

Simulação Computacional de Transitórios em Transformador de Potência baseado em Design Review

Humberto Margel Wickert
CEEE-GT
Passo Fundo, Brasil
humbertow@ceee.com.br

Tiago Bandeira Marchesan
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
Santa Maria, Brasil
tiago@ufsm.br

Resumo— Este trabalho propõem um modelo de transformador de potência para transitórios com base nas características geométricas do equipamento. A precisão e a validação deste modelo são verificadas através de simulação computacional utilizando o design review de um transformador trifásico com potência nominal de 25MVA e tensões de 138/13,8/13,8kV. Finalmente, análises são desenvolvidas para diferentes formas de ligação do enrolamento de alta tensão.

Palavras Chaves— Transformador de potência, enrolamento, modelo, tensões transitórias, simulação, design review.

I. INTRODUÇÃO

Transformadores de potência estão entre os equipamentos mais importantes do sistema de energia. Esses equipamentos estão constantemente expostos a diferentes tipos de eventos transitórios que submetem sua estrutura de isolamento a altas tensões [1].

Diferentes modelos têm sido apresentados para avaliação e estudo de transformadores [2]. Porém, os modelos físicos mais completos ou avançados de transformadores precisam de muitos detalhes construtivos que não são revelados pelo fabricante ou sua formulação matemática é muito complexa [3].

É justificável o entendimento pelas concessionárias de energia dos meios e mecanismos de falhas de transformadores associadas a tensões transitórias, incluindo aquelas de rápida frente de onda, e a implementação de procedimentos de especificação, projetos e ensaios [4].

Portanto, esse artigo utiliza a modelagem física do transformador de potência através de parâmetros distribuídos, que consideram as dimensões e características geométricas do equipamento; da disposição relativa dos enrolamentos e das características de seus materiais. Estes dados devem ser apresentados no *design review*, realizado entre o fabricante do transformador e a concessionária de energia.

O objetivo deste trabalho é desenvolver a modelagem de transformador, com os dados fornecidos pelo fabricante e

validados por simulação computacional através da descrição do circuito, por meio de um arquivo tipo texto, *netlist*.

Com a obtenção deste modelo, diferentes análises do comportamento das tensões transitórias internas ao transformador são possíveis. O estudo de caso utilizado considera um transformador trifásico com potência nominal de 25MVA e tensões 138/13,8/13,8kV. É aplicada a modelagem do enrolamento de alta tensão projetado e o estudo de modificação de projeto para os tipos de enrolamentos tradicionalmente utilizados, comparando assim o comportamento das tensões transitórias.

II. DETERMINAÇÃO DO MODELO DE ALTA FREQUÊNCIA

A fidelidade na representação de enrolamentos de transformadores por parâmetros elétricos visando simular o comportamento deste, é proporcionado ao se garantir a precisão envolvendo os cálculos matemáticos. Assim, as características construtivas do transformador para a obtenção de modelos matemáticos refletem com mais precisão o comportamento transitório do enrolamento, cujo arranjo forma uma estrutura ressonante, com várias frequências naturais que podem ser excitadas por tensões transitórias estabelecidas no sistema [4].

Quando os terminais do enrolamento de um transformador são submetidos a tensões de impulso atmosférico, a distribuição inicial depende basicamente das capacitâncias entre espiras, enrolamentos e entre enrolamentos e a terra. Essas capacitâncias são denominadas de capacitâncias séries e paralelas. As indutâncias são praticamente desprezíveis à distribuição inicial de tensão, podendo o problema ser considerado eletrostático. Porém, quando a tensão aplicada é mantida durante um tempo suficiente (50 a 100 μ s) valores apreciáveis de corrente fluem pelas indutâncias. As diferenças inicial e final na distribuição de tensão submetem a fenômenos transitórios oscilatórios devido ao baixo fator de amortecimento dos enrolamentos.

Portanto, as matrizes de capacitâncias, indutâncias e resistências são formadas por parâmetros elétricos distribuídos, que caracterizam o circuito equivalente da Fig. 1.

