

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

Humberto Margel Wickert

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA PARA ESTUDO DE
TRANSITÓRIOS EM ALTAS FREQUÊNCIAS**

Santa Maria, RS

2016

Humberto Margel Wickert

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE TRANSFORMADORES
DE POTÊNCIA PARA ESTUDO DE TRANSITÓRIOS EM ALTAS FREQUÊNCIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Bandeira Marchesan

Coorientador: Prof. Dr. Lenois Mariotto

Santa Maria, RS
2016

Wickert, Humberto Margel
Modelagem e Simulação Computacional de Transformadores
de Potência para Estudo de Transitórios em Altas
Frequências / Humberto Margel Wickert.- 2016.
88 p.; 30 cm

Orientador: Tiago Bandeira Marchesan
Coorientador: Lenois Mariotto
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2016

1. Transformador de Potência 2. Modelo para Altas
Frequências 3. Transitórios Eletromagnéticos 4. Simulação
Computacional 5. Frequências de Ressonância I. Marchesan,
Tiago Bandeira II. Mariotto, Lenois III. Título.

©2016

Todos os direitos autorais reservados a Humberto Margel Wickert. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: humbertomw@hotmail.com

Humberto Margel Wickert

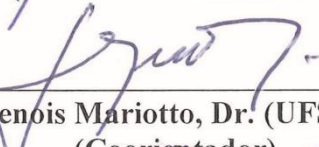
**MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE TRANSFORMADORES
DE POTÊNCIA PARA ESTUDO DE TRANSITÓRIOS EM ALTAS FREQUÊNCIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Aprovado em 18 de agosto de 2016:



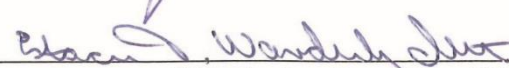
Tiago Bandeira Marchesan, Dr. (UFSM)
(Presidente/ Orientador)



Lenois Mariotto, Dr. (UFSM)
(Coorientador)



Ghendy Cardoso Junior, Dr. (UFSM)



Estácio Tavares Wanderley Neto, Dr. (UNIFEI)

Santa Maria, RS

2016

DEDICATÓRIA

A minha esposa Daiana Lenz e nossa filha Marina Wickert, pela compreensão, carinho e amor. Dedico também aos meus pais Inácio Wickert e Maria Tereza Brinker por todo o amor, paciência e exemplo a ser seguido. A minha irmã Géssica Wickert e meu sobrinho Noah Wickert.

AGRADECIMENTOS

Aos professores Tiago Bandeira Marchesan e Lenois Mariotto pela confiança, dedicação, competência e excelente orientação deste trabalho.

Aos colegas e amigos da Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica, em especial ao Rodinei Carraro, por toda ajuda, amizade e convívio ao longo deste trabalho; aos colegas Thiago Mattevi e Tiago Rafael Vieira por todo apoio, amizade e companheirismo.

A Dona Francisca pelo acolhimento em Santa Maria.

Enfim, agradeço a todos os meus amigos e familiares que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão deste estudo.

*O cientista não é o homem que
fornece as verdadeiras respostas; é
quem faz as verdadeiras perguntas.*

(Claude Lévi-Strauss)

RESUMO

MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA PARA ESTUDO DE TRANSITÓRIOS EM ALTAS FREQUÊNCIAS

AUTOR: Humberto Margel Wickert

ORIENTADOR: Tiago Bandeira Marchesan

COORIENTADOR: Lenois Mariotto

Este trabalho apresenta uma proposta de modelagem de um transformador de potência para transitórios eletromagnéticos em altas frequências. O emprego deste modelo possibilita avaliar o comportamento dos enrolamentos frente aos surtos de tensão resultantes de transitórios no sistema elétrico de potência. Além do modelo, são detalhados os cálculos necessários para a determinação dos parâmetros distribuídos e concentrados que definirão o circuito representativo do modelo. Os cálculos foram realizados para um transformador de potência de 25 MVA, a partir dos dados obtidos de uma auditoria técnica entre cliente e fabricante, também conhecida como *design review*. A representação do modelo do equipamento para a simulação é realizada através de uma linguagem descritiva, *netlist*. A impossibilidade de medições de tensão ao longo dos enrolamentos do transformador, submetidos a surtos de tensão, motivaram o desenvolvimento do modelo proposto e a sua validação via simulação computacional. Com o objetivo de avaliar as potencialidades do modelo desenvolvido realizaram-se simulações enfatizando a determinação da distribuição das tensões transitórias de impulso atmosférico ao longo dos enrolamentos do transformador, sendo estes resultados avaliados detalhadamente. Também foram abordadas alterações no projeto do transformador estudado, considerando enrolamentos tradicionalmente utilizados pelos fabricantes. É apresentada uma comparação qualitativa entre a resposta do transformador projetado e os estudos de modificação de projeto.

Palavras-chave: Transformador de Potência. Modelo para Altas Frequências. Transitórios Eletromagnéticos. Simulação Computacional. Frequências de Ressonância.

ABSTRACT

MODELING AND COMPUTATIONAL SIMULATION OF POWER TRANSFORMERS FOR HIGH-FREQUENCY TRANSIENTS STUDIES

AUTHOR: Humberto Margel Wickert

ADVISOR: Tiago Bandeira Marchesan

JOINT ADVISOR: Lenois Mariotto

This paper presents a proposed the modeling of power transformers for high-frequency electromagnetic transients. The application of this model allows the evaluation of the windings behavior against the voltage surges imposed by the electric power system. Besides the model, the required calculations to determine the concentrated and distributed parameters which define the representative circuit are detailed. The calculations were performed for a 25 MVA power transformer, using the data obtained from a technical audit between both client and manufacturer, known as *design review*. The representation of the equipment for the simulation is realized through a descriptive language, known as *netlist*. The impossibility of measuring the voltage along the power transformer windings subjected to voltage surges has motivated the development of the proposed model and computer simulation. Aiming to evaluate the potentialities of the developed model, the simulations for the power transformer were performed focusing on the determination of the lightning impulse transient voltage distribution along the windings and fully evaluating the obtained results. Alterations of the studied transformer's project were also addressed, considering the windings traditionally used by the manufacturers. A qualitative comparison between the responses of both power transformers is also presented.

Keywords: Power Transformer. High-frequency Modeling. Electromagnetic Transients. Computational Simulation. Resonant Frequencies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Transformador: (a) estrutura física do transformador; (b) circuito representativo	22
Figura 2 – Circuito capacitivo (bobina no instante inicial do transitório)	23
Figura 3 – Distribuição da tensão de impulso no enrolamento com neutro aterrado	24
Figura 4 – Distribuição inicial de tensão no enrolamento	25
Figura 5 – Disposição das espiras no enrolamento disco contínuo	26
Figura 6 – Disposição das espiras no enrolamento disco entrelaçado	26
Figura 7 – Malha equivalente de um transformador multi-enrolamentos	27
Figura 8 – Resposta em frequência para diferentes transformadores	28
Figura 9 – Modelo matemático do enrolamento através dos parâmetros distribuídos	30
Figura 10 – Matriz de indutância	36
Figura 11 – Fluxograma proposto para análise dos transformadores	38
Figura 12 – Representação dos parâmetros concentrados do enrolamento do transformador	40
Figura 13 – Representação do circuito equivalente	42
Figura 14 – Enrolamento entrelaçado do tipo <i>English Electric</i>	43
Figura 15 – Circuito equivalente da linguagem descritiva	44
Figura 16 – Representação dos enrolamentos do transformador e conexões	46
Figura 17 – Divisão dos enrolamentos	47
Figura 18 – Modelo simplificado com os parâmetros elétricos concentrados	47
Figura 19 – Onda de impulso atmosférico	49
Figura 20 – Diagrama de conexões para impulso aplicado na AT	49
Figura 21 – Simulação do fabricante: Tensões críticas entre enrolamento de AT e BT	50
Figura 22 – Simulação própria: Tensões críticas entre enrolamento de AT e BT	50
Figura 23 – Esquema de ligação do enrolamento de AT	51
Figura 24 – Resposta para impulso atmosférico no enrolamento de AT	52
Figura 25 – Distribuição inicial de tensão no enrolamento tipo disco entrelaçado	52
Figura 26 – Esquema de ligação entre enrolamentos de AT e BT	53
Figura 27 – Resposta para impulso atmosférico entre enrolamentos de AT e BT em pu	54
Figura 28 – Resposta para impulso atmosférico entre enrolamentos de AT e BT em kV	54
Figura 29 – Esquemas de ligação do enrolamento de AT	56
Figura 30 – Resposta para tensões transferidas entre AT (DE) e BT, em pu	57
Figura 31 – Resposta para tensões transferidas entre AT (DEC8) e BT, em pu	58
Figura 32 – Resposta para tensões transferidas entre AT (DC) e BT, em pu	58
Figura 33 – Detalhe da resposta para tensões transferidas entre AT (DE) e BT	59

Figura 34 – Detalhe da resposta para tensões transferidas entre AT (DEC) e BT	60
Figura 35 – Detalhe da resposta para tensões transferidas entre AT (DC) e BT.....	60
Figura 36 – Amplitude de tensão nos enrolamentos estudados.....	61
Figura 37 – Tensões entre espiras no enrolamento tipo disco entrelaçado	62
Figura 38 – Tensões entre espiras no enrolamento tipo disco parcialmente entrelaçado	63
Figura 39 – Tensões entre espiras no enrolamento tipo disco contínuo	63
Figura 40 – Amplitude de tensão entre espiras do primeiro disco dos enrolamentos	64
Figura 41 – Tensões entre discos no enrolamento tipo disco entrelaçado.....	65
Figura 42 – Tensões entre discos no enrolamento tipo disco parcialmente entrelaçado	65
Figura 43 – Tensões entre discos no enrolamento tipo disco contínuo	66
Figura 44 – Detalhe das tensões entre discos no enrolamento DE.....	67
Figura 45 – Detalhe das tensões entre discos no enrolamento tipo DEC8	67
Figura 46 – Detalhe das tensões entre discos no enrolamento DC.....	68
Figura 47 – Amplitude de tensão entre discos dos enrolamentos estudados.....	68
Figura 48 – Esquemas de ligação do enrolamento tipo disco parcialmente entrelaçado	70
Figura 49 – Tensões entre discos para descontinuidade em DE12048 – DC12050 (DEC4) ...	71
Figura 50 – Tensões entre discos para descontinuidade em DE12052 – DC12054 (DEC6) ...	72
Figura 51 – Tensões entre discos para descontinuidade em DE12056 – DC12058 (DEC8) ...	72
Figura 52 – Amplitude de tensão entre disco na região de descontinuidade.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tensões entre enrolamentos de AT e BT.....	55
Tabela 2: Tensões entre discos no enrolamento tipo disco entrelaçado	69

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas;

AT: Enrolamento de alta tensão;

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica;

BIL: *Basic Insulation Level*;

BT: Enrolamento de baixa tensão;

C_a: Capacitância série parcial;

C_G: Capacitância paralela;

C_P: Capacitância paralela;

C_S: Capacitância série;

C_{gi}: Capacitância paralela para o enrolamento interno;

C_{ge}: Capacitância paralela para o enrolamento externo;

CEEE-GT: Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica;

CIGRÉ-Brasil: Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica;

CIGRÉ: International Council on Large Electric Systems;

DC: Disco contínuo;

DE: Disco entrelaçado;

DEC: Disco parcialmente entrelaçado;

DIL: *Design Insulation Level*

L: Indutância;

NBI: Nível básico de isolamento;

RAT: Enrolamento de regulação da alta tensão;

R: Resistência ôhmica;

SIN: Sistema Interligado Nacional;

SPICE: *Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*;

PU: Por unidade.

α : Fator de distribuição da tensão transitória.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO.....	17
1.2	OBJETIVOS	18
1.2.1	Objetivo geral.....	18
1.2.2	Objetivos específicos.....	18
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1	SOBRETENSÕES E ENSAIOS NORMALIZADOS	20
2.2	FENÔMENOS TRANSITÓRIOS.....	21
2.3	TRANSFORMADOR SUBMETIDO A TRANSITÓRIOS.....	22
2.4	ENROLAMENTOS PARA ALTA TENSÃO	25
2.5	RESSONÂNCIA EM TRANSFORMADORES	27
2.6	MODELO DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA.....	29
2.6.1	Cálculo das capacitâncias	30
2.6.1.1	<i>Capacitância paralela</i>	31
2.6.1.2	<i>Capacitância série</i>	32
2.6.1.2.1	<i>Disco contínuo.....</i>	33
2.6.1.2.2	<i>Disco entrelaçado</i>	33
2.6.1.2.3	<i>Camada.....</i>	34
2.6.2	Cálculo das indutâncias	34
2.6.3	Cálculo das resistências.....	36
2.7	DESIGN REVIEW	37
3	DESENVOLVIMENTO DO MODELO DO TRANSFORMADOR.....	39
3.1	MODELO DO TRANSFORMADOR ADOTADO	39
3.2	CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO TRANSFORMADOR ...	40
3.2.1	Enrolamentos	40
3.2.2	Isolamento	41
3.2.3	Núcleo	41
3.3	CIRCUITO EQUIVALENTE DO TRANSFORMADOR.....	42
3.4	REPRESENTAÇÃO DO MODELO NO SPICE	43
4	TRANSFORMADOR MODELADO.....	45
4.1.1	Enrolamento AT	45
4.1.2	Enrolamento BT	45

4.1.3	Enrolamento terciário	45
4.1.4	Enrolamento regulação AT (RAT)	46
4.1.5	Núcleo	46
5	ESTUDO DE CASO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	48
5.1	ONDA PADRONIZADA: IMPULSO ATMOSFÉRICO	48
5.1.1	Caso 1: Análise do transformador real	51
5.1.2	Caso 2: Análise do transformador e estudo de modificação de projeto ..	55
<i>5.1.2.1</i>	<i>Tensões entre enrolamentos de AT e BT.....</i>	<i>57</i>
<i>5.1.2.2</i>	<i>Tensões entre espiras do enrolamento de AT</i>	<i>61</i>
<i>5.1.2.3</i>	<i>Tensões entre discos do enrolamento de AT.....</i>	<i>64</i>
5.1.3	Caso 3: Análise do enrolamento tipo disco parcialmente entrelaçado	70
6	CONCLUSÃO.....	74
6.1	CONTINUIDADE DO TRABALHO	75
6.2	PUBLICAÇÕES	75
	REFERÊNCIAS.....	76
	APÊNDICE A – LINGUAGEM ESTRUTURADA.....	78

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, requisitos de qualidade, continuidade e segurança no fornecimento de energia elétrica são impostos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) às empresas transmissoras e distribuidoras de energia elétrica. A missão da ANEEL é “proporcionar condições favoráveis para que o mercado de energia elétrica se desenvolva com equilíbrio entre os agentes e em benefício da sociedade” (ANEEL, 2016).

As exigências, relacionadas à disponibilidade e à qualidade no fornecimento de energia elétrica entregue ao consumidor, demandam um alto investimento em equipamentos. Neste contexto destaca-se o transformador de potência, um dos principais componentes na confiabilidade operativa das subestações e interligações dos circuitos de diferentes níveis de tensões.

De acordo com Medina (2003), entre os fatores que contribuem para tornar o transformador de potência um elemento importante no sistema de transmissão estão o elevado custo de investimento, prazo de aquisição, impossibilidade de transportá-lo montado e elevado tempo de montagem.

Porém, com o aumento das interligações do Sistema Interligado Nacional (SIN) os transformadores são muito solicitados durante os distúrbios neste sistema, podendo causar danos severos que provocam sua retirada de operação, diminuindo assim, a capacidade de transmissão de energia (ZAMBRANO, 2009).

A estes distúrbios somam-se os fenômenos transitórios, caracterizados por tensões transitórias com frente de onda rápida, típicas de descargas atmosféricas; assim como tensões transitórias com frente de onda muito rápida, oriundas de sobretensões de manobras de equipamentos.

A confiabilidade de um transformador de potência está associada à probabilidade de ruptura do seu isolamento, quando submetido a surtos oriundos do sistema. Algumas solicitações importantes podem não ser cobertas por ensaios normatizados e devem ser criteriosamente analisadas e especificadas, a fim de certificar que o projeto do transformador leve em consideração tais solicitações.

Dessa forma, o propósito do estudo do comportamento de transformadores submetidos a transitórios eletromagnéticos é certificar de que não ocorram falhas de isolamento dos enrolamentos. Este isolamento é determinado pela tensão que aparece no dielétrico e pelo esforço elétrico que a forma de tensão provoca sobre o mesmo. Conseqüentemente influenciando na dimensão, peso e principalmente no custo do transformador. O último item é

determinante para que os fabricantes projetem transformadores com o isolamento extremamente otimizado; daí a importância da construção de um modelo como ferramenta para estudos do cliente.

Ainda na fase de projeto do transformador torna-se fundamental a participação dos clientes para desenvolvimento de um modelo deste equipamento, que possibilite a análise das tensões internas dos enrolamentos.

Conforme Zambrano (2009), os modelos que não levam em consideração as características físicas do equipamento apresentam restrições para as frequências em que podem ser utilizados. Modelos mais avançados de transformadores necessitam de detalhes construtivos que não são revelados pelo fabricante, ou ainda, os dados fornecidos são insuficientes para se construir um circuito equivalente detalhado.

Portanto, a combinação de esforços entre especificação e projeto (cliente e fabricante), na etapa de *design review*, pode contribuir para a proteção adequada do transformador para frequências características de manobras da subestação específica, reduzindo os riscos de amplificações internas de tensões e solicitações dielétricas excessivas (MENDES, 1995).

A determinação da frequência natural das oscilações internas no transformador torna-se um requisito importante na fase de projeto e instalação do equipamento, a fim de avaliar o risco de que surtos oriundos do sistema venham a propiciar a condição de ressonância interna no transformador.

Um modelo equivalente e consistente para simular o comportamento de transformadores de potência, submetidos a tensões transitórias, tem sido alvo de diversos estudos. No presente trabalho são apresentadas algumas das recentes propostas que visualizam o estado da arte nos estudos sobre modelagem e simulação de transformadores para transitórios em altas frequências.

Nesse contexto, Amaral (1994) desenvolve uma técnica de modelagem de transformador de potência que representa as características elétricas, magnéticas e as perdas do transformador em função da frequência, através de um complexo circuito de parâmetros concentrados. Além do modelo, é dada uma grande atenção ao cálculo dos parâmetros e à escolha da melhor forma de modelar transformadores. O autor realiza os cálculos dos parâmetros, executa a montagem do circuito e obtém a resposta matemática do modelo para uma excitação determinada. Devido à dificuldade de encontrar todos os dados necessários relativos a um equipamento específico, foi utilizado um equipamento teórico com base nos dados reais de equipamentos apresentados na literatura.

Outra importante referência, corresponde a Mendes (1995), cujo trabalho analisa a modelagem de enrolamentos para transitórios de alta frequência fundamentada no modelo elétrico de parâmetros distribuídos de linha de transmissão longa. Neste, são apresentados os resultados de simulações aplicadas a alguns transformadores de alta tensão. As análises se detêm próximo ao terminal de entrada dos enrolamentos submetidos a tensões transitórias, apresentando as tensões internas resultantes de cálculos realizados, as tensões suportáveis e os coeficientes de segurança correspondente.

Tanto Villa (2006) quanto Rahimpour e Bigdelli (2009) apresentam equações simplificadas para cálculo das indutâncias, capacitâncias e resistências, baseados nos dados geométricos do transformador, para aplicação no modelo de equipamentos. Os resultados foram comparados com a resposta em frequência dos transformadores estudados.

Em 2011, Venegas et al. além da demonstração dos cálculos realizados para determinar os parâmetros elétricos RLC do transformador através das formulações convencionais, o modelo é validado através da comparação entre o transitório de tensão medido e calculado em um protótipo reduzido de um transformador de potência.

Nos últimos anos, tem sido propostos muitos trabalhos de modelo de transformadores de potência no domínio da frequência para estudo de transitórios eletromagnéticos. Em 2007, Martins implementou um modelo analítico de enrolamento de transformador, desenvolvendo as bases necessárias à implementação de um sistema de monitoramento utilizando a metodologia de resposta em frequência. Já Zambrano (2009), desenvolveu duas metodologias através das quais se obtêm os parâmetros de um circuito equivalente que representa o comportamento do transformador em uma ampla faixa de frequências. Em 2011, Oliveira apresenta uma metodologia para determinação de um modelo matemático para transformadores, a partir da medição da resposta em frequência do transformador, a qual é ajustada por funções de transferência, utilizando-se a rotina *vector fitting*.

Kulkarni e Khaparde (2004), abordam em seu livro o tratamento completo sobre a engenharia de transformadores. Sua abordagem alia a teoria e prática em todos os tópicos, além de propagar o uso de modernas ferramentas computacionais para a otimização e melhoria na qualidade do transformador. Soma-se ainda o fato de considerarem as principais referências nos assuntos tratados. Foram encontrados nesta publicação, todas as informações necessárias para calcular os parâmetros do modelo RLC do transformador, principalmente na estrutura capacitiva. Para a estrutura indutiva, também utilizou-se do exposto por Grover (1973) e Wirgau (1976).

Importantes referências são os estudos coordenados pelo CIGRÉ, destacando-se os grupos de trabalho JWG-A2/C4-03 (2011) e JWG-A2/C4.39 (2014) que abordam a interação entre transformadores e o sistema elétrico com foco nos transitórios eletromagnéticos de altas frequências. Neste último, um transformador fictício é modelado e simulado pelos quatorze membros do grupo, resultando numa contribuição valiosa para os fabricantes de transformadores nas simulações de transitórios de tensão dentro dos transformadores.

Em alguns trabalhos, descritos acima, o transformador é associado a modelos matemáticos complexos baseados nas suas características geométricas, sem garantir a simplicidade no modelo e a precisão no comportamento das tensões internas ao transformador através de simulação computacional.

1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

Existem diversos modelos de transformadores de potência disponíveis na literatura, com representações baseadas principalmente por suas funções de transferência ou circuitos elétricos equivalentes. Porém, esses modelos geralmente apresentam limitações para baixas e médias frequências, bem como não abordam detalhadamente a representação dos enrolamentos do transformador de potência.

Tradicionalmente, fabricantes consideram a distribuição da tensão impulsiva nos enrolamentos de transformadores de potência para determinar sua estrutura de isolamento. Entretanto, os clientes acompanham apenas a suportabilidade deste isolamento durante a fase de ensaio de aceitação, mas desconhecem as características da distribuição de tensão ao longo do enrolamento.

É imprescindível compreender como o equipamento comporta-se frente às diversas excitações oriundas do sistema elétrico. Portanto, este trabalho apresenta uma alternativa para a modelagem de alta frequência de transformadores submetidos a transitórios, de forma a possibilitar, através de simulação computacional, o conhecimento da distribuição da tensão ao longo dos enrolamentos.

A limitação referente ao fornecimento de detalhes construtivos do transformador pelo fabricante foi contornada com a realização do *design review*. Assim, o presente trabalho propõe um modelo baseado nos dados físicos da geometria interna do transformador para obter com melhor precisão, através da simulação computacional, a resposta dos enrolamentos submetidos a transitórios de altas frequências.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Propor uma metodologia para a modelagem de transformador de potência e simulação computacional para transitórios eletromagnéticos em altas frequências.

1.2.2 Objetivos específicos

- Utilizar as características geométricas do transformador para calcular os parâmetros do circuito equivalente RLC;
- Facilitar a representação destes circuitos complexos através de uma linguagem descritiva estruturada;
- Utilizar o software LTSPICE como ambiente de simulação;
- Validar o modelo proposto comparando com os dados fornecidos pelo fabricante;
- Permitir determinar a distribuição espacial de tensão no enrolamento durante os ensaios com onda de impulso atmosférico padronizada;
- Proporcionar a análise do surto transferido entre os enrolamentos;
- Avaliar os pontos de amplitudes das tensões transitórias e a suportabilidade da isolação;
- Identificar as frequências de ressonâncias do equipamento;
- Subsidiar o cliente na condução do *design review* com o fabricante do transformador de potência.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 6 capítulos. O presente capítulo destina-se a uma breve introdução da necessidade de desenvolvimento de um modelo de transformador de potência para alta frequência, a justificativa e motivação para sua realização e os objetivos almejados.

O capítulo 2 é dedicado aos distúrbios elétricos que podem ocorrer no SIN, especialmente o fenômeno de sobretensão. O conhecimento das influências destes transitórios no transformador de potência serve como ponto de partida para elaboração de projetos bem sucedidos. Ainda neste capítulo, são apresentados os tipos de enrolamentos de transformadores empregados para Alta Tensão (AT), bem como suas características ressonantes. Por fim, são

abordados os cálculos e teoria para desenvolver uma modelagem de transformador adequada para altas frequências, destacando a importância da realização de *design review*.

O capítulo 3 é integralmente dedicado a discussão da modelagem do equipamento, detalhando os parâmetros presentes e como obtê-los através das características construtivas do transformador. Além disso, propõe o circuito equivalente e demonstra o método a ser utilizado para representação deste circuito no SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*) para simulação computacional.

O capítulo 4 apresenta, brevemente, o modelo do transformador calculado através da fundamentação teórica apresentada nos capítulos anteriores. A escolha do transformador utilizado no estudo se deve a disponibilidade do conhecimento detalhado deste projeto, oriundo do *design review*.

No capítulo 5, abordam-se alguns estudos de caso para o modelo desenvolvido, buscando evidenciar suas potencialidades para a simulação e análise de transitórios eletromagnéticos em transformadores.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões deste trabalho e sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma breve revisão da literatura a respeito de fenômenos transitórios eletromagnéticos e descreve o comportamento de transformadores submetidos a estes. Além disso, é detalhada a obtenção de um circuito equivalente que represente a distribuição destas tensões nos enrolamentos e as formulações necessárias para determinar os valores dos parâmetros deste circuito.

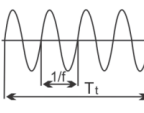
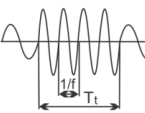
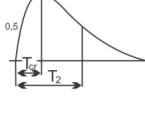
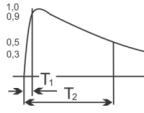
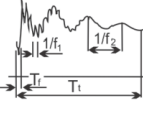
2.1 SOBRETENSÕES E ENSAIOS NORMALIZADOS

Sobretensões são distúrbios que ocorrem sobre a tensão nominal do sistema elétrico, caracterizadas como sobretensões internas e externas. As sobretensões internas ocorrem dentro do próprio sistema, por exemplo, curto-circuito ou manobra de disjuntores. Já as sobretensões externas, são originadas fora do sistema, geralmente oriundas de descargas atmosféricas.

A norma brasileira de coordenação de isolamento, NBR 6939 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), define sobretensão como tensão entre fase e terra ou entre fases, cujo valor de crista é superior ao valor de crista da tensão máxima de operação do sistema, $U_m\sqrt{2}/\sqrt{3}$ ou $U_m\sqrt{2}$, respectivamente.

A forma, o grau de amortecimento e a duração definem a divisão das tensões e sobretensões em classes, conforme Quadro 1 da NBR 6939.

Quadro1: Classes e formas das solicitações de tensão

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

Fonte: ABNT NBR 6939 (2000).

