o comportamento da tensão do terminal primário do TPI.

4.4.2.2 Curto-circuito

Para a reprodução do curto-circuito, a chave foi posicionada no nó do terminal primário do TPI, na zona de 138 kV. Os contatos da chave são energizados em 10 ms, e a falta é eliminada após 5ms. Os gráficos da Figura 4.22 comparam, com valores por fase, as respostas das tensões nos terminais primário (Figura 4.22a) e secundário (Figura 4.22b) do modelo do TPI na simulação deste teste.

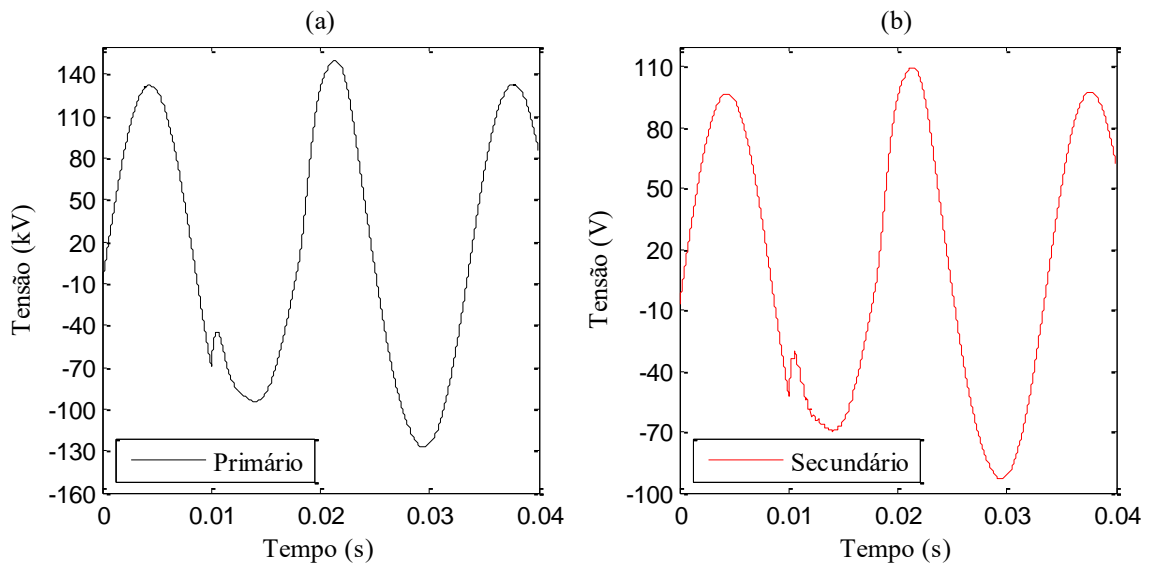


Figura 4.22 – Tensão nos terminais primário (a) e secundário (b) do TPI 138 kV na simulação de curto-circuito.

Pela análise dos gráficos acima, observa-se que a tensão no terminal secundário reproduz de maneira correta, tanto durante a ocorrência do curto quanto após sua extinção, a tensão do terminal primário do TPI.

4.4.2.3 Chaveamento

Simulando uma interrupção do fornecimento de energia ao TPI, uma chave controlada por tempo secciona, no nó de conexão do terminal primário do TPI, o sistema aos 10 ms de simulação. O sistema original é restabelecido, através do fechamento da chave, após 10 ms, mantendo-se assim até o final da simulação. A Figura 4.23 mostra o resultado da tensão nos terminais primário (Figura 4.23a) e secundário (Figura 4.23b) do TPI nessas condições.

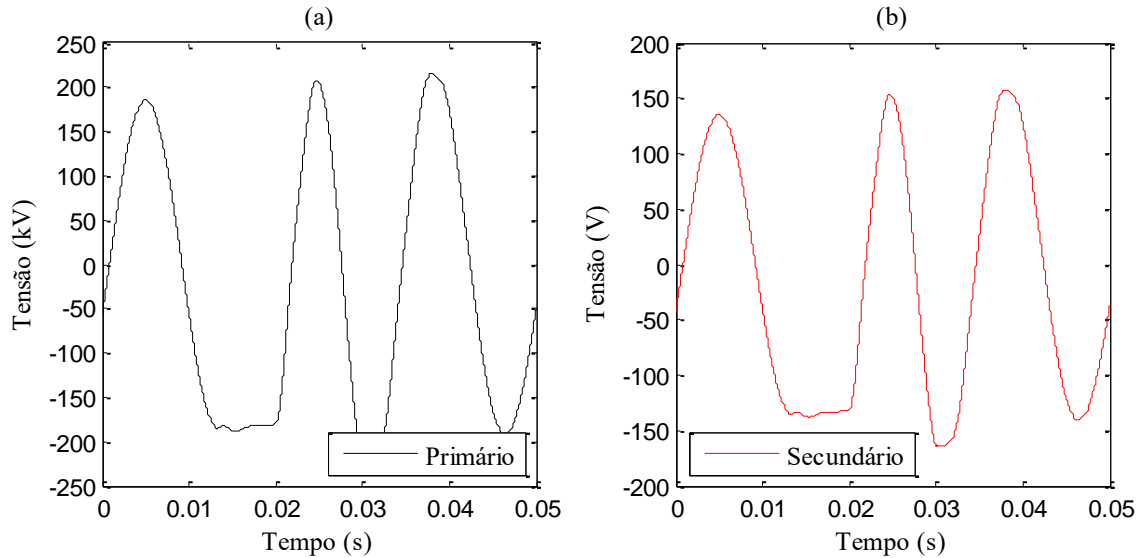


Figura 4.23 – Tensão nos terminais primário (a) e secundário (b) do TPI 138 kV durante teste de chaveamento.

Percebe-se, pela resposta acima, que o modelo do TPI consegue representar fielmente o comportamento de seu terminal primário no terminal secundário, tanto durante quanto após o acionamento das chaves, com êxito.

4.4.2.4 Relação de Transformação

Como descrito na Tabela 4.3, a relação de transformação do TPI 138kV de Passo Real é de $\frac{138}{\sqrt{3}}$ kV – $\frac{110}{\sqrt{3}}$ V, ou seja, 1380:1. Na simulação para conferência da relação de transformação do modelo, a alta tensão nominal é convertida para seu valor de pico por fase e, então, aplicada no terminal primário do modelo do TPI. A Figura 4.24 apresenta a tensão aplicada no terminal primário do modelo (Figura 4.24a) e sua referida resposta no lado de baixa tensão (Figura 4.24b).

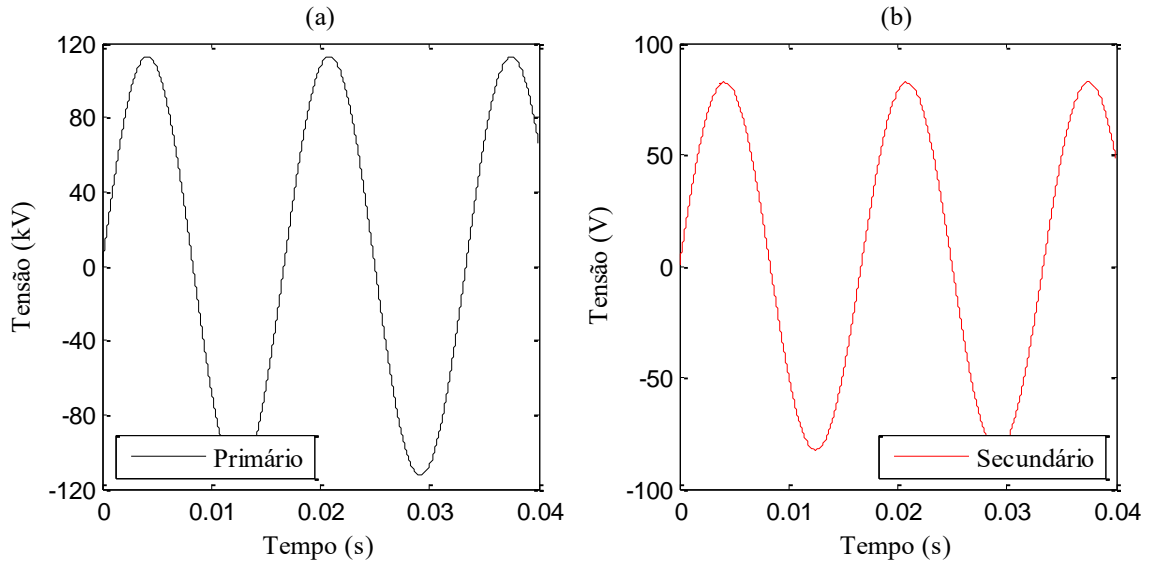


Figura 4.24 – Tensão nos terminais primário (a) e secundário (b) do TPI 138 kV na verificação da relação de transformação.

A tensão, em valor de pico por fase, presente no terminal secundário equivale a 82,43 V, o que significa, aproximadamente, uma relação de tensão de 1367:1. Esse valor de tensão secundário representa um erro de 0,96% em relação ao valor de $81,6497 \left(\frac{100\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \right)$, especificado nos dados de placa do fornecedor do TPI real.

4.4.3 Aplicações no TPC 230 kV

O sistema teste utilizado na aplicação do modelo do TPC 230 kV de Canoas é um equivalente elétrico de um SEP real do SIN na barra de 230 kV da subestação Santa Maria 3 (SM3). Complementarmente ao equivalente, conforme diagrama unifilar da Figura 4.25, inseriu-se um para-raios de 230 kV, além de uma linha de transmissão e uma carga com fator de potência unitário.

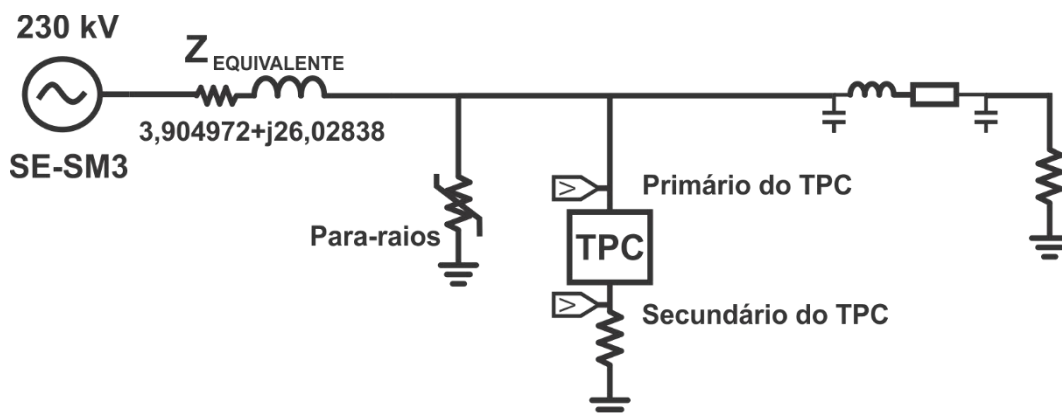


Figura 4.25 – Sistema teste para aplicação do modelo do TPC 230kV.

