

SÉRGIO HENRIQUE LOPES CABRAL

**ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS ELÉTRICOS EM
TRANSFORMADORES ATRAVÉS DO MÉTODO
TLM**

**FLORIANÓPOLIS
2003**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS ELÉTRICOS EM
TRANSFORMADORES ATRAVÉS DO MÉTODO
TLM

Tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para
obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica

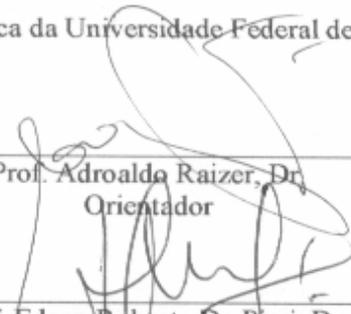
SÉRGIO HENRIQUE LOPES CABRAL

Florianópolis, maio de 2003

ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS ELÉTRICOS EM TRANSFORMADORES ATRAVÉS DO MÉTODO TLM

Sérgio Henrique Lopes Cabral

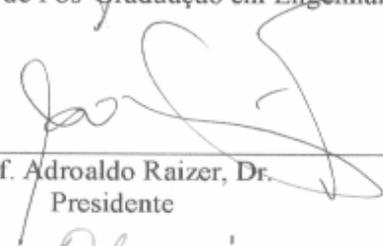
Esta Tese foi julgada adequada para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Energia e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina



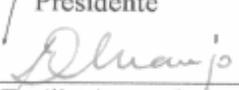
Prof. Adroaldo Raizer, Dr.
Orientador

Prof. Edson Roberto De Pieri, Dr.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora :



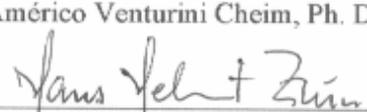
Prof. Adroaldo Raizer, Dr.
Presidente



Prof. Antônio Emilio Angueth de Araújo, Dr.



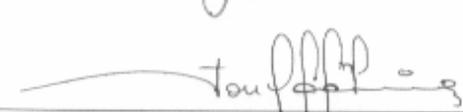
Sr. Luiz Américo Venturini Cheim, Ph. D.



Prof. Hans Helmut Zürn, Ph. D.



Prof. Jorge Coelho, D. Sc.



Prof. Jony Laureano Silveira, Dr.

Dedicatória

Como muitos dizem por aí, a vida pode realmente ser somente um sonho, um capricho do

Criador. Pode também ser como as tramas de um tapete persa, que começam e que terminam de acordo com a vontade daquele que o tece, sem que isso represente algo real. Mas dentro desse possível sonho, do qual eu mesmo me pergunto se faço parte, entendo que o mais importante valor do viver está no que sentimos de bem. E diante disso, creio que tenho motivos de sobra para afirmar que viver vale a pena. Afinal, nasci e cresci cercado de carinho; há vinte anos tenho o amor de minha Leila; há quatro anos, minhas emoções se desdobram com o crescer de minha pequena Elisa; há nove anos vivo no estado mais belo da nação mais bela : Santa Catarina, Brasil. Mais especificamente, na linda e inigualável cidade de Blumenau, por minha pura e feliz opção; tenho orgulho, e muito, de meu sangue latino-americano. Exerço a profissão que almejei, num ambiente de trabalho fraternal.

Que motivos a mais seriam então necessários para me julgar feliz ?

À vida, muito obrigado.

Agradecimentos

Agradeço inicialmente ao orientador, Prof. Adroaldo Raizer, pela valiosa orientação, pelos incentivo e ajuda constantes e pela oportunidade dada à realização deste trabalho.

Aos inúmeros novos amigos que ganhei, ao estar em contacto com o Departamento de Engenharia Elétrica da UFSC. Esses novos amigos se somam à enorme leva de amigos com os quais tenho orgulho em compartilhar meus pensamentos.

Aos amigos do Departamento de Engenharia Elétrica, da Direção do Centro de Ciências Tecnológicas e do Instituto de Pesquisas Tecnológicas todos da FURB, pelos valiosos incentivos e apoio constantes.

A todos os alunos, inclusive egressos, dos cursos de graduação em Engenharia Industrial Elétrica e em Engenharia de Telecomunicações da FURB. Eles talvez não saibam, mas todas as dúvidas que um dia a mim direcionaram, contribuíram de forma decisiva para me instigar à investigação de cada uma daquelas dúvidas e com isso me ajudaram a ter um melhor conhecimento da Engenharia Elétrica. Então, por favor, continuem a expor suas dúvidas, pois cada vez mais descubro que nada sei.

Aos muitos amigos das empresas fabricantes de transformadores de Blumenau, dos quais obtive valiosas informações para o desenvolvimento deste trabalho. Para esses, espero que o presente trabalho seja de valia.

Às Minhas Leila e Elisa, com meu pedido de escusas pelas pequenas ausências, causadas simplesmente pelo afã de elaborar um bom trabalho, em nome delas.

À minha Mãe e às minhas Avós e ao Vô José, pela educação e pelo conforto diante das lágrimas infantis e pelo enorme carinho.

À luz de Euclides Bezerra Netto, pela inestimável educação.

Resumo da Tese apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS ELÉTRICOS EM TRANSFORMADORES ATRAVÉS DO MÉTODO TLM

Sérgio Henrique Lopes Cabral

Maio / 2003

Orientador: Prof. Adroaldo Raizer, Dr.

Área de Concentração : Compatibilidade Eletromagnética.

Palavras-Chave : Transformadores, transitórios, TLM.