2.2 FENÔMENOS TRANSITÓRIOS

As sobretensões classificadas como transitórias tratam-se de fenômenos de curta duração, oscilatória ou não oscilatória, usualmente fortemente amortecida conforme NBR 6939 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2000).

Caracterizadas por uma frente de onda rápida, as sobretensões atmosféricas são de curta duração, na ordem de dezenas de microssegundos. A incidência de uma descarga atmosférica pode ser tanto direta nos condutores e equipamentos, quanto por indução, através do acoplamento de campos eletromagnéticos com os condutores.

Sobretensões de frente de onda muito rápida surgem no interior de subestações quando da mudança brusca da tensão normal de operação. Esta mudança pode ser resultado da abertura ou fechamento de chaves seccionadoras, abertura e fechamento de disjuntores ou curto-circuito monofásico nas linhas de transmissão nas proximidades da subestação. Geralmente são inferiores a tensão suportável de impulso atmosférico, também conhecido como Nível Básico de Isolamento (NBI), ou do Inglês, *Basic Insulation Level* (BIL) (CIGRÉ, 2011).

Estas sobretensões de frente de onda muito rápida resultam da superposição das reflexões e refrações das ondas trafegantes que são geradas a partir de impulsos advindos das variações bruscas, conforme descrito anteriormente.

O Quadro 2 apresenta a classificação do CIGRÉ (1990) dos tipos de sobretensões por faixas de frequência.

Quadro 2 – 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: Adaptado de CIGRÉ (1990).

Os ensaios padronizados são bons indicadores para avaliar o isolamento elétrico do transformador de potência às solicitações do sistema. Porém, estes ensaios abrangem os grupos I, II e III destacados no Quadro 2. Para determinados casos, é necessário avaliar o comportamento do isolamento frente aos surtos não padronizados, uma vez que as sobretensões reais têm um comportamento distinto dos valores normalizados.

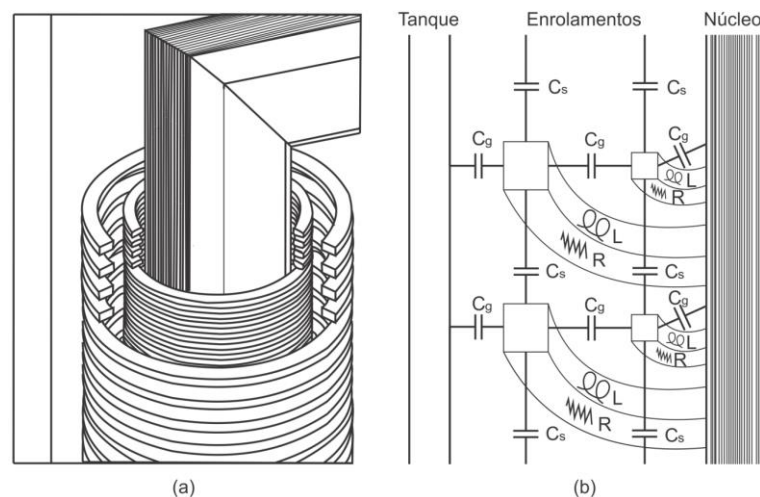
Segundo o grupo de trabalho CIGRÉ (2011), não está definida uma forma de tensão normalizada para testar a suportabilidade da isolação dos transformadores para sobretensões de frente muito rápida. Para avaliação dos transformadores submetidos a surtos de frente muito rápida, grupo IV, torna-se necessária a análise através de simulação computacional a partir da modelagem para altas frequências deste equipamento.

Nas altas frequências o comportamento capacitivo do transformador torna-se mais significativo. Portanto, para estudos de transitórios envolvendo surtos com frente de onda rápida e muito rápida, os modelos convencionais de transformadores não são adequados (OLIVEIRA, 2011).

2.3 TRANSFORMADOR SUBMETIDO A TRANSITÓRIOS

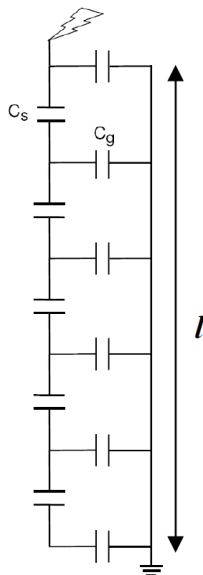
A distribuição das sobretensões transitórias ao longo dos enrolamentos e seus impactos a isolação dependem da estrutura interna do transformador. Estão associados à representação dessa estrutura o valor ôhmico da resistência (R) entre os terminais de cada enrolamento, as indutâncias (L) próprias e mútuas das bobinas e, principalmente as capacitâncias séries (C_s) e paralelas (C_g), conforme exemplificado na Figura 1.

Figura 1 – Transformador: (a) estrutura física do transformador; (b) circuito representativo



Conforme CIGRÉ (2011), nos instantes iniciais do transitório, a distribuição inicial de tensão depende basicamente das capacitâncias entre espiras, enrolamentos e entre enrolamentos e a terra. Kulkarni e Khaparde (2004) ressaltam que, para o instante inicial (frações de microssegundos), as indutâncias são praticamente desprezíveis à distribuição inicial de tensão, podendo o problema ser considerado eletrostático. A Figura 2 representa de forma simplificada uma bobina qualquer do transformador no instante inicial do transitório.

Figura 2 – Circuito capacitivo (bobina no instante inicial do transitório)

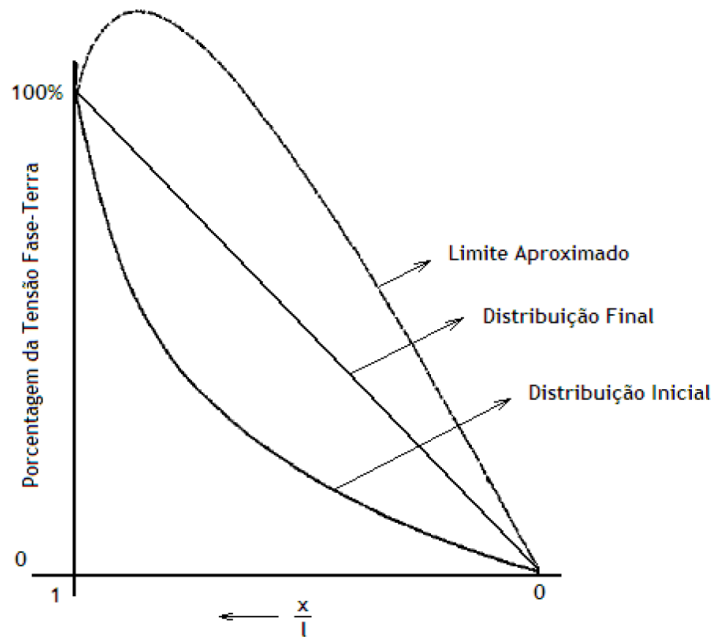


Fonte: Adaptado de CIGRÉ (2011).

Nestes instantes os fenômenos magnéticos são desprezados, uma vez que o tempo após a aplicação de tensão e conseqüente corrente de carga das capacitâncias é extremamente curto e insuficiente para provocar correntes de magnetização (AMARAL, 1994).

Porém, quando a tensão aplicada é mantida durante um tempo suficiente (50 a 100 μ s) valores apreciáveis de corrente fluem pelas indutâncias propagando a onda de tensão pelo enrolamento, acompanhada das oscilações típicas de um circuito RLC no tempo. Com a diferença inicial e final na distribuição de tensão, a troca de energia entre os campos elétricos e magnéticos é contínua. Durante este período transitório no qual a tensão ajusta-se do valor inicial até o valor final da tensão, este transiente é oscilatório. Conforme a Figura 3, a tensão em qualquer ponto do enrolamento oscila sobre o valor final de tensão, atingindo valores máximos como demonstrado pelo limite aproximado (KULKARNI e KHAPARDE, 2004).

Figura 3 – Distribuição da tensão de impulso no enrolamento com neutro aterrado



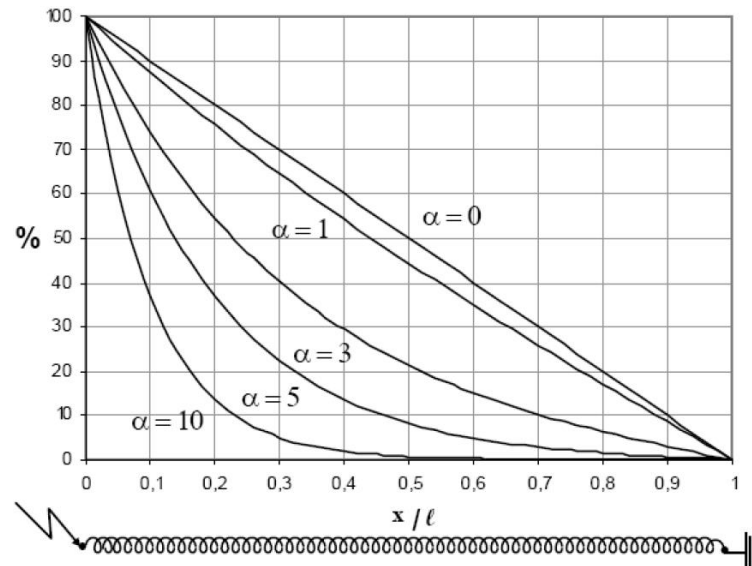
Fonte: Adaptado de Oliveira (2011).

Mendes (1995), Kulkarni e Khaparde (2004) e CIGRÉ (2011) destacam que o fator de distribuição de tensão transitória em um enrolamento está associado a relação das capacitâncias série e paralela correspondente, conforme a Equação 1.

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_G}{C_S}} \quad (1)$$

O controle da distribuição inicial da tensão é determinado pela capacitância série total C_S , visto que a capacitância paralela C_G é determinada por um compromisso entre distâncias mínimas elétricas e mecânicas proporcionadas pela estrutura. De acordo com a Figura 4, a linearidade na distribuição da tensão no enrolamento é garantida quanto menor o fator α , ou seja, menos concentrados estarão os gradientes de tensão junto ao terminal atingido pelo transitório. Para isso, a adoção de diferentes tipos de enrolamentos garante a alteração da capacitância série total (KULKARNI e KHAPARDE, 2004; CIGRÉ, 2011).

Figura 4 – Distribuição inicial de tensão no enrolamento



Fonte: Adaptado de CIGRÈ (2011).

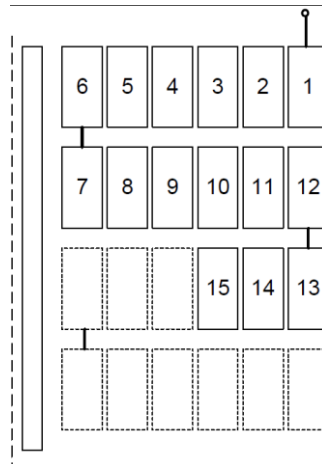
2.4 ENROLAMENTOS PARA ALTA TENSÃO

De acordo com Mendes (1995), tradicionalmente para os enrolamentos de alta tensão de transformadores, são utilizados enrolamentos do tipo disco contínuo ou tipo disco entrelaçado. Associado ao nível de tensão, podem ser utilizados enrolamentos do tipo disco contínuo com blindagens e enrolamentos tipo disco parcialmente entrelaçado.

Conforme Figura 5, o enrolamento tipo disco contínuo apresenta baixa capacitância série em razão das espiras estarem radialmente justapostas. Para transitórios de alta frequência, tal característica resulta em uma solitação dielétrica elevada nos discos situados próximo à entrada do enrolamento (AMARAL, 2007).

A baixa capacitância série deste enrolamento não permite sua aplicação para tensões mais elevadas. Enrolamentos do tipo disco contínuo não são recomendados para nível de isolamento à tensão de impulso atmosférico superior a 350 kV.

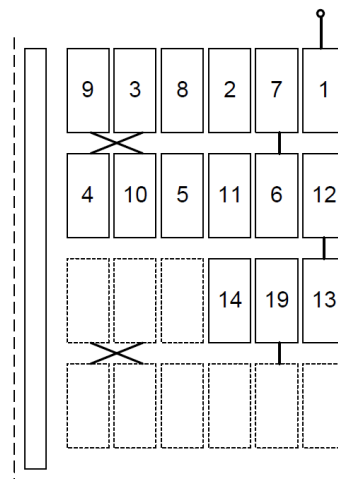
Figura 5 – Disposição das espiras no enrolamento disco contínuo



Fonte: Adaptado de Soares (2011).

Já no enrolamento tipo disco entrelaçado, as espiras entrelaçadas elevam a capacitância série total do enrolamento. Neste, os condutores adjacentes pertencem a espiras eletricamente afastadas. Geralmente são aplicados para transformadores cujo nível de isolamento à tensão de impulso atmosférico seja superior a 350 kV.

Figura 6 – Disposição das espiras no enrolamento disco entrelaçado



Fonte: Adaptado de Soares (2011).

Enrolamento do tipo disco parcialmente entrelaçado não é recomendado para tensões de impulso atmosférico superiores a 650 kV, devido a amplitude da tensão de onda estacionária formada na descontinuidade entre disco entrelaçado e disco contínuo. Este enrolamento deve garantir no mínimo 20% de discos entrelaçados a partir do terminal de entrada (MENDES, 1995).

2.5 RESSONÂNCIA EM TRANSFORMADORES

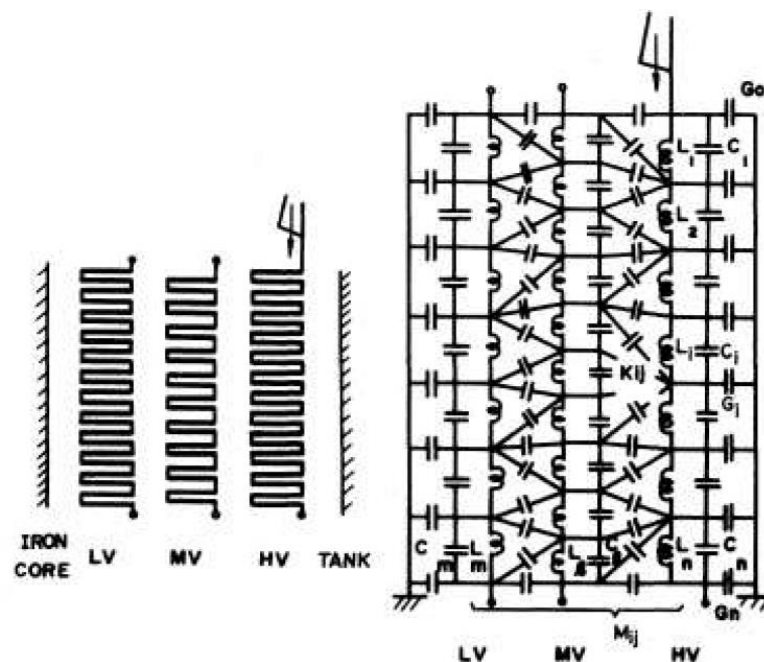
A natureza eletromagnética do arranjo dos enrolamentos do transformador forma uma estrutura ressonante com várias frequências naturais. As tensões transitórias estabelecidas no sistema elétrico de potência podem excitar tais frequências e resultar em ampliações de tensões internas nos enrolamentos e solicitações dielétricas excessivas (MENDES, 1995).

Tais sobretensões ressonantes podem causar danos a isolação interna dos transformadores, ou ainda, solicitar continuamente a isolação resultando em uma falha (CIGRÉ, 2011).

Em razão dos testes exigidos em norma não contemplarem a análise da imposição de oscilações ressonantes no transformador, somado a aspectos econômicos, estes equipamentos não são projetados para suportar o esforço elétrico provocado pela excitação ressonante. É garantido apenas a rigidez dielétrica do isolamento para surtos atmosféricos (AMARAL, 1994).

Na Figura 7, o circuito equivalente do transformador de potência apresenta frequências de ressonância compreendidas entre poucos kHz até centenas de kHz (tipicamente de 5 kHz a 500 kHz), aumentando a probabilidade de que transitórios do sistema de potência excitem algumas destas frequências (CIGRÉ, 2011).

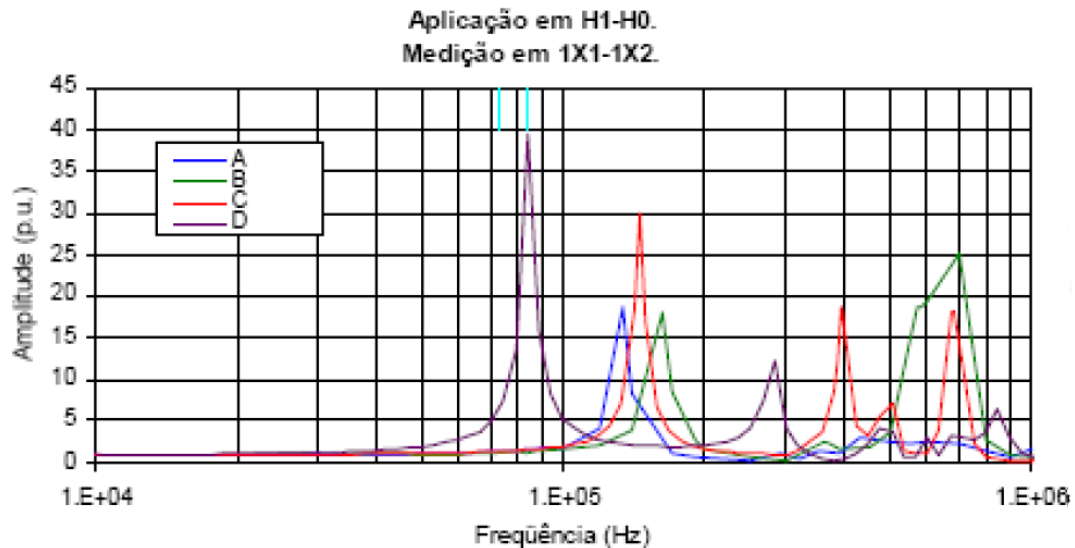
Figura 7 – Malha equivalente de um transformador multi-enrolamentos



Fonte: Adaptado de Miki et al. (1978).

A Figura 8 apresentada por Martins et al. (2000), mostra a frequência de ressonância entre enrolamentos para quatro transformadores reais de diferentes fabricantes, onde observam-se vários pontos de ressonância ao longo do espectro de frequências e amplificação de até 40 pu.

Figura 8 – Resposta em frequência para diferentes transformadores



Fonte: Adaptado de Martins et al. (2000).

Esta análise considera a transferência entre primário e secundário. Assim, com o circuito equivalente mais complexo, semelhante ao modelo da Figura 7, é possível obter a transferência entre primário e qualquer par de pontos internos no transformador. Esta transferência é similar a apresentada na Figura 8, com muitas frequências de ressonância que poderão ocasionar a chamada ressonância interna, uma amplificação da tensão em uma parte do enrolamento (CIGRÉ, 2011).

Conforme Martins (2007), resultados recentes mostram que é possível reproduzir com razoável precisão, através do modelo considerando a geometria do enrolamento e núcleo, a resposta em frequência. Ressaltando assim que a representação da interação entre enrolamentos de fases distintas, embora importante, não traz alterações significativas na resposta.

O relatório do CIGRÉ (1990) descreve que os fenômenos transitórios abrangem uma faixa do espectro de frequência de 0,1Hz a 50MHz.

A forma mais segura de reduzir as oscilações internas de tensão resultantes das ressonâncias é o conhecimento das frequências naturais do equipamento na fase de projeto e

confrontar com as características do sistema. Havendo coincidência entre os sinais oriundos do sistema e as frequências do transformador é possível introduzir modificações de projeto.

2.6 MODELO DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

Para a obtenção de um circuito equivalente que represente a resposta de tensões transitórias em um transformador de potência, geralmente são utilizadas duas abordagens básicas, sendo elas a modelagem “caixa branca” ou modelagem “caixa preta” (CIGRÉ, 2014).

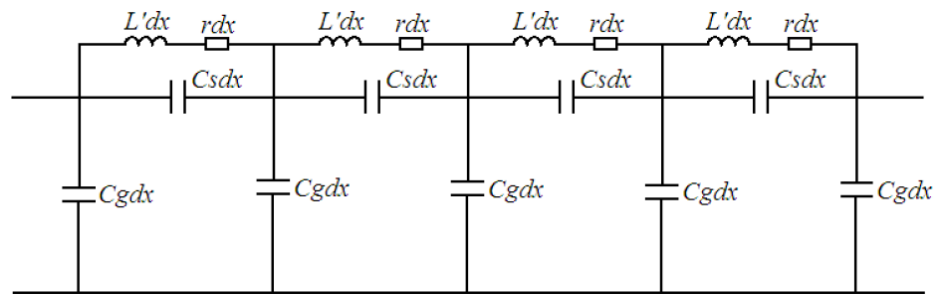
O modelo “caixa branca” refere-se à modelagem física do transformador, onde são conhecidas detalhadamente todas suas partes. Assim, é possível retratar algumas de suas características internas e externas através de equações algébricas. Os parâmetros são representados de forma distribuída ou concentrada. A representação através de parâmetros distribuídos leva em consideração as dimensões e características geométricas do equipamento. Já os parâmetros concentrados não têm significado físico direto em termos de equivalência com o transformador (ZAMBRANO, 2009).

O modelo “caixa preta” não utiliza nenhum conhecimento prévio sobre o arranjo ou as características físicas do equipamento, sendo possível observar seu comportamento apenas a partir de seus terminais. A estrutura do modelo é apenas uma equação matemática que reflete o comportamento do transformador (CIGRÉ, 2014).

A representação de enrolamentos de transformadores de potência por parâmetros elétricos distribuídos permite analisar, via simulação, o comportamento transitório em pontos do enrolamento que geralmente são inacessíveis fisicamente e identificar as situações críticas causadas pelas solicitações dielétricas. Portanto, a modelagem física do transformador de potência, através de parâmetros elétricos distribuídos, requer o conhecimento detalhado das dimensões e características geométricas do equipamento, da disposição relativa dos enrolamentos e das características de seus materiais.

A Figura 9 representa o circuito equivalente de um enrolamento baseado na modelagem física do transformador de potência.

Figura 9 – Modelo matemático do enrolamento através dos parâmetros distribuídos



Fonte: Adaptado de Zambrano (2009).

Os acoplamentos capacitivos são predominantes para estudos que envolvem surtos de frente rápida e muito rápida na representação matemática de transformadores, quando comparados aos demais parâmetros (impedância de curto circuito, saturação do núcleo e as perdas no ferro) (CIGRÉ, 2011).

Para valores elevados de frequência é importante a representação dos parâmetros elétricos de ligação entre os terminais externos (buchas) e o terminal de ligação do enrolamento (MENDES, 1995).

O principal motivo da construção do modelo do transformador é garantir a otimização e desenvolvimento de novos projetos. Através deste, é possível certificar uma boa coordenação entre o isolamento interno e externo do equipamento e assegurar soluções econômicas e tecnicamente adequadas ao desempenho e confiabilidade do transformador.

A representação dos enrolamentos de transformadores por parâmetros elétricos é proporcionada por cálculos matemáticos, oriundos dos estudos desenvolvidos por Kulkarni e Khaparde (2004), Mendes (1995), Wirgau (1976), Grover (1973), Venegas et al. (2011) e Rahimpour e Bigdeli (2009).

2.6.1 Cálculo das capacitâncias

As capacitâncias presentes nos enrolamentos são calculadas através de fórmulas analíticas, assumindo modelos de capacitores planos ou cilíndricos, fundamentadas nas características geométricas e isolantes dos materiais. Para o circuito equivalente do transformador várias capacitâncias descrevem o comportamento do equipamento. As capacitâncias que necessitam ser calculadas são:

- capacitância entre espiras do enrolamento;
- capacitância entre discos e/ou seções;
- capacitância entre enrolamentos;
- capacitâncias para a massa (tanque, núcleo, blindagens).

2.6.1.1 Capacitância paralela

Assume-se que as capacitâncias paralelas são distribuídas uniformemente ao longo dos enrolamentos de interesse (MENDES, 1995).

O acoplamento capacitivo entre dois enrolamentos concêntricos ou entre o núcleo e o enrolamento mais próximo é determinado pela Equação 2.

$$C_{gw} = \frac{\varepsilon_0 \pi D_m H}{(t_{oil}/\varepsilon_{oil}) + (t_{solid}/\varepsilon_{solid})} \quad (2)$$

Onde:

C_{gw} capacitância entre enrolamento e o núcleo/enrolamento;

ε_0 permissividade do ar;

D_m diâmetro médio entre um enrolamento e o núcleo/enrolamento;

H altura do enrolamento;

t_{oil} espessura da isolação por óleo;

ε_{oil} permissividade do óleo isolante;

t_{solid} espessura da isolação sólida;

ε_{solid} permissividade da isolação sólida.

Segundo Kulkarni e Khaparde (2004), a capacitância entre enrolamento e o tanque do transformador é dada pela Equação 3.

$$C_{gt} = \frac{2\pi\varepsilon_0 H}{\cosh^{-1}\left(\frac{S}{R}\right)} \left[\frac{t_{oil} + t_{solid}}{(t_{oil}/\varepsilon_{oil}) + (t_{solid}/\varepsilon_{solid})} \right] \quad (3)$$

Neste caso, S é a distância entre o enrolamento e o tanque e R é o raio do enrolamento. A capacitância entre os enrolamentos externos de duas fases distintas é a metade do valor obtido através da Equação 3, com S igual a metade do valor da distância entre eixos de dois enrolamentos.

2.6.1.2 Capacitância série

De acordo com Kulkarni e Khaparde (2004), as capacitâncias séries representam o acoplamento capacitivo entre espiras e discos adjacentes de um enrolamento, resultantes do cálculo da energia eletrostática armazenada (En) entre espiras e discos, sendo a tensão representada por (V).

$$C = \frac{2En}{V^2} \quad (4)$$

Em decorrência dos diversos tipos de enrolamentos de transformadores, o cálculo das capacitâncias espira por espira e disco por disco é essencial. A capacitância entre espiras é apresentada pela Equação 5.

$$C_T = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_p D (w + t_p)}{t_p} \quad (5)$$

Onde:

- C_T capacitância entre espiras;
- ε_p permissividade relativa do papel isolante;
- D diâmetro médio do enrolamento;
- w largura do condutor na direção axial;
- t_p espessura do papel isolante.

A Equação 6 determina a capacitância série entre dois discos consecutivos:

$$C_{DA} = \varepsilon_0 \left[\frac{k}{t_p/\varepsilon_p + t_s/\varepsilon_{oil}} + \frac{1-k}{t_p/\varepsilon_p + t_s/\varepsilon_s} \right] \times \pi D (R + t_s) \quad (6)$$

Onde:

- C_{DA} capacitância entre discos adjacentes;
- ε_s permissividade da isolamento sólida (espaçador entre discos);
- t_s espessura da isolamento sólida (espaçador entre discos);
- R profundidade radial do disco;
- k fração circunferencial do espaço ocupado por óleo.

Conforme Kulkarni e Khaparde (2004), devido a facilidade na comparação das expressões obtidas para as capacitâncias de vários tipos de enrolamentos, é assumida a distribuição linear da tensão ao longo do enrolamento. Esta aproximação é utilizada para o cálculo da capacitância série dos diferentes enrolamentos apresentados a seguir.