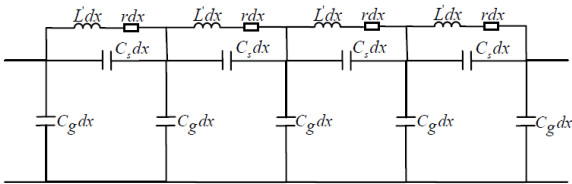


Fig. 1. Modelo matemático do enrolamento através dos parâmetros distribuídos. (figura adaptada [1])

Para a obtenção dos parâmetros do circuito equivalente são considerados os dados da geometria interna do transformador. Os elementos da matriz capacitância são calculados, assumindo modelos de capacitores planos ou cilíndricos [5]. Para os elementos da matriz indutância são utilizados modelos matemáticos, que consideram as indutâncias próprias e mútuas em núcleo de ar [6]-[8]. As resistências são incluídas no modelo com a finalidade de proporcionar as oscilações internas originadas no transcorrer do ensaio [7].

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

Para a simulação utilizou-se o software LTspice IV, versão do PSpice disponibilizado pelo fabricante Linear Technology.

O fluxograma apresentado na Fig. 2 detalha as etapas principais para o desenvolvimento do modelo do transformador e suas análises.

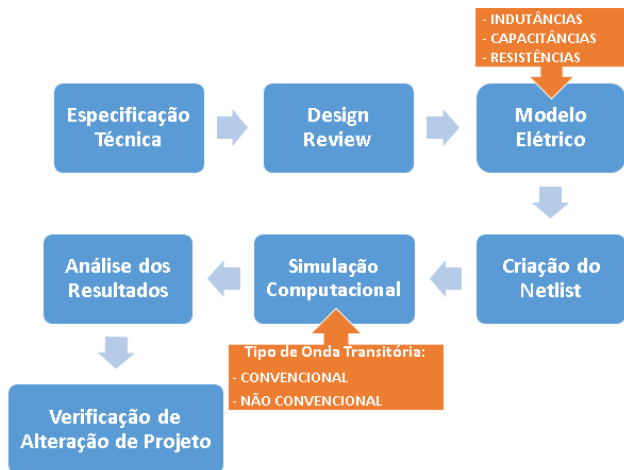


Fig. 2. Fluxograma das etapas de análise do modelo de transformador.

III. MODELO PROPOSTO

O modelo estabelecido para análise de enrolamentos de transformadores, submetidos a tensões transitórias, foi desenvolvido com base nas referências apresentadas no

capítulo II, a partir de suas dimensões geométricas. O *design review* fornecido pelo fabricante à concessionária de energia elétrica possibilitou o desenvolvimento do modelo e suas análises.

A. Transformador Modelado

O transformador de potência avaliado é trifásico de três enrolamentos com potência nominal de 25MVA e tensões de 138/13,8/13,8kV. O enrolamento de alta tensão é do tipo disco entrelaçado com 80 discos (40+40) e 21 espiras por disco. Na baixa tensão o enrolamento é do tipo hélice com 90 espiras, enquanto que o enrolamento terciário é do tipo camada com 156 espiras.

O circuito equivalente do transformador modelado divide o enrolamento em seções (S). Cada ponto de conexão entre seções é definido como nós (N). Com isso é possível analisar as oscilações de tensão que ocorrem ao longo de todo o enrolamento. A Figura 3 apresenta o modelo simplificado com os parâmetros elétricos calculados de acordo com [2], [5]-[7].