4.4.3.1 Descarga Atmosférica

A descarga atmosférica, com amplitude 10 kA, é inserida ao sistema no nó do terminal primário do TPC. O impulso desse distúrbio tem início em 10 ms e duração de 100 μ s. Os gráficos da Figura 4.26 apresentam o comportamento das tensões nos terminais primário (Figura 4.26a) e secundário (Figura 4.26b) do modelo do TPC em resposta à descarga.

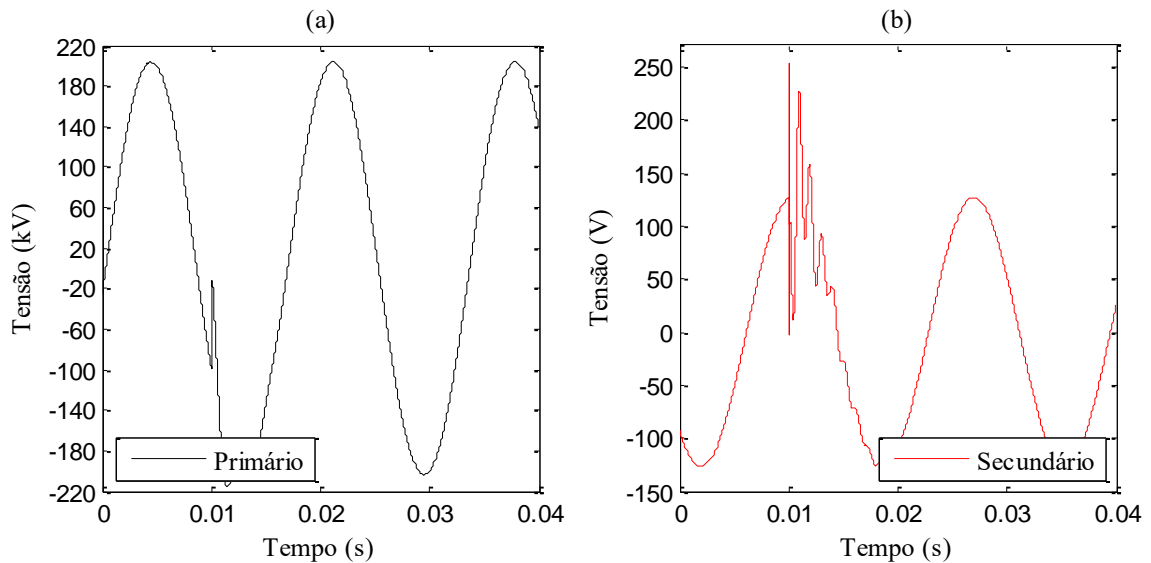


Figura 4.26 – Tensão nos terminais primário (a) e secundário (b) do TPC 230 kV sob descarga atmosférica.

Devido à presença da coluna capacitiva e do reator de compensação no TPC, aliado à presença súbita da descarga atmosférica, percebe-se, pela representação acima, que a tensão no terminal secundário não representa fidedignamente a tensão do terminal primário do modelo, tanto em amplitude quanto em fase. Essa situação perdura durante o período da perturbação na rede elétrica até alguns milissegundos após o fim dessa. Nota-se, também, que, no momento da ocorrência do evento, a tensão no terminal secundário chega a atingir um valor de, aproximadamente, o dobro de sua tensão em regime permanente. Após esse rápido comportamento, que já era esperado, o modelo consegue representar muito bem o comportamento do TPC.

4.4.3.2 Curto-circuito

O fechamento de uma chave posicionada no nó do terminal primário do TPC, que o liga à uma impedância de falta de 100 Ω , estabelece o curto-circuito no sistema. Essa chave entra em condução, por 5ms, em 10ms de simulação do sistema. A Figura 4.27 mostra ilustra a

resposta das tensões nos terminais primário (Figura 4.27a) e secundário (Figura 4.27b) do modelo do TPC para esse teste.

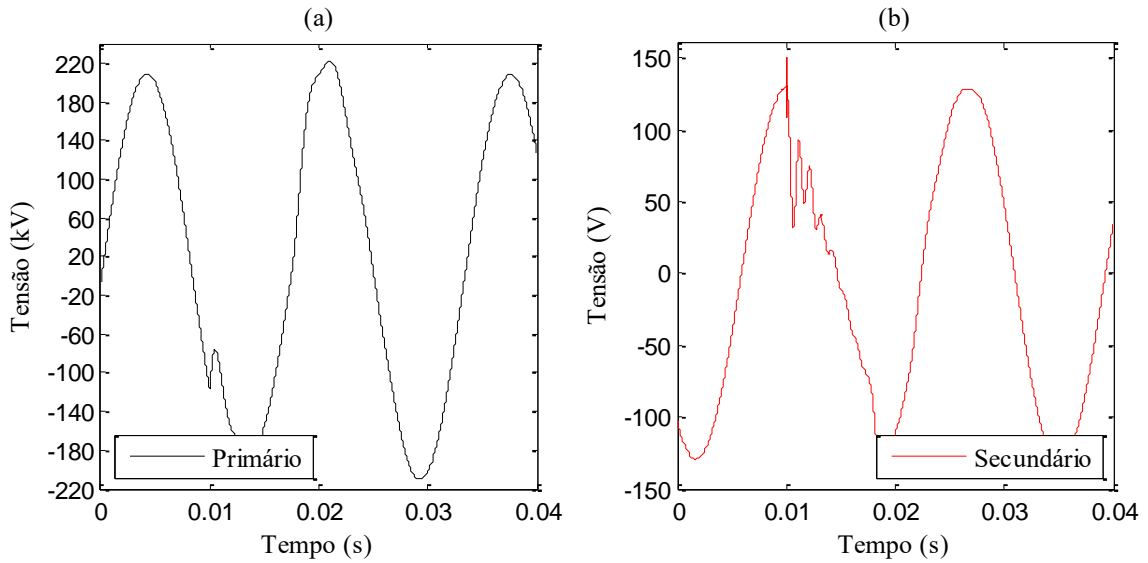


Figura 4.27 – Tensão nos terminais primário (a) e secundário (b) do TPC 230 kV na simulação de curto-circuito.

Examinando o comportamento da resposta de tensão no terminal secundário pelos gráficos acima, percebe-se, novamente, a imprecisão do TPC em representar as rápidas mudanças impostas no terminal primário. Assim, esse resultado ratifica as preocupações com transitórios eletromagnéticos em TPCs.

4.4.3.3 Chaveamento

Uma chave controlada por tempo, alocada entre o sistema equivalente elétrico e o nó de conexão do TPC, interrompe a energia ao TP. Em 10 ms essa chave abre seus contatos, reestabelecendo sua condução após 10 ms. A Figura 4.28 ilustra o comportamento das tensões nos terminais primário (Figura 4.28a) e secundário (Figura 4.28b) do TPC durante a ocorrência dos chaveamentos.

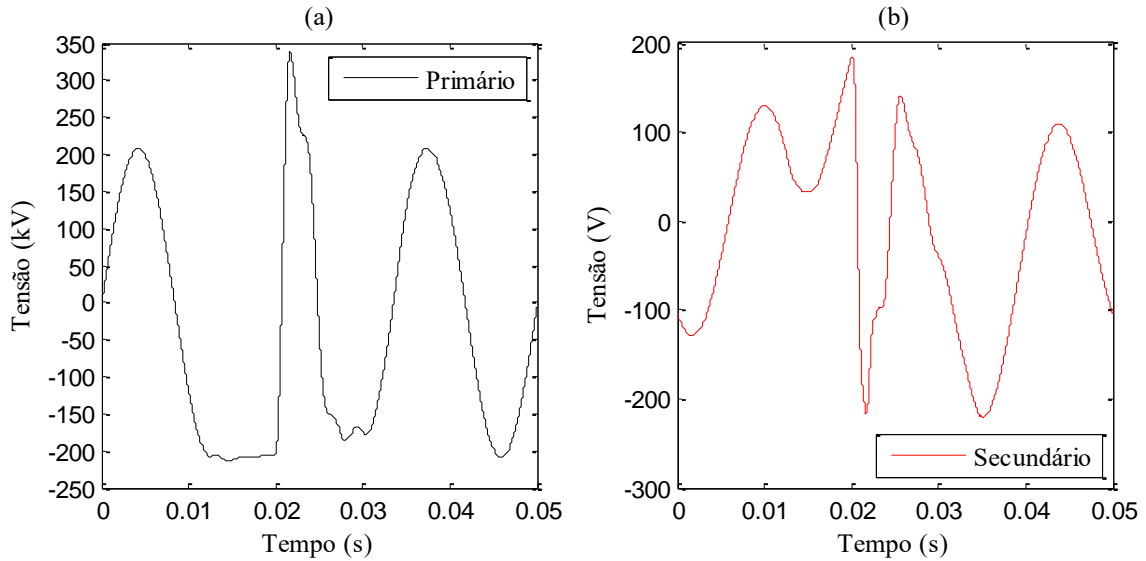


Figura 4.28 – Tensão nos terminais primário (a) e secundário (b) do TPC 230 kV durante teste de chaveamento.

A resposta do modelo do TPC referente à ocorrência dos chaveamentos, assim como nos testes anteriores, reflete a influência das partes componentes do circuito do TPC original no seu comportamento perante eventos transitórios. Contudo, novamente, o modelo do TPC consegue expressar o possível desempenho do equipamento original.