2.6.1.2.1 Disco contínuo

No enrolamento tipo disco contínuo a capacitância série é uma equivalente de todas as capacitâncias espira por espira e disco por disco. Tanto as capacitâncias espira por espira quanto as disco por disco estão em série e conseqüentemente resultam em valores de capacitância muito baixos. Com o aumento das classes de tensão do enrolamento, a isolação entre espiras e entre discos deve ser aumentada, o que diminui ainda mais a capacitância série (KULKARNI e KHAPARDE, 2004).

A capacitância série da seção desejada de um enrolamento tipo disco contínuo é dada pela Equação 7.

$$C_S = \frac{C_T}{N_{DW}N_D^2}(N_D - 1) + \frac{4(N_{DW} - 1)}{N_{DW}^2} \left(\frac{C_{DA}}{3} \right) \quad (7)$$

Onde:

- C_S capacitância série;
- C_T capacitância entre espiras;
- C_{DA} capacitância entre discos adjacentes;
- N_D número de espiras por disco;
- N_{DW} número de discos.

2.6.1.2.2 Disco entrelaçado

Para o enrolamento tipo disco entrelaçado, duas espiras eletricamente consecutivas estão separadas fisicamente por uma espira que está muito distante eletricamente ao longo do enrolamento. Essa disposição de espiras, de algumas maneiras particulares, possibilita um incremento nos valores das capacitâncias séries e uma melhor distribuição da tensão ao longo do enrolamento (KULKARNI e KHAPARDE, 2004).

Para este tipo de enrolamento, a capacitância entre discos apresenta baixos valores e pode ser desprezada. Portanto a capacitância série do enrolamento tipo disco entrelaçado é apresentada na Equação 8.

$$C_S = \frac{C_T}{4} \left[N_D + \left(\frac{N_D - 1}{N_D} \right)^2 (N_D - 2) \right] \quad (8)$$

2.6.1.2.3 Camada

De acordo com Kulkarni e Khaparde (2004), considerando linear a distribuição da tensão no enrolamento, é determinada a capacitância série do enrolamento tipo camada através da capacitância entre espiras C_T e do número total de espiras N_W deste enrolamento, conforme a Equação 9.

$$C_S = \frac{C_T(N_W - 1)}{N_W^2} \cong \frac{C_T}{N_W} \quad (9)$$

2.6.2 Cálculo das indutâncias

Os modelos de transformadores de potência com tensões elevadas devem considerar as indutâncias dos enrolamentos. Estes elementos são fundamentais para a representação da distribuição final da tensão ao longo do enrolamento, oposta à rede de capacitâncias que determina a distribuição inicial desta tensão.

As indutâncias são definidas como próprias e mútuas. As indutâncias próprias são aquelas presentes nos condutores enquanto que as mútuas referem-se aos acoplamentos magnéticos entre condutores adjacentes e não adjacentes.

Segundo Amaral (1994), Fergsted e Henriksen (1973), com o aumento da frequência e consequente aumento da saturação, o núcleo se comporta como se fosse de ar, assim nas altas frequências as indutâncias passam a ser praticamente constantes.

O modelo proposto para as indutâncias próprias e mútuas consideram o núcleo de ar e são baseados nas características construtivas do transformador. Neste trabalho, utilizou-se das equações apresentadas por Wirgau (1976), Grover (1973), Venegas et al. (2011), e Rahimpour e Bigdeli (2009).

A indutância própria de uma espira é caracterizada pela Equação 10.

$$L = \mu_0 R \left(\ln \frac{8R}{GMD} - 2 \right) \quad (10)$$

Onde:

μ_0 permeabilidade magnética do vácuo;

R raio da espira;

GMD distância média geométrica.

A distância média geométrica da espira é definida pela Equação 11.

$$GMD = \sqrt{a^2 + b^2} \exp \left[\begin{array}{l} \frac{2b}{3a} \tan^{-1} \frac{a}{b} + \frac{2a}{3b} \tan^{-1} \frac{b}{a} \\ - \frac{b^2}{12a^2} \ln \left(1 + \frac{a^2}{b^2} \right) \\ - \frac{a^2}{12b^2} \ln \left(1 + \frac{b^2}{a^2} \right) - \frac{25}{12} \end{array} \right] \quad (11)$$

Onde:

a dimensão radial do condutor;

b dimensão axial do condutor;

Com a definição das indutâncias próprias presentes no enrolamento, a indutância mútua entre duas espiras é expressa pela Equação 12.

$$M_{12} = \frac{2\mu_0 \sqrt{r_a r_b}}{\sqrt{k'}} [K(k') - E(k')] \quad (12)$$

As variáveis $K(k')$ e $E(k')$ são as integrais elípticas de primeira e segunda ordem, r_a e r_b o raio das espiras e d é a distância entre as espiras consideradas, conforme as Equações 13 e 14.

$$k' = \frac{1 - \sqrt{1 - k^2}}{1 + \sqrt{1 - k^2}} \quad (13)$$

$$k = \sqrt{\frac{4 r_a r_b}{(r_a + r_b)^2 + d^2}} \quad (14)$$

Com os cálculos das Equações 10 e 12 determina-se a matriz L $(n+m) \times (n+m)$. Através do método de soma é possível converter para uma matriz de ordem 2×2 , conforme é mostrado esquematicamente na Figura 10.

Figura 10 – Matriz de indutância

$$L_{(n+m) \times (n+m)} = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} 1 \dots n & | & 1 \dots m \\ \vdots & & \vdots \\ \Sigma & & \Sigma \\ \vdots & & \vdots \\ n & & 1 \\ \vdots & & \vdots \\ 1 & & \Sigma \\ \vdots & & \vdots \\ m & & \Sigma \end{array} \end{array} \Rightarrow L_{2 \times 2} = \begin{array}{|c|c|} \hline L_1 & M \\ \hline M & L_2 \\ \hline \end{array}$$

Fonte: Adaptado de Rahimpour e Bigdeli (2009).

2.6.3 Cálculo das resistências

Com o intuito de proporcionar o amortecimento das oscilações internas originadas no transcorrer do ensaio, são incluídas as resistências ao circuito equivalente. O valor desta resistência por espira pode ser definido pela Equação 15 (VENEGAS et. al., 2011).

$$R = \frac{1}{a \delta \sigma} \quad (15)$$

Onde:

- R resistência;
- a perímetro da seção do condutor;
- δ espessura de penetração do fluxo magnético;
- σ condutividade.

A espessura de penetração do fluxo magnético é determinada pela Equação 16, sendo a frequência angular representada por ω .

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu_0}} \quad (16)$$

Ressalta-se que em relação a esta formulação não se considera a perda no condutor, devido à corrente nos condutores vizinhos, ou seja, é desprezado o efeito proximidade.

2.7 DESIGN REVIEW

O termo *design review*, refere-se a uma auditoria técnica realizadas entre cliente e fabricante durante a fase de projeto do transformador. O objetivo principal é o entendimento comum dos requisitos de normas e especificações aplicáveis, bem como avaliar a interação transitória entre o transformador e o sistema elétrico.

A resposta da interação do sistema elétrico com o transformador, para as condições de interesse, requer o conhecimento especializado do sistema a partir do cliente e do projeto pelo fabricante (MENDES, 1995).

Conforme Rocha e Duarte (2005), o *design review* deve ser coordenado pelo cliente para assegurar uma investigação detalhada.

Nesta fase, devem ser elaborados estudos que avaliem se os pontos críticos dos enrolamentos possuem frequências coincidentes com as predominantes do sistema elétrico. Para isso, sugere-se utilizar uma modelagem física que permita avaliar as solicitações padronizadas de impulso atmosférico, assim como a resposta do transformador para ondas não padronizadas oriundas de surtos transitórios de chaveamentos específicos da subestação.

As demonstrações da suportabilidade da estrutura de isolamento em relação as solicitações especificadas são normalmente obtidas com a utilização de softwares, através de modelos com parâmetros elétricos RLC. Estes modelos são complexos e com elevados número de parâmetros para representar o enrolamento de forma satisfatória (ROCHA e DUARTE, 2005).

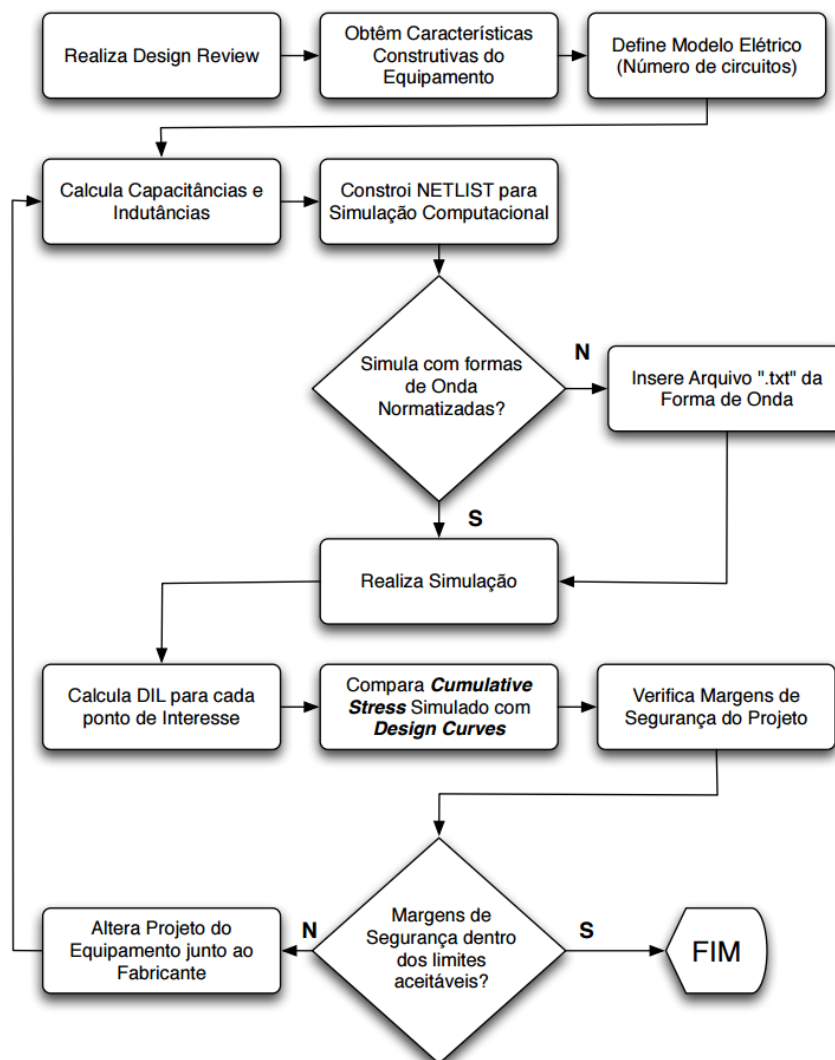
Dentro deste contexto, o trabalho propõe a modelagem do transformador pelo cliente através de uma linguagem descritiva, que permita realizar a análise da suportabilidade da isolamento do projeto proposto pelo fabricante, bem como ter requisitos para avaliar o modelo fornecido pelo mesmo.

Na especificação técnica, o cliente deve apresentar os requisitos elétricos do sistema e as informações necessárias para o desenvolvimento adequado do projeto do transformador. Nesta etapa, também deve ser solicitado o modelo do transformador para estudos de tensões

transitórias de alta frequência, sintetizado por uma rede RLC capaz de representar o comportamento do transformador para transitórios (CIGRÉ, 2011).

O fluxograma proposto neste trabalho, apresentado na Figura 11, permite aos clientes um conhecimento mais realista do transformador de potência nas simulações, assim como sua utilização em estudos transitórios, sem os quais não se poderia analisar satisfatoriamente as amplificações internas nos enrolamentos.

Figura 11 – Fluxograma proposto para análise dos transformadores



Fonte: Elaborada pelo autor.

3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DO TRANSFORMADOR

Neste capítulo será apresentado o modelo do transformador adotado, evidenciando as características necessárias do equipamento. Também são destacados os detalhes para construção do circuito equivalente e sua representação, através de linguagem estruturada que auxiliará na simulação computacional.

Segundo o CIGRÉ (2014), quando o interesse são os eventos internos no transformador, tais como tensões transitórias na isolação dos enrolamentos, deve-se utilizar um modelo de transformador detalhado e mais complexo, conhecido como “caixa branca”. Porém, apenas o fabricante dispõe do conhecimento e das informações necessárias à elaboração de tal modelo.

Como o objetivo deste trabalho é avaliar a distribuição interna das tensões transitórias nos enrolamentos, optou-se pela modelagem do transformador “caixa branca”, capaz de testar diferentes transformadores.

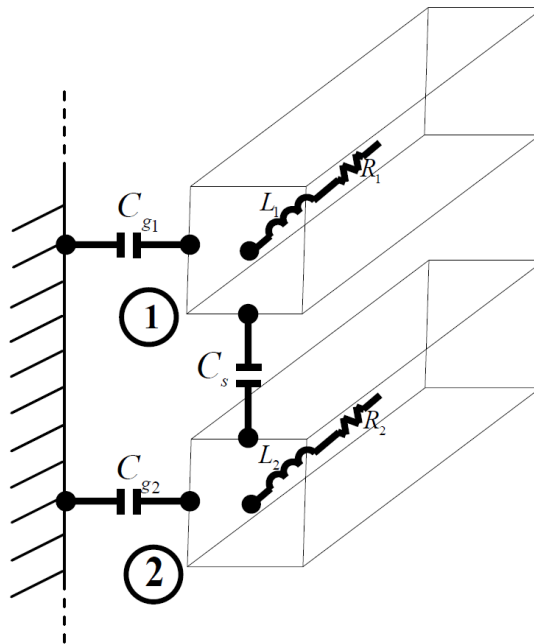
3.1 MODELO DO TRANSFORMADOR ADOTADO

Neste trabalho, os cálculos dos parâmetros do circuito equivalente utilizado estão baseados na modelagem física dos enrolamentos, conforme descrito no capítulo 2. Porém, o modelo utilizado considera parâmetros distribuídos apenas para o disco de entrada do enrolamento de alta tensão; os demais discos deste enrolamento e dos demais enrolamentos são representados através de parâmetros concentrados, ou seja, cada parâmetro do circuito equivalente não corresponderá mais a uma única espira ou disco, e sim a um conjunto de espiras ou discos.

De acordo com Mendes (1995), a representação do enrolamento, espira por espira, permite avaliar com boa precisão as solicitações dielétricas internas à sobretensões de alta frequência.

A Figura 12 representa como foram concentrados os parâmetros dos enrolamentos do transformador. As barras 1 e 2 correspondem a um conjunto de discos, camadas ou espiras do enrolamento, as quais formam uma seção na modelagem do transformador. Nesta mesma figura, C_s representa a capacitância entre as seções; C_{g1} e C_{g2} representam as capacitâncias entre cada seção e suas partes aterradas; L_1 e L_2 as indutâncias próprias para cada seção; e R_1 e R_2 as resistências do cobre.

Figura 12 – Representação dos parâmetros concentrados do enrolamento do transformador



Fonte: Adaptado de Zambrano (2009).

Portanto, com as fórmulas até aqui apresentadas e com o fornecimento pelo fabricante das características construtivas do transformador, é possível a obtenção de um modelo aplicável a estudos transitórios pertencentes aos grupos III e IV definidos pelo CIGRÉ (1990), destacado na Quadro 2.

3.2 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO TRANSFORMADOR

Os dados necessários para os cálculos dos elementos elétricos que compõem o circuito equivalente do transformador, são obtidos através dos detalhes construtivos fornecidos pelo fabricante do equipamento. Para isso, é importante que o usuário defina em sua especificação técnica a necessidade de realização de *design review* e o fornecimento mínimo das seguintes informações:

3.2.1 Enrolamentos

- a) tipo de enrolamento;
- b) número de espiras;
- c) número de discos;

- d) tipo de condutor;
- e) dimensões do condutor;
- f) resistividade do material do condutor;
- g) permissividade magnética do material do condutor;
- h) espessura do material isolante dos condutores;
- i) permissividade do material isolante dos condutores;
- j) parcela da área entre discos ocupada por óleo isolante;
- k) espessura dos separadores entre discos;
- l) permissividade dos separadores entre discos;
- m) diâmetro interno e externo do enrolamento;
- n) altura do enrolamento;
- o) distância entre a superfície externa do enrolamento e o tanque.

3.2.2 Isolamento

Os parâmetros do isolamento representam as características do isolamento elétrico de todas as interfaces entre enrolamentos, tanque e núcleo.

- a) espessura do papel isolante;
- b) permissividade do papel isolante;
- c) espessura do espaçador isolante (sólido);
- d) permissividade do espaçador isolante (sólido);
- e) espessura do óleo isolante;
- f) permissividade do óleo isolante.

De acordo com o número de enrolamentos é necessário definir as características do isolamento entre núcleo e enrolamento, entre enrolamentos e entre o último enrolamento e o tanque.

3.2.3 Núcleo

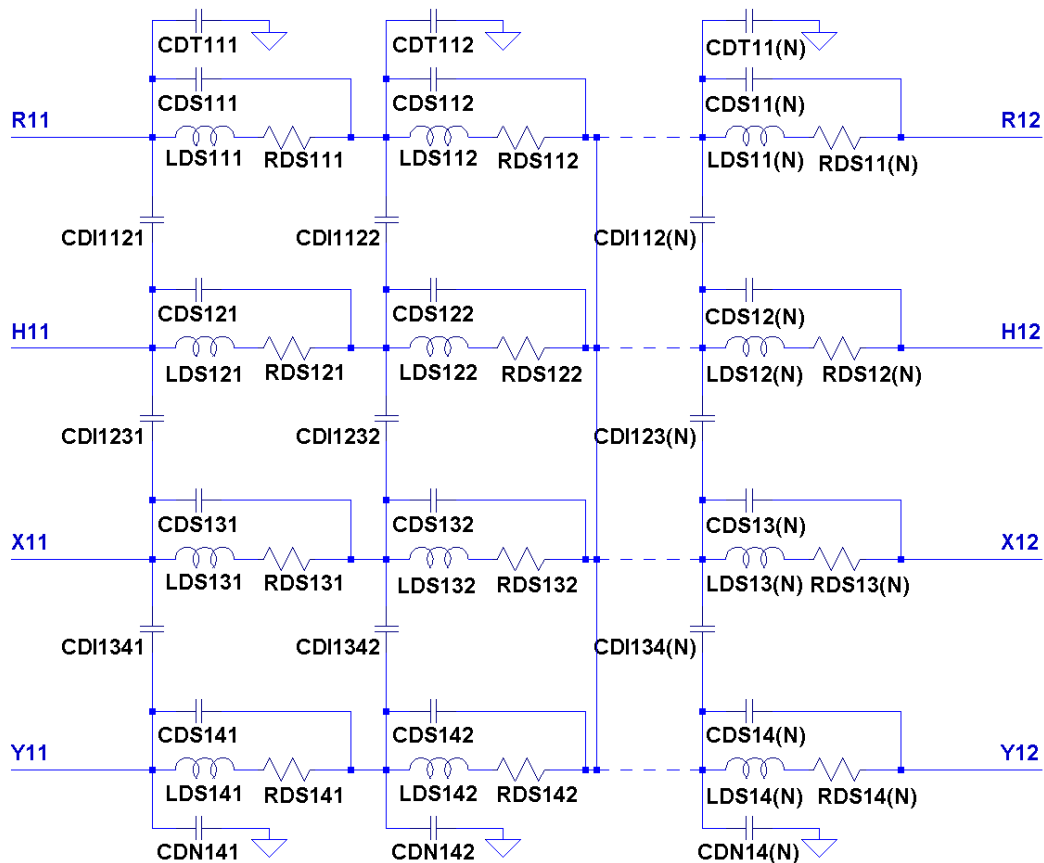
- a) diâmetro;
- b) altura da parte interna;
- c) distância entre colunas nas fases;

Destaca-se que os dados aqui citados são os mínimos necessários para determinar o circuito equivalente proposto.

3.3 CIRCUITO EQUIVALENTE DO TRANSFORMADOR

O circuito equivalente do transformador de potência é subdividido em diversos circuitos RLC, conforme a Figura 13. As indutâncias mútuas não foram representadas, mas são utilizadas na simulação.

Figura 13 – Representação do circuito equivalente



Fonte: Elaborada pelo autor.

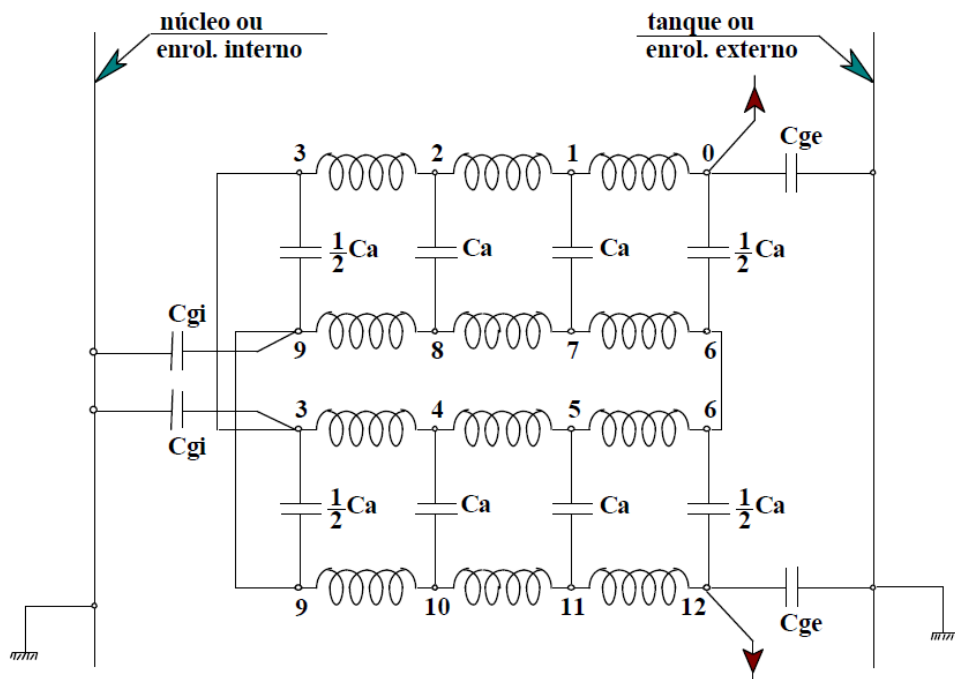
A seguinte definição foi adotada para a nomenclatura dos componentes que formam as malhas RLC do circuito equivalente do transformador:

- L_{ds} indutância própria série;
- R_{ds} resistência série;
- C_{ds} capacitância série;
- L_{dm} indutância mútua;
- C_{at} capacitância em relação ao tanque;
- C_{di} capacitância entre enrolamentos;
- C_{dn} capacitância em relação ao núcleo.

Visto que o objetivo deste trabalho é avaliar a distribuição da tensão ao longo do enrolamento de alta tensão e entre os enrolamentos de AT e BT, o modelo a ser utilizado subdivide os enrolamentos de AT e BT em maior número de subcircuitos, permitindo vários pontos de medição ao longo destes enrolamentos.

Dado o interesse na análise da distribuição das tensões transitórias próximo ao terminal de entrada, o primeiro disco é representado espira por espira. Como referência utiliza-se o esquema elétrico representativo, apresentado por Mendes (1995), do disco entrelaçado tipo *English Electric* com seis espiras por disco de uma bobina dupla, conforme Figura 14.

Figura 14 – Enrolamento entrelaçado do tipo *English Electric*



Fonte: Adaptado de Mendes (1995).

3.4 REPRESENTAÇÃO DO MODELO NO SPICE

De acordo com Vahidi e Beiza (2005), muitos pesquisadores têm utilizado o SPICE para simulações de diferentes aspectos de sistemas de energia e aplicações de engenharia.

A complexidade na representação gráfica de um circuito, envolvendo todos os componentes do modelo equivalente de um transformador de potência, determinou a simulação através de um programa com plataforma SPICE e a descrição do circuito através de *netlist*. A

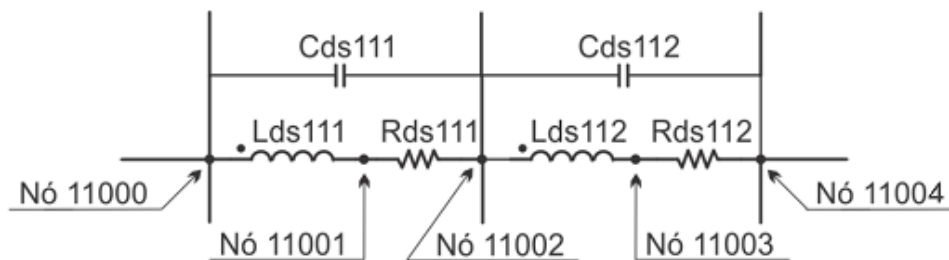
netlist é a representação descritiva dos circuitos através de linguagem estruturada, onde são definidos todos os componentes e interligações por arquivo de texto.

As declarações utilizadas na montagem do circuito equivalente no arquivo de texto resumem-se basicamente na identificação do elemento do circuito, os nós a que este elemento estará conectado e a respectiva grandeza elétrica (valor). O código abaixo descreve um circuito elétrico representativo:

Identificação	Nó 1	Nó 2	Valor
Lds111	11000	11001	#####
Rds111	11001	11002	#####
Cds111	11000	11002	#####
Lds112	11002	11003	#####
Rds112	11003	11004	#####
Cds112	11002	11004	#####

Este código descrito é exemplificado na Figura 15.

Figura 15 – Circuito equivalente da linguagem descritiva



Fonte: Adaptado de Pivotto (2013).

O simulador SPICE gera um sistema de equações integro-diferenciais a partir da análise nodal ou de malhas do circuito descrito no arquivo, e o mesmo resolve este sistema de equações utilizando métodos numéricos.

Para as simulações do arquivo *netlist* gerado utiliza-se o programa com plataforma SPICE e de distribuição gratuita *LTSPICE* (*freeware*).

4 TRANSFORMADOR MODELADO

Neste capítulo são apresentados os dados do transformador real alvo da modelagem, assim como os parâmetros concentrados resultantes dos cálculos.

O transformador de potência real avaliado é trifásico de três enrolamentos com potência nominal de 25MVA e tensões de 138/13,8/13,8 kV. As principais características elétricas deste transformador são:

- a) 15/20/25 MVA, ONAN/ONAF1/ONAF2
- b) 138/13,8/13,8 kV, YNyn0d1, 60 HZ
- c) NBI HV: 650 kV

Devido a política do fabricante, os dados técnicos e construtivos do transformador correspondente não podem ser divulgados publicamente. Portanto, apenas algumas características construtivas deste transformador são apresentadas.

4.1.1 Enrolamento AT

- a) tipo de enrolamento: disco entrelaçado;
- b) número de discos: 80 (40+40);
- c) diâmetro interno / externo do enrolamento: 797 / 951 mm;
- d) altura do enrolamento: 975 mm.

4.1.2 Enrolamento BT

- a) tipo de enrolamento: hélice;
- b) número de espiras: 90;
- c) diâmetro interno / externo do enrolamento: 625 / 707 mm;
- d) altura do enrolamento: 1005 mm.

4.1.3 Enrolamento terciário

- a) tipo de enrolamento: camada;
- b) número de espiras: 156;
- c) diâmetro interno / externo do enrolamento: 563 / 589 mm;
- d) altura do enrolamento: 944 mm.