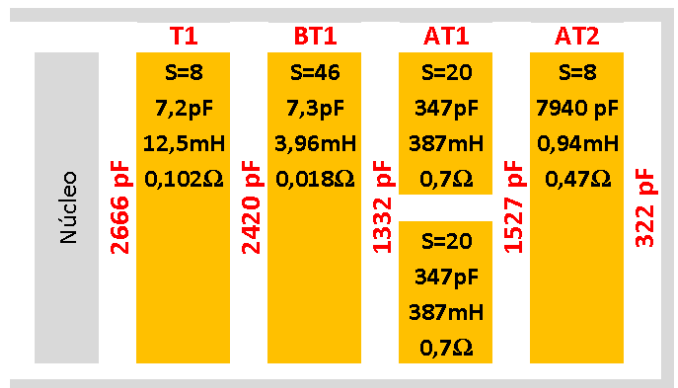


Fig. 3. Modelo simplificado com os parâmetros elétricos.

B. Enrolamento de Alta Tensão

Apesar do modelo proposto contemplar todo o transformador, neste artigo será abordado de forma detalhada a análise do enrolamento de alta tensão e o estudo de modificação de projeto deste.

A bobina de alta tensão é de conexão central, isto é, os discos centrais do enrolamento estão submetidos a maiores gradientes de tensão quando da aplicação da forma de onda de impulso atmosférico. Desta forma, 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 4 ilustra os esquemas de ligações para enrolamentos de alta tensão.

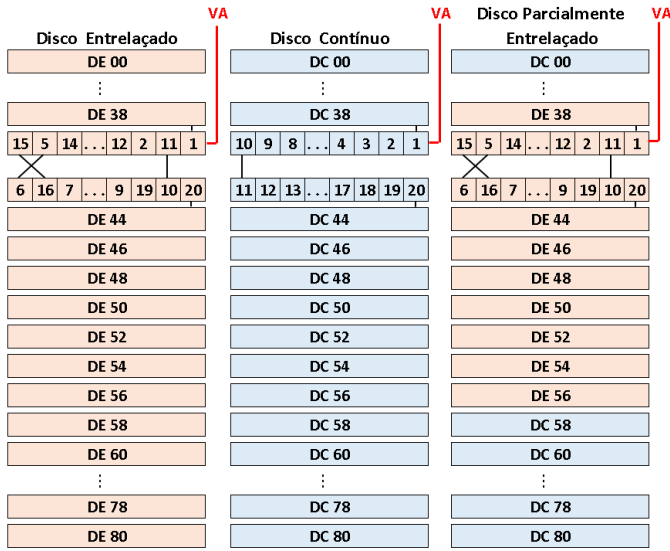


Fig. 4. Esquema de ligação dos tipos de enrolamentos de alta tensão.

IV. ESTUDO DE CASO

Neste estudo de caso, o modelo estabelecido e descrito nos itens anteriores é aplicado para análise de enrolamentos de transformadores submetidos a impulso de tensão. Algumas configurações no tipo de ligação do enrolamento de alta tensão, Fig. 4, foram simuladas com o propósito de determinar o comportamento e a amplitude das tensões ao longo da bobina.

Porém, tradicionalmente para transformadores de potência, projetados e fabricados para tensões de impulso de até 350kV, são utilizados enrolamentos de alta tensão do tipo disco contínuo. Para tensões superiores o enrolamento do tipo disco entrelaçado é aplicado e, em alguns casos, discos parcialmente entrelaçados (DEC) também são utilizados.

Para a análise dos resultados das respostas transitórias do enrolamento do transformador foi utilizada a forma de onda de impulso atmosférico 1,2/50 μ s com valor de crista de 650kV, porém, outras formas de ondas transitórias convencionais e não convencionais poderiam ser usadas. O diagrama de conexões para análise do impulso aplicado na alta tensão é detalhado na Fig. 5.

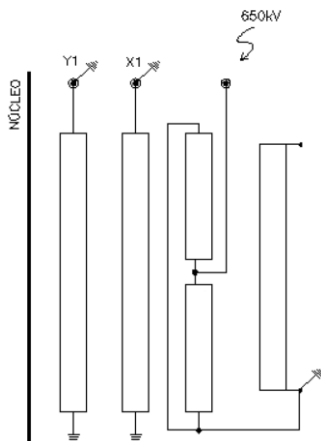


Fig. 5. Diagrama de conexões para impulso aplicado na alta tensão.