4.4.3.4 Relação de Transformação

O desenvolvimento do modelo do TPC 230 kV foi baseado nas medições entre seus terminais de alta tensão H1-H2 e de baixa X1-X3, o que, conforme Tabela 4.4, corresponde à uma relação de $\frac{230}{\sqrt{3}}$ kV – 115V, em valores RMS, ou seja, 1154,7:1. Essa alta tensão nominal, através de seu valor de pico, é, então, aplicada ao terminal primário do modelo do TPC. A Figura 4.29 revela os valores dessa tensão aplicada no terminal primário (Figura 4.29a) e sua correspondente no terminal de baixa tensão (Figura 4.29b).

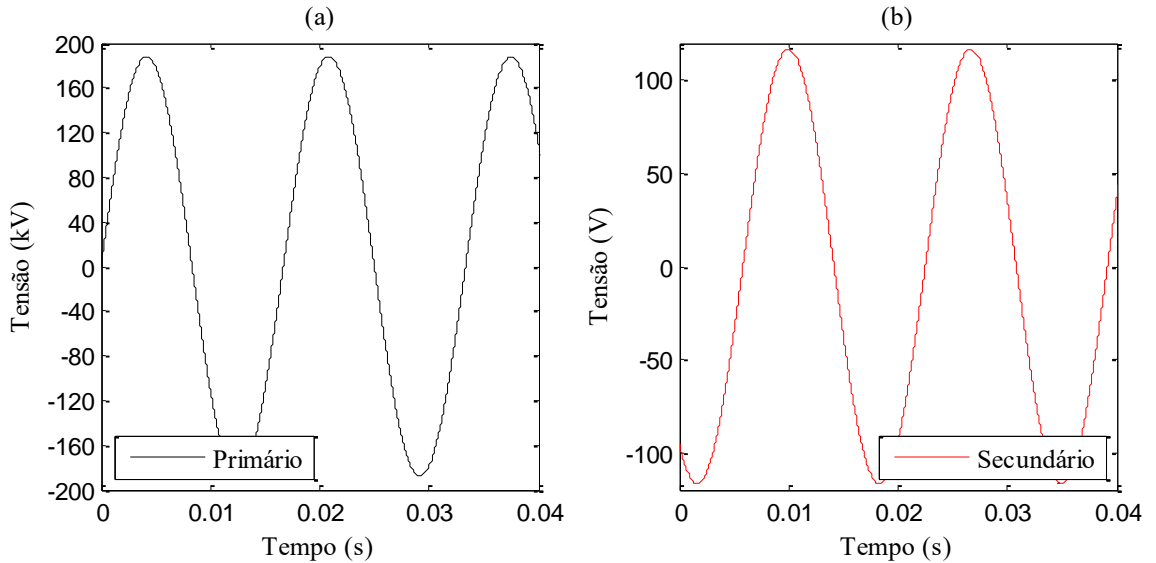


Figura 4.29 – Tensão nos terminais primário (a) e secundário (b) do TPC 230 kV na verificação da relação de transformação.

Analisando as formas de onda das tensões dos gráficos acima, percebe-se, facilmente, um maior erro na relação de tensão do TPC em relação aos TPIs anteriores. Nesse caso, a tensão secundária do modelo do TPC atinge um valor de 116,7 V de pico, ou seja, um desvio de 28,22% do valor de 162,6346 V ($115\sqrt{2}$) do valor especificado para o TPC real. Uma provável explicação para tal erro é a mesma apontada no resultado da validação desse modelo, em que a não-linearidade existente em baixas frequências em TPCs com núcleo de ferro embutido no secundário do transformador intermediário não pode ser representada pelo modelo.

4.5 Considerações Finais

Esse capítulo expôs os resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta para a modelagem de transformadores de potencial em dois TPIs e um TPC. Foram apresentados, em detalhes, os processos de criação e validação dos modelos para altas frequências e, posteriormente, sua aplicação em sistemas teste, para análise de eventos de transitórios eletromagnéticos.

Em suma, referente à criação dos modelos, foram especificados os processos para a realização do ensaio em frequência dos TPs utilizando um SFRA comercial e as configurações para a aproximação racional de sua resposta pelo método do Ajuste Matricial no MATLAB®. A validação dos modelos foi realizada pela comparação de suas respostas a um teste de degrau de tensão com as do equipamento original. Encerrando o capítulo, foram analisadas as respostas dos modelos para caso de eventos transitórios em SEPs.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma metodologia para a modelagem de Transformadores de Potencial Indutivos e Capacitivos para estudos de transitórios em altas frequências, visto a necessidade de modelos eficientes, que contemplem seus comportamentos não lineares e efeitos dependentes da frequência, para tais equipamentos no estudo de distúrbios de frente rápida. De forma a atender esses requisitos, foram desenvolvidos modelos de TPs para estudos de transitórios que resultam em frequências na ordem de até 3 MHz, uma vez que, para estudos acima dessa faixa de frequência, a obtenção de modelos confiáveis torna-se prejudicada por interferências e limitações técnicas de alguns dos equipamentos disponíveis.

Os modelos dos TPs são desenvolvidos a partir da utilização de um SFRA comercial com conexões adaptadas para a análise de sua resposta em frequência. O resultado dessa medição é importado ao MATLAB®, que com uma rotina de correção, cria a matriz de admitâncias que representa o TP visto a partir de seus terminais para uma grande faixa de frequências. Ao aplicar o método do Ajuste Matricial nessa matriz, obtém-se um circuito equivalente RLC adequado para utilização em programas de transitórios eletromagnéticos.

A metodologia proposta foi aplicada em três TPs: dois TPIs, um de 13,8 kV e outro de 138 kV, e um TPC de 230 kV. O TPI de 13,8 kV pertence à Universidade Federal de Santa Maria, enquanto que os outros dois TPs estudados foram disponibilizados pela CEEE-GT. Os ensaios em frequência dos TPs foram realizados pelo SFRA FRAnalyzer da OMICRON, que também foi disponibilizado pela CEEE-GT.

A validação dos modelos criados foi realizada através da comparação entre suas respostas e as dos TP reais quando submetidos a um teste de degrau de tensão. Desse teste, bons resultados foram obtidos da comparação entre as respostas ao degrau de tensão no modelo e no equipamento original tanto para as tensões nos terminais primários quanto secundários.

Por fim, para comprovar a fidelidade dos modelos na análise de fenômenos transitórios, foram analisadas, através do programa ATPDraw, as respostas dos modelos dos TPs quando os SEPs a que são empregados são submetidos à eventos de curto-circuito, descarga atmosférica e chaveamentos. Os resultados dos testes são satisfatórios e comprovam o comportamento não ideal das tensões secundárias dos TPs reais na presença de faltas e transitórios em seus terminais primários, levando algum tempo para normalizar sua operação.

6 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Os resultados promissores obtidos das respostas dos modelos construídos estimulam novos estudos sobre o tema. Pelo fato de este ter sido o primeiro trabalho a utilizar o SFRA comercial para ensaios em frequência pelo grupo de pesquisa do Centro de Estudos em Energia e Sistemas de Potência (CEESP) da UFSM, ainda há pontos que podem ser aprimorados nas futuras aquisições desses tipos de dados, como busca por ambiente propício para medição e materiais mais confiáveis. Esforços também podem ser direcionados na tentativa de aumentar a abrangência da faixa de frequências de representação do modelo, assim como melhorar o desempenho do modelo também em baixas frequências.

Além de melhorias no processo de medição com o SFRA, sugere-se um estudo mais detalhado na estabilidade numérica dos modelos quando estes são aplicados ao ATPDraw. Isso se deve ao fato de que, durante o desenvolvimento de alguns testes na realização deste trabalho, foram percebidos conflitos entre alguns elementos e configurações do ATPDraw com o circuito equivalente RLC do modelo do TP, que, no seu circuito, geralmente, apresenta valores negativos para indutâncias e capacitâncias.

Visando consolidar os resultados da metodologia proposta, sugere-se a realização de um maior número de ensaios em TPIs e TPCs de diferentes fabricantes, bem como, realizar testes para analisar a resposta a um sinal de impulso gerado em laboratório de alta tensão dos próprios fabricantes. Além disso, sugere-se comparar os modelos criados a partir dos resultados das medidas obtidas de ensaios de resposta em frequência realizados com a metodologia de ensaio dos fabricantes, que aplica um sinal de tensão e potência com valor bem maior que o sinal injetado pelo SFRA.

REFERÊNCIAS

ABDUL-MALEK, Z. et al. **Investigation of ferroresonance mitigation, techniques in voltage transformer using ATP-EMTP simulation.** In: Jurnal Teknologi, 2013, pp. 85-95, July, 2013.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6855:** Transformador de Potencial Indutivo. Rio de Janeiro, 1992.

AJAEI, F.B.; SANAYE-PASAND, M. **Minimizing the Impact of Transients of Capacitive Voltage Transformers on Distance Relay.** In: Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008. POWERCON 2008, , pp.1-6, 12-15 Oct. 2008.

ALVES, F. R. et al. **Análise de problemas associados aos transformadores de potencial capacitivo 550kV da usina de Xingó.** Em: XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE. Campinas, Brasi, Outubro, 2001.

ARAÚJO, M. A. **Projeto de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas para uma linha de transmissão de 69 kV.** 2010. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

BAINY, R. G. et al. **Influência de modelos de transformadores de potencial capacitivo sobre a estimação de fasores de tensão.** Em: IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE. Goiânia, Brasil, Maio, 2012.

BAINY, R. G. et al. **Compensação da dinâmica de transformadores de potencial capacitivos em dispositivo digital de sinal (DSP) para estudos elétricos na usina hidrelétrica de Itaipu.** Em: XV Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRÉ – ERIAC. Foz do Iguaçu, Brasil, Maio, 2013.

CAGIDO, M. C. **Impulso atmosférico em laboratório – Aplicação, medição e interpretação.** 2014. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2014.

CARVALHO JUNIOR, A. V. **Interação transitória entre transformadores de potencial capacitivos e linhas de transmissão: uma contribuição para minimizar falhas.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

CHIMKLAI, S.; MARTI, J.R. **Simplified three-phase transformer model for electromagnetic transient studies.** In: IEEE Transactions on Power Delivery, vol.10, no.3, pp.1316-1325, Jul 1995.

CIGRÉ Working Group 33.02. **Guidelines for representation of network elements when calculating transients.** Technical brochure CE/SC GT/WG 02, 1990.

COSTELLO, D.; ZIMMERMAN, K. **CVT transients revisited — Distance, directional overcurrent, and communications-assisted tripping concerns**. In: 65th Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2012, pp.73-84, 2-5 April 2012.