Número de Páginas : 103

RESUMO : Este trabalho apresenta a aplicação eficiente do método numérico TLM-*Transmission Line Method* na solução dos principais problemas relacionados a transitórios elétricos em transformadores elétricos. Dadas a simplicidade e a eficiência desse método, torna-se possível o desenvolvimento de programas computacionais para a análise de diversos projetos de transformadores frente às solicitações transitórias elétricas, segundo as particularidades de cada fabricante, através de planilhas eletrônicas. Inicialmente, se define e justifica quais vêm a ser os três principais casos de transitórios elétricos relacionados a transformadores e a importância da análise desses casos, no contexto regional. Em seguida, esses três casos são analisados de forma teórica, baseando-se no que há de mais atual em cada um deles. Desta forma, se demonstra a necessidade do uso de ferramentas computacionais eficientes para a análise dos casos. Então, o método TLM é apresentado, através de exemplos relacionados aos três principais casos e em seguida cada um desses três casos é simulado, com a base no método. Dada a coerência obtida, a apresentação culmina com a validação experimental dos três casos, permitindo vislumbrar a aplicação do método em diversas outras situações particulares, de interesse de fabricantes de transformadores. A forma simples como os programas computacionais podem ser desenvolvidos é enfatizada.

Abstract of Thesis presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor in Electrical Engineering.

ANALYSIS OF ELECTRICAL TRANSIENTS IN TRANSFORMERS WITH THE TLM METHOD

Sérgio Henrique Lopes Cabral

May / 2003

Advisor : Prof. Adroaldo Raizer, Dr.

Area of Concentration : Electromagnetic Compatibility.

Keywords : Transformers, transients, TLM.

Number of Pages : 103

ABSTRACT : This work presents the use of the efficient numerical method *TLM-Transmission Line Method* to solve problems of transformers related to electrical transients. Based upon the simplicity and the efficiency of this method, computational programs are easily developed in spreadsheets for the analysis of the behavior of several designs of transformers, when submitted to electrical transients. Formerly, three main cases of electrical transients are defined, according to the importance of them, in the regional context. Thus, these three cases are theoretically analyzed, based on the most recent works related to them and the need of the use of computational tools for the analysis of these cases is shown. Then, the TLM method is presented through examples related to these cases and each of them is simulated with the use of the TLM method. Since a very clear coherence is obtained, this work presents the experimental validation for the use of this method to the three cases, which allows that the TLM method may be also applicable to several conditions of electrical transients in transformers. The simplicity of the development of computational tools of analysis is emphasized.

SUMÁRIO

1. CAPÍTULO 1 - Introdução.....	1
1.1 Histórico	1
1.2 Transitórios Elétricos Rápidos e Seus Efeitos em Transformadores.....	6
1.2.1 A Distribuição de Surtos de Tensão em Enrolamentos Contínuos de Transformadores.....	6
1.2.2 A Transferência de Surtos de Tensão Através de Enrolamentos de Transformadores.....	8
1.3 Transitórios Elétricos à Frequência Industrial e Seus Efeitos em Transformadores..	10
1.4 Tópicos da Tese.....	11
2. CAPÍTULO 2 - Análise Teórica de Transitórios Elétricos em Transformadores.....	14
2.1 O Comportamento de Transformadores Frente aos Transitórios Elétricos Rápidos	14
2.1.1 A Distribuição da Surtos de Tensão em Enrolamentos Contínuos de Transformadores.....	14
2.1.1.1 Intervalo Inicial de Análise.....	21
2.1.1.2 Intervalo Final de Análise.....	25
2.1.1.3 Intervalo Intermediário de Análise.....	26
2.1.2 A Transferência de Surtos de Tensão Através de Enrolamentos de Transformadores.....	30
2.2 O Comportamento de Transformadores Frente aos Transitórios Elétricos na Frequência Industrial - Corrente de <i>Inrush</i>	34
2.2.1 Modelagem Simplificada de Histerese.....	39

3. CAPÍTULO 3 - O Método TLM em Exemplos.....	45
3.1 A Origem do Método : Análise da Propagação de Surtos em Linhas de Transmissão.....	45
3.2 Aplicação do Método TLM a Circuitos de Parâmetros Concentrados.....	49
3.2.1 O Circuito RLC-série	49
3.2.2 Circuitos Acoplados Magneticamente.....	53
4. CAPÍTULO 4 - Aplicação do Método TLM à Análise de Transitórios Elétricos em Transformadores.....	58
4.1 Aplicação do Método TLM para Estudo do Comportamento de Transformadores Frente a Transitórios Elétricos Rápidos.....	58
4.1.1 Aplicação do Método TLM para Estudo do Comportamento de Transformadores frente à Distribuição de Surtos de Tensão.....	59
4.1.2 Aplicação do Método TLM para Estudo do Comportamento de Transformadores frente à Transferência de Surtos de Tensão.....	63
4.2 Aplicação do Método TLM para Estudo do Comportamento de Transformadores Frente a Transitórios Elétricos na Frequência Industrial - Corrente de <i>Inrush</i>	66
5. CAPÍTULO 5 - Avaliação do Desempenho do Método TLM frente a Resultados Experimentais.....	72
5.1 Comparação entre Resultados Experimentais e do Método TLM para o Estudo do Comportamento de Transformadores frente a Transitórios Elétricos Rápidos.....	72
5.1.1 Comparação para o Estudo de Distribuição de Surto de Tensão em Enrolamentos Contínuos e Homogêneos.....	72

5.1.2 Comparação para o Estudo de Transferência de Surtos de Tensão entre Enrolamentos de Transformadores.....	80
5.2 Comparação entre Resultados Experimentais e do Método TLM para o Estudo do Comportamento de Transformadores frente a Transitórios Elétricos na Freqüência Industrial - Corrente de <i>Inrush</i>	84
6. CAPÍTULO 6 - Conclusões.....	87
6.1 Conclusões Referentes ao Estudo do Comportamento de Transformadores Frente a Transitórios Elétricos Rápidos.....	88
6.2 Conclusões Referentes ao Estudo do Comportamento de Transformadores Frente a Transitórios Elétricos na Freqüência Industrial.....	90
ANEXO 1 - Sistema Matricial de Cálculo de Potencial dos Nós do Modelo do Enrolamento Experimental.....	91
ANEXO 2 - Disco Contendo Programas de Cálculo, pelo Método TLM - Programas Desenvolvidos em Planilha Excel®.....	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - HISTÓRICO