No intuito de verificar o desempenho do modelo proposto para a condição do enrolamento do tipo disco entrelaçado, caso real do *design review*, a Fig. 6 apresenta a evolução no tempo das tensões transitórias em sete pontos distintos do enrolamento.

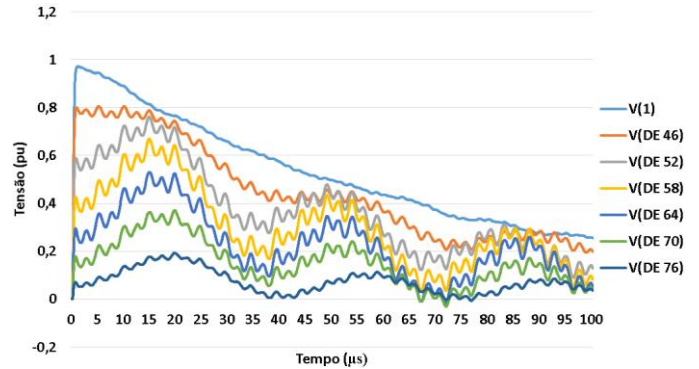


Fig. 6. Resposta para impulso atmosférico – Enrolamento tipo disco entrelaçado (DE).

Os mesmos pontos foram verificados para o enrolamento do tipo disco parcialmente entrelaçado, conforme Fig. 7.

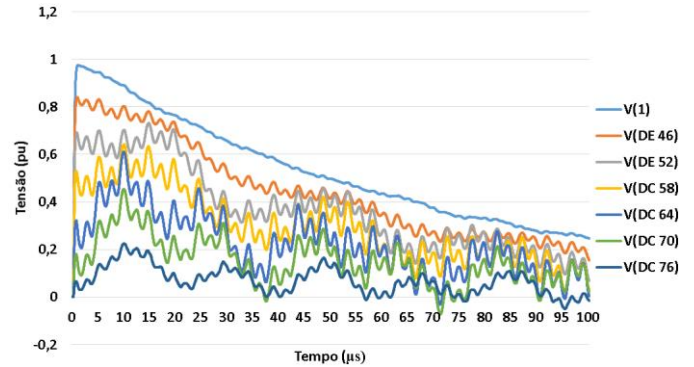


Fig. 7. Resposta para impulso atmosférico – Enrolamento tipo disco parcialmente entrelaçado (DEC).

Analogamente, a Fig. 8 mostra o comportamento das tensões no tempo para o disco tipo contínuo.

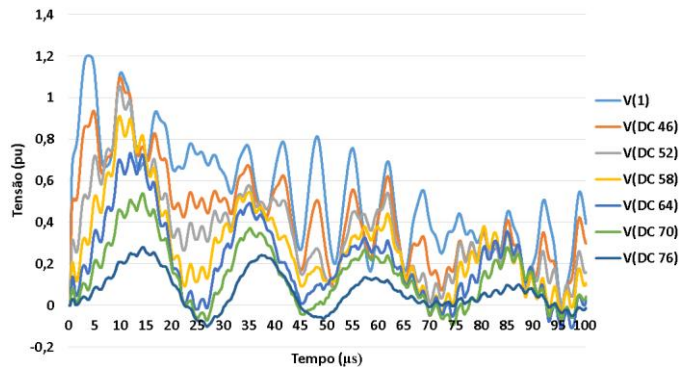


Fig. 8. Resposta para impulso atmosférico – Enrolamento tipo disco contínuo (DC).

Observa-se que as diferenças encontradas no comportamento da distribuição das tensões da Fig. 8, em relação às Figs. 6 e 7, estão associadas às capacitâncias séries dos enrolamentos. No enrolamento tipo disco contínuo, Fig.8, 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 consequentemente resultam em valores de capacitâncias muito baixos para o enrolamento. Com o aumento das classes de tensão do enrolamento, a isolamento entre espiras e entre discos deve ser aumentada, o que agrava ainda mais a capacitância série.