FERNANDES JÚNIOR, D. **Estimação de parâmetros para transformadores de potencial capacitivo**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 1999.

FERNANDES JÚNIOR, D. **Modelo de transformadores de potencial capacitivos para estudos de transitórios eletromagnéticos**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2003.

GUSTAVSEN, B. **Matrix fitting toolbox for rational modeling from Y-parameter and S-parameter data**. Norway, 2009.

GUSTAVSEN, B.; SEMLYEN, A. **Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting**. In: IEEE Transactions on Power Delivery, vol.14, no.3, pp.1052-1061, Jul 1999.

HOLDYK, A. et al. **Wideband Modeling of Power Transformers Using Commercial sFRA Equipment**. In: IEEE Transactions on Power Delivery, vol.29, no.3, pp.1446-1453, June 2014.

KANG, et al. **Design and evaluation of a compensating algorithm for the secondary voltage of a coupling capacitor voltage transformer in the time domain**. In: IET Generation, Transmission & Distribution, vol.3, no.9, pp.793-800, September, 2009.

KEZUNOVIC, M. et al. **Digital models of coupling capacitor voltage transformers for protective relay transient studies**. In: IEEE Transactions on Power Delivery, vol.7, no.4, pp.1927-1935, Oct 1992.

KOJOVIC, L.; KEZUNOVIC, M. **A new method for the CCVT performance analysis using field measurements, signal processing and EMTP modeling**. In: IEEE Transactions on Power Delivery, vol.9, no.4, pp.1907-1915, Oct 1994.

MARTI, J.R. et al. **Current transformers and coupling-capacitor voltage transformers in real-time simulations**. In: IEEE Transactions on Power Delivery, vol.12, no.1, pp.164-168, Jan 1997.

MCGRAW, E. **Distribution-System Protection Manual**. McGraw Edison Company Power System Division, 1971, 155 p.

MOORE, F. et al. **Influence of inductive voltage transformers on the measurement of switching transients**. In: Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2012 47th International, pp.1-5, 4-7. London, Sept. 2012.

MORAES, H. M.; VASCONCELOS, J. C. A. **Sobretensões em TPC durante manobra de chave seccionadora**. Em: XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE. Foz do Iguaçu, Brasil, Outubro, 1999.

ROCHA, L. C. **Desempenho de linhas de transmissão EAT e UAT frente a descargas atmosféricas: influência da ruptura a meio de vão.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

SALEH, et al. **Neural Network-based technique used for recovery the CCVT primary signal.** In: Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE, vol., no., pp.1-7, 26-30 July 2009.

SANTOS, A. K. X. **Um compensador para a correção em tempo real da tensão secundária de transformadores de potencial capacitivos.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

SULE, I.; ALIYU, U.O.; VENAYAGAMOORTHY, G.K. **Simulation model for assessing transient performance of capacitive voltage transformers.** In: IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006.

SILVA, C. A. **Correção da tensão secundária de transformadores de potencial capacitivos em tempo real.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

SWEETANA, A. **Transient Response Characteristics of Capacitive Potential Devices.** In: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.PAS-90, no.5, pp.1989-2001, Sept. 1971.

SWEETANA, A.; FLUGUM, R.W. **A New Metering Accuracy Capacitive Potential Device.** In: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.PAS-85, no.5, pp.499-510, May 1966.

TYGAI, Y.I.; BESARAB, A.B. **The mathematical model of voltage transformers for the study of ferroresonant processes.** In: IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 2014. Vol., no., pp.77-80, June, 2014.

ZARE, M. H. et al. **Improving capacitive voltage transformer response and its impact on distance relay performance.** In: 20th Iranian Conference on Electrical Engineering – ICEE 2012. Tehran, Iran, May, 2012.

Apêndice A – Guia para criação dos modelos dos TPs no ATPDraw

Este apêndice ilustra, passo-a-passo, o processo de criação do bloco do transformador de potencial, gerado a partir do arquivo *.txt do circuito equivalente RLC, para simulação no software ATPDraw.

Passo 1: Abra o ATPDraw, e crie um arquivo em branco. Em seguida, no menu “Library”, acesse a opção “Templates on disk > New User Specified”, conforme Figura A.1 abaixo.

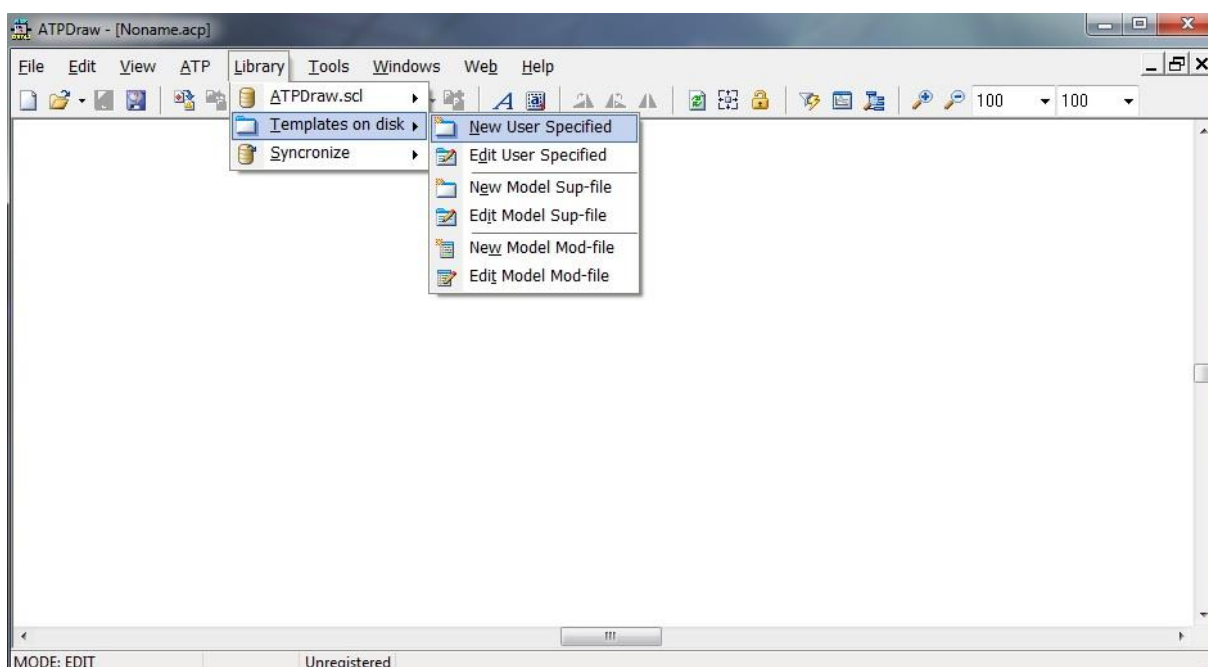


Figura A.1 – Passo 1 para criação e aplicação do bloco do modelo no ATPDraw.

Passo 2: Abrirá uma janela para criação e edição de arquivos suporte, conforme Figura A.2. Nessa janela, na aba “Data”, configure as opções “Num. data” e “Num. nodes” para 0 e 2, respectivamente.

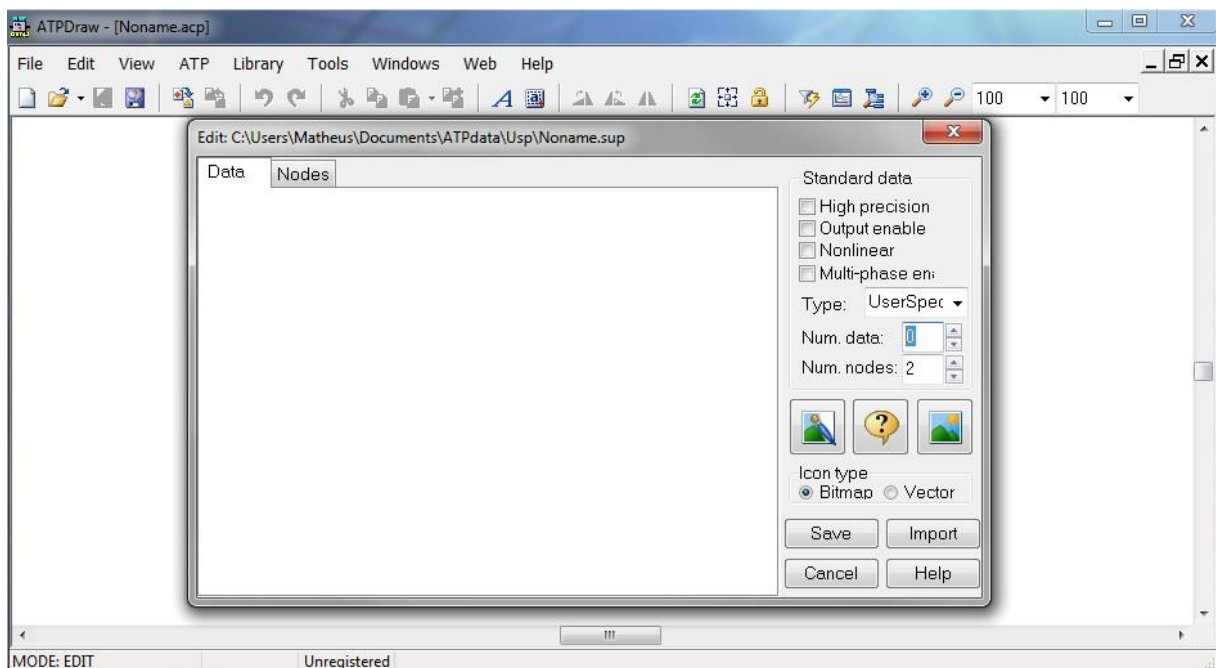


Figura A.2 – Passo 2 para criação e aplicação do bloco do modelo no ATPDraw.

Passo 3: Ainda nessa janela, selecione a aba “Nodes”. Na parte inferior direita dessa aba, configure o tipo de ícone para Vetor e confirme, conforme mostra a Figura A.3.