O transformador é um dos mais importantes componentes dos sistemas elétricos em geral. Graças à sua alta eficiência tanto na elevação quanto na redução dos níveis de tensão, a implantação e a operação de redes de distribuição e de transmissão da energia elétrica tornaram-se economicamente viáveis, já a partir do início do século passado[1]. Desta forma, o uso do transformador permitiu o constante aumento da disponibilidade da energia elétrica em nossa sociedade, contribuindo para o aumento da qualidade de vida da sociedade moderna. Muito embora o transformador seja um elemento eminentemente robusto, desde o início de seu uso o mesmo demonstrou ser também vulnerável às freqüentes e severas solicitações resultantes dos transitórios elétricos inerentes à operação dos sistemas elétricos. Conseqüentemente, dada a crucial importância do transformador, os primeiros estudos a respeito dessas solicitações e de seus efeitos foram realizados e divulgados quase que na mesma época em que se iniciou o seu uso[2,3]. Mas desde então os sistemas elétricos sofreram uma vigorosa expansão, tornando-se cada vez mais complexos e interligados, aumentando a diversidade de solicitações a transformadores. Concomitantemente, essa expansão não somente fez com que a importância estratégica dos transformadores ainda aumentasse como também criou demanda por uma extensa variedade de tipos de transformadores, aumentando por demais a complexidade da análise de efeitos de transitórios elétricos nesses. Diante desse cenário de complexidades tornou-se impossível que hoje exista um método generalista de análise que permita o estudo do comportamento de todos os diferentes tipos de transformadores frente a qualquer tipo de solicitação transitória.

E como não poderia ser diferente, os problemas decorrentes do quadro de complexidade anteriormente delineado logo se tornaram o objeto de preocupação de todos os fabricantes e usuários de transformadores de todo o mundo. E nos dias de hoje cada vez mais a preocupação persiste. Fabricantes, em especial, têm procurado o desenvolvimento de técnicas que permitam avaliar, de forma economicamente viável, o comportamento de seus diferentes projetos de transformadores frente aos diversos tipos de solicitações transitórias. O objetivo dessas técnicas é permitir a redução de custos com materiais isolantes empregados e o aumento da suportabilidade às solicitações transitórias por parte dos transformadores, caracterizando esse último como sendo um problema de compatibilidade eletromagnética. Entretanto, conforme descrito anteriormente, a enorme quantidade de variáveis a considerar faz com que os fabricantes decidam por soluções particulares, voltadas para seus projetos em específico e para as solicitações transitórias mais frequentes. E para esse fim o uso de ferramentas computacionais para o desenvolvimento de técnicas de análise tem sido cada vez mais frequente. Principalmente devido à disponibilidade cada vez maior de computadores de menor porte e à, cada vez maior, capacidade de cálculo desses.

Inserida nessa realidade está a região do Vale do Itajaí, no Estado de Santa Catarina, que apresenta características industriais únicas, em nível nacional. Nessa região estão unidades fabris de três dos maiores fabricantes nacionais, e um mundial, de transformadores de grande porte¹. Além disso, a região abriga ainda diversos fabricantes de transformadores de menor porte, reformadoras de transformadores e diversos fabricantes de insumos básicos para a construção de transformadores. Portanto, essas características justificam a importância regional desse assunto. Por sua vez, por estar no contexto tecnológico dessa região industrial do estado, a Universidade Regional de Blumenau tem se voltado para auxiliar as empresas de transformadores a desenvolver as técnicas adequadas para a análise desse problema, de acordo com as necessidades de cada um dos fabricantes de transformadores da região. Para tanto, os pesquisadores do seu Departamento de Engenharia Elétrica têm contribuído há algum tempo para a solução de alguns problemas relacionados a transformadores, através da realização de contactos técnicos, de trabalhos de consultoria e da realização de projetos de cooperação com pessoal

¹ Transformadores mono ou trifásicos, com potência nominal superior a 15 kVA e tensão nominal superior a 6 kV

técnico das empresas fabricantes. Em consequência à intensificação dos trabalhos conjuntos e ao interesse cada vez maior por parte de fabricantes em investir na melhoria de seus projetos de transformadores, foram criadas diversas novas frentes de cooperação entre a universidade e as empresas. Dessas frentes, uma das principais se estabeleceu como sendo a busca por novas técnicas numéricas que permitissem maior facilidade do uso de computadores para o desenvolvimento de programas de análise do comportamento de transformadores frente aos transitórios elétricos. Àquela altura, por volta de 1999, o já tão difundido método numérico dos Elementos Finitos se vislumbrava como sendo plenamente aplicável aos interesses de engenheiros e técnicos projetistas de empresas. Afinal, já se conheciam situações em que esse método se mostrava eficaz na solução de problemas de extremo interesse por parte de fabricantes [4,5]. Entretanto, o uso do método dos Elementos Finitos implicava numa forte rejeição por parte do pessoal de gerência dessas empresas, devido ao volume do investimento necessário para o treinamento do pessoal de projetos de transformadores nesse método. Por outro lado, é importante considerar que o método dos Elementos Finitos está baseado na teoria de campos. E isto somado à histórica rejeição por parte de Engenheiros Eletricistas aos conceitos de campos, especialmente em eletromagnetismo, veio por determinar a procura por métodos alternativos. De imediato, havia como alternativa atraentemente viável os programas comerciais desenvolvidos para a análise de circuitos, incluindo os circuitos representativos de transformadores em regime transitório. Programas tais como o EMTP, o PSPICE e o ATP, dos quais já se tinham muitas notícias de diversos trabalhos realizados e publicados, que mostravam a eficácia deles na solução de problemas de transitórios elétricos em transformadores [6-10]. Não obstante, antes mesmo que fossem iniciados os esforços para a utilização de um desses programas, foi percebido que no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina já se consolidava o uso de uma nova técnica numérica que também se mostrava adequada às necessidades vigentes. Era o método numérico conhecido como *Transmission Line Modelling*-TLM [11,12], até então pouco difundido no Brasil e que somente ganhou a notoriedade de sua importância em Santa Catarina a partir de diversas aplicações do método, por parte de pesquisadores e alunos de pós-graduação do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina, no desenvolvimento de programas para a solução de diversos problemas complexos de compatibilidade eletromagnética [13,14]. Então iniciadas as conversações, aqueles