Já no enrolamento entrelaçado, Fig. 6, 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.

A Figura 9 indica o comparativo das tensões máximas nos pontos avaliados para os três tipos de enrolamentos. Observa-se que no enrolamento tipo disco contínuo, as oscilações internas resultaram em tensões com amplitudes superiores a 20% do valor nominal do impulso aplicado.

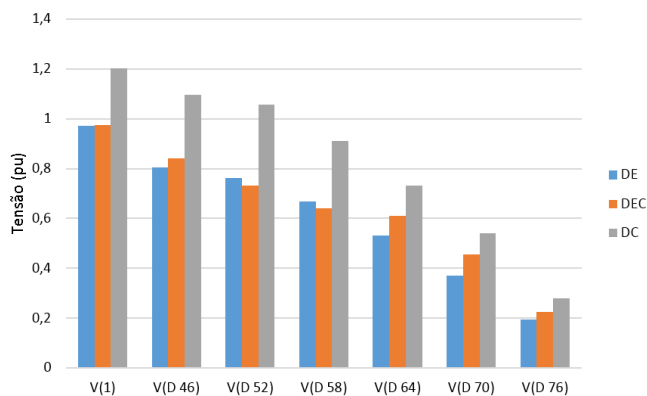


Fig. 9. Tensões máximas para diferentes tipos de enrolamento.

Estes resultados confirmam a premissa de que enrolamentos do tipo disco contínuo, geralmente não são utilizados para tensões de impulso superiores a 350kV.

As análises seguintes consideram as diferenças de potenciais entre espiras e seções adjacentes, quando submetidas a ondas transitórias.

Na Figura 10 são comparadas as diferenças de tensões máximas entre seções ao longo dos três tipos de enrolamentos.

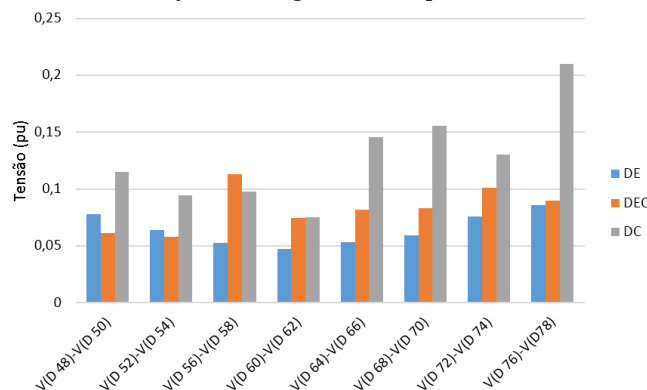


Fig. 10. Diferença de potencial ao longo do enrolamento.

Deve-se observar que as diferenças de potenciais entre as seções têm maior amplitude quando empregado enrolamento do tipo disco contínuo. Entretanto, destaca-se que, entre as seções D56 e D58, a diferença de potencial com amplitude máxima ocorre para o enrolamento do tipo disco parcialmente entrelaçado. Este ponto corresponde à região de transição de disco entrelaçado para disco contínuo.

A Figura 11 demonstra as seções D56 e D58 e suas adjacentes. É incluída nesta análise a diferença de potencial no disco de entrada, entre o condutor VA conectado a espira 1 e a espira 20. Novamente, pelos motivos já citados, o disco contínuo apresenta o pior desempenho.

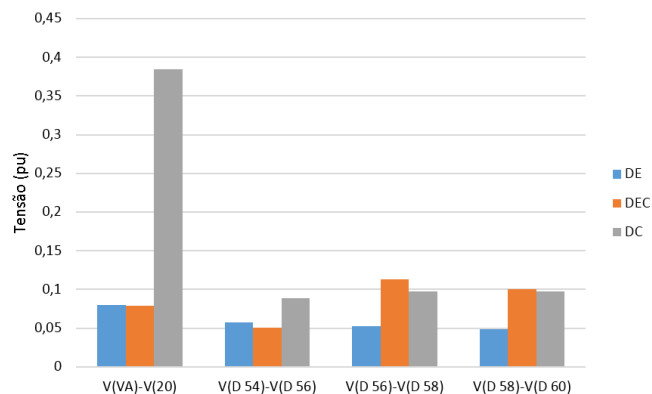


Fig. 11. Diferença de potencial na região de transição e entrada de bobina.