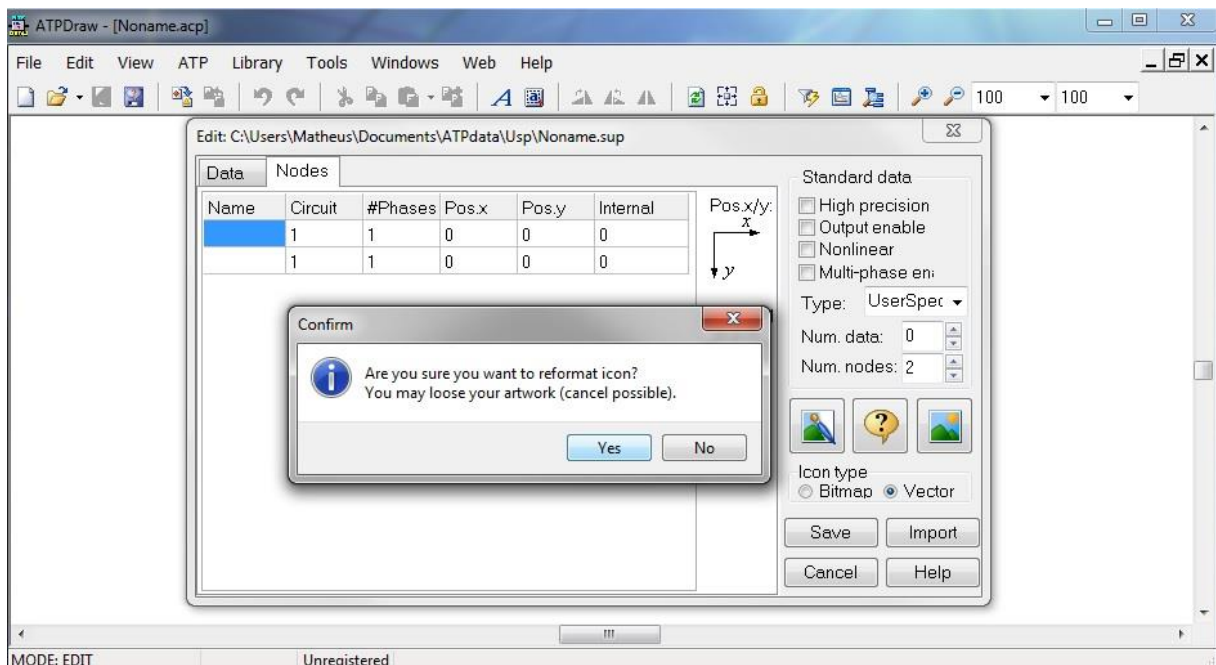


Figura A.3 – Passo 3 para criação e aplicação do bloco do modelo no ATPDraw.

Passo 4: Ainda na aba “Nodes”, defina o nome dos dois nós para IN e OUT e, posteriormente, configure a posição desses nós no eixo y. Recomenda-se, conforme Figura A.4, um valor de -20 para o nó IN, e 20 para o nó OUT.

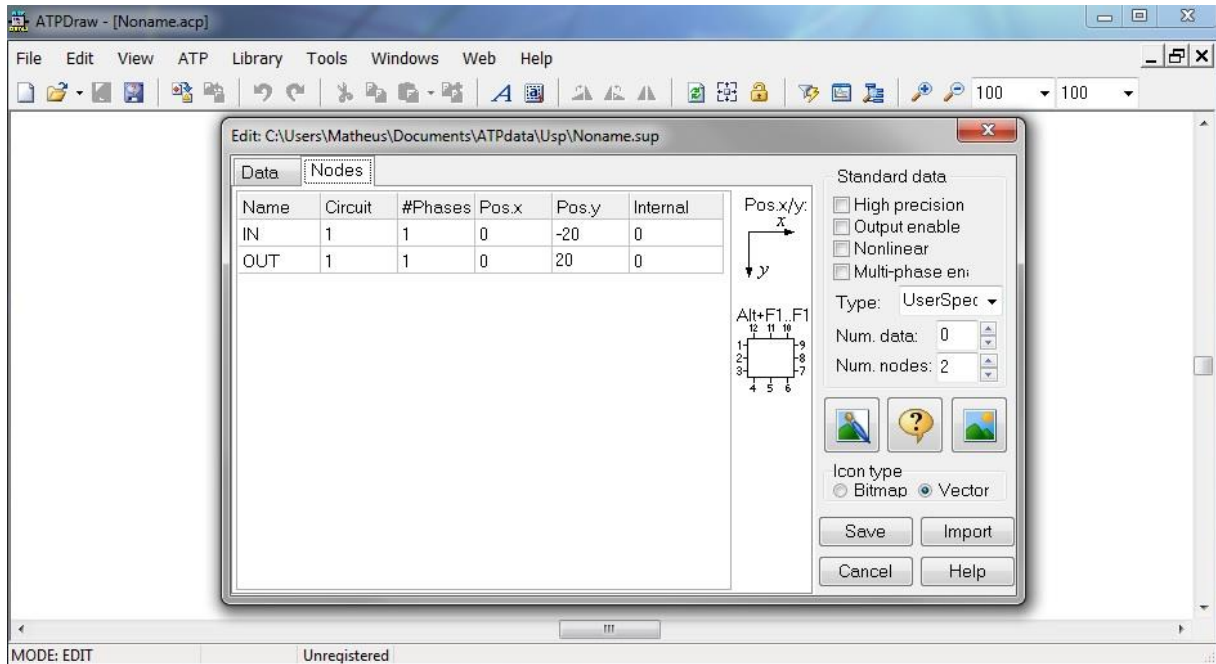


Figura A.4 – Passo 4 para criação e aplicação do bloco do modelo no ATPDraw.

Passo 5: Em seguida, nessa mesma janela, clique no ícone “Icon Editor”, localizado no lado esquerdo do ícone com sinal de interrogação. A janela da Figura A.5 abrirá.

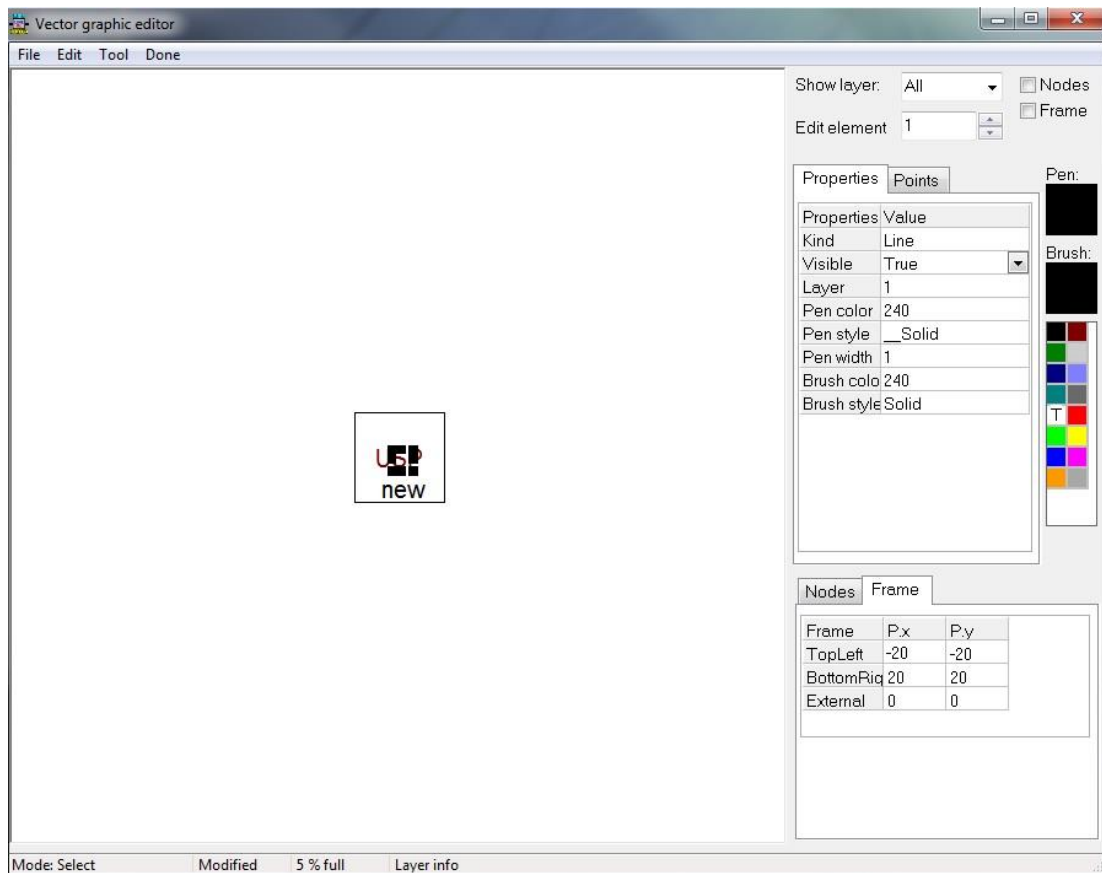


Figura A.5 – Passo 5 para criação e aplicação do bloco do modelo no ATPDraw.

Passo 6: Na janela de edição gráfica, selecione o elemento 5 e, conforme Figura A.6, configure-o de modo a ficar invisível através da atribuição de “False” à propriedade “Visible”.