pesquisadores se mostraram muito interessados em realizar trabalhos de cooperação, por permitir novas aplicações para o método TLM, que então se vislumbravam. Conseqüentemente, dadas essas condições favoráveis e ainda a facilidade com que as trocas de informações poderiam ocorrer entre as partes interessadas, principalmente pela proximidade das universidades, o método numérico TLM foi naturalmente escolhido para ser a realização dos trabalhos de cooperação. Dentre esses trabalhos, um deles é o que aqui se apresenta, que é a conclusão desta tese, voltada para a pesquisa, na busca o estado da arte no assunto *Transitórios Elétricos em Transformadores*. Para ainda referendar essa escolha, é importante citar uma característica do método TLM, que permite a abordagem de problemas de compatibilidade eletromagnética tanto pela teoria de campos quanto pela teoria de circuitos. E assim, a possibilidade da abordagem pela teoria de circuitos essa tornou o método TLM atraente para engenheiros eletricitas e técnicos projetistas, pois essa abordagem é, reconhecidamente, preferida por esses. Conseqüentemente, essa é a abordagem adotada neste trabalho. Desta forma, por não ser utilizada a abordagem pela teoria de campos, não será analisado neste trabalho o problema do cálculo dos parâmetros dos circuitos que modelam o transformador em regimes de transitórios elétricos. Mas sim, esses parâmetros serão considerados como sendo conhecidos. Diante disso, se percebeu que a utilização do método TLM permitiria a elaboração de programas eficientes e simples para a análise de problemas de transitórios elétricos em transformadores, a ponto de poderem ser elaborados em planilhas eletrônicas, que são facilmente encontradas na maioria dos computadores de empresas. Assim, a conclusão deste trabalho resulta numa contribuição tecnológica às empresas da região do Vale do Itajaí, mostrando a relevância do papel e a capacidade das duas universidades catarinenses na solução de problemas regionais.

No que diz respeito à forma de apresentação, neste trabalho a demonstração da aplicação do eficiente método numérico TLM na análise de problemas de transitórios elétricos em transformadores se dará através do estudo de três casos tidos como os mais freqüentes e portanto interessantes, identificados a partir dos trabalhos de cooperação com empresas fabricantes de transformadores. Também, em face das complexidades citadas, a análise se concentrará nesses três casos. São eles :

- 1 - *A Distribuição da Tensão de Surto em Enrolamentos Contínuos de Transformadores;*
- 2 - *A Transferência de Surtos de Tensão Através de Enrolamentos de Transformadores; e*
- 3 - *A Avaliação da Corrente Transitória de Energização de Transformadores.*

Desses, os dois primeiros casos dizem respeito aos transitórios elétricos ditos rápidos[15], relacionados com a ocorrência de descargas atmosféricas. O primeiro caso se aplica principalmente a transformadores utilizados nas redes de distribuição, enquanto que o segundo se aplica a todos os tipos. Já o terceiro, e último caso, diz respeito aos transitórios um pouco mais lentos, com duração relacionada à frequência industrial e também se aplica a todos os tipos de transformadores. Portanto, a análise do comportamento de transformadores frente a transitórios, apresentada neste trabalho, se dividirá em duas partes: Transitórios rápidos e transitórios em frequência industrial. A razão dessa divisão está no fato de que para cada um desses tipos de transitórios o modelo de circuito do transformador possui características específicas. Por exemplo, para transitórios rápidos, o circuito que modela o transformador apresenta as inerentes capacitâncias parasitas existentes, enquanto que as não-linearidades do núcleo ferromagnético têm influência um pouco menor [16,17]. Por outro lado, para transitórios em frequência industrial ocorre justamente o contrário.

Então, para cada um desses três casos é mostrado como a utilização do método numérico TLM permite simular eficientemente o comportamento de transformadores com intensa similaridade, tornando-se mais uma aplicação eficiente deste método numérico à extensa gama de aplicações já existentes, em diversos outros problemas de compatibilidade eletromagnética[18-20]. Tal como citado anteriormente, para enfatizar a simplicidade e eficiência do método, todos os programas desenvolvidos neste trabalho foram feitos em planilha eletrônica Excel[®].

A esta altura é importante frisar que este trabalho está eminentemente voltado para a aplicação do método TLM na solução dos circuitos que modelam o transformador para os principais tipos de transitórios elétricos. Desta forma, não se está propondo uma nova modelagem para transformadores, mas sim verificando a eficácia de uma eficiente técnica numérica para a solução dos circuitos que modelam o transformador.

A seguir é então apresentada uma breve descrição introdutória desses três importantes casos, seguindo a divisão proposta anteriormente.