4.1.4 Enrolamento regulação AT (RAT)

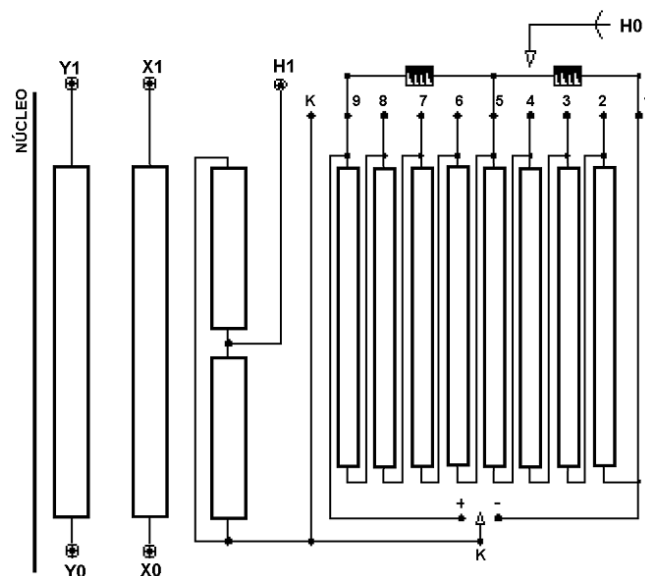
- a) tipo de enrolamento: hélice múltipla tipo “C”;
- b) número de espiras: 136 espiras;
- c) diâmetro interno / externo do enrolamento: 1043 / 1073 mm;
- d) altura do enrolamento: 947 mm.

4.1.5 Núcleo

- a) diâmetro: 531 mm;
- b) altura da parte interna: 1160mm;
- c) distância entre colunas nas fases: 1100mm.

Na Figura 16 é representado o diagrama de conexões do transformador de potência considerado para os estudos seguintes.

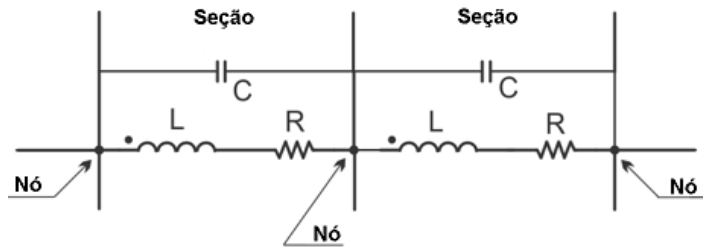
Figura 16 – Representação dos enrolamentos do transformador e conexões



Fonte: Adaptado do design review (2014).

Na modelagem do transformador os enrolamentos foram divididos em seções, conforme abordado no capítulo 3.1. Cada ponto entre as seções é definido como nó, exemplificado na Figura 17.

Figura 17 – Divisão dos enrolamentos



Fonte: Adaptado de Pivotto (2013).

Assim, o circuito equivalente do modelo considerado dividiu os enrolamentos do transformador de potência da seguinte forma:

- enrolamento terciário: 8 seções e 9 nós;
- enrolamento BT: 46 seções e 47 nós;
- enrolamento de AT: 40 seções e 41 nós;
- enrolamento de RAT: 4 seções e 5 nós.

O número de seções e nós do modelo proposto é decorrente da análise estar voltada a distribuição das tensões ao longo do enrolamento de AT e as tensões resultantes entre enrolamento de AT e BT, justificando o maior detalhamento destes enrolamentos. Os enrolamentos de AT e BT foram divididos em par de discos, correspondendo respectivamente a 40 e 46 seções. Destaca-se que neste modelo não foram considerados os efeitos do núcleo.

Em posse dos dados do transformador selecionado, calcularam-se os parâmetros elétricos para o modelo proposto, conforme detalhado no capítulo 2 deste trabalho. A Figura 18 apresenta o modelo simplificado com os parâmetros elétricos concentrados, onde S representa o número de seções.

Figura 18 – Modelo simplificado com os parâmetros elétricos concentrados

	T	BT	AT	RAT
Núcleo				
	S=8	S=46	S=20	S=8
	7,2pF	7,3pF	347pF	7940 pF
	12,5mH	3,96mH	387mH	0,94mH
	0,102Ω	0,018Ω	0,7Ω	0,47Ω
	2666 pF	2420 pF	1332 pF	1527 pF
			S=20	
			347pF	
			387mH	
			0,7Ω	
				322 pF

Fonte: Elaborado pelo autor.

5 ESTUDO DE CASO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste estudo, a partir da modelagem física estabelecida nos capítulos anteriores, é possível avaliar as solicitações dielétricas ao longo dos enrolamentos, permitindo a identificação dos pontos críticos.

Nas análises seguintes serão abordadas as tensões aplicadas no enrolamento de alta tensão. Não serão consideradas tensões aplicadas no enrolamento de baixa tensão e demais enrolamentos, considerando as afirmações do fabricante de que as tensões transitórias na AT são muito mais críticas, mesmo nas tensões transferidas para a BT.

Primeiramente, os parâmetros elétricos considerados para o modelo do transformador correspondem aos calculados a partir dos dados obtidos através do *design review*, ou seja, transformador real. Posteriormente serão utilizados parâmetros com base em estudos de modificação de projeto, denominado transformador virtual.

Dentro deste contexto busca-se comparar, através das simulações realizadas e os valores apresentados pelo fabricante, as tensões entre espiras e entre discos do enrolamento de AT. Os resultados e avaliações destas simulações são apresentados neste capítulo.

5.1 ONDA PADRONIZADA: IMPULSO ATMOSFÉRICO

Para análise das oscilações de tensões que ocorrem ao longo dos enrolamentos, nas simulações, utilizou-se a onda de impulso atmosférico normatizada 1,2/50 μ s com valor de crista de 650 kV, conforme definida na Equação 17 e representado na Figura 19.

$$V(t) = V_{MAX} \cdot A \cdot (e^{-\alpha \cdot t} - e^{-\beta \cdot t}) \quad 17)$$

Onde:

V_{MAX} tensão de pico em kV;

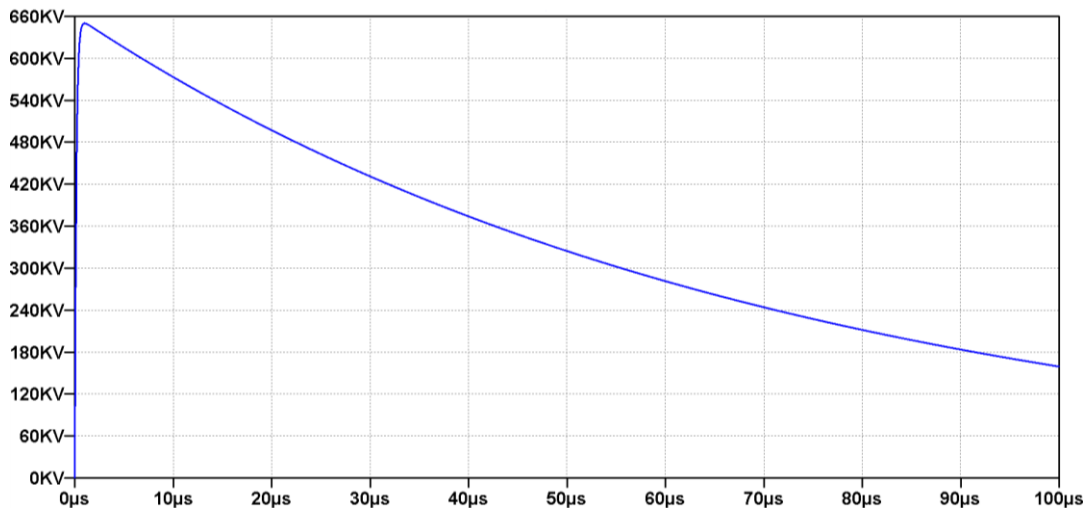
t tempo em segundos;

A 1,0167;

α $0,01423 \times 10^6$;

β $6,0691 \times 10^6$.

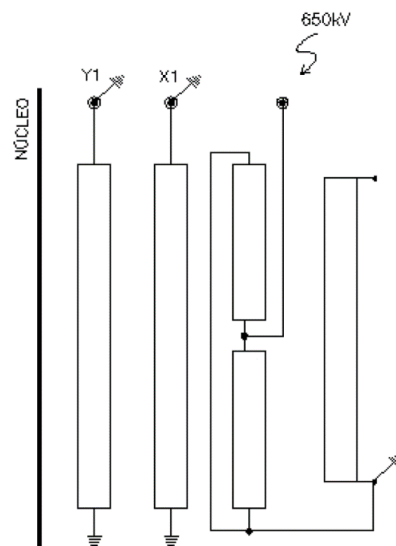
Figura 19 – Onda de impulso atmosférico



Fonte: Elaborado pelo autor.

O diagrama de conexões para avaliação do impulso aplicado na alta tensão é detalhado na Figura 20. Todos os terminais, exceto o ensaiado, são considerados aterrados diretamente.

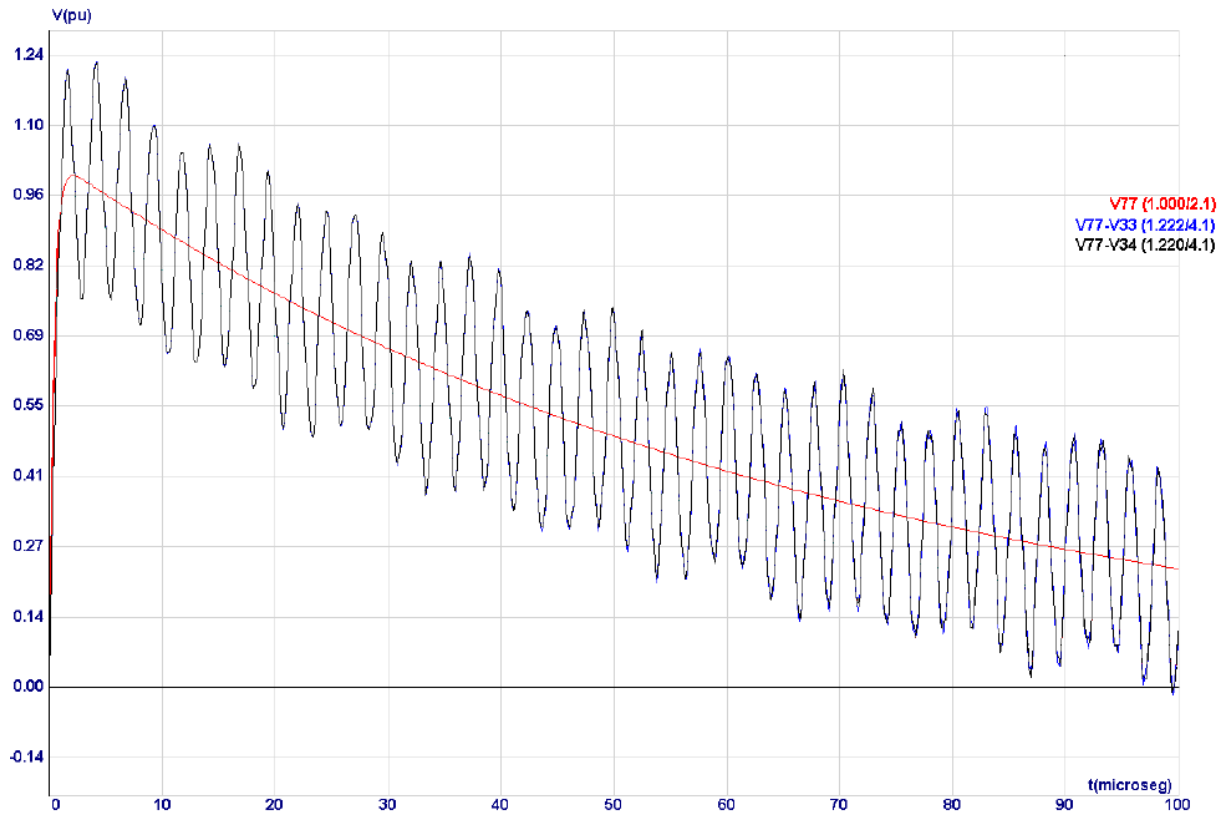
Figura 20 – Diagrama de conexões para impulso aplicado na AT



Fonte: Adaptado do design review (2014).

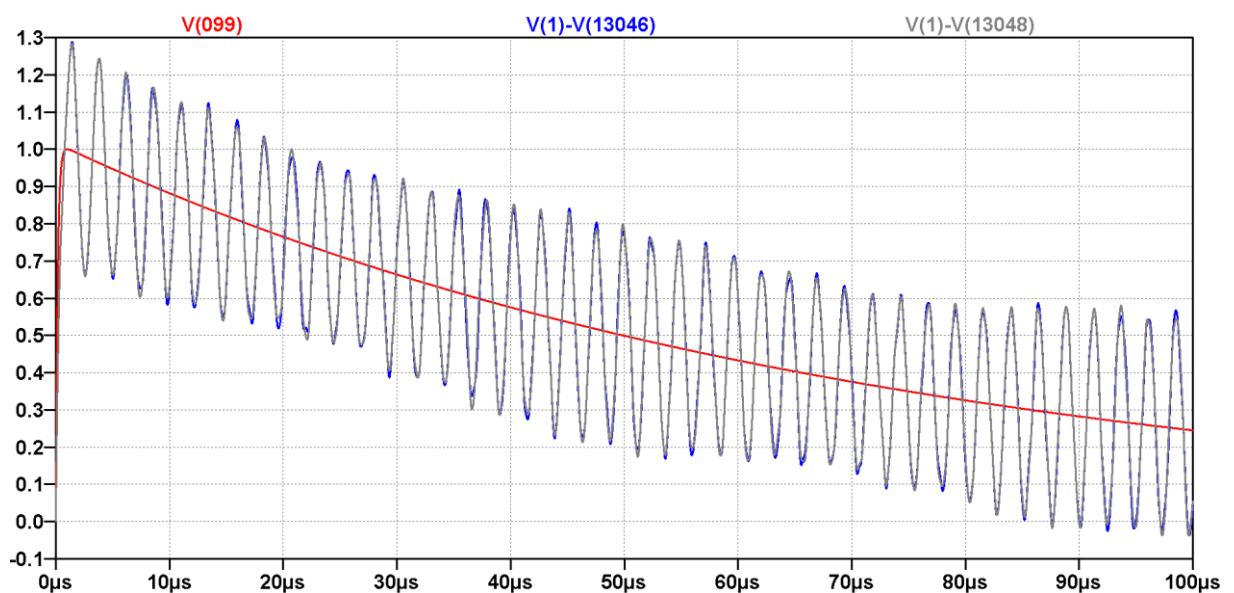
De acordo com a comparação qualitativa entre as simulações disponibilizadas pelo fabricante do transformador, Figura 21, com as simulações obtidas do modelo desenvolvido para os mesmos pontos, Figura 22, percebe-se a similaridade entre as respostas. Ambas apresentam sua ordem de grandeza em pu no eixo das ordenadas e com tempo de simulação de 100 μs no eixo das abscissas.

Figura 21 – Simulação do fabricante: Tensões críticas entre enrolamento de AT e BT



Fonte: Adaptado do design review (2014).

Figura 22 – Simulação própria: Tensões críticas entre enrolamento de AT e BT

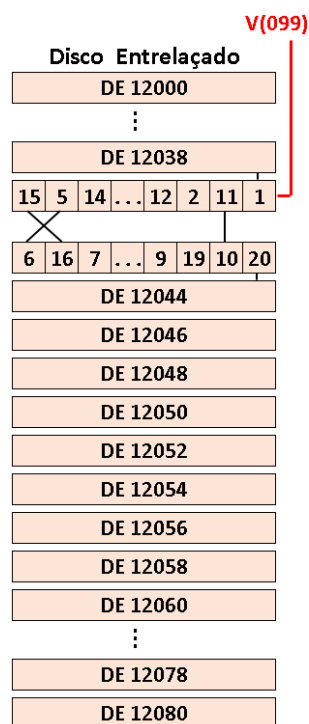


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.1 Caso 1: Análise do transformador real

O objetivo desta simulação consiste em representar o transformador real e estudar o comportamento das tensões de impulso atmosférico ao longo de todo o enrolamento de alta tensão. A Figura 23 ilustra o esquema de ligação do enrolamento de AT, onde é possível perceber que o primeiro disco da bobina de conexão central é representado espira por espira e as demais seções equivalem a concentração de um par de discos.

Figura 23 – Esquema de ligação do enrolamento de AT

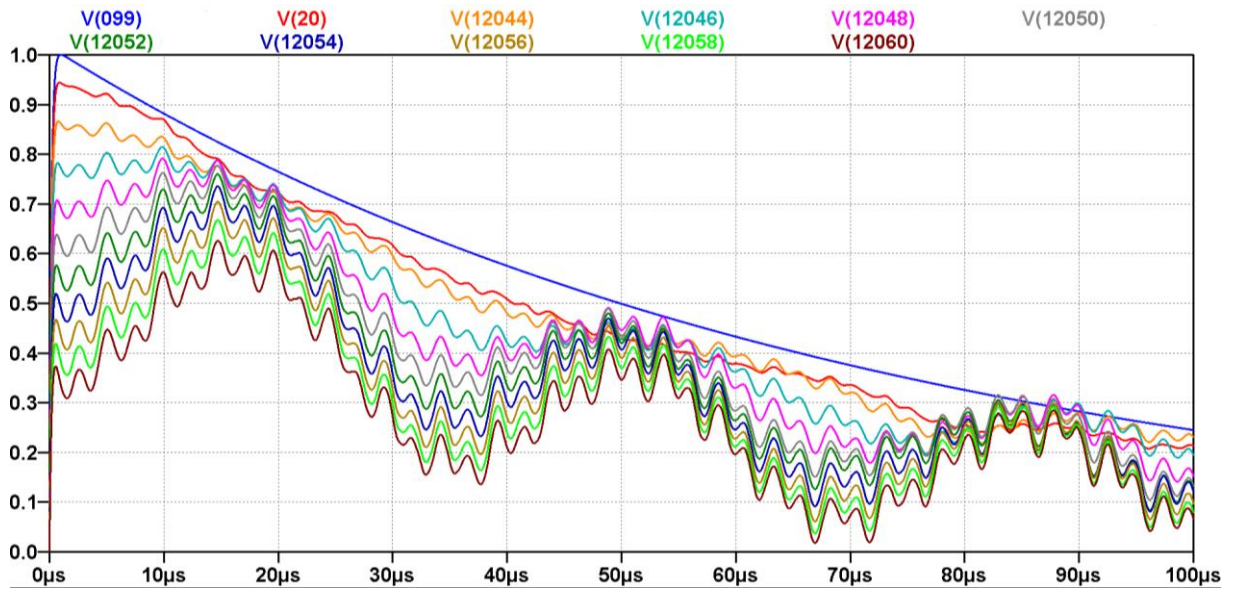


Fonte: Elaborado pelo autor.

No intuito de verificar o desempenho do modelo proposto para a condição do enrolamento do tipo disco entrelaçado, uma onda de impulso atmosférico padronizada foi aplicada ao terminal de entrada (V099) do enrolamento de AT. A Figura 24 apresenta a evolução no tempo das tensões transitórias em dez pontos distintos deste enrolamento, conforme esquema de ligação da Figura 23.

Através da Figura 24 é possível averiguar que os discos mais próximos da entrada central do enrolamento têm uma característica predominante da onda de impulso aplicada. Já nos discos mais distantes do centro do enrolamento surgem distorções na forma de onda, porém não tão críticas quanto nos primeiros enrolamentos, em decorrência da amplitude de tensão.

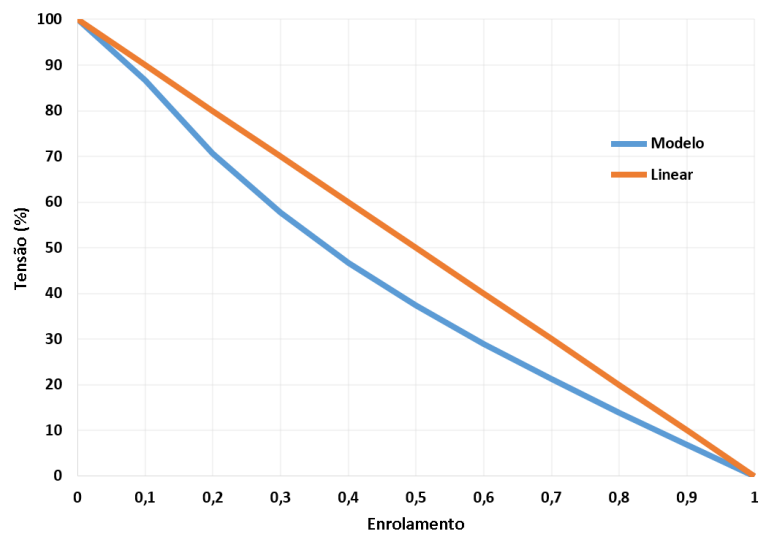
Figura 24 – Resposta para impulso atmosférico no enrolamento de AT



Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma das vantagens do modelo proposto refere-se à possibilidade de representar o comportamento da distribuição de tensão no enrolamento para os instantes iniciais da aplicação da onda de impulso, evitando desta forma, aproximações grosseiras. A Figura 25 compara a concentração dos gradientes de tensão (fator α) ao longo do enrolamento de AT, entre o modelo proposto e a distribuição linear.

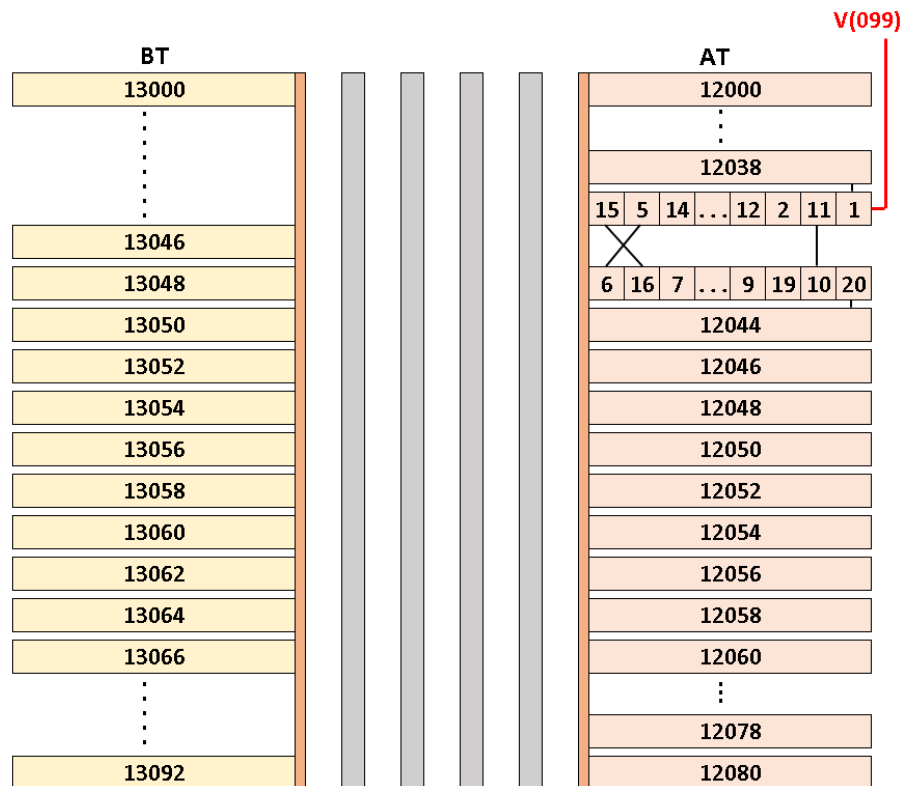
Figura 25 – Distribuição inicial de tensão no enrolamento tipo disco entrelaçado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na sequência é averiguado o comportamento das tensões transferidas entre os enrolamentos de AT e BT. Tal análise também segue o diagrama de conexões da Figura 20. O esquema de ligação da Figura 26 facilita o entendimento das simulações e análises seguintes.

Figura 26 – Esquema de ligação entre enrolamentos de AT e BT.



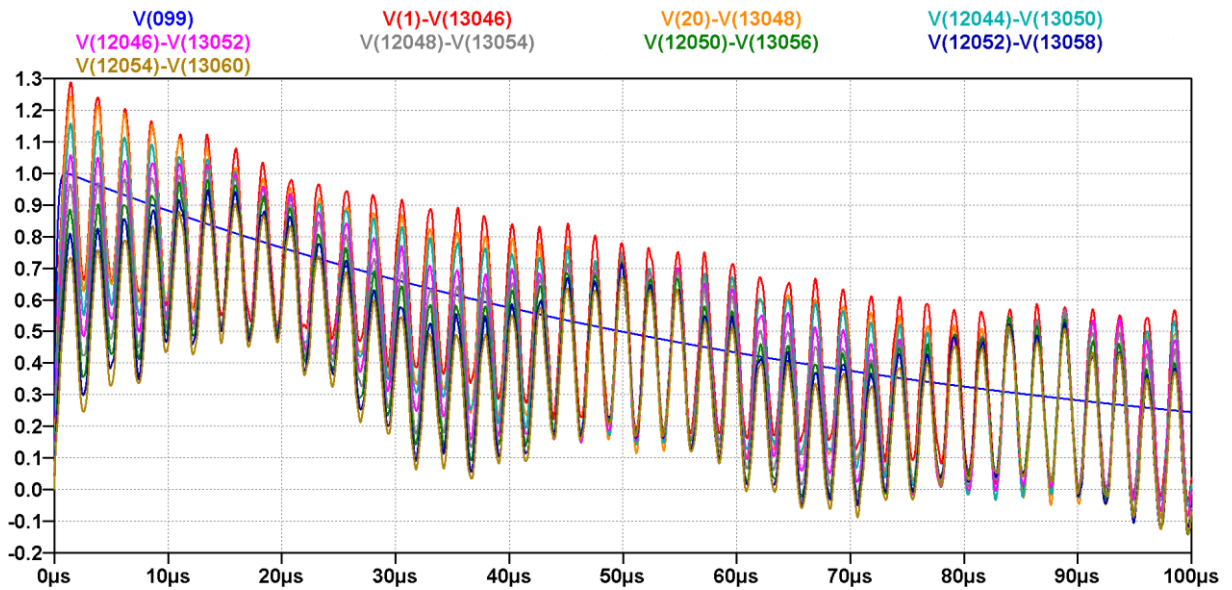
Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com Jacyszyn (2006), transitórios de tensão e corrente oriundos de descargas atmosféricas ou manobras de equipamentos podem atingir os transformadores e serem transferidos da alta para a baixa tensão. Estes surtos podem superar os limites de isolamento do equipamento.

A Figura 27 apresenta oito pontos avaliados entre estes enrolamentos e, conforme já evidenciado, os discos mais próximos da região central dos enrolamentos estão submetidos as tensões transitórias mais críticas.

Entre os pontos centrais dos enrolamentos, conforme o esquema de ligação da Figura 26, a amplificação da tensão transitória pode chegar a 1,288 pu, considerando como base 650 kV da onda de impulso atmosférico.