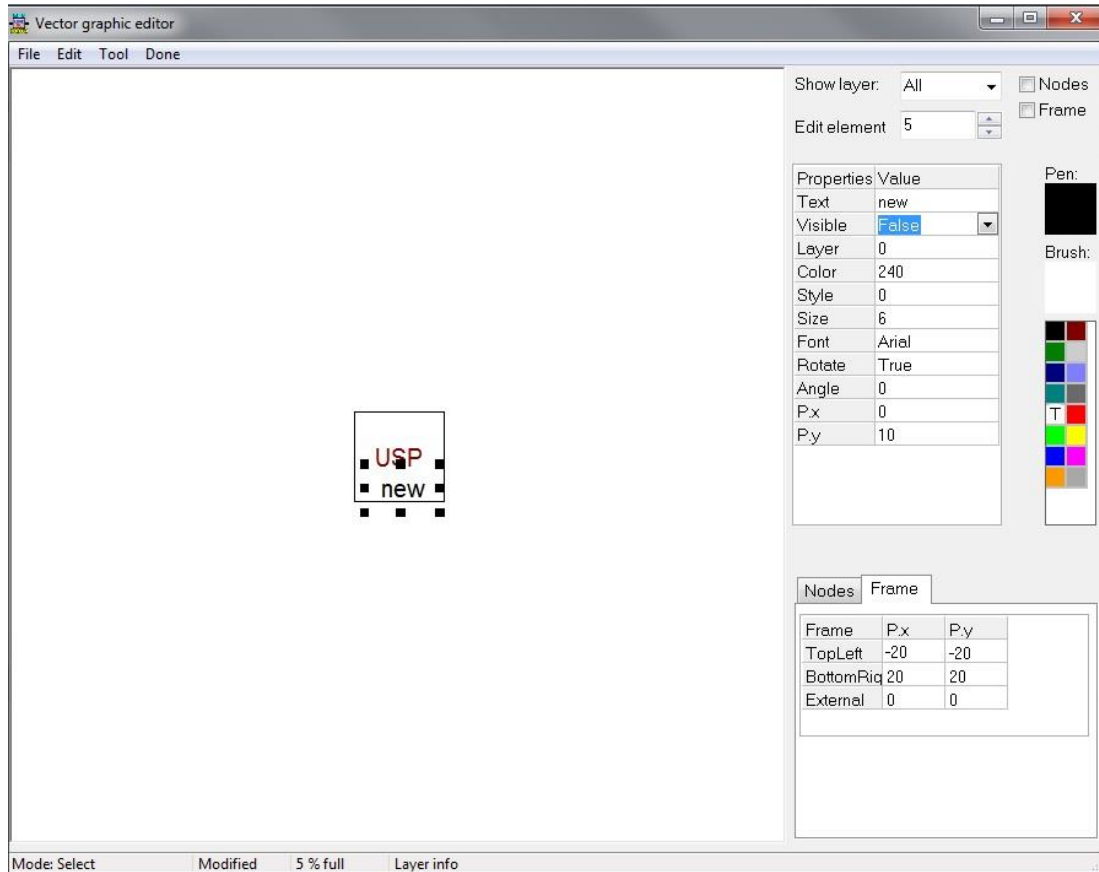


Figura A.6 – Passo 6 para criação e aplicação do bloco do modelo no ATPDraw.

Passo 7: Selecione, agora, o elemento 4 para edição, onde será definida a identificação do bloco. Na propriedade “Text”, digite o nome que deseja atribuir ao seu modelo. Conforme exemplo da Figura A.7, o nome “TP” foi definido. Há, ainda, a possibilidade de alterar a cor, tamanho e fonte das letras do texto editando, respectivamente, os campos “Color”, “Size” e “Font”.

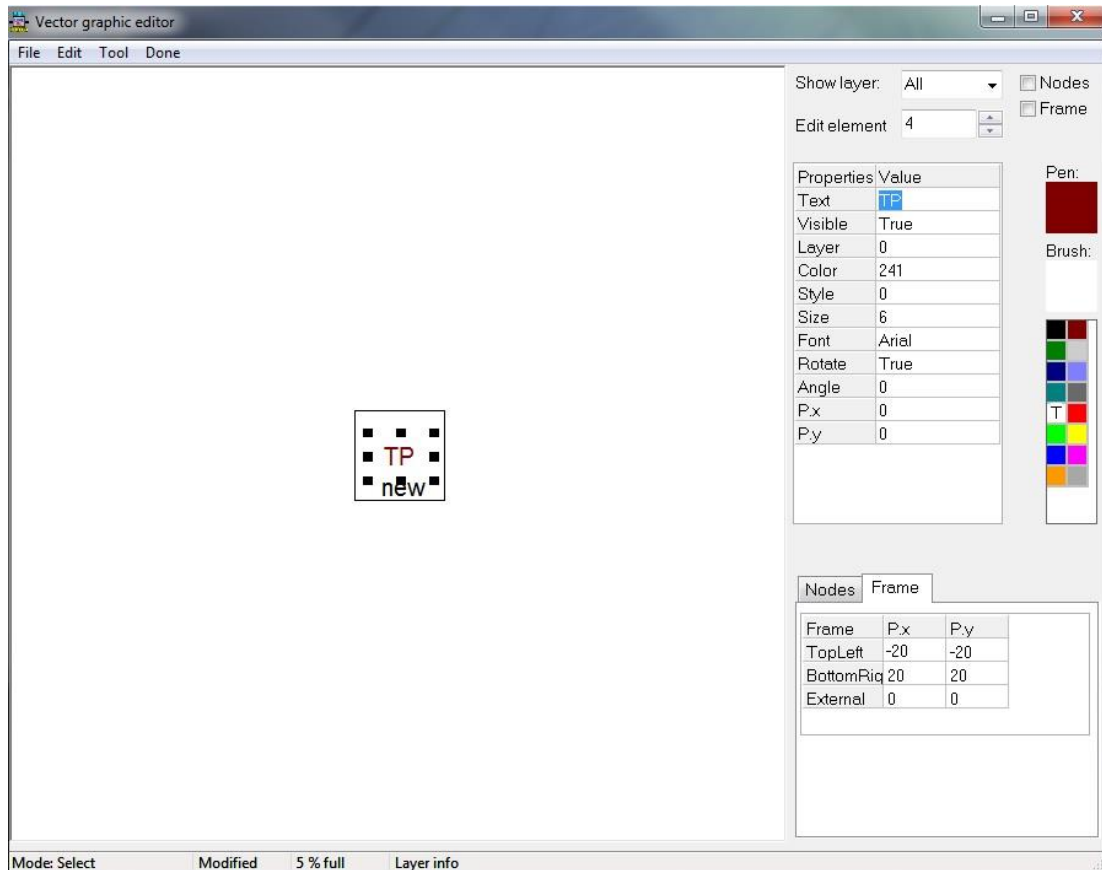


Figura A.7 – Passo 7 para criação e aplicação do bloco do modelo no ATPDraw.

Passo 8: Através das edições dos elementos 1 e 2, vamos configurar a localização dos terminais de conexão do bloco. Ao selecionar tais elementos, essa configuração é realizada na aba “Points” através da escolha de valores para “y” na tabela. A Figura A.8 edita o conector do elemento 1, definindo valores de “y” de “-14” para “P1”, e “-20” para “P2”. A Figura A.9 configura a posição do conector do elemento 2 configurando “14” para “P1” e “20” para “P2”. Definidas essas posições, clique em “Done”, no menu superior da janela.

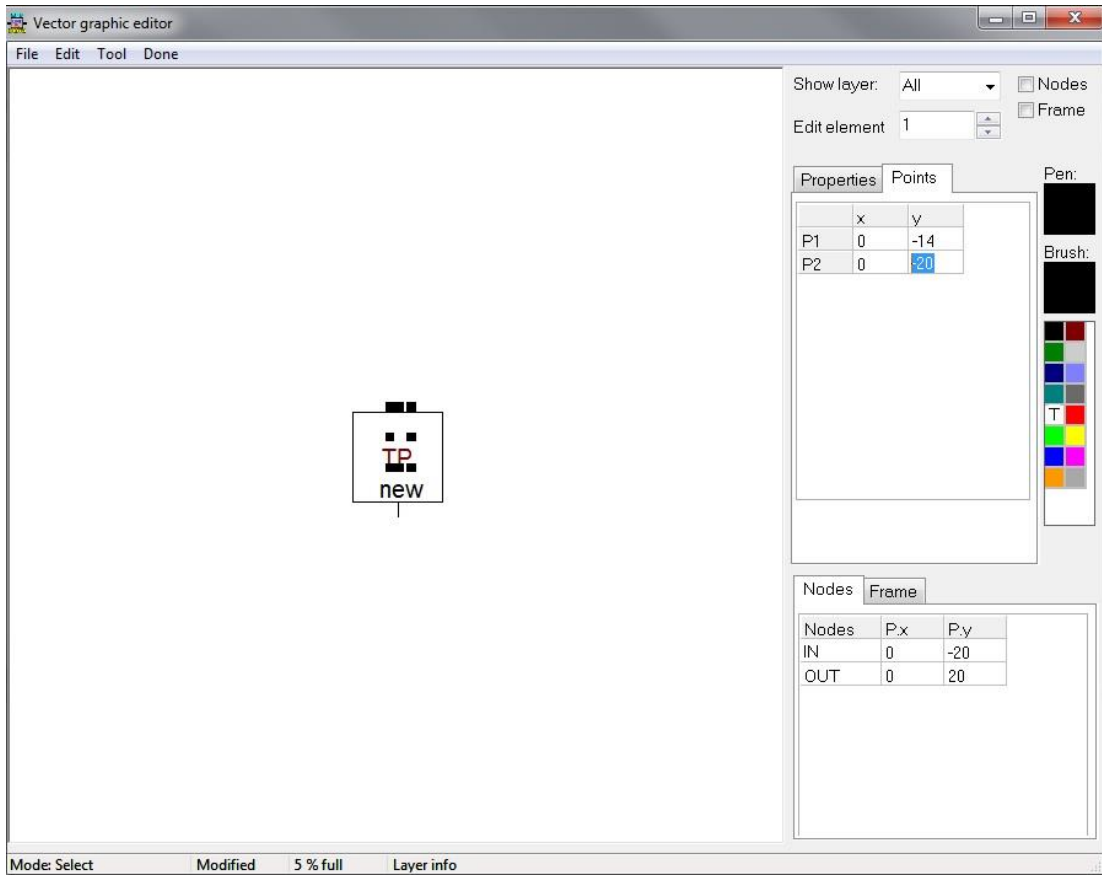


Figura A.8 – Passo 8 para criação e aplicação do bloco do modelo no ATPDraw, elemento 1.