1.2 - TRANSITÓRIOS ELÉTRICOS RÁPIDOS E SEUS EFEITOS EM TRANSFORMADORES

Conforme já citado, o circuito do modelo de transformador para transitórios rápidos considera as capacitâncias parasitas, enquanto que os efeitos da não-linearidade do núcleo ferromagnético têm importância relativamente menor. E a consideração dessas e de outras características específicas de modelagem do transformador para transitórios rápidos permitem que os resultados obtidos na análise dos casos aqui estudados sejam extensivos a outras situações importantes, vivenciadas por fabricantes de transformadores e até mesmo de máquinas girantes. Por exemplo, pela semelhança de condições de modelagem, os resultados obtidos da modelagem de transformadores para transitórios rápidos podem ser adaptados para o estudo de transformadores e máquinas girantes submetidos aos conversores de frequência, com tecnologia *PWM-Pulse Width Modulation*, que é um assunto bastante investigado atualmente [21,22]. Também, por motivos semelhantes, os resultados se aplicam ao comportamento de enrolamentos de máquinas girantes sob a incidência de surtos de tensão de origem atmosférica ou de manobras. Mais diretamente, os resultados se aplicam integralmente aos enrolamentos de reatores, enquanto que para diversos outros casos adaptações podem ser feitas, mostrando a relevância do tema.

1.2.1 - A Distribuição de Surtos de Tensão em Enrolamentos Contínuos de Transformadores

Para a maioria dos transformadores de distribuição, o estudo da distribuição de tensão de surto ao longo de enrolamentos contínuos tem como ponto de partida o método clássico de análise, que consiste na solução analítica da equação da onda ao longo de um enrolamento contínuo e homogêneo, que apresenta parâmetros uniformemente distribuídos ao longo de seu comprimento[16]. Muito embora essa não seja a condição que se verifica

integralmente na prática, seus resultados levam a importantes conclusões que permitem entender razoavelmente bem o comportamento da distribuição de surtos de tensão e de seus efeitos em quase todos os tipos de enrolamentos contínuos utilizados na indústria. Acerca dos diversos desdobramentos dos resultados do método clássico de análise, uma razoável quantidade de trabalhos de pesquisa tem sido publicada até os dias de hoje[23-25]. Mas nem sempre os resultados desses trabalhos chegam aos interessados no assunto, nas indústrias. Por outro lado, quanto à aplicação prática dos resultados, a mais difundida das técnicas de análise de comportamento de enrolamentos contínuos sob surtos de tensão é aquela conhecida como a técnica da *curva rebatida*[3,16], que considera as curvas de distribuição de tensão ao longo do enrolamento nos instantes inicial e final da incidência do surto do tipo degrau. Para ilustrar, na Figura 1.1 estão mostradas ambas as curvas para um enrolamento contínuo genérico, bem como a curva rebatida, obtida a partir da diferença entre os valores das curvas de distribuição inicial e final. A curva obtida é o envelope dos máximos valores de tensão de cada ponto do enrolamento, desde o instante da incidência do surto no enrolamento até que a distribuição de tensão atinja seu estado permanente, uniformemente distribuída.

Embora seja realmente bastante difundida junto aos projetistas de transformadores, as premissas estabelecidas por essa técnica não têm respaldo teórico[16], o que reforça a necessidade de estudos contendo uma investigação mais profunda, tal como proposta por esse trabalho. Em adição a esse problema da validade da técnica da curva rebatida, é muito importante frisar que a necessária consideração de características físicas reais de qualquer enrolamento contínuo de transformador implica na inviabilidade do uso de métodos analíticos para a solução da equação da onda nesses enrolamentos[16]. Esses fatos são então suficientes para justificar a técnica proposta neste trabalho, que permite a avaliação precisa de como ocorre a distribuição da tensão de surto ao longo de enrolamentos contínuos, baseada no método numérico TLM.

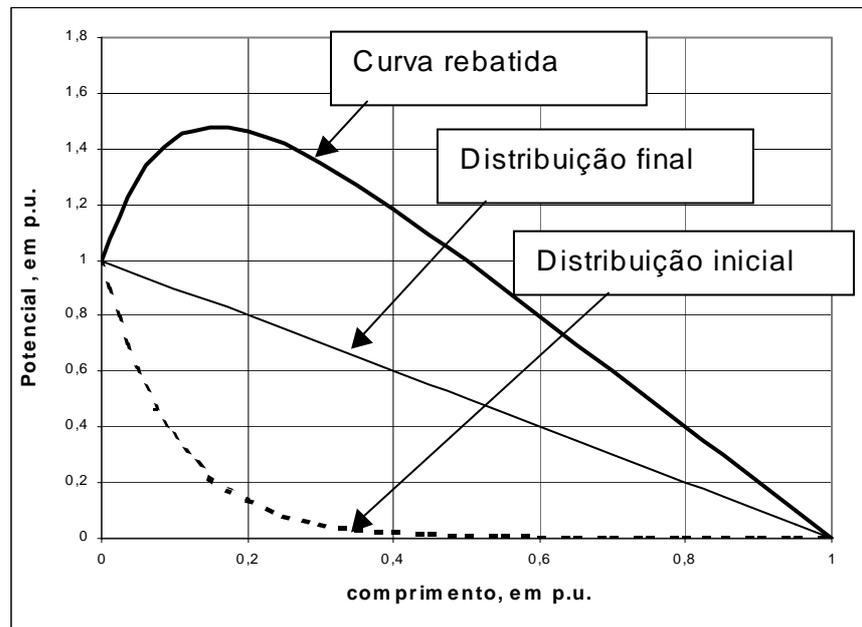


Figura 1.1 – Gráfico para elaboração da curva rebatida, utilizada na análise da distribuição de tensão

1.2.2 - A Transferência de Surtos de Tensão Através de Enrolamentos de Transformadores