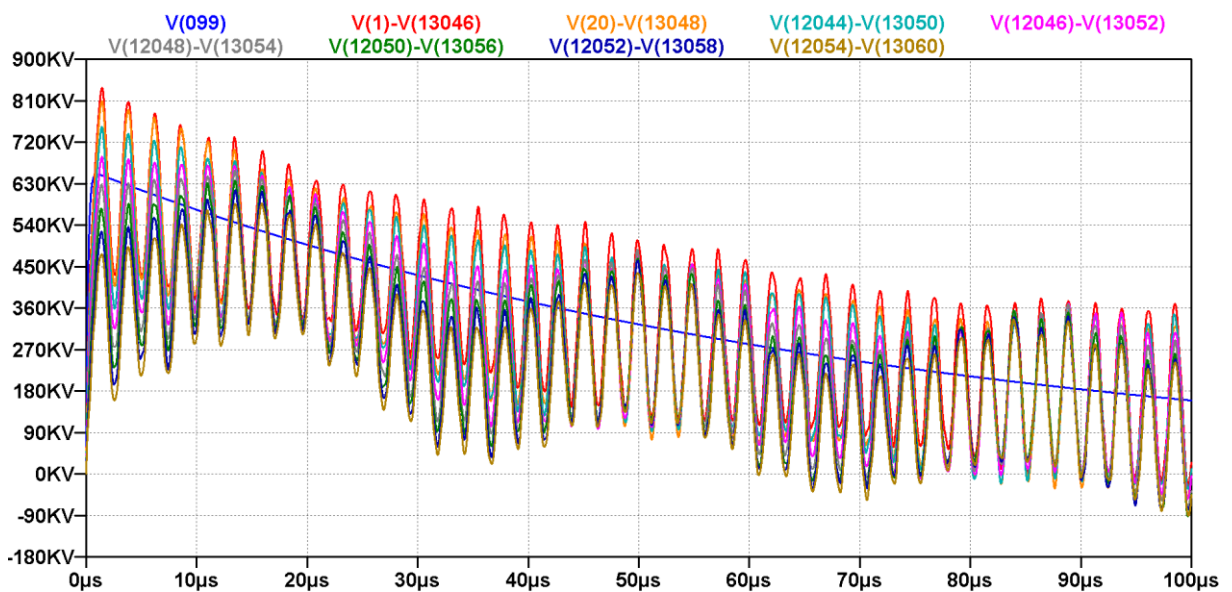
Figura 27 – Resposta para impulso atmosférico entre enrolamentos de AT e BT em pu



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 28 demonstra a mesma simulação destacada na Figura 27, porém com os valores em kV.

Figura 28 – Resposta para impulso atmosférico entre enrolamentos de AT e BT em kV



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 1, comparam-se as tensões transferidas entre os enrolamentos de AT e BT fornecidas pelo fabricante e as tensões encontradas a partir do modelo proposto. Em razão do fabricante não ter fornecido o comportamento das tensões ao longo de todo o enrolamento, apresentando apenas os valores, considerou-se os valores máximos do modelo simulado.

Tabela 1: Tensões entre enrolamentos de AT e BT

AT - BT	Tensão (kV)		
	Fabricante	Modelo	Diferença (%)
1-13046	798	837	4,89
20-13048	798	808	1,25
12044-13050	734	752	2,45
12046-13052	679	687	1,18
12048-13054	624	627	0,48
12050-13056	581	575	-1,03
12052-13058	544	525	-3,49
12054-13060	522	476	-8,81

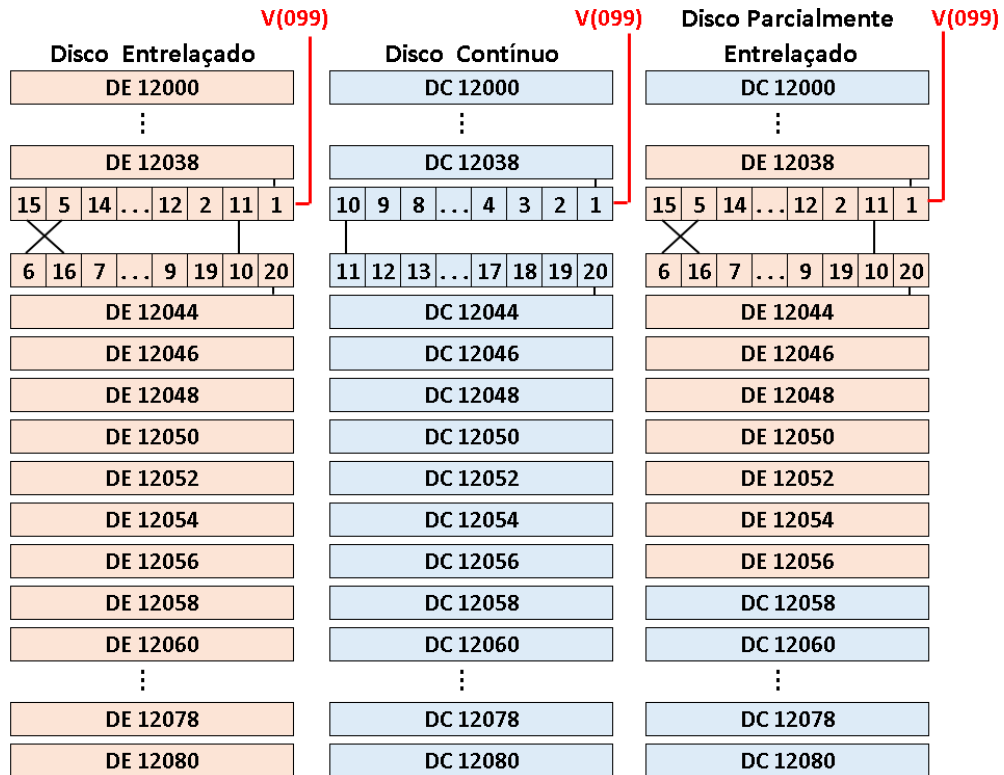
Fonte: Elaborado pelo autor.

A aproximação dos valores simulados com os fornecidos pelo fabricante evidencia a precisão do modelo desenvolvido.

5.1.2 Caso 2: Análise do transformador e estudo de modificação de projeto

Neste estudo de caso será abordado de forma detalhada a análise do enrolamento de alta tensão e o estudo de modificação deste projeto. Conforme destacado, o primeiro disco de entrada é representado espira por espira. Os demais discos são concentrados a cada dois discos adjacentes, resultando na divisão da bobina de alta tensão em 40 seções (20+20). Estas são identificadas como disco contínuo (DC) e disco entrelaçado (DE). A Figura 29 ilustra os esquemas de ligação para os enrolamentos de alta tensão tratados.

Figura 29 – Esquemas de ligação do enrolamento de AT



Fonte: Elaborado pelo autor.

O primeiro esquema de ligação, denominado disco entrelaçado, corresponde ao transformador real. Os demais esquemas, intitulados disco contínuo e disco parcialmente entrelaçado, fazem referência ao estudo de modificação de projeto, designado transformador virtual.

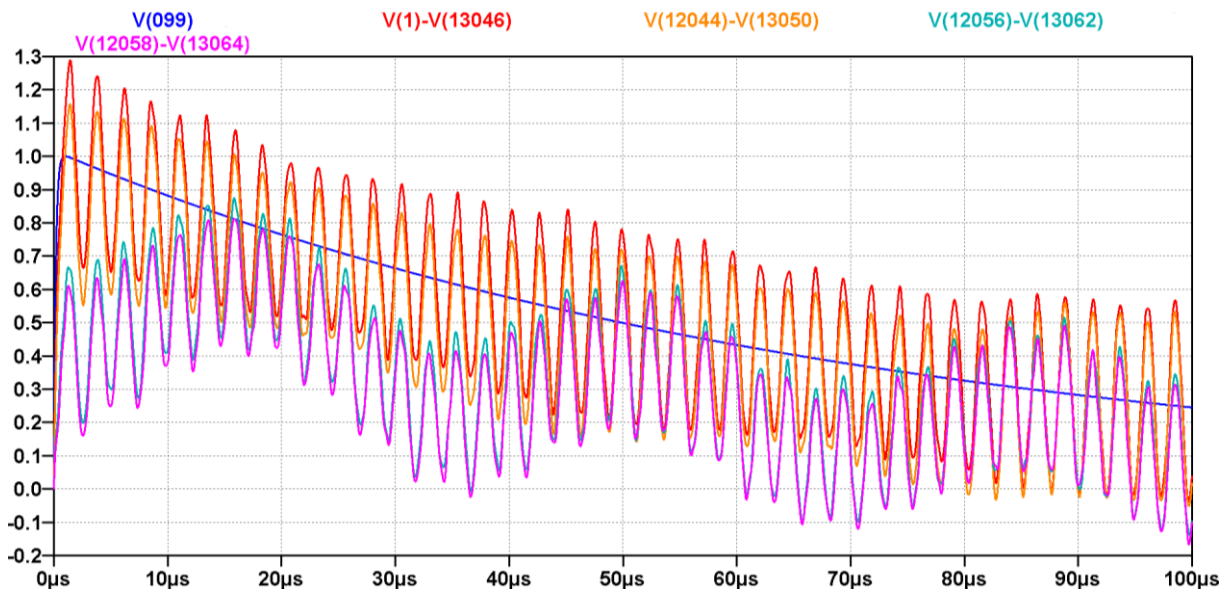
De acordo com as observações realizadas no caso 1 deste trabalho, percebe-se que no enrolamento de alta tensão de conexão central, os discos centrais do enrolamento estão submetidos a maiores gradientes de tensão, quando da aplicação da forma de onda de impulso atmosférico. Desta forma, é analisado o comportamento das tensões oscilatórias transferidas do enrolamento de AT para BT, entre espiras no primeiro disco de entrada do enrolamento de AT, assim como, as tensões entre discos para este enrolamento.

Esta avaliação realizada para o projeto do transformador real é comparada às respostas dos estudos de modificação de projeto, denominado transformador virtual, conforme esquemas de ligação da Figura 29.

5.1.2.1 Tensões entre enrolamentos de AT e BT

Entre o enrolamento de AT, do tipo disco entrelaçado, e o enrolamento de BT são avaliados quatro pontos distintos destacados na Figura 30.

Figura 30 – Resposta para tensões transferidas entre AT (DE) e BT, em pu

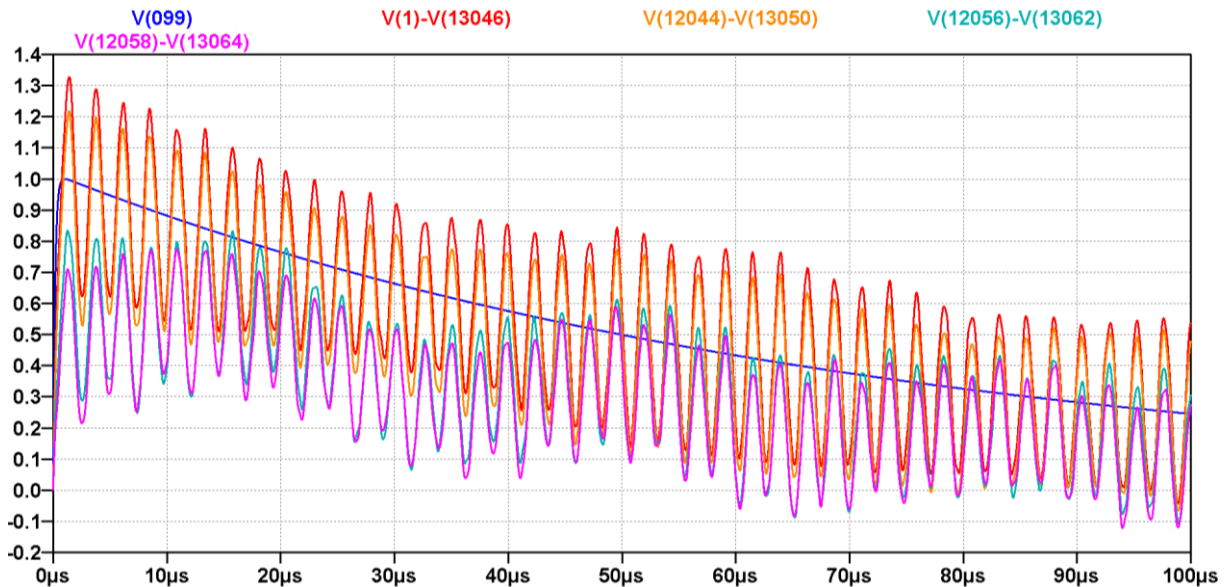


Fonte: Elaborado pelo autor.

No enrolamento do tipo disco parcialmente entrelaçado, os primeiros discos são entrelaçados e a partir de um determinado ponto, sua forma de ligação passa a ser do tipo disco contínuo. Tal medida é adotada pela indústria, pois a maior severidade imposta pelas tensões transitórias se detém aos discos iniciais.

A Figura 31 apresenta o comportamento das tensões entre o enrolamento de AT, do tipo disco parcialmente entrelaçado, e BT para os pontos avaliados.

Figura 31 – Resposta para tensões transferidas entre AT (DEC8) e BT, em pu

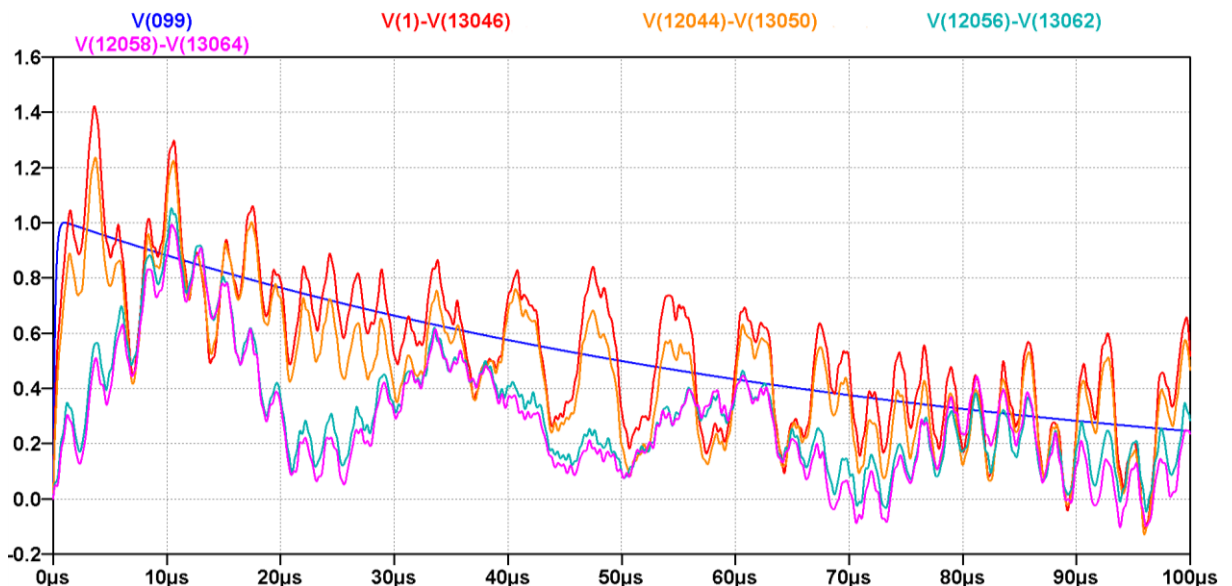


Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar de enrolamentos de alta tensão do tipo disco contínuo, tradicionalmente, não serem projetados e fabricados para tensões de impulso superiores a 350 kV, neste estudo considerou-se sua aplicação.

O comportamento das tensões entre AT e BT para o disco tipo contínuo distingue-se do perfil apresentado pelos enrolamentos do tipo DE e DEC8, conforme Figura 32.

Figura 32 – Resposta para tensões transferidas entre AT (DC) e BT, em pu

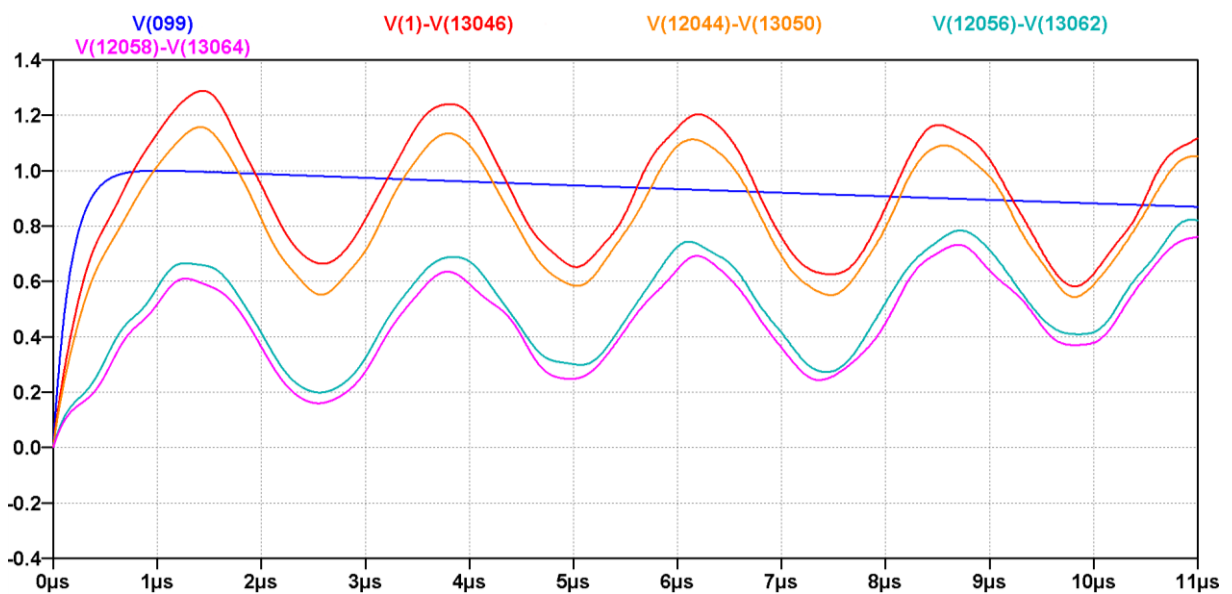


Fonte: Elaborado pelo autor.

De modo a enfatizar a amplitude das tensões transitórias abordadas para os três tipos de enrolamentos de AT, destaca-se individualmente, nas figuras a seguir, cada um dos casos para os primeiros 11 μ s. As tensões mais críticas entre os enrolamentos de AT e BT são observadas entre os pontos 1 e 13046.

Através da Figura 33, observa-se que a amplitude máxima de tensão entre V(1) e V(13046) é de 1,288 pu no tempo de 1,43 μ s para o enrolamento tipo disco entrelaçado.

Figura 33 – Detalhe da resposta para tensões transferidas entre AT (DE) e BT

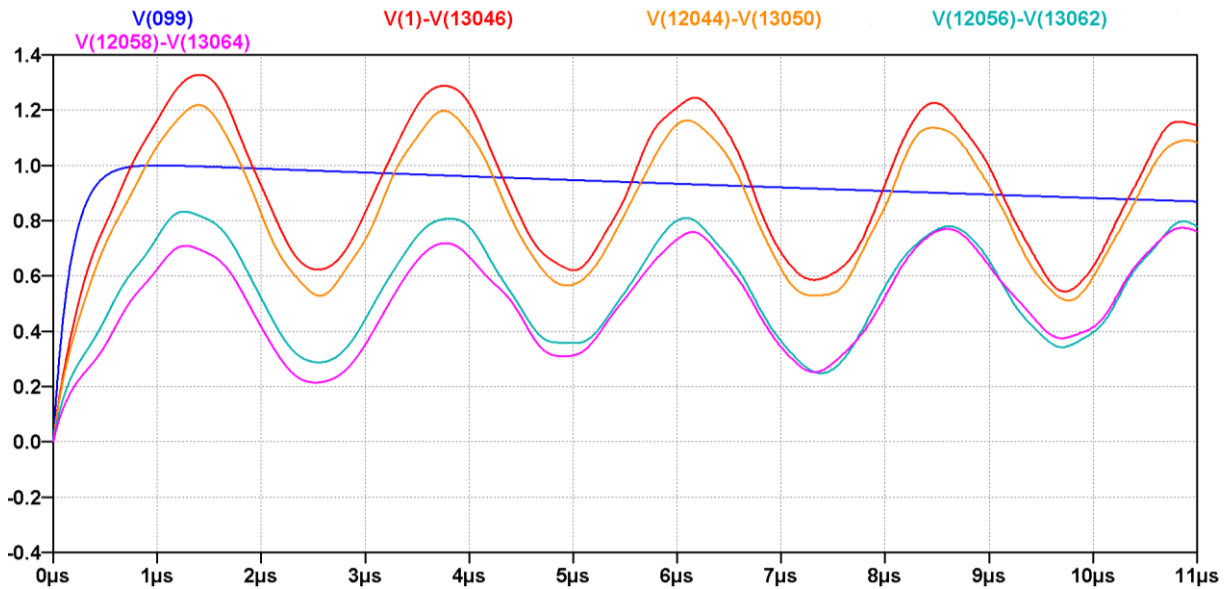


Fonte: Elaborado pelo autor.

Já no enrolamento tipo parcialmente entrelaçado a amplitude máxima atinge 1,328 pu no tempo de 1,41 μ s. A diferença nos valores máximos entre o transformador virtual e o real é de 0,04 pu, correspondendo a aproximadamente 26 kV.

A Figura 34 apresenta as tensões máximas para o enrolamento tipo disco parcialmente entrelaçado.

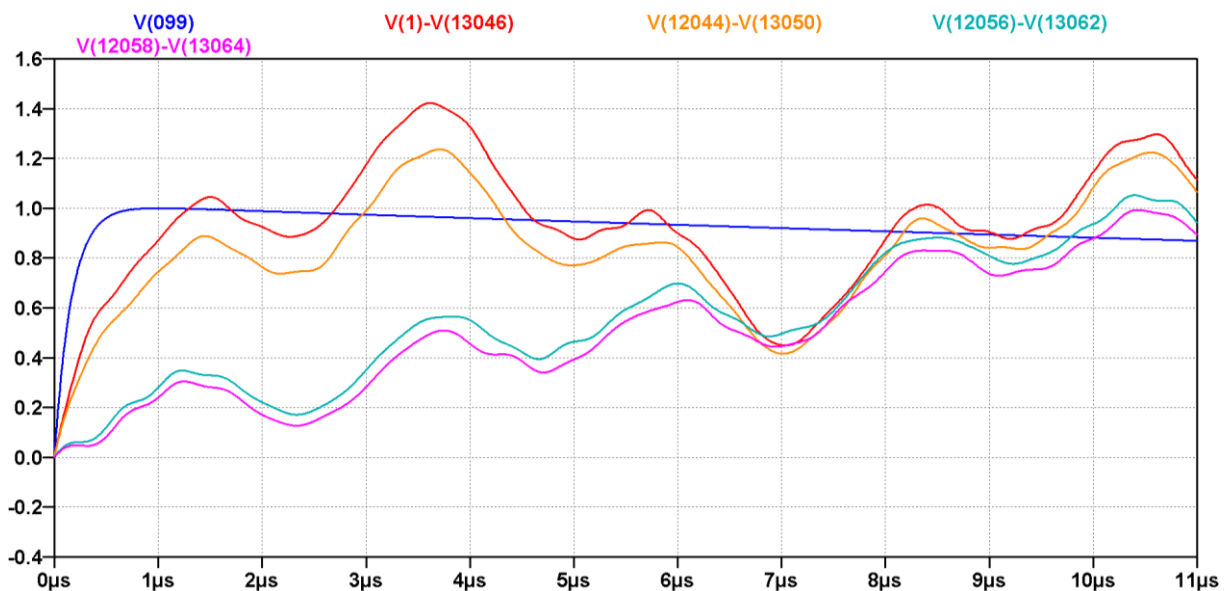
Figura 34 – Detalhe da resposta para tensões transferidas entre AT (DEC) e BT



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tais diferenças acentuam-se quando analisado o enrolamento tipo disco contínuo. A partir da Figura 35, percebe-se que a amplitude máxima de tensão é de aproximadamente 1,422 pu no tempo de 3,61 μ s. Desta forma, a diferença entre este projeto virtual e o real é de 0,134 pu, equivalente de 87,1 kV.

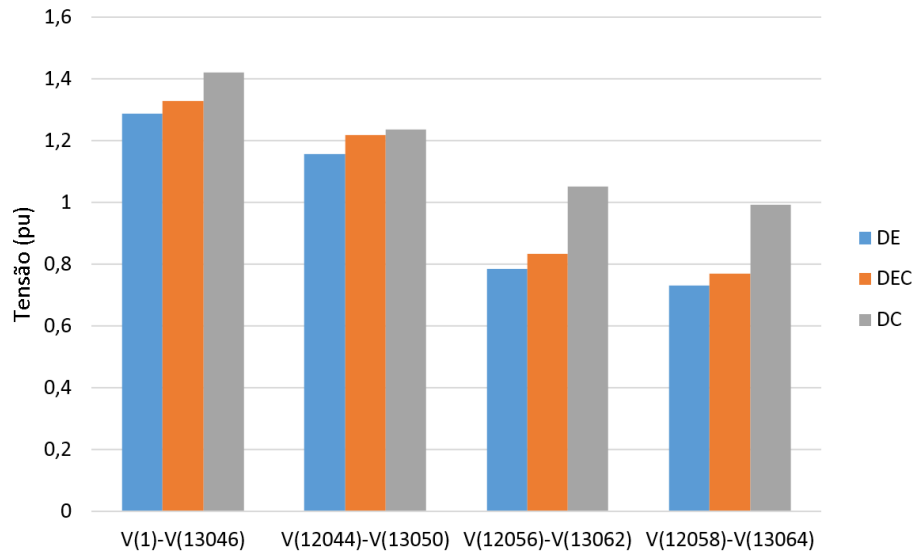
Figura 35 – Detalhe da resposta para tensões transferidas entre AT (DC) e BT



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 36 demonstra os resultados comparativos para os quatro pontos avaliados entre AT e BT, considerando o transformador real e as alterações de projeto para o enrolamento de alta tensão.

Figura 36 – Amplitude de tensão nos enrolamentos estudados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Sob o ponto de vista técnico, evidencia-se na Figura 36 que o melhor resultado na distribuição de tensão entre os enrolamentos de AT e BT ocorre na adoção do enrolamento tipo disco entrelaçado, seguido do enrolamento disco parcialmente entrelaçado. De acordo com Mendes (1995), o disco contínuo não deve ser utilizado para tensão de impulso atmosférico de 650 kV, comprovado pelo pior desempenho entre os enrolamentos estudados.

Os dados até aqui apresentados destacaram a distribuição das tensões transitórias entre os enrolamentos de AT e BT, quando submetidos à onda padronizada de impulso atmosférico. As análises seguintes avaliam as tensões internas no enrolamento de alta tensão para os três tipos abordados.