No que tange à diferença de potencial entre as seções D56 e D58, nota-se através da análise da evolução no tempo das tensões parciais, que nos primeiros 10 μ s, o enrolamento tipo disco parcialmente entrelaçado apresenta um desempenho inferior aos demais tipos, com uma diferença de aproximadamente 50% na amplitude da tensão, conforme Fig.12.

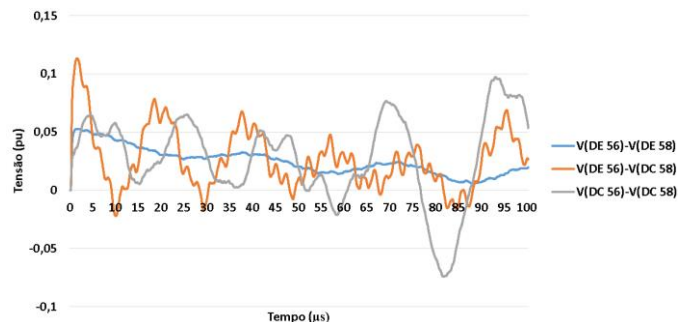


Fig. 12. Resposta para impulso atmosférico entre seções (D56-D58).

Considerando como ponto crítico a região de transposição 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: DE48 – DC50, DE52 – DC54 e DE56 – DC58. Conforme a Fig. 13, a diferença de potencial máxima, entre os três enrolamentos

testados, ocorre na região da transição. Já a tensão entre espiras do disco de entrada apresenta pequena diferença.

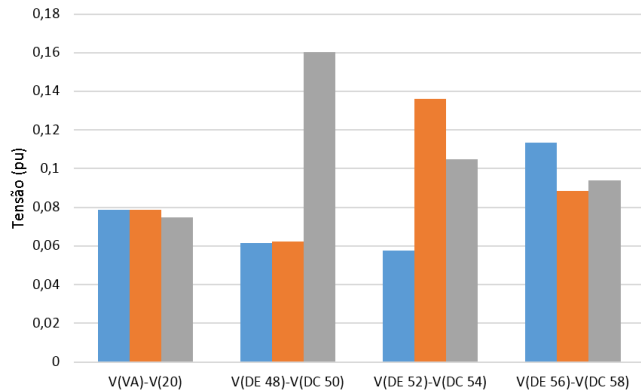


Fig. 13. Diferença de potencial no enrolamento do tipo parcialmente entrelaçado para diferentes pontos de transição.

Na Figura 14 são indicadas apenas as diferenças de potencial máximas em cada uma das transições. As maiores amplitudes ocorrem quanto mais próximo da entrada do enrolamento de alta tensão for realizada a transição.

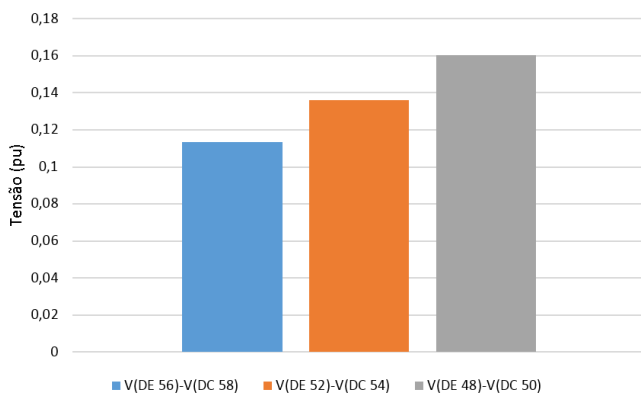


Fig. 14. Tensões máximas para transições em diferentes pontos do enrolamento do tipo parcialmente entrelaçado.