A transferência de surtos de tensão através de enrolamentos de transformadores é um tema que surge naturalmente como consequência do estudo da distribuição de tensão de surto ao longo de enrolamentos contínuos. Muito embora no método clássico de análise da distribuição da tensão de surto ao longo de enrolamentos contínuos não seja considerada a proximidade ou qualquer efeito de outros enrolamentos, o fato é que em transformadores é bastante comum que enrolamentos de uma mesma fase estejam dispostos fisicamente bem aproximados. Isto leva a concluir que um surto que incida num enrolamento contínuo de um transformador não somente cause as sobretensões e distribuições de tensão como também esse surto possa se transferir para um enrolamento mais próximo, por efeitos de acoplamentos magnéticos e capacitivos. Portanto, os danos decorrentes da incidência do surto não estariam limitados ao primeiro enrolamento atingido, mas também ao enrolamento próximo e às eventuais cargas que nele estiverem conectadas. Muito embora diversos trabalhos já tenham sido publicados sobre esse assunto[26-29], essa conclusão não

parece tão óbvia quando se nota que no Brasil não é comum o uso de protetores de surto para os enrolamentos de baixa-tensão de transformadores das redes de distribuição de energia. A proteção contra surtos é frequentemente aplicada somente ao circuito de alta-tensão, através da instalação de pára-raios. Indiferente a este fato, alguns tipos de transformadores passaram a ser utilizados como supostos elementos bloqueadores de surtos, em algumas instalações elétricas de baixa-tensão, no Vale do Itajaí. Essa constatação ocorreu a partir de diversas inspeções técnicas em muitas instalações comerciais e industriais, solicitadas aos profissionais do Departamento de Engenharia Elétrica, devidas à crescente preocupação com a ocorrência de danos devidos à incidência de surtos em instalações elétricas de baixa-tensão. Nestas instalações cada vez mais são utilizados equipamentos eletrônicos sensíveis, o que faz surgir algumas técnicas de proteção e de compatibilidade eletromagnética que não são eficazes. Principalmente aquelas que utilizam transformadores como bloqueadores de surtos.

Não obstante, transformadores com características construtivas especiais têm sido cada vez mais encomendados a fabricantes. Dentre essas características é comum o pedido da ligação do tipo isolador e a inclusão de uma blindagem eletromagnética² entre os enrolamentos primário e secundário. As situações mais frequentes onde esses transformadores têm sido empregados são em instalações elétricas projetadas para a alimentação de equipamentos eletrônicos sensíveis. Certamente, porque a sensibilidade desses tipos de equipamentos se deve ao fato deles possuírem microprocessadores. Esses equipamentos realizam tarefas que são cada vez mais vitais para a nossa sociedade. Isto torna evidente o prejuízo decorrente da interrupção de serviços que esses equipamentos realizam. Portanto, é clara a necessidade de proteger tais equipamentos das incidências de surtos advindos da rede de distribuição de energia elétrica. E a aplicação de tipos especiais de transformadores é tida como sendo uma dessas formas de proteção. Entretanto, se verifica que mesmo nas instalações elétricas em que transformadores são utilizados com o intuito do bloqueio de surtos, cada vez mais ocorrem problemas de funcionamento de equipamentos eletrônicos sensíveis, devidos à incidência de surtos oriundos da rede elétrica. Mais uma vez, esses fatos são suficientes para justificar a importância da técnica proposta neste trabalho, que vai permitir a avaliação precisa de como ocorre a transferência

² Em projetos de transformadores essa blindagem é chamada de Blindagem Eletrostática.

de surtos de tensão entre enrolamentos. E essa técnica proposta seguirá a mesma metodologia utilizada para o item anterior, ou seja, estará baseada no método numérico TLM e será validada nas formas teórica e experimental .

1.3 - TRANSITÓRIOS ELÉTRICOS À FREQUÊNCIA INDUSTRIAL E SEUS EFEITOS EM TRANSFORMADORES

Um outro tipo muito importante de transitório elétrico em transformadores não está associado a surtos de tensão, mas sim a um fenômeno transitório um pouco mais lento, que é decorrente da energização de transformadores. Em geral, esse evento acarreta em sobrecorrentes que atingem valores comparáveis ao de curto-circuito do ponto de energização. Essas sobrecorrentes recebem o nome de corrente de *Inrush*. Elas podem, por exemplo, fazer atuar indevidamente sistemas de proteção elétrica, causando desligamentos no circuito utilizado e conseqüentes transtornos. Por isso, torna-se importante que para cada transformador seja conhecido o nível dessa sobrecorrente a fim de que se tomem medidas para minorar suas conseqüências ou que se especifiquem outros transformadores com níveis adequados de sobrecorrentes de energização. Conseqüentemente, resta aos fabricantes tomar medidas baseadas no conhecimento desse fenômeno para projetar transformadores com níveis pré-determinados de *Corrente de Inrush*. Por outro lado, aqueles que lidam com transformadores devem ter conhecimento da intensidade, relevância e condicionantes desse evento, a fim de coordenar os eventos de energização dos mesmos. Para atender ambas as necessidades, a modelagem da histerese e da saturação dos materiais ferromagnéticos de transformadores é de extrema importância. Por outro lado, há três tipos básicos de modelagem para a histerese[30]. O primeiro tipo se volta para os objetivos daqueles que estão interessados em entender as causas físicas do fenômeno da histerese. Portanto, é analisado o comportamento das partículas de material magnético do transformador, o que faz com que esse tipo de modelagem seja significativamente complexo. O segundo tipo é aquele voltado para a avaliação cada vez mais precisa das perdas decorrentes da histerese magnética em regime permanente da frequência industrial, com ou sem harmônicos. Modelos desse tipo são relativamente complexos, mas já podem

ser resolvidos usando-se o método TLM [31]. O terceiro tipo de modelagem prima pela simplificação e se preocupa em avaliar o comportamento de transformadores através da sua representação por circuitos elétricos. Usualmente, esse terceiro tipo dá respostas muito satisfatórias, com esforço de cálculo reduzido. E esse tipo de modelagem é também aplicável para a avaliação de corrente de *Inrush* em sistemas elétricos. Visando desenvolver uma modelagem bastante simplificada, porém precisa, este trabalho apresenta uma metodologia para avaliar a corrente de *Inrush* de transformadores. Para tanto, o circuito representativo de transformadores será também modelado pelo método TLM, permitindo uma solução rápida e precisa para a análise de problemas dessa natureza.