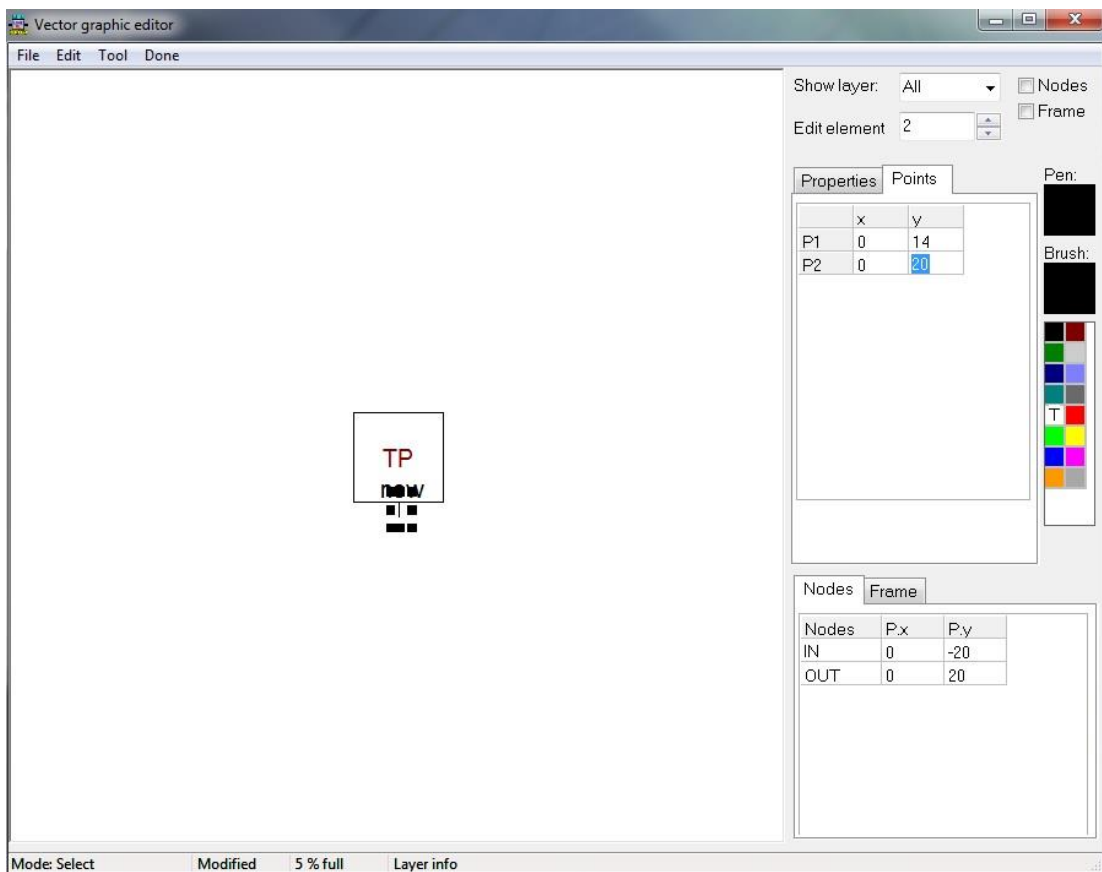


Figura A.9 – Passo 8 para criação e aplicação do bloco do modelo no ATPDraw, elemento 2.

Passo 9: Por fim, para concluir a criação do bloco para o modelo do transformador, basta salvar o arquivo no formato do tipo suporte (*.sup), clicando em “Save”, conforme Figura A.10.

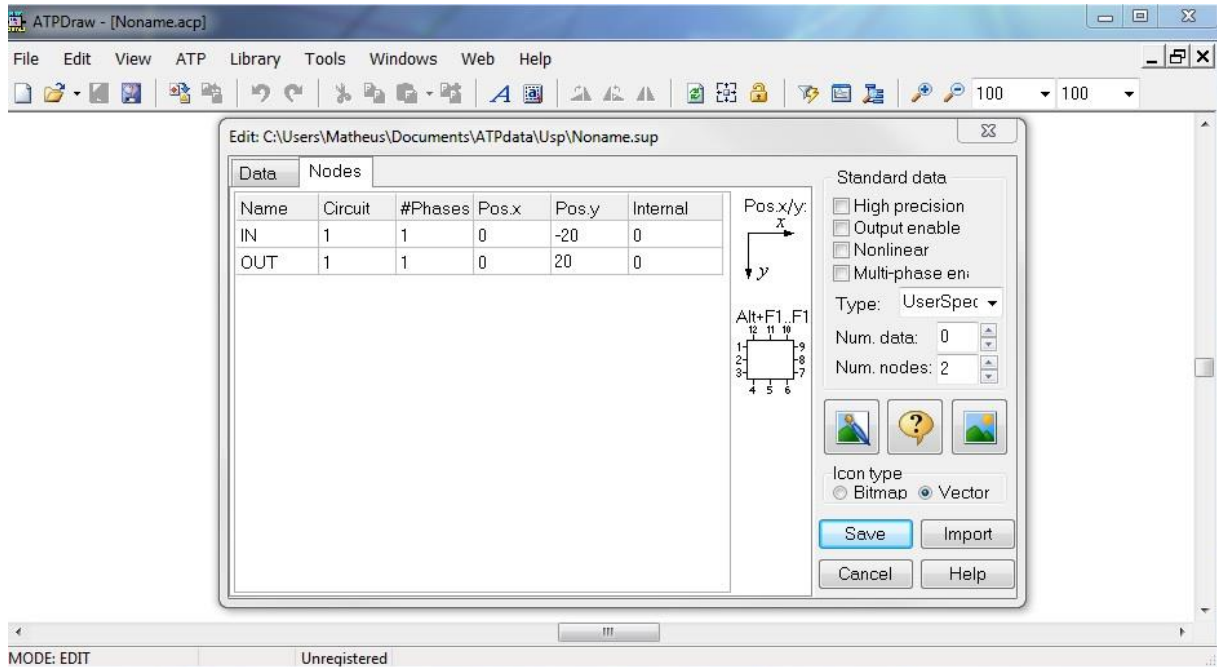


Figura A.10 – Passo 9 para criação e aplicação do bloco do modelo no ATPDraw.

Passo 10: Concluída a criação do bloco, vamos aplicá-lo no ATPDraw. Para chamar o bloco, clique com o botão direito do mouse na área de trabalho do ATPDraw, selecionando, conforme Figura A.11, “User Specified > Files”. Carregue o arquivo salvo no passo anterior.

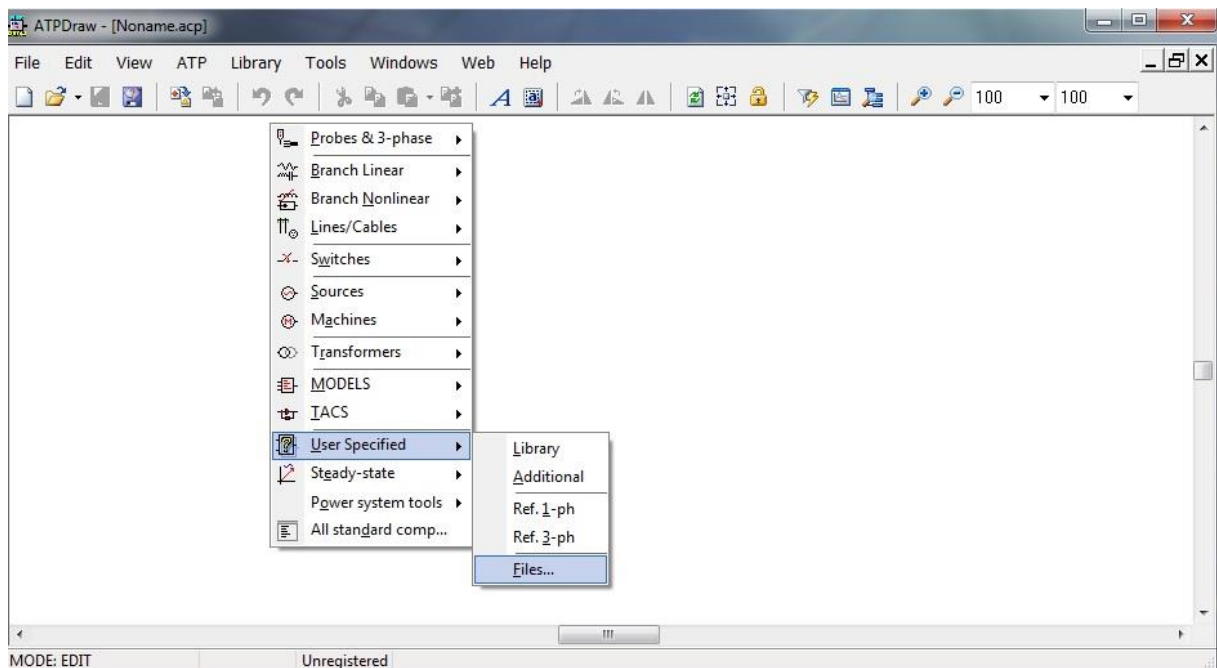


Figura A.11 – Passo 10 para criação e aplicação do bloco do modelo no ATPDraw.

Passo 11: O bloco do modelo surgirá na área de trabalho. Ao clicar duas vezes no ícone do modelo, uma janela para sua edição, ilustrada pela Figura A.12, abrirá. Deve-se, agora, carregar o arquivo texto (*.txt) do circuito equivalente do referido transformador. Para isso, clique no botão “Edit”, localizado ao lado da opção “\$Include”.

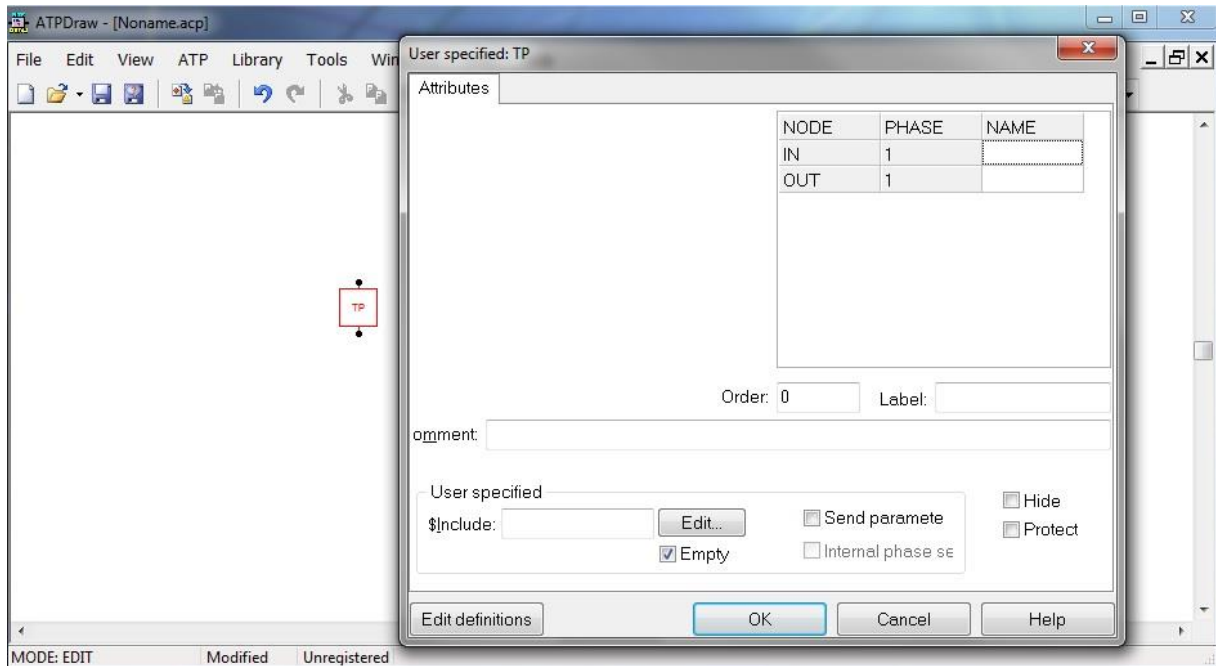


Figura A.12 – Passo 11 para criação e aplicação do bloco do modelo no ATPDraw.