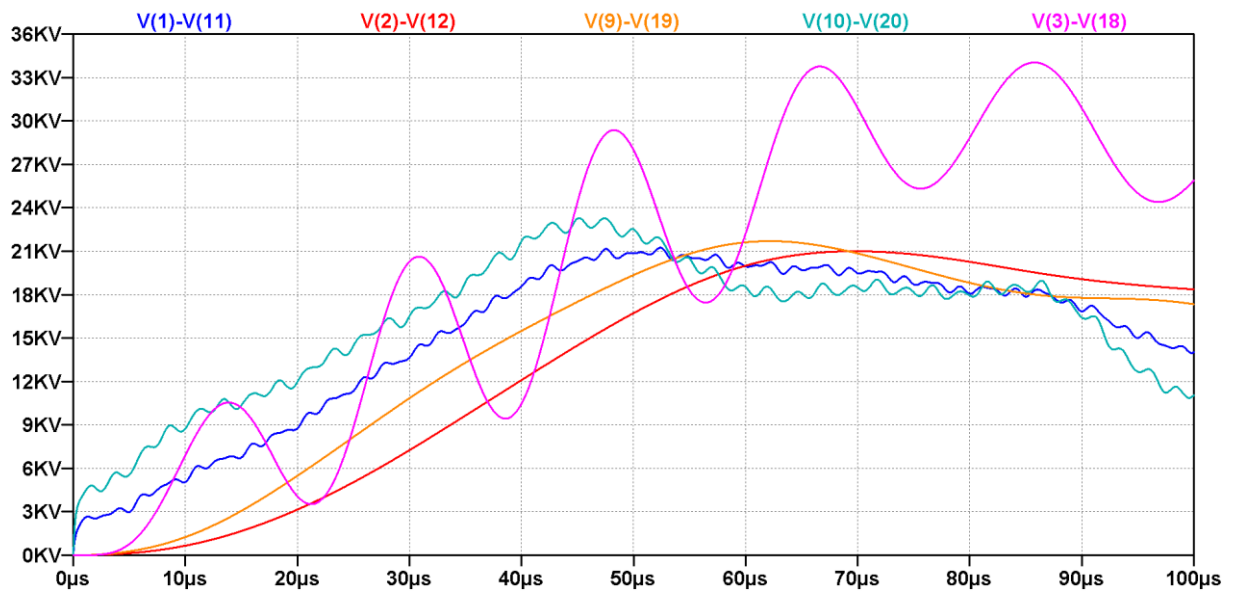
5.1.2.2 Tensões entre espiras do enrolamento de AT

Para o comportamento interno no enrolamento de AT, verificam-se as tensões encontradas entre as espiras do primeiro disco. Com estes valores é possível avaliar o

isolamento do enrolamento, ao comparar com os valores informados pelo fabricante na etapa de *design review*.

No projeto do transformador real, cujo enrolamento de AT é do tipo disco entrelaçado, foram avaliadas as tensões entre as espiras iniciais, centrais e finais do disco central, destacado na Figura 37.

Figura 37 – Tensões entre espiras no enrolamento tipo disco entrelaçado



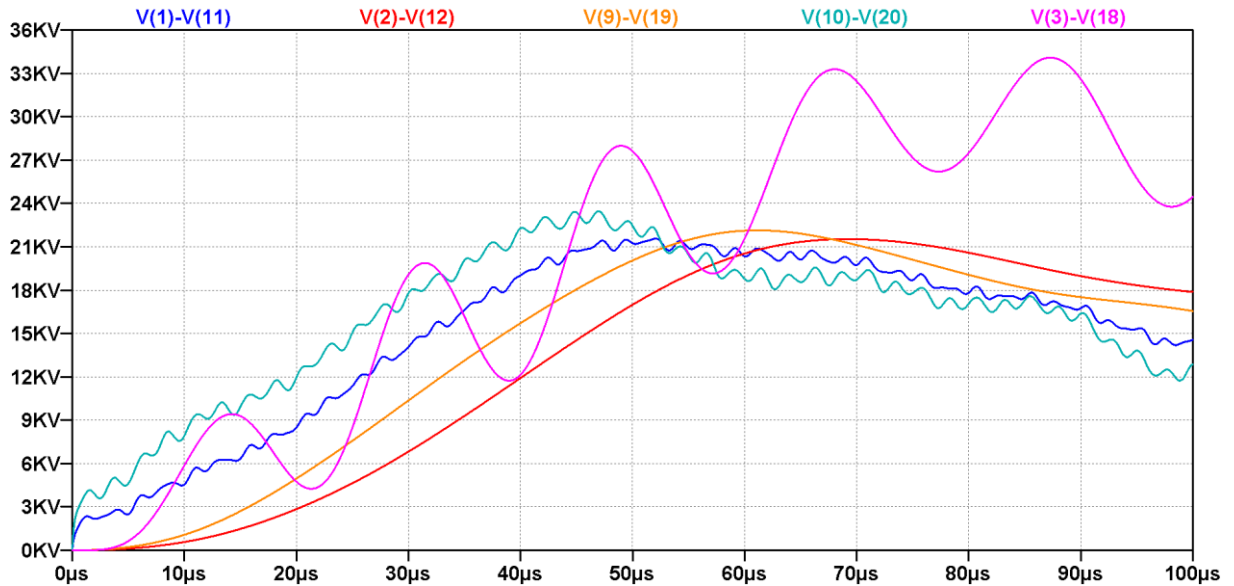
Fonte: Elaborado pelo autor.

O fabricante do transformador apresentou, através de uma tabela, a tensão entre espiras de 33 kV de crista para o primeiro disco deste projeto. Destaca-se que a tensão de crista admissível considerada neste projeto é de 52 kV.

Diante destes valores apresentados pelo fabricante e da simulação na Figura 37, considera-se como satisfatório e com boa precisão o modelo desenvolvido. Também se observa que o isolamento projetado entre espiras atende às solicitações impostas pela onda de impulso atmosférico.

A simulação realizada para o estudo de modificação de projeto, disco parcialmente entrelaçado, demonstra através da Figura 38 que as tensões entre espiras para o disco central assemelham-se aos valores apresentados para o projeto do transformador real. Portanto, neste quesito e para este disco, o isolamento entre espiras é satisfatório.

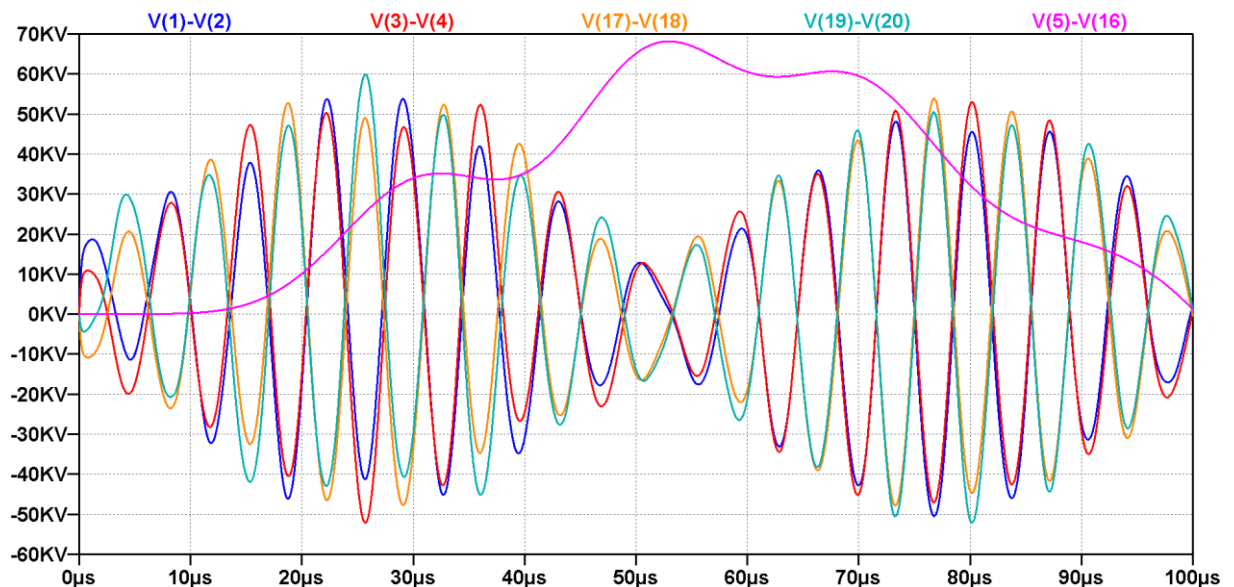
Figura 38 – Tensões entre espiras no enrolamento tipo disco parcialmente entrelaçado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Porém, no enrolamento do tipo disco contínuo, constata-se que as tensões máximas ultrapassam as tensões admissíveis projetadas para o transformador real, conforme a Figura 39. Por conseguinte, o isolamento entre espiras do transformador real não atende este caso. Conforme já abordado, este tipo de enrolamento não é usualmente utilizado para níveis de impulso de 650 kV, mas optou-se por sua utilização para avaliar e compreender a distribuição das tensões transitórias.

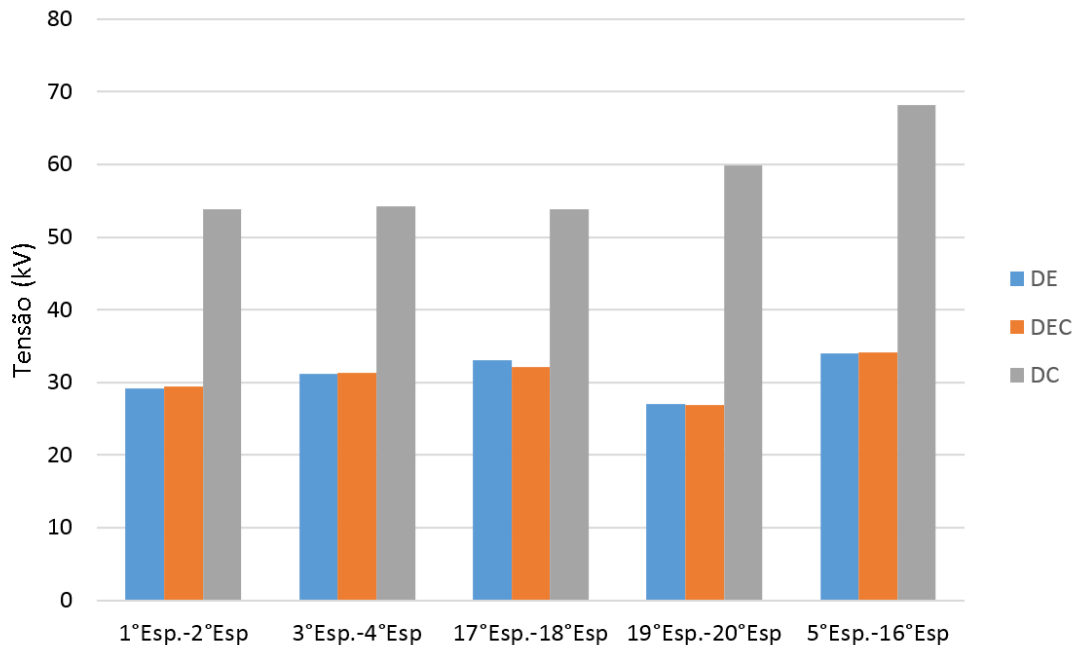
Figura 39 – Tensões entre espiras no enrolamento tipo disco contínuo



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 40 mostra os resultados comparativos da tensão entre espiras para os enrolamentos estudados.

Figura 40 – Amplitude de tensão entre espiras do primeiro disco dos enrolamentos



Fonte: Elaborado pelo autor.

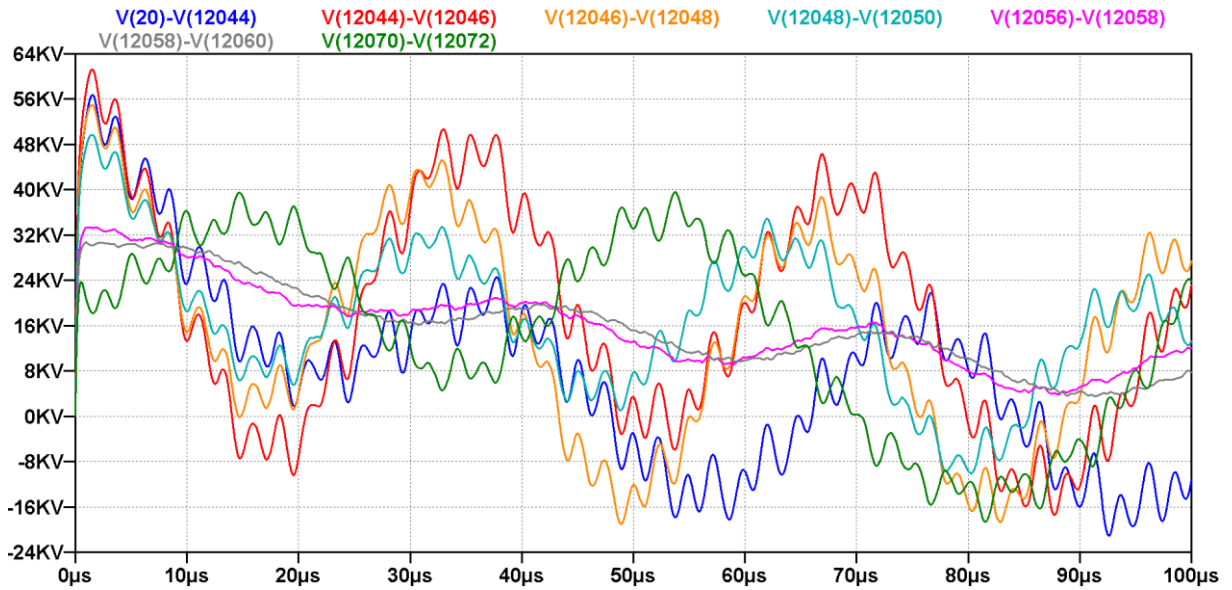
Constata-se na Figura 40 que a amplitude da tensão entre espiras é semelhante entre os enrolamentos tipo disco entrelaçado e parcialmente entrelaçado. O desempenho transitório do enrolamento tipo disco contínuo está associado à relação das capacitâncias série e paralela correspondentes. Como a capacitância série é muito baixa, o fator de distribuição de tensão α é muito alto e, conseqüentemente, há uma concentração dos gradientes de tensão junto ao terminal atingido pelo transitório, conforme detalhado no item 2.3 deste trabalho.

A fim de completar a análise das tensões internas no enrolamento de AT, avaliam-se as tensões entre discos para os enrolamentos estudados.

5.1.2.3 Tensões entre discos do enrolamento de AT

As tensões transitórias entre discos do enrolamento tipo entrelaçado são observadas em sete pontos distintos. A Figura 41 retrata-os na simulação do transformador real.

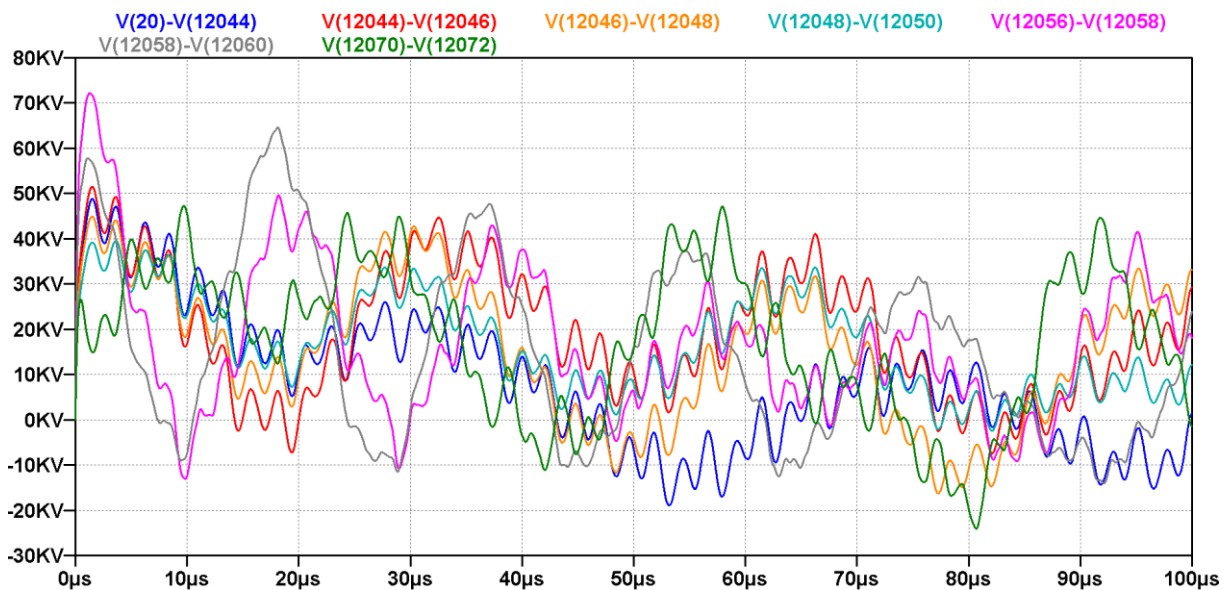
Figura 41 – Tensões entre discos no enrolamento tipo disco entrelaçado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o enrolamento de AT do projeto virtual do tipo disco parcialmente entrelaçado, os mesmos pontos destacados anteriormente são apresentados na Figura 42.

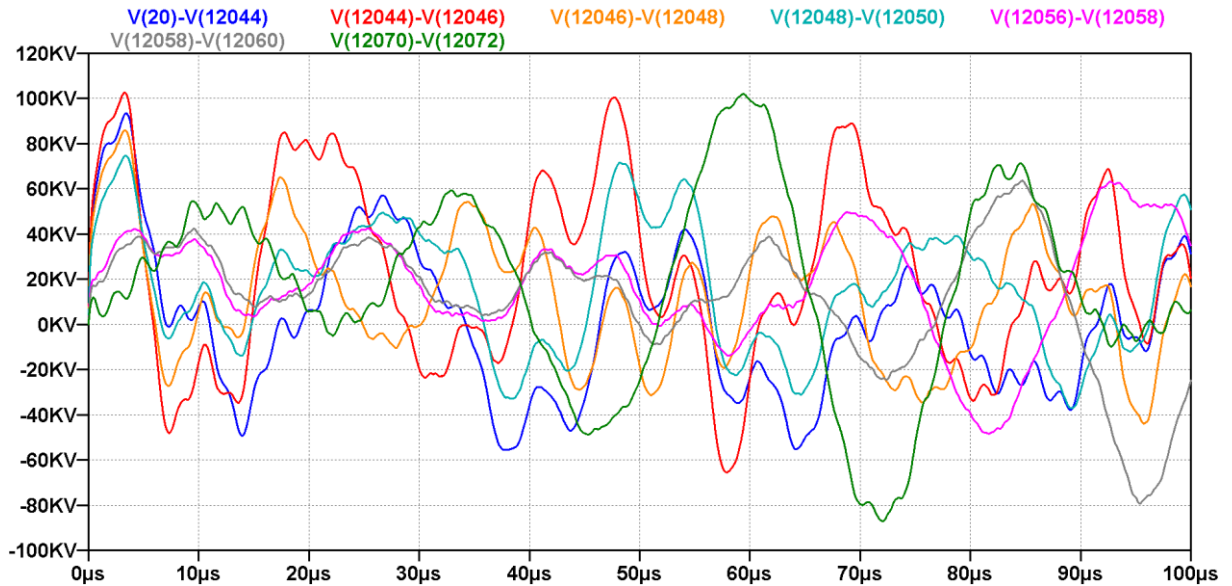
Figura 42 – Tensões entre discos no enrolamento tipo disco parcialmente entrelaçado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Da mesma forma, na Figura 43 são apresentadas as tensões entre discos para o enrolamento do tipo contínuo.

Figura 43 – Tensões entre discos no enrolamento tipo disco contínuo



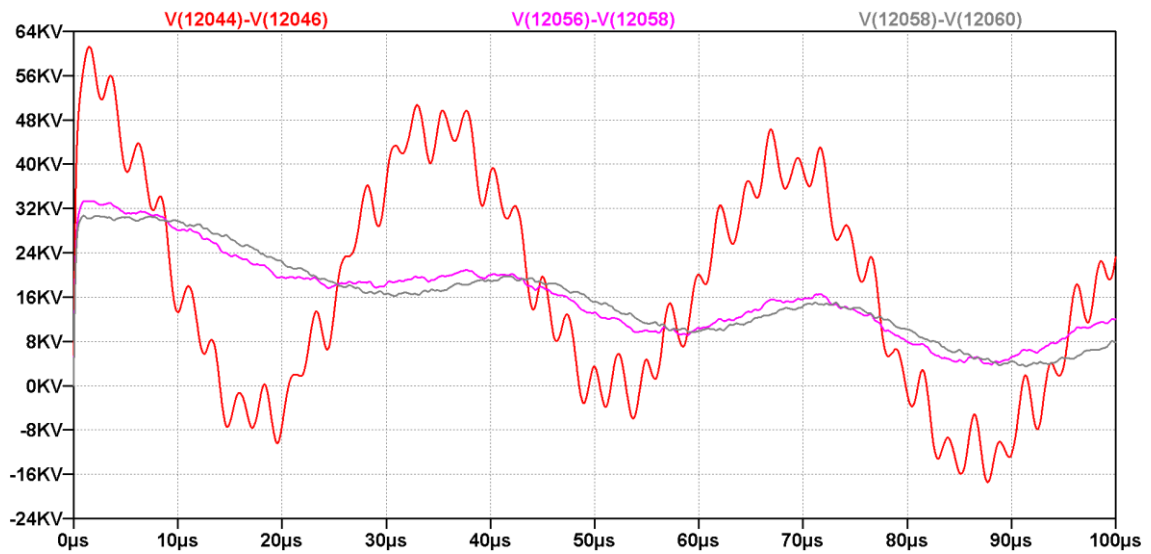
Fonte: Elaborado pelo autor.

Através de uma análise detalhada e criteriosa do comportamento das tensões transitórias entre os discos dos três tipos de enrolamentos abordados e com base nas Figura 41, 42 e 43, foram selecionados os três pontos representativos das tensões mais críticas entre discos. Os três pontos mencionados são: 12044-12046; 12056-12058; 12058-12060.

Na Figura 44, entre os discos 12044 e 12046, percebe-se a amplitude máxima da tensão impulsiva. Esta característica de onda ocorre para os primeiros discos do enrolamento de alta tensão e, à medida que se distancia do terminal central, a distribuição da tensão torna-se mais linear, conforme se observa entre os discos 12056 e 12058, 12058 e 12060.

Portanto, no enrolamento de AT do tipo disco entrelaçado, a tensão máxima é de 61,20 kV para o canal entre os discos 12044 e 12046. Nos demais canais os níveis de tensão são inferiores.

Figura 44 – Detalhe das tensões entre discos no enrolamento DE

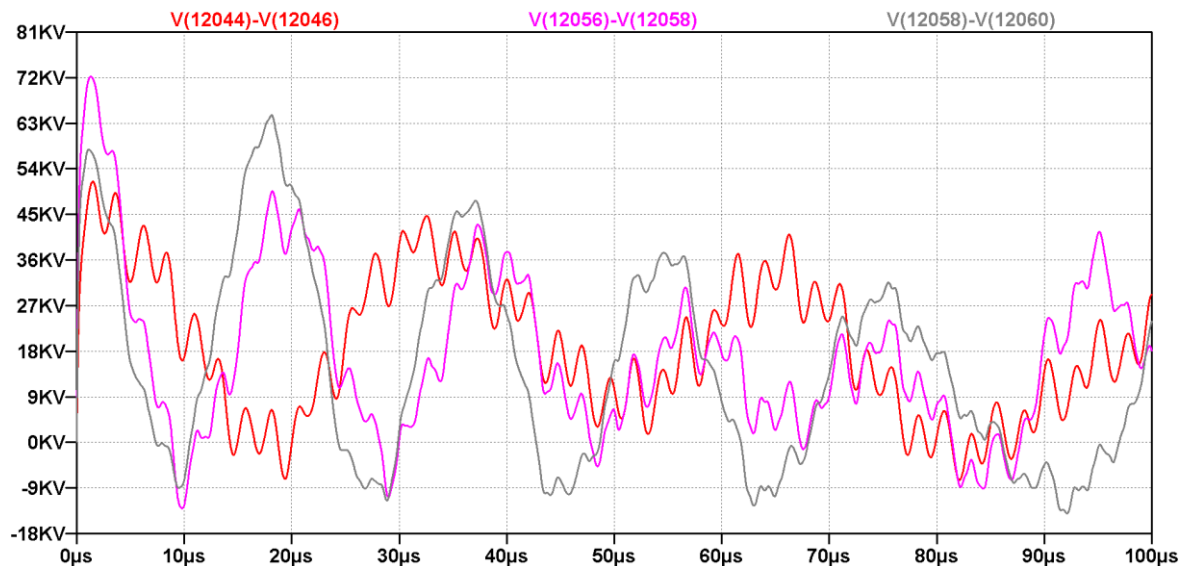


Fonte: Elaborado pelo autor.

No enrolamento tipo disco parcialmente entrelaçado há uma descontinuidade no padrão de construção do enrolamento entre os discos 12056 e 12058, resultando neste ponto a maior criticidade na amplitude de tensão. Diferentemente da análise anterior, onde a amplitude máxima da tensão impulsiva ocorria próximo ao terminal de entrada, neste caso, a amplitude máxima acontece na descontinuidade e as tensões ao longo do enrolamento não apresentam uma característica linear.

Na Figura 45 são apresentadas as tensões entre discos e evidenciada a amplitude máxima de 72,18 kV entre os pontos 12056 e 12058.

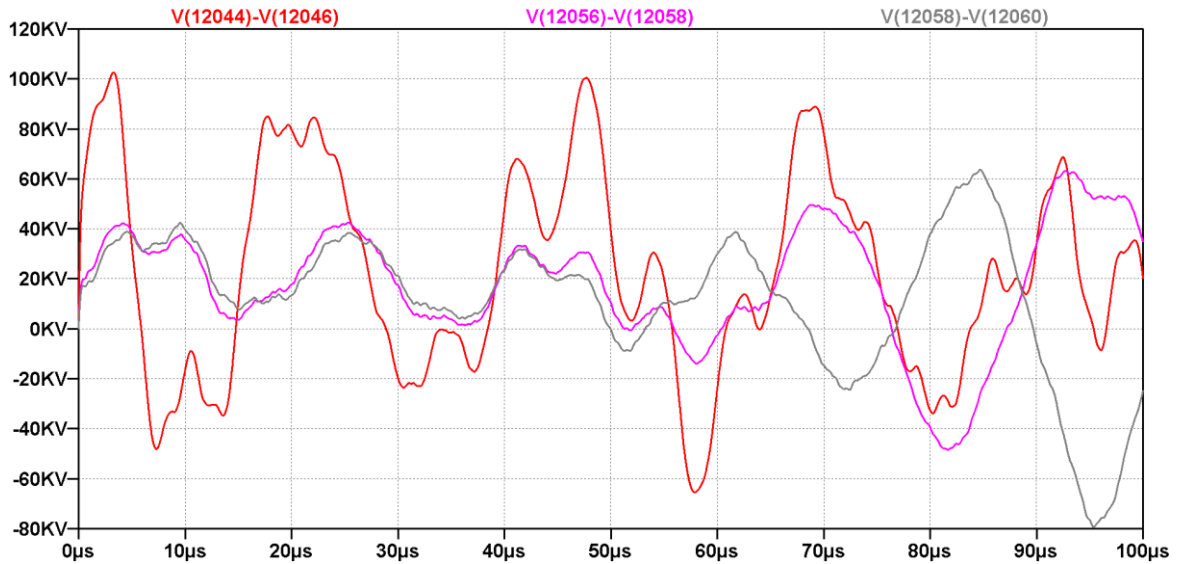
Figura 45 – Detalhe das tensões entre discos no enrolamento tipo DEC8



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já no enrolamento tipo disco contínuo, novamente ressalta-se que a máxima tensão impulsiva entre os discos ocorre próximo ao terminal de entrada do enrolamento de AT. Esta tensão de crista atinge 102,60 kV, conforme apresentado na Figura 46.