1.4 - TÓPICOS DA TESE

Visando apresentar a eficiência da aplicação do método TLM para a análise do comportamento de transformadores em regimes transitórios, a divisão deste trabalho segue a evolução gradual do estudo de cada um dos três tipos de transitórios propostos.

Neste primeiro capítulo foram apresentadas conjunções históricas introdutórias e motivadoras para o aprofundamento da análise de cada um dos três importantes casos mais freqüentes de transitórios em transformadores.

No Capítulo 2 cada um desses três casos de transitórios é abordado teoricamente, com ênfase no equacionamento básico das grandezas elétricas e magnéticas envolvidas e no estado da arte sobre o assunto.

No Capítulo 3 uma breve descrição do método numérico TLM é apresentada, seguida da descrição da demonstração de sua aplicação em problemas clássicos que estão bastante relacionados com os três casos de transitórios, tomados como base. Esses problemas são :

- 1 - A energização de circuito RLC-série a uma fonte de tensão contínua constante;
- 2 - A energização de circuito acoplado magneticamente a uma fonte de tensão senoidal ;

Em ambos os problemas os resultados obtidos pelo método TLM são confrontados com os resultados analíticos, demonstrando a eficiência do método. No primeiro caso também é feita uma comparação com o método numérico de Euler, reiterando a eficiência do TLM.

No Capítulo 4 estão apresentadas simulações computacionais dos três casos de transitórios, cuja coerência dos resultados remete à validação experimental.

No Capítulo 5 são então apresentadas as comparações entre resultados experimentais e da simulação através do TLM para situações de cada um dos três casos de transitórios em transformadores definidos como sendo a base deste trabalho. Essas comparações validam a aplicabilidade do método TLM, com ênfase na sua eficiência.

No Anexo 1 é mostrado o preenchimento das matrizes que permitem o cálculo da distribuição de tensão ao longo de um enrolamento contínuo. E finalmente no Anexo 2 está disponível um disco magnético contendo todos os programas de cálculo de problemas analisados neste trabalho. Esses programas, desenvolvidos em planilha eletrônica, são os seguintes :

- 1 - *rlc.xls* - Programa de cálculo de transitório em circuito RLC-série energizado por fonte de tensão constante - *Capítulo 3*;
- 2 - *mutuas.xls* - Programa de cálculo de transitório em circuito acoplado magneticamente , energizado por fonte de tensão senoidal - *Capítulo 3*;
- 3 - *distribtln.xls* - Programa de cálculo de distribuição de tensão de surto em enrolamento contínuo , através do método TLM - *Capítulo 4* ;
- 4 - *tlmtransfer.xls* - Programa de cálculo de transferência de tensão de surto através de transformador monofásico, através do método TLM - *Capítulo 4* ;
- 5 - *histlm.xls* - Programa de cálculo de corrente de inrush em transformador monofásico, através do método TLM - *Capítulo 4* ;
- 6 - *distexptlm.xls* - Programa de cálculo de distribuição real de tensão de surto em enrolamento contínuo : comparação experimental e o método TLM - *Capítulo 5*;
- 7 - *tlmtransfexpr.xls* - Programa de cálculo de transferência real de tensão de surto através de transformador monofásico : comparação experimental e o método TLM - *Capítulo 5* ;

8 - *histlmexp.xls* - Programa de cálculo de corrente de inrush real em transformador monofásico : comparação experimental e o método TLM - *Capítulo 5* ;

CAPÍTULO 2

ANÁLISE TEÓRICA DE TRANSITÓRIOS ELÉTRICOS EM TRANSFORMADORES

2.1 - O COMPORTAMENTO DE TRANSFORMADORES FRENTE AOS TRANSITÓRIOS ELÉTRICOS RÁPIDOS

De acordo com as justificativas apresentadas no Capítulo 1, a análise do comportamento de transformadores frente a transitórios rápidos apresenta características bastante específicas. Um fator de muita importância para esse tipo de análise é a presença de componentes de altas frequências no espectro dos surtos rápidos de tensão, que provoca diversos efeitos no transformador, que não são sentidos em baixas frequências. Diante dessas características específicas, os dois importantes casos relacionados aos transitórios rápidos são agora analisados teoricamente.

2.1.1 - A Distribuição de Surto de Tensão em Enrolamentos Contínuos de Transformadores

O método clássico, citado no Capítulo 1, considera que o enrolamento contínuo seja homogêneo. Ou seja, o mesmo apresenta parâmetros elétricos fixos, uniformemente distribuídos ao longo de seu comprimento, sem variação com a frequência, contendo núcleo de material magnético linear e sem a existência do efeito *Foucault*[2,3,16]. Embora essas premissas nem sempre se aplicam totalmente a enrolamentos contínuos reais, os resultados obtidos pelo método clássico permitem um bom entendimento do comportamento dos diversos tipos de enrolamentos contínuos reais.

De uma forma geral, a abordagem utilizada pelo método clássico de análise da distribuição de surto em enrolamento contínuo possui semelhanças com aquela utilizada na análise da propagação de ondas de surtos de tensão em linhas de transmissão planas com retorno por solo ideal. A Figura 2.1 mostra um segmento genérico de um enrolamento contínuo sobre um plano de terra ideal, contendo três espiras, onde são mostrados os seus parâmetros elétricos distribuídos. São eles :

- A capacitância entre espiras, C_e ;
- A capacitância à terra, C_g ;
- A auto-indutância série, L_e ;
- A indutância mútua entre espiras, M ;
- A resistência elétrica série, R_e .

Portanto, no método clássico de análise, o acoplamento capacitivo entre espiras que é considerado é somente aquele existente entre duas espiras adjacentes. Por sua vez, as condutâncias entre espiras ou à terra não são consideradas.