Finalmente, a Fig. 15 identifica o comportamento no tempo das tensões transitórias nos pontos de transição.

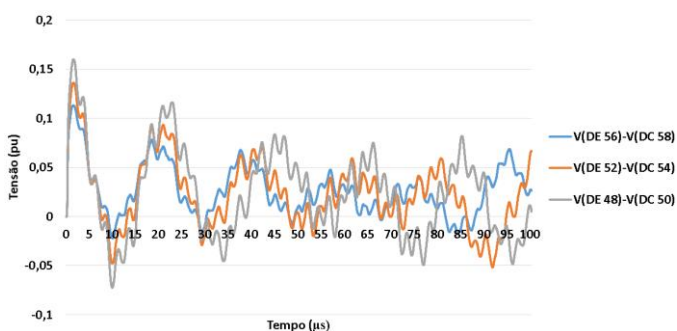


Fig. 15. Resposta para impulso atmosférico nas transições.

V. CONCLUSÃO

O modelo de alta frequência proposto neste artigo baseia-se em cálculos, que utilizam fórmulas convencionais com parâmetros obtidos através das características físicas do transformador de potência. Sua simulação computacional, através da descrição do circuito por meio de um arquivo tipo texto, *netlist*, permite uma maior compreensão da distribuição interna das tensões transitórias por parte das concessionárias de energia. Neste âmbito, ressalta-se a importância da utilização de um modelo de alta frequência para transformador, e salienta-se a necessidade da realização de *design review* entre fabricante e concessionária.

Para o estudo de caso utilizando transitórios convencionais, representados por ondas tipo impulso atmosférico 1,2/50μs, como já esperado, o enrolamento disco entrelaçado apresentou melhores resultados. O enrolamento tipo disco contínuo, empregado inadequadamente para este tipo de impulso, apresenta tensões máximas em relação aos demais enrolamentos. Evidencia-se, através deste estudo, que a diferença de potencial entre seções na região de transição do enrolamento tipo parcialmente entrelaçado, apresenta amplitudes máximas superiores até mesmo ao enrolamento tipo disco contínuo. Isto não significa que, projetos envolvendo enrolamentos do tipo parcialmente entrelaçados não possam ser fabricados. Porém, algumas concepções de projeto dielétrico devem ser diferentes às normalmente empregadas.

REFERÊNCIAS

- [1] CIGRE Brochure 577A, "Electrical Transient Interaction Between Transformers and The Power System - Part 1: Expertise" Joint Working Group A2/C4.39, April 2004.
- [2] E. Rahimpour, M. Bigdeli, "Simplified transient model of transformer based on geometrical dimensions used in power network analysis and fault detections studies", *Powereng* 2009. Lisbon, pp.375-380, march 2009.
- [3] G.M.V. Zambrano, Identificação de Parâmetros de um Circuito Equivalente de Transformadores de Potência", Universidade Federal do Rio de Janeiro. Tese de Doutorado. 2009.
- [4] J.C. Mendes, "Redução de Falhas em Grandes Transformadores de Potência", Universidade de São Paulo. Tese de Doutorado. 1995.
- [5] S.V. Kulkarni and S.A. Khaparde, "Transformer Engineering: Design and Practice" chapter 7, CRC Press; 1st edition (May 24, 2004), ISBN-10: 0824756533.
- [6] F.W. Grover, "Inductance Calculations: Working Formulas and Tables", Instrument Society of America, New York, 1973.
- [7] V. Venegas, J.L. Guardado, E. Melgoza, S. Maximov, M. Hernandez, "A Computer Model for Transient Voltages Distribution Studies in Transformer Windings", 9th WSEAS/IASME International Conference. Florença, pp. 121-126, August 2011.
- [8] K.A. Wirgau, "Inductance calculation of air-core disk winding", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-95, No.1, January/February 1976, pp. 394-400.