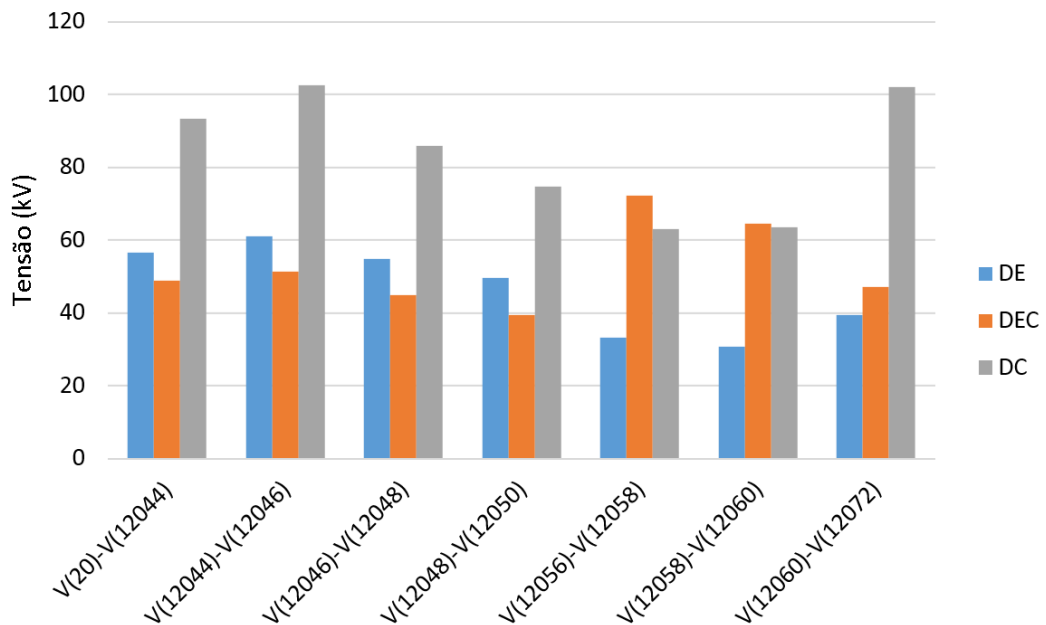
Figura 46 – Detalhe das tensões entre discos no enrolamento DC



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 47 demonstra o comparativo das tensões entre discos considerando a alteração de projeto para o enrolamento de alta tensão.

Figura 47 – Amplitude de tensão entre discos dos enrolamentos estudados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Diante das simulações realizadas para análise das tensões entre discos do enrolamento de AT do transformador real, tomam-se estes pontos como referência para comparação com os dados fornecidos pelo fabricante, conforme destacado na Tabela 2.

Tabela 2: Tensões entre discos no enrolamento tipo disco entrelaçado

Discos	Fabricante			Modelo
	Tensão entre Discos (kV)	Tensão Admissível (kV)	Suportabilidade	Tensão entre Discos (kV)
12044-12046	57	94	1,65	61,20
12046-12048	51	94	1,84	54,98
12048-12050	46	94	2,04	49,67
12056-12058	36	94	2,61	33,37
12058-12060	37	94	2,54	30,71
12070-12072	40	94	2,35	39,48

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 2 constata-se que as tensões fornecidas pelo fabricante são semelhantes às encontradas nas simulações do modelo proposto. A tensão admissível fornecida pelo fabricante do transformador refere-se ao canal de 4 mm entre os discos.

Quando comparados os dois enrolamentos, alvo do estudo de alteração de projeto, com o valor de tensão admissível para um canal de 4mm, certifica-se que o enrolamento tipo disco parcialmente entrelaçado tem isolamento satisfatória entre os discos 12056 e 12058, indicando uma suportabilidade de 1,30. Porém, o enrolamento tipo disco contínuo, com uma suportabilidade de 0,92, tem uma isolamento insatisfatória entre os discos 12044 e 12046, cujo canal também é de 4 mm.

Com estes resultados conclui-se que o enrolamento tipo disco contínuo estudado não apresenta condições de isolamento satisfatórias. Apesar de o enrolamento tipo disco entrelaçado atender às condições de isolamento, este projeto apresenta na descontinuidade do enrolamento uma fragilidade. Novamente, cabe ressaltar que os estudos de alteração de projeto consideraram as mesmas dimensões e tipo de isolamento do transformador real, alterando unicamente o padrão de construção do enrolamento de AT e conseqüentemente influenciando nas capacitâncias calculadas.

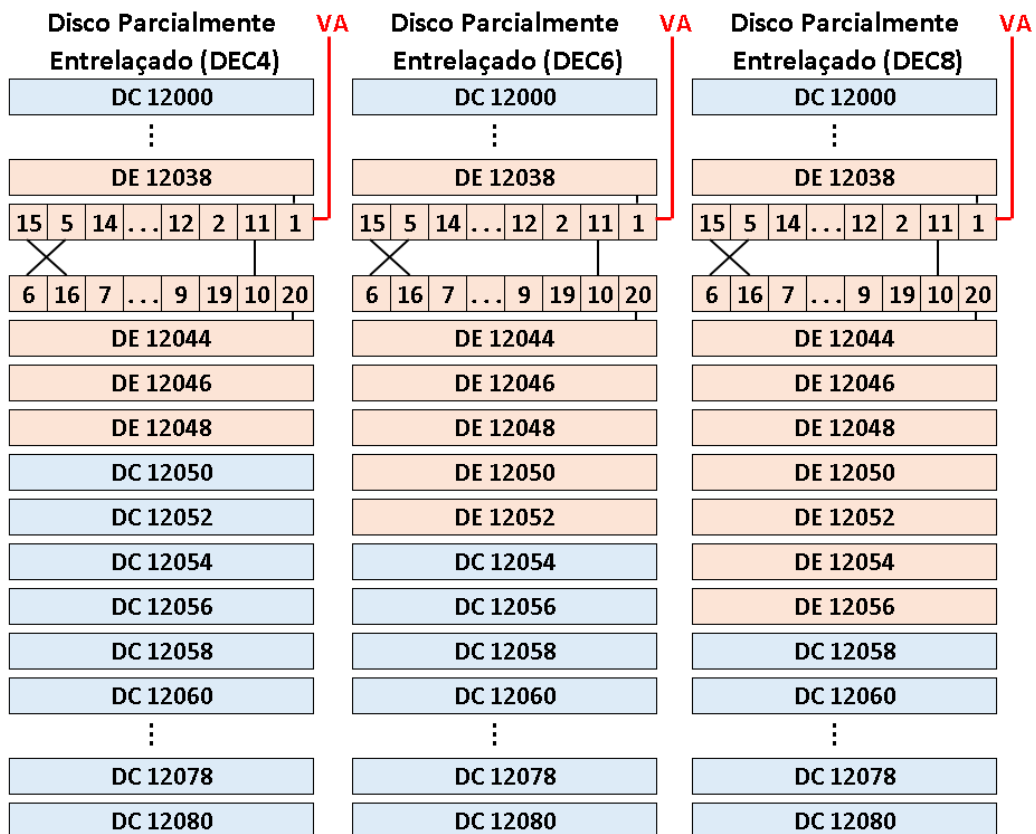
5.1.3 Caso 3: Análise do enrolamento tipo disco parcialmente entrelaçado

Conforme abordado no item 2.4, no enrolamento tipo disco parcialmente entrelaçado, a amplitude da tensão de onda estacionária na descontinuidade entre o disco entrelaçado e disco contínuo pode atingir valores elevados.

Segundo o CIGRÉ (2011), a resposta transitória pode ser obtida analiticamente, em teoria, por ondas trafegantes e ondas estacionárias, para um enrolamento uniforme. Porém, na prática, existem enrolamentos complexos que apresentam descontinuidades, sejam estas regiões com derivações de tensão ou mesmo onde o tipo construtivo do enrolamento é modificado com a finalidade de minimizar o impacto das sobretensões transitórias. Entretanto, no modelo desenvolvido, cujos parâmetros representam exatamente tais descontinuidades, possibilita-se a análise através de simulação computacional.

Com base nesta afirmação, este estudo de caso considera a modificação de projeto do transformador virtual, proporcionado pela alteração da região de descontinuidade do enrolamento de AT em três pontos distintos. Na Figura 48 são apresentadas as regiões de descontinuidade para o enrolamento de alta tensão tipo parcialmente entrelaçado.

Figura 48 – Esquemas de ligação do enrolamento tipo disco parcialmente entrelaçado

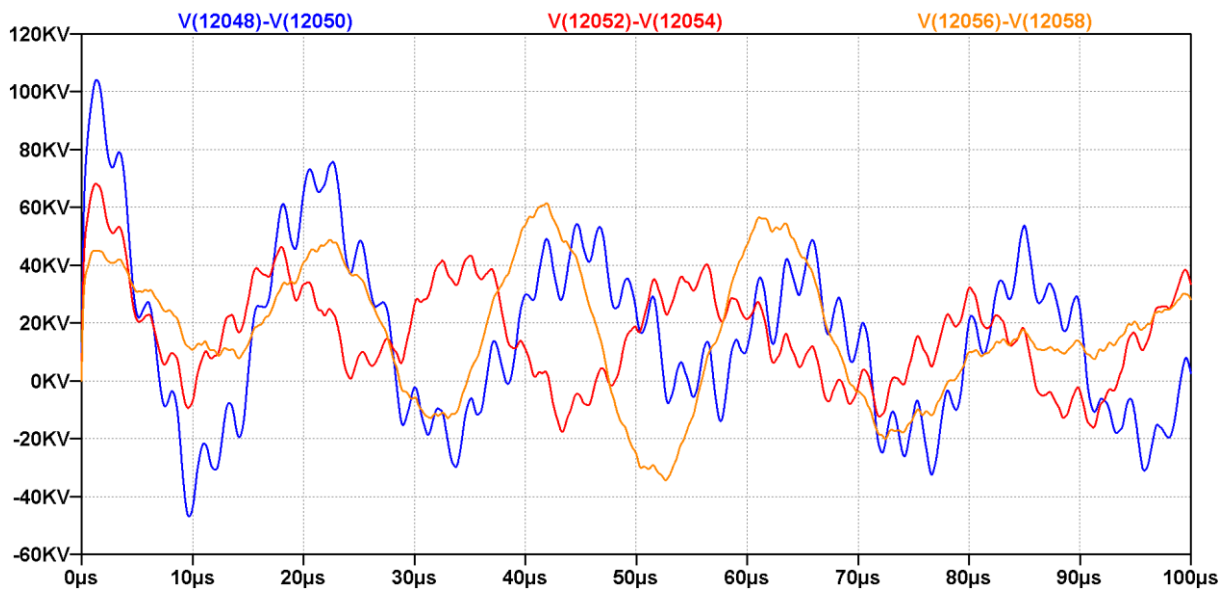


Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando como ponto crítico a região de descontinuidade de um enrolamento tipo parcialmente entrelaçado, ou seja, a interligação do disco entrelaçado para o disco contínuo, as análises seguintes avaliam apenas este tipo de enrolamento, diferenciando-os pelos pontos onde ocorrem as transições.

Objetivando o melhor desempenho frente aos surtos de tensão, os pontos de transição testados foram entre os discos DE12048 – DC12050, DE12052 – DC12054 e DE12056 – DC12058. A Figura 49 apresenta o comportamento da tensão entre discos na região da descontinuidade DE12048 – DC12050.

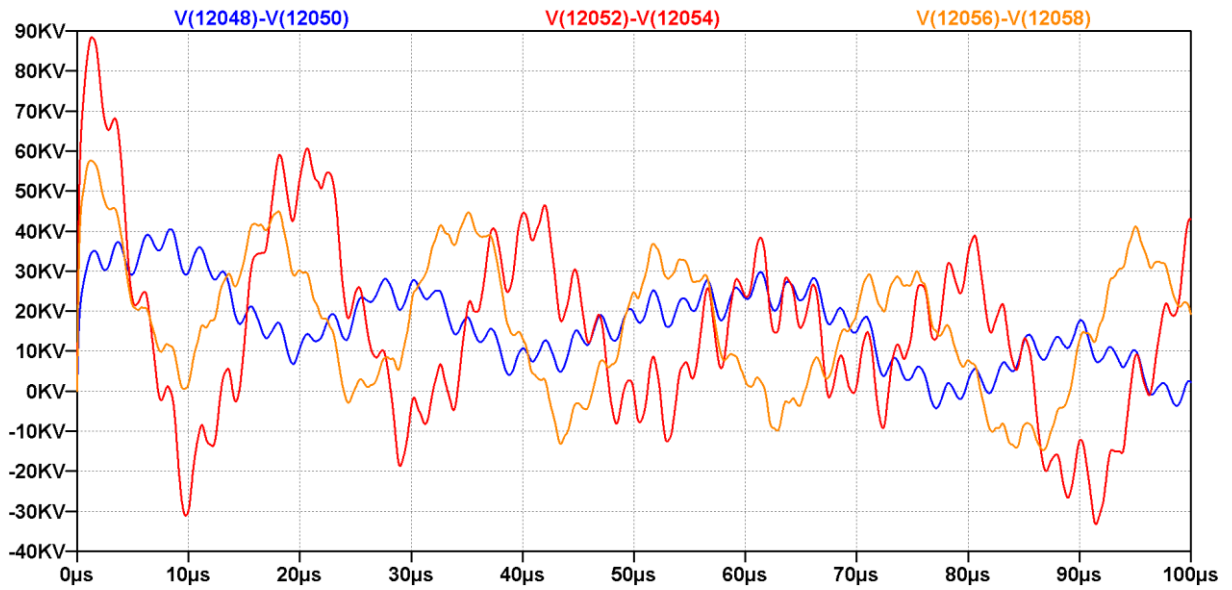
Figura 49 – Tensões entre discos para descontinuidade em DE12048 – DC12050 (DEC4)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 50, a descontinuidade do enrolamento tipo parcialmente entrelaçado ocorre entre os discos DE12052 – DC12054.

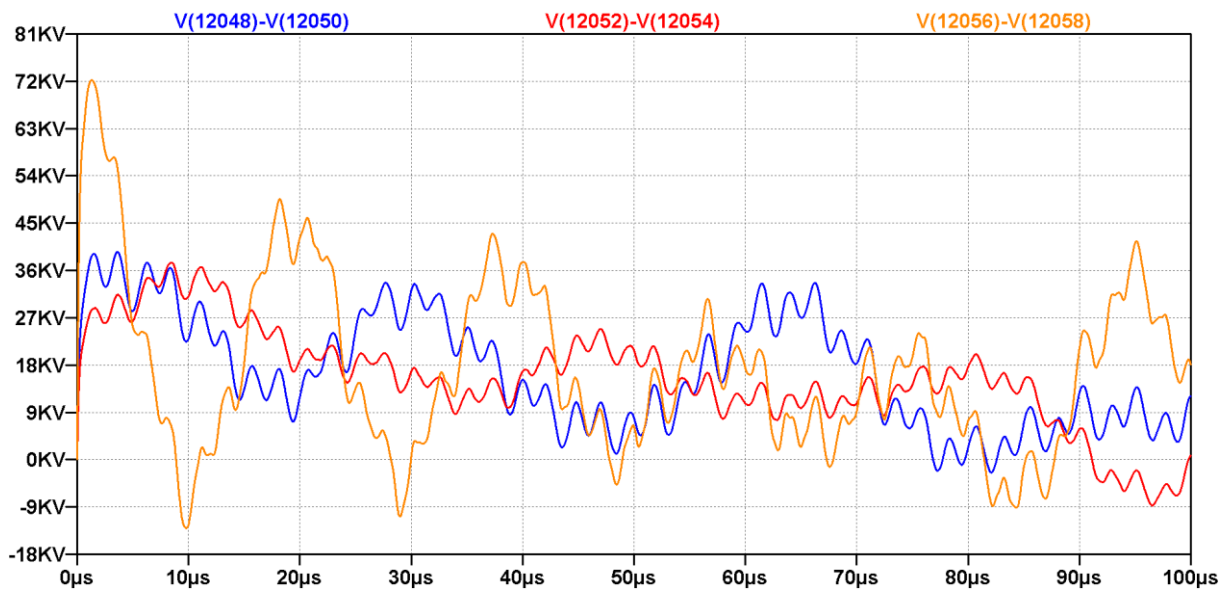
Figura 50 – Tensões entre discos para descontinuidade em DE12052 – DC12054 (DEC6)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a descontinuidade entre os discos DE12056 – DC12058 do enrolamento de AT, a tensão transitória tem o comportamento destacado na Figura 51.

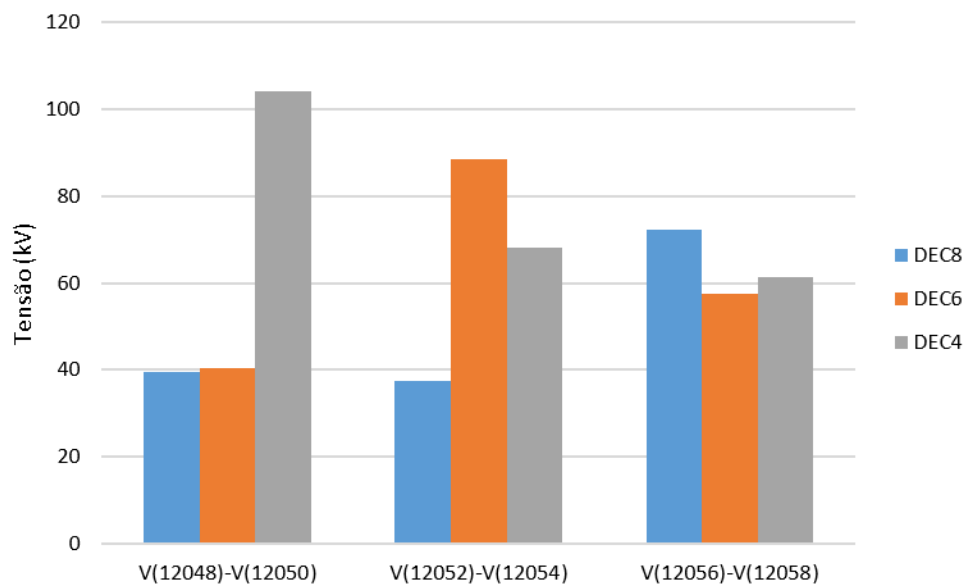
Figura 51 – Tensões entre discos para descontinuidade em DE12056 – DC12058 (DEC8)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 52, observa-se que a amplitude máxima de tensão para o enrolamento do tipo disco parcialmente entrelaçado ocorre nas descontinuidades. Constatase também que, quanto mais próximo do terminal de entrada for a descontinuidade, maior será a amplitude de tensão nesta região. Tais avaliações são coerentes com a abordagem de Mendes (1995), o qual expõe que deve-se garantir no mínimo 20% dos discos entrelaçados a partir do terminal de entrada, bem como não recomenda a adoção deste tipo de enrolamento para tensões de impulso atmosférico superiores a 650 kV.

Figura 52 – Amplitude de tensão entre disco na região de descontinuidade



Fonte: Elaborado pelo autor.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma metodologia para a modelagem de transformadores de potência para estudos de transitórios de altas frequências, visando construir um modelo eficiente, que permita ao cliente o conhecimento do comportamento da distribuição interna das tensões no estudo de distúrbios de frente de onda rápida e muito rápida.

De forma a atender estes requisitos, o modelo do transformador é desenvolvido a partir de cálculos dos parâmetros que consideram a estrutura física do equipamento. Com isso, obtém-se um circuito equivalente RLC adequado para altas frequências. Este circuito é descrito através de uma linguagem estruturada, *netlist*, que permite reduzir a dificuldade na representação e nos recursos de simulação computacional.

A metodologia proposta foi aplicada em um transformador trifásico com potência nominal de 25MVA e tensões de 138/13,8/13,8 kV. Os dados necessários foram obtidos do *design review* realizado entre a CEEE-GT e o fabricante.

A validação do modelo criado foi realizada através da comparação entre as respostas provenientes de suas simulações e as disponibilizadas pelo fabricante. A modelagem proposta para transitórios encontrou um bom desempenho do circuito equivalente, ou seja, os resultados oriundos das simulações realizadas são aproximados aos valores e simulações fornecidos pelo fabricante no *design review*.

Ressalta-se que os resultados encontrados para as simulações do transformador real foram comparados aos provenientes dos estudos de modificação de projeto, no intuito de ratificar e demonstrar de forma quantitativa as afirmações e conclusões expostas pelos autores nas abordagens recentes sobre o assunto.

A partir das constatações obtidas nas simulações computacionais, fica evidente a necessidade de que o projeto e dimensionamento dos enrolamentos do transformador considerem as ressonâncias do equipamento, assim como as frequências naturais oriundas de manobras do sistema no qual o transformador será instalado.

Por fim, merece ser destacada a importância das simulações, pois permitem o conhecimento detalhado da distribuição das tensões internas no equipamento, dada a impossibilidade de sua obtenção nos testes de aceitação. Estes resultados podem ser analisados pelo cliente e comparados aos valores de suportabilidade do isolamento disponibilizados pelo fabricante, revelando, em alguns casos, a necessidade de estudos mais detalhados do projeto.

6.1 CONTINUIDADE DO TRABALHO

Bons resultados foram obtidos no desenvolvimento deste estudo, no entanto existem algumas questões que ainda devem ser exploradas em futuros trabalhos. A seguir, são descritos alguns desses pontos:

- desenvolver um software que automatize os processos de cálculo dos parâmetros do circuito equivalente;
- representar as conexões entre enrolamentos e as buchas através dos seus parâmetros indutivos e resistivos;
- considerar o núcleo magnético do transformador no modelo;
- proceder as medições das respostas transitórias não normatizadas, associadas às manobras no sistema elétrico, e aplicá-las no modelo proposto;
- calcular o índice de relação de suportabilidade dielétrica (*Design Insulation Level*) para cada ponto de interesse;
- comparar o *Cumulative Stress* simulado com o *Design Curves* através de elementos finitos;
- verificar as margens de segurança do projeto.

6.2 PUBLICAÇÕES

Durante o desenvolvimento do trabalho apresentado, realizou-se a publicação do trabalho em um evento da área de sistemas de potência. Esta publicação é descrita a seguir:

Título:	Simulação Computacional de Transitórios em Transformador de Potência baseado em Design Review.
Autores:	WICKERT, H. M.; MARCHESAN, T. B.
Evento:	VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE 2016.
Local:	Natal.
Data:	Maior, 2016.
DOI:	3B993898-33C7-416D-B39B-B700CB87FE13

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6939**: Coordenação de isolamento - procedimento. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2000.

AMARAL, N. B. S. **Estudo sobre Critérios para a Especificação de Transformadores Elevadores de Estações Geradoras**. 2007. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2007.

AMARAL, L. S. **Ressonância em Enrolamentos de Transformadores de Potência Devido a Transitórios no Sistema**. 1994. 157 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 1994.

CIGRÉ-Brasil JWG-A2/C4-03. **Interação entre Transformadores e o Sistema Elétrico com Foco nos Transitórios Eletromagnéticos de Alta Frequência**. Brochura 12, 2011.

CIGRÉ JWG-A2/C4.39. **Electrical Transient Interaction Between Transformers and the Power System**. Part 1 – Expertise, 2014.

CIGRÉ WG-SC 33-02. **Guidelines for Representation of Network Elements when Calculating Transients**. Technical Brochure CE/SC GT/WG 02, 1990.

FERGESTED, P. I.; HENRIKSEN, T. Transient Oscillations in Multwinding Transformers. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems** **93**. 1973, p: 397-400.

GROVER, F. W. **Inductance Calculations: Working formulae and tables**. Instrument Society of America, New York, 1973.

JACYSZYN, R. B. **Modelo para Surtos para Transformadores de Média Tensão**. 2006. 87 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2006.

KULKARNI, S. V.; KHAPARDE, S. A. **Transformer Engineering: Design and Practice**. 1. ed. New York: Marcel Dekker, Inc, 2004. Cap. 7, p. 277-325.

MARTINS, H. J. A. **Diagnóstico de Transformadores de Potência Através de Metodologias no Domínio da Frequência**. 2007. 224 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

MARTINS, H. J. A. et. Al. Investigação sobre Falhas nos Transformadores 500 kV / 185 MVA da CHESF na Usina Luiz Gonzaga. **III ENEAT, Encontro Nacional de Engenharia de Alta Tensão** – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Junho 2000.

MENDES, J. C. **Redução de Falhas em Grandes Transformadores de Alta Tensão**. 1995. 166 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1995.

MEDINA, C. P. **Falhas em Transformadores de Potência: Uma Contribuição para Análise, Definições, Causas e Soluções**. 2003. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2003.

MIKI, A.; HOSOYA, T.; OKUYAMA, K. A Calculation Method for Impulse Voltage Distribution and Transferred Voltage in Transformer Winding. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS-97, No. 3, May/June 1978, pp. 930-939.

OLIVEIRA, L. A. F. **Estudo de Modelos de Transformadores para Altas Frequências**. 2011. 108 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC, Curitiba, PR, 2011.

PIVOTTO, E. S. **Modelagem Matemática e Simulação de Transformadores de Potência para Ensaios de Impulso Atmosférico**. 2013. 87 p. Monografia. Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2013.

RAHIMPOUR, E.; BIGDELI, M. Simplified Transient Model of Transformer baseado n Geometrical Dimensions used in Power Network Analysis and Fault Detections Studies. **POWERENG 2009**, Lisbon, Portugal, 2009.

ROCHA, A. C. O; DUARTE, L. H. S. Transformador de Potência – Uma Análise entre as Solicitações Especificadas e Impostas pelo Sistema Elétrico. **SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, GSE 17**, Curitiba, PR, Outubro 2005.

SOARES, J. C. **Avaliação da Suficiência dos Ensaios Dielétricos Especificados para Aquisição de Transformadores Elevadores Submetidos as Sobretensões de Frente Muito Rápida**. 2011. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) –Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2009.

VENEGAS, V.; GUARDADO, J.L.; MELGOZA, E.; MAXIMOV, S. HERNANDEZ, M. A Computer Model for Transient Voltages Distribution Studies in Transformer Windings. **9th WSEAS/IASME International Conference**. Florença, pp. 121-126, 2011.

VAHIDI, B.; BEIZA, J. Using PSpice in Teaching Impulse Voltage Testing of Power Transformers to Senior Undergraduate Students. **IEEE Transaction on Education**, v.48, no.2, Mai 2005.

VILLA, A. Models Development for Core and Shell Type Reactors for Electromagnetic Transients Studies. Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America. IEEE/PES. Caracas, Ago. 2006.

WIRGAU, K.A. Inductance Calculation of an Air-Core Disk Winding. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS-95, No1, January/February 1976, pp394-400.

ZAMBRANO, G.M.V. **Identificação de Parâmetros de um Circuito Equivalente de Transformador de Potência**. 2009. 144 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2009.

APÊNDICE A – LINGUAGEM ESTRUTURADA

Representação descritiva dos circuitos através de linguagem estruturada, onde são definidos todos os componentes e interligações por arquivo de texto. Este caso corresponde ao modelo do transformador real com enrolamento de AT do tipo disco entrelaçado.