Passo12: Uma janela de edição de texto, ilustrada na Figura A.13, abrirá. Nessa caixa de texto, você deverá importar o arquivo de texto (*.txt) do circuito equivalente. A importação desse arquivo pode ser feita tanto pelo processo de copiar e colar do arquivo original quanto através do menu “File > Import”, conforme mostra a Figura A.14. Caso a segunda opção seja escolhida, recomenda-se armazenar o arquivo a ser importado em uma diretório com um caminho, ou link, pequeno, como, por exemplo, uma pasta direta na raiz (C:) do computador. Após carregar o arquivo, clique em “Done”.

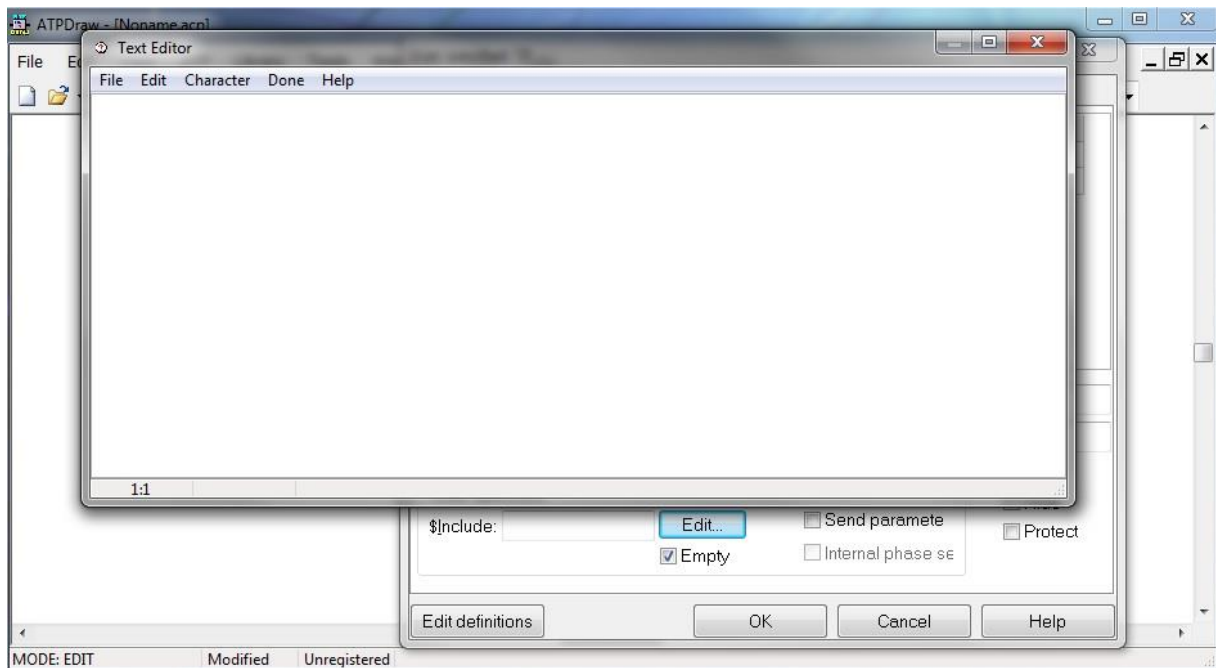


Figura A.13 – Passo 12 para criação e aplicação do bloco do modelo no ATPDraw, editor de texto.

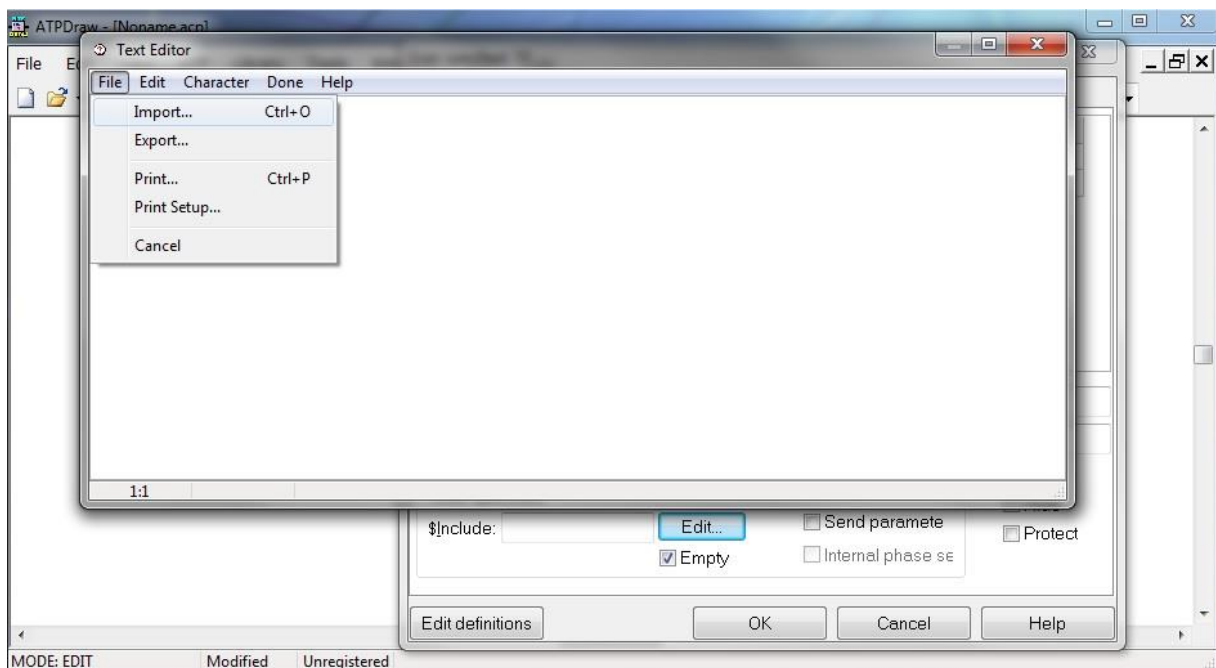


Figura A.14 – Passo 12 para criação e aplicação do bloco do modelo no ATPDraw, importar arquivo texto.

Passo 13: O bloco do modelo do transformador está pronto para ser utilizado em simulações no ATPDraw. NOTA: Atente-se ao fato de que o arquivo texto gera um circuito equivalente entre os nós A___1 e A___2, que representam, respectivamente, os terminais primário e secundário do transformador. Portanto, ao montar o circuito completo a ser simulado no ATPDraw, certifique-se de renomear os nós terminais do bloco dessa mesma maneira, conforme ilustra a Figura A.15 a seguir.

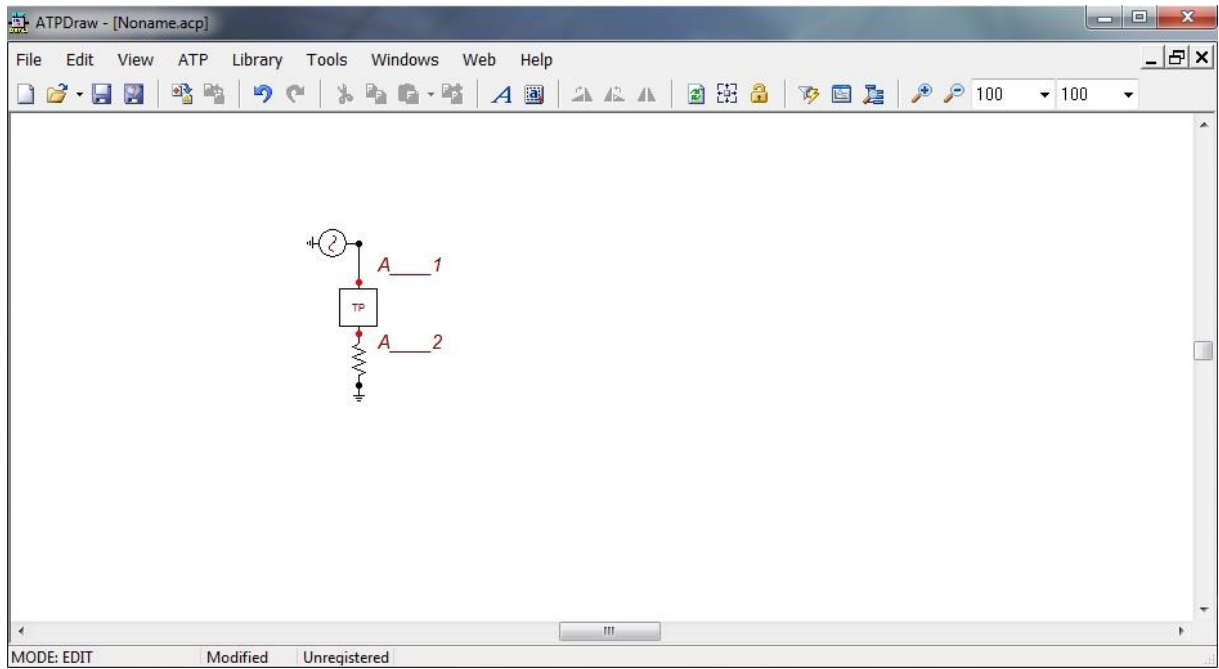


Figura A.15 – Passo 13 para criação e aplicação do bloco do modelo no ATPDraw.