*MODELO DO TRANSFORMADOR

*Impulso Atmosférico

B_Vatm 099 0 V=650000*1.0167*(exp(-0.01423e6*time)-exp(-6.0691e6*time))

*Resistência de Condução

*R_con01	11000	0	1e-12
R_Con03	12000	12080	1e-12
R_Con02	12080	11008	1e-12
R_con04	13000	0	1e-12
R_con05	13092	0	1e-12
R_con06	14000	0	1e-12
R_con07	14016	0	1e-12
R_con08	11008	0	1e-12

*FASE 11

R11

LDS111	11000	11001	0.2338e-03
RDS111	11001	11002	0.729e-02
CDS111	11000	11002	1985e-12
LDS112	11002	11003	0.2338e-03
RDS112	11003	11004	0.729e-02
CDS112	11002	11004	1985e-12
LDS113	11004	11005	0.2338e-03
RDS113	11005	11006	0.729e-02
CDS113	11004	11006	1985e-12
LDS114	11006	11007	0.2338e-03
RDS114	11007	11008	0.729e-02
CDS114	11006	11008	1985e-12
LDM111	11000	11004	0.56704e-3
LDM112	11002	11006	0.5672522e-3
LDM113	11004	11008	0.5677062e-3
CDT111	11000	0	40.22e-12
CDT112	11002	0	80.44e-12
CDT113	11004	0	80.44e-12
CDT114	11006	0	80.44e-12
CDT115	11008	0	40.22e-12
CDI1121	11000	12000	19.0875e-12
CDI1122	11000	12002	38.175e-12
CDI1123	11000	12004	38.175e-12
CDI1124	11000	12006	38.175e-12
CDI1125	11000	12008	38.175e-12
CDI1126	11002	12010	38.175e-12
CDI1127	11002	12012	38.175e-12
CDI1128	11002	12014	38.175e-12
CDI1129	11002	12016	38.175e-12
CDI11210	11002	12018	38.175e-12
CDI11211	11002	12020	38.175e-12
CDI11212	11002	12022	38.175e-12

CDI11213	11002	12024	38.175e-12
CDI11214	11002	12026	38.175e-12
CDI11215	11002	12028	38.175e-12
CDI11216	11002	12030	38.175e-12
CDI11217	11002	12032	38.175e-12
CDI11218	11004	12034	38.175e-12
CDI11219	11004	12036	38.175e-12
CDI11220	11004	12038	38.175e-12
CDI11223	11004	12044	38.175e-12
CDI11224	11004	12046	38.175e-12
CDI11225	11006	12048	38.175e-12
CDI11226	11006	12050	38.175e-12
CDI11227	11006	12052	38.175e-12
CDI11228	11006	12054	38.175e-12
CDI11229	11006	12056	38.175e-12
CDI11230	11006	12058	38.175e-12
CDI11231	11006	12060	38.175e-12
CDI11232	11006	12062	38.175e-12
CDI11233	11006	12064	38.175e-12
CDI11234	11006	12066	38.175e-12
CDI11235	11006	12068	38.175e-12
CDI11236	11006	12070	38.175e-12
CDI11237	11008	12072	38.175e-12
CDI11238	11008	12074	38.175e-12
CDI11239	11008	12076	38.175e-12
CDI11240	11008	12078	38.175e-12
CDI11241	11008	12080	19.0875e-12

****H11****

LDE0	099	1	0.966e-03
LDE1	1	2	0.966e-03
LDE2	2	3	0.966e-03
LDE3	3	4	0.966e-03
LDE4	4	5	0.966e-03
LDE5	5	6	0.966e-03
LDE6	6	7	0.966e-03
LDE7	7	8	0.966e-03
LDE8	8	9	0.966e-03
LDE9	9	10	0.966e-03
LDE10	10	11	0.966e-03
LDE11	11	12	0.966e-03
LDE12	12	13	0.966e-03
LDE13	13	14	0.966e-03
LDE14	14	15	0.966e-03
LDE15	15	16	0.966e-03
LDE16	16	17	0.966e-03
LDE17	17	18	0.966e-03
LDE18	18	19	0.966e-03
LDE19	19	20	0.966e-03

CaE0	1	20	11430e-12
CaE1	2	19	11430e-12
CaE2	12	9	11430e-12
CaE3	3	18	11430e-12
CaE4	13	8	11430e-12
CaE5	4	17	11430e-12
CaE6	14	7	11430e-12
CaE7	5	16	11430e-12
CaE8	15	6	11430e-12
CaE9	11	10	11430e-12

CDE0	099	1	45840e-12
CDE1	1	11	91680e-12
CDE2	2	12	91680e-12
CDE3	3	13	91680e-12
CDE4	4	14	91680e-12
CDE5	5	15	91680e-12

CDE6	6	16	91680e-12
CDE7	7	17	91680e-12
CDE8	8	18	91680e-12
CDE9	9	19	91680e-12
CDE10	10	20	45840e-12
Cd	20	12043	1430e-12
CDI1	11004	5	38.175e-12
CDI2	11004	15	38.175e-12
CDI3	099	13046	33.3025e-12
CDI4	20	13048	33.3025e-12
LDS121	12000	12001	19.32e-03
RDS121	12001	12002	0.123662e-01
CDS121	12000	12002	6939.9e-12
LDS122	12002	12003	19.32e-03
RDS122	12003	12004	0.123662e-01
CDS122	12002	12004	6939.9e-12
LDS123	12004	12005	19.32e-03
RDS123	12005	12006	0.123662e-01
CDS123	12004	12006	6939.9e-12
LDS124	12006	12007	19.32e-03
RDS124	12007	12008	0.123662e-01
CDS124	12006	12008	6939.9e-12
LDS125	12008	12009	19.32e-03
RDS125	12009	12010	0.123662e-01
CDS125	12008	12010	6939.9e-12
LDS126	12010	12011	19.32e-03
RDS126	12011	12012	0.123662e-01
CDS126	12010	12012	6939.9e-12
LDS127	12012	12013	19.32e-03
RDS127	12013	12014	0.123662e-01
CDS127	12012	12014	6939.9e-12
LDS128	12014	12015	19.32e-03
RDS128	12015	12016	0.123662e-01
CDS128	12014	12016	6939.9e-12
LDS129	12016	12017	19.32e-03
RDS129	12017	12018	0.123662e-01
CDS129	12016	12018	6939.9e-12
LDS1210	12018	12019	19.32e-03
RDS1210	12019	12020	0.123662e-01
CDS1210	12018	12020	6939.9e-12
LDS1211	12020	12021	19.32e-03
RDS1211	12021	12022	0.123662e-01
CDS1211	12020	12022	6939.9e-12
LDS1212	12022	12023	19.32e-03
RDS1212	12023	12024	0.123662e-01
CDS1212	12022	12024	6939.9e-12
LDS1213	12024	12025	19.32e-03
RDS1213	12025	12026	0.123662e-01
CDS1213	12024	12026	6939.9e-12
LDS1214	12026	12027	19.32e-03
RDS1214	12027	12028	0.123662e-01
CDS1214	12026	12028	6939.9e-12

LDS1215	12028	12029	19.32e-03
RDS1215	12029	12030	0.123662e-01
CDS1215	12028	12030	6939.9e-12
LDS1216	12030	12031	19.32e-03
RDS1216	12031	12032	0.123662e-01
CDS1216	12030	12032	6939.9e-12
LDS1217	12032	12033	19.32e-03
RDS1217	12033	12034	0.123662e-01
CDS1217	12032	12034	6939.9e-12
LDS1218	12034	12035	19.32e-03
RDS1218	12035	12036	0.123662e-01
CDS1218	12034	12036	6939.9e-12
LDS1219	12036	12037	19.32e-03
RDS1219	12037	12038	0.123662e-01
CDS1219	12036	12038	6939.9e-12
LDS1220	12038	12039	19.32e-03
RDS1220	12039	099	0.123662e-01
CDS1220	12038	099	6939.9e-12
LDS1222	20	12043	19.32e-03
RDS1222	12043	12044	0.123662e-01
CDS1222	20	12044	6939.9e-12
LDS1223	12044	12045	19.32e-03
RDS1223	12045	12046	0.123662e-01
CDS1223	12044	12046	6939.9e-12
LDS1224	12046	12047	19.32e-03
RDS1224	12047	12048	0.123662e-01
CDS1224	12046	12048	6939.9e-12
LDS1225	12048	12049	19.32e-03
RDS1225	12049	12050	0.123662e-01
CDS1225	12048	12050	6939.9e-12
LDS1226	12050	12051	19.32e-03
RDS1226	12051	12052	0.123662e-01
CDS1226	12050	12052	6939.9e-12
LDS1227	12052	12053	19.32e-03
RDS1227	12053	12054	0.123662e-01
CDS1227	12052	12054	6939.9e-12
LDS1228	12054	12055	19.32e-03
RDS1228	12055	12056	0.123662e-01
CDS1228	12054	12056	6939.9e-12
LDS1229	12056	12057	19.32e-03
RDS1229	12057	12058	0.123662e-01
CDS1229	12056	12058	6939.9e-12
LDS1230	12058	12059	19.32e-03
RDS1230	12059	12060	0.123662e-01
CDS1230	12058	12060	6939.9e-12
LDS1231	12060	12061	19.32e-03
RDS1231	12061	12062	0.123662e-01
CDS1231	12060	12062	6939.9e-12
LDS1232	12062	12063	19.32e-03
RDS1232	12063	12064	0.123662e-01

CDS1232	12062	12064	6939.9e-12
LDS1233	12064	12065	19.32e-03
RDS1233	12065	12066	0.123662e-01
CDS1233	12064	12066	6939.9e-12
LDS1234	12066	12067	19.32e-03
RDS1234	12067	12068	0.123662e-01
CDS1234	12066	12068	6939.9e-12
LDS1235	12068	12069	19.32e-03
RDS1235	12069	12070	0.123662e-01
CDS1235	12068	12070	6939.9e-12
LDS1236	12070	12071	19.32e-03
RDS1236	12071	12072	0.123662e-01
CDS1236	12070	12072	6939.9e-12
LDS1237	12072	12073	19.32e-03
RDS1237	12073	12074	0.123662e-01
CDS1237	12072	12074	6939.9e-12
LDS1238	12074	12075	19.32e-03
RDS1238	12075	12076	0.123662e-01
CDS1238	12074	12076	6939.9e-12
LDS1239	12076	12077	19.32e-03
RDS1239	12077	12078	0.123662e-01
CDS1239	12076	12078	6939.9e-12
LDS1240	12078	12079	19.32e-03
RDS1240	12079	12080	0.123662e-01
CDS1240	12078	12080	6939.9e-12
LDM1211	12000	12004	14.3385e-03
LDM1212	12002	12006	14.3385e-03
LDM1213	12004	12008	14.3385e-03
LDM1214	12006	12010	14.3385e-03
LDM1215	12008	12012	14.3385e-03
LDM1216	12010	12014	14.3385e-03
LDM1217	12012	12016	14.3385e-03
LDM1218	12014	12018	14.3385e-03
LDM1219	12016	12020	14.3385e-03
LDM12110	12018	12022	14.3385e-03
LDM12111	12020	12024	14.3385e-03
LDM12112	12022	12026	14.3385e-03
LDM12113	12024	12028	14.3385e-03
LDM12114	12026	12030	14.3385e-03
LDM12115	12028	12032	14.3385e-03
LDM12116	12030	12034	14.3385e-03
LDM12117	12032	12036	14.3385e-03
LDM12118	12034	12038	14.3385e-03
LDM12119	12036	099	14.3385e-03
LDM12120	12038	20	14.3385e-03
LDM12121	099	12044	14.3385e-03
LDM12122	20	12046	14.3385e-03
LDM12123	12044	12048	14.3385e-03
LDM12124	12046	12050	14.3385e-03
LDM12125	12048	12052	14.3385e-03
LDM12126	12050	12054	14.3385e-03
LDM12127	12052	12056	14.3385e-03
LDM12128	12054	12058	14.3385e-03
LDM12129	12056	12060	14.3385e-03
LDM12130	12058	12062	14.3385e-03
LDM12131	12060	12064	14.3385e-03
LDM12132	12062	12066	14.3385e-03
LDM12133	12064	12068	14.3385e-03

LDM12134	12066	12070	14.3385e-03
LDM12135	12068	12072	14.3385e-03
LDM12136	12070	12074	14.3385e-03
LDM12137	12072	12076	14.3385e-03
LDM12138	12074	12078	14.3385e-03
LDM12139	12076	12080	14.3385e-03
CDI1231	12000	13000	16.6512e-12
CDI1232	12002	13002	33.3025e-12
CDI1233	12004	13004	33.3025e-12
CDI1234	12006	13006	33.3025e-12
CDI1235	12008	13008	33.3025e-12
CDI1236	12010	13012	33.3025e-12
CDI1237	12012	13014	33.3025e-12
CDI1238	12014	13016	33.3025e-12
CDI1239	12016	13018	33.3025e-12
CDI12310	12018	13020	33.3025e-12
CDI12311	12020	13024	33.3025e-12
CDI12312	12022	13026	33.3025e-12
CDI12313	12024	13028	33.3025e-12
CDI12314	12026	13030	33.3025e-12
CDI12315	12028	13032	33.3025e-12
CDI12316	12030	13036	33.3025e-12
CDI12317	12032	13038	33.3025e-12
CDI12318	12034	13040	33.3025e-12
CDI12319	12036	13042	33.3025e-12
CDI12320	12038	13044	33.3025e-12
CDI12323	12044	13050	33.3025e-12
CDI12324	12046	13052	33.3025e-12
CDI12325	12048	13054	33.3025e-12
CDI12326	12050	13056	33.3025e-12
CDI12327	12052	13060	33.3025e-12
CDI12328	12054	13062	33.3025e-12
CDI12329	12056	13064	33.3025e-12
CDI12330	12058	13066	33.3025e-12
CDI12331	12060	13068	33.3025e-12
CDI12332	12062	13072	33.3025e-12
CDI12333	12064	13074	33.3025e-12
CDI12334	12066	13076	33.3025e-12
CDI12335	12068	13078	33.3025e-12
CDI12336	12070	13080	33.3025e-12
CDI12337	12072	13084	33.3025e-12
CDI12338	12074	13086	33.3025e-12
CDI12339	12076	13088	33.3025e-12
CDI12340	12078	13090	33.3025e-12
CDI12341	12080	13092	16.6512e-12
X11			
LDS131	13000	13001	0.0861065e-03
RDS131	13001	13002	2.9913e-04
CDS131	13000	13002	336.98e-12
LDS132	13002	13003	0.0861065e-03
RDS132	13003	13004	2.9913e-04
CDS132	13002	13004	336.98e-12
LDS133	13004	13005	0.0861065e-03
RDS133	13005	13006	2.9913e-04
CDS133	13004	13006	336.98e-12

LDS134	13006	13007	0.0861065e-03
RDS134	13007	13008	2.9913e-04
CDS134	13006	13008	336.98e-12
LDS135	13008	13009	0.0861065e-03
RDS135	13009	13010	2.9913e-04
CDS135	13008	13010	336.98e-12
LDS136	13010	13011	0.0861065e-03
RDS136	13011	13012	2.9913e-04
CDS136	13010	13012	336.98e-12
LDS137	13012	13013	0.0861065e-03
RDS137	13013	13014	2.9913e-04
CDS137	13012	13014	336.98e-12
LDS138	13014	13015	0.0861065e-03
RDS138	13015	13016	2.9913e-04
CDS138	13014	13016	336.98e-12
LDS139	13016	13017	0.0861065e-03
RDS139	13017	13018	2.9913e-04
CDS139	13016	13018	336.98e-12
LDS1310	13018	13019	0.0861065e-03
RDS1310	13019	13020	2.9913e-04
CDS1310	13018	13020	336.98e-12
LDS1311	13020	13021	0.0861065e-03
RDS1311	13021	13022	2.9913e-04
CDS1311	13020	13022	336.98e-12
LDS1312	13022	13023	0.0861065e-03
RDS1312	13023	13024	2.9913e-04
CDS1312	13022	13024	336.98e-12
LDS1313	13024	13025	0.0861065e-03
RDS1313	13025	13026	2.9913e-04
CDS1313	13024	13026	336.98e-12
LDS1314	13026	13027	0.0861065e-03
RDS1314	13027	13028	2.9913e-04
CDS1314	13026	13028	336.98e-12
LDS1315	13028	13029	0.0861065e-03
RDS1315	13029	13030	2.9913e-04
CDS1315	13028	13030	336.98e-12
LDS1316	13030	13031	0.0861065e-03
RDS1316	13031	13032	2.9913e-04
CDS1316	13030	13032	336.98e-12
LDS1317	13032	13033	0.0861065e-03
RDS1317	13033	13034	2.9913e-04
CDS1317	13032	13034	336.98e-12
LDS1318	13034	13035	0.0861065e-03
RDS1318	13035	13036	2.9913e-04
CDS1318	13034	13036	336.98e-12
LDS1319	13036	13037	0.0861065e-03
RDS1319	13037	13038	2.9913e-04
CDS1319	13036	13038	336.98e-12
LDS1320	13038	13039	0.0861065e-03
RDS1320	13039	13040	2.9913e-04
CDS1320	13038	13040	336.98e-12

LDS1321	13040	13041	0.0861065e-03
RDS1321	13041	13042	2.9913e-04
CDS1321	13040	13042	336.98e-12
LDS1322	13042	13043	0.0861065e-03
RDS1322	13043	13044	2.9913e-04
CDS1322	13042	13044	336.98e-12
LDS1323	13044	13045	0.0861065e-03
RDS1323	13045	13046	2.9913e-04
CDS1323	13044	13046	336.98e-12
LDS1324	13046	13047	0.0861065e-03
RDS1324	13047	13048	2.9913e-04
CDS1324	13046	13048	336.98e-12
LDS1325	13048	13049	0.0861065e-03
RDS1325	13049	13050	2.9913e-04
CDS1325	13048	13050	336.98e-12
LDS1326	13050	13051	0.0861065e-03
RDS1326	13051	13052	2.9913e-04
CDS1326	13050	13052	336.98e-12
LDS1327	13052	13053	0.0861065e-03
RDS1327	13053	13054	2.9913e-04
CDS1327	13052	13054	336.98e-12
LDS1328	13054	13055	0.0861065e-03
RDS1328	13055	13056	2.9913e-04
CDS1328	13054	13056	336.98e-12
LDS1329	13056	13057	0.0861065e-03
RDS1329	13057	13058	2.9913e-04
CDS1329	13056	13058	336.98e-12
LDS1330	13058	13059	0.0861065e-03
RDS1330	13059	13060	2.9913e-04
CDS1330	13058	13060	336.98e-12
LDS1331	13060	13061	0.0861065e-03
RDS1331	13061	13062	2.9913e-04
CDS1331	13060	13062	336.98e-12
LDS1332	13062	13063	0.0861065e-03
RDS1332	13063	13064	2.9913e-04
CDS1332	13062	13064	336.98e-12
LDS1333	13064	13065	0.0861065e-03
RDS1333	13065	13066	2.9913e-04
CDS1333	13064	13066	336.98e-12
LDS1334	13066	13067	0.0861065e-03
RDS1334	13067	13068	2.9913e-04
CDS1334	13066	13068	336.98e-12
LDS1335	13068	13069	0.0861065e-03
RDS1335	13069	13070	2.9913e-04
CDS1335	13068	13070	336.98e-12
LDS1336	13070	13071	0.089859882e-03
RDS1336	13071	13072	2.9913e-04
CDS1336	13070	13072	336.98e-12
LDS1337	13072	13073	0.0861065e-03
RDS1337	13073	13074	2.9913e-04

CDS1337	13072	13074	336.98e-12
LDS1338	13074	13075	0.0861065e-03
RDS1338	13075	13076	2.9913e-04
CDS1338	13074	13076	336.98e-12
LDS1339	13076	13077	0.0861065e-03
RDS1339	13077	13078	2.9913e-04
CDS1339	13076	13078	336.98e-12
LDS1340	13078	13079	0.0861065e-03
RDS1340	13079	13080	2.9913e-04
CDS1340	13078	13080	336.98e-12
LDS1341	13080	1308	1 0.0861065e-03
RDS1341	13081	13082	2.9913e-04
CDS1341	13080	13082	336.98e-12
LDS1342	13082	13083	0.0861065e-03
RDS1342	13083	13084	2.9913e-04
CDS1342	13082	13084	336.98e-12
LDS1343	13084	13085	0.0861065e-03
RDS1343	13085	13086	2.9913e-04
CDS1343	13084	13086	336.98e-12
LDS1344	13086	13087	0.0861065e-03
RDS1344	13087	13088	2.9913e-04
CDS1344	13086	13088	336.98e-12
LDS1345	13088	13089	0.0861065e-03
RDS1345	13089	13090	2.9913e-04
CDS1345	13088	13090	336.98e-12
LDS1346	13090	13091	0.0861065e-03
RDS1346	13091	13092	2.9913e-04
CDS1346	13090	13092	336.98e-12
LDM1311	13000	13004	0.05665312e-03
LDM1312	13002	13006	0.05665312e-03
LDM1313	13004	13008	0.05665312e-03
LDM1314	13006	13010	0.05665312e-03
LDM1315	13008	13012	0.05665312e-03
LDM1316	13010	13014	0.05665312e-03
LDM1317	13012	13016	0.05665312e-03
LDM1318	13014	13018	0.05665312e-03
LDM1319	13016	13020	0.05665312e-03
LDM13110	13018	13022	0.05665312e-03
LDM13111	13020	13024	0.05665312e-03
LDM13112	13022	13026	0.05665312e-03
LDM13113	13024	13028	0.05665312e-03
LDM13114	13026	13030	0.05665312e-03
LDM13115	13028	13032	0.05665312e-03
LDM13116	13030	13034	0.03390542e-03
LDM13117	13032	13036	0.03390542e-03
LDM13118	13034	13038	0.03390542e-03
LDM13119	13036	13040	0.03390542e-03
LDM13120	13038	13042	0.03390542e-03
LDM13121	13040	13044	0.03390542e-03
LDM13122	13042	13046	0.03390542e-03
LDM13123	13044	13048	0.03390542e-03
LDM13124	13046	13050	0.03390542e-03
LDM13125	13048	13052	0.03390542e-03
LDM13126	13050	13054	0.03390542e-03
LDM13127	13052	13056	0.03390542e-03
LDM13128	13054	13058	0.03390542e-03
LDM13129	13056	13060	0.03390542e-03
LDM13130	13058	13062	0.03390542e-03

LDM13131	13060	13064	0.0496744e-03
LDM13132	13062	13066	0.0496744e-03
LDM13133	13064	13068	0.0496744e-03
LDM13134	13066	13070	0.0496744e-03
LDM13135	13068	13072	0.0496744e-03
LDM13136	13070	13074	0.0496744e-03
LDM13137	13072	13076	0.0496744e-03
LDM13138	13074	13078	0.0496744e-03
LDM13139	13076	13080	0.0496744e-03
LDM13140	13078	13082	0.0496744e-03
LDM13141	13080	13084	0.0496744e-03
LDM13142	13082	13086	0.0496744e-03
LDM13143	13084	13088	0.0496744e-03
LDM13144	13086	13090	0.0496744e-03
LDM13145	13088	13092	0.0496744e-03
CDI1341	13000	14000	30.25e-12
CDI1342	13002	14000	30.25e-12
CDI1343	13004	14000	30.25e-12
CDI1344	13006	14000	30.25e-12
CDI1345	13008	14000	30.25e-12
CDI1346	13010	14002	57.23e-12
CDI1347	13012	14002	57.23e-12
CDI1348	13014	14002	57.23e-12
CDI1349	13016	14002	57.23e-12
CDI13410	13018	14002	57.23e-12
CDI13411	13020	14002	57.23e-12
CDI13412	13022	14004	57.23e-12
CDI13413	13024	14004	57.23e-12
CDI13414	13026	14004	57.23e-12
CDI13415	13028	14004	57.23e-12
CDI13416	13030	14004	57.23e-12
CDI13417	13032	14006	57.23e-12
CDI13418	13034	14006	57.23e-12
CDI13419	13036	14006	57.23e-12
CDI13420	13038	14006	57.23e-12
CDI13421	13040	14006	57.23e-12
CDI13422	13042	14008	57.23e-12
CDI13423	13044	14008	57.23e-12
CDI13424	13046	14008	57.23e-12
CDI13425	13048	14008	57.23e-12
CDI13426	13050	14008	57.23e-12
CDI13427	13052	14010	57.23e-12
CDI13428	13054	14010	57.23e-12
CDI13429	13056	14010	57.23e-12
CDI13430	13058	14010	57.23e-12
CDI13431	13060	14010	57.23e-12
CDI13432	13062	14012	57.23e-12
CDI13433	13064	14012	57.23e-12
CDI13434	13066	14012	57.23e-12
CDI13435	13068	14012	57.23e-12
CDI13436	13070	14012	57.23e-12
CDI13437	13072	14014	57.23e-12
CDI13438	13074	14014	57.23e-12
CDI13439	13076	14014	57.23e-12
CDI13440	13078	14014	57.23e-12
CDI13441	13080	14014	57.23e-12
CDI13442	13082	14014	57.23e-12
CDI13443	13084	14016	30.25e-12

CDI13444	13086	14016	30.25e-12
CDI13445	13088	14016	30.25e-12
CDI13446	13090	14016	30.25e-12
CDI13447	13092	14016	30.25e-12
****Y11****			
LDS141	14000	14001	1.56325e-03
RDS141	14001	14002	0.22375e-02
CDS141	14000	14002	58.0476e-12
LDS142	14002	14003	1.56325e-03
RDS142	14003	14004	0.22375e-02
CDS142	14002	14004	58.0476e-12
LDS143	14004	14005	1.56325e-03
RDS143	14005	14006	0.22375e-02
CDS143	14004	14006	58.0476e-12
LDS144	14006	14007	1.56325e-03
RDS144	14007	14008	0.22375e-02
CDS144	14006	14008	58.0476e-12
LDS145	14008	14009	1.56325e-03
RDS145	14009	14010	0.22375e-02
CDS145	14008	14010	58.0476e-12
LDS146	14010	14011	1.56325e-03
RDS146	14011	14012	0.22375e-02
CDS146	14010	14012	58.0476e-12
LDS147	14012	14013	1.56325e-03
RDS147	14013	14014	0.22375e-02
CDS147	14012	14014	58.0476e-12
LDS148	14014	14015	1.56325e-03
RDS148	14015	14016	0.22375e-02
CDS148	14014	14016	58.0476e-12
LDM1411	14000	14004	0.8221008e-03
LDM1412	14002	14006	0.8221008e-03
LDM1413	14004	14008	0.8221008e-03
LDM1414	14006	14010	0.7733762e-03
LDM1415	14008	14012	0.7733762e-03
LDM1416	14010	14014	1.084895e-03
LDM1417	14012	14016	1.084895e-03
CDN141	14000	0	166.65e-12
CDN142	14002	0	333.3e-12
CDN143	14004	0	333.3e-12
CDN144	14006	0	333.3e-12
CDN145	14008	0	333.3e-12
CDN146	14010	0	333.3e-12
CDN147	14012	0	333.3e-12
CDN148	14014	0	333.3e-12
CDN149	14016	0	166.65e-12

```

.OPTION RELTOL=0.1 ABSTOL=100 VNTOL=100 ITL4=50
.TRAN 0 0.0001 0 0.000000001
.PROBE
.END

```