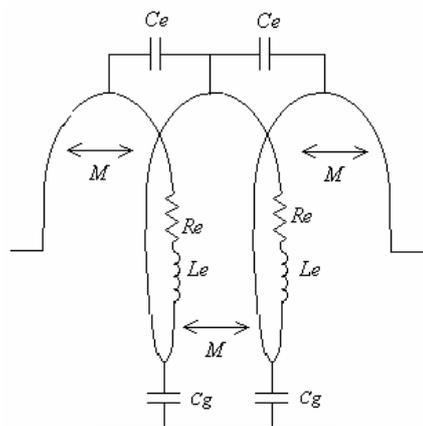


Figura 2.1 - Segmento genérico entre duas espiras de um enrolamento contínuo.

A partir desses parâmetros identificados, o enrolamento contínuo pode então ser representado pela associação série de diversos desses segmentos elementares, de forma análoga ao caso de linhas de transmissão. Então, considere um enrolamento contínuo que

apresente um número elevado de espiras, N , e que seu comprimento, ℓ , seja muito maior que o seu diâmetro. Tendo o enrolamento uma de suas extremidades na origem, $x = 0$, considere que ele estende-se ao longo do eixo x , no sentido positivo. Conseqüentemente, a outra extremidade do enrolamento estará localizada em $x = \ell$. Desta forma é possível obter as equações relativas às grandezas elétricas existentes quando da incidência de um surto de tensão, em $x = 0$. A Figura 2.2 apresenta o circuito equivalente do segmento elementar do enrolamento, cujo o comprimento é Δx . Neste circuito não está diretamente presente a indutância mútua entre cada espira e as demais, M . Esse parâmetro, por sua vez, é usualmente considerado através de sua transformação numa auto-indutância série, que é somada à auto-indutância do enrolamento, Le [2,17]. Portanto, na análise feita a seguir, o termo Le representa a soma da auto-indutância série do enrolamento com indutância equivalente das indutâncias mútuas existentes entre cada uma espira e todas as demais. Quanto ao parâmetro Cg , capacitância entre o enrolamento e a terra, deve-se considerar que o potencial de terra está distribuído de forma radial e uniforme ao longo do enrolamento.

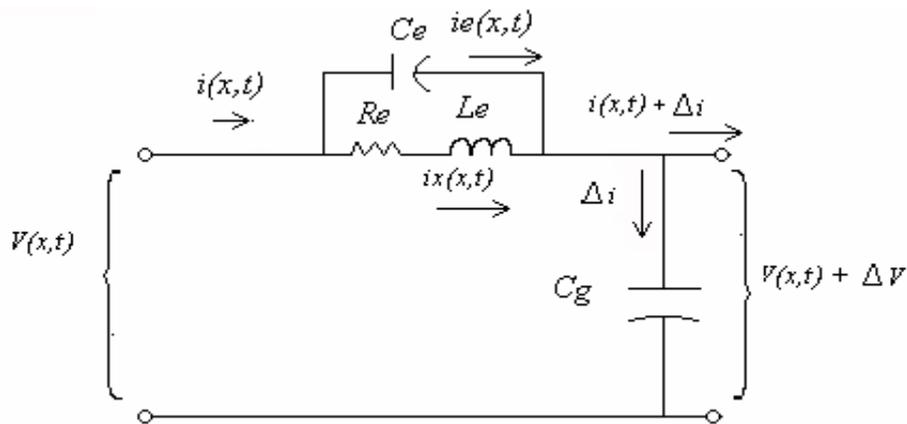


Figura 2.2 - Circuito equivalente do segmento elementar de um enrolamento contínuo. O segmento tem comprimento Δx .

Então, o comportamento das grandezas elétricas tensão e corrente, $V(x,t)$ e $i(x,t)$, ao longo do enrolamento pode ser obtido também de forma análoga ao caso de uma linha de transmissão clássica. A partir da Figura 2.2, num segmento elementar genérico do enrolamento contínuo, tem-se que:

$$V(x,t) - (V(x,t) + \Delta V) = \left(Re ix(x,t) + Le \frac{\partial ix(x,t)}{\partial t} \right) \Delta x \quad (2.1)$$

$$i(x,t) - (i(x,t) + \Delta i) = Cg \frac{\partial V(x,t)}{\partial t} \Delta x \quad (2.2)$$

Tomando-se o limite quando $\Delta x \rightarrow 0$, de forma que a análise seja diferencial, as equações anteriores transformam-se em :

$$\frac{\partial V(x,t)}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta x} = - \left(Re ix(x,t) + Le \frac{\partial ix(x,t)}{\partial t} \right) \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta i}{\Delta x} = -Cg \frac{\partial V(x,t)}{\partial t} \quad (2.4)$$

Este sistema de equações diferenciais, (2.3) e (2.4), não pode ser ainda resolvido, pelo fato de as correntes envolvidas serem diferentes entre si. Afinal, de acordo com a Figura 2.2, pela capacitância Ce passa a corrente $ie(x,t)$. Isto torna $i(x,t)$ diferente de $ix(x,t)$. Matematicamente, o sistema obtido de equações diferenciais parciais apresenta duas equações e três incógnitas, sendo então necessária uma terceira equação ou a eliminação de uma das incógnitas. Para tanto, deve-se considerar que a corrente que entra no segmento, $i(x,t)$, corresponde à soma da corrente que passa pelos elementos Re e Le somada à corrente passa pela capacitância Ce . Logo,

$$i(x,t) = ix(x,t) + ie(x,t) \quad (2.5)$$

Considerando a queda de tensão na capacitância entre espiras, Ce , a corrente nessa capacitância será :

$$\frac{\partial V(x,t)}{\partial x} = -\frac{1}{\Delta x Ce} \int_0^t ie(x,t)dt \quad (2.6)$$

Neste ponto é importante considerar uma importante particularidade da análise de um enrolamento contínuo: O segmento mais elementar de um enrolamento é aquele entre duas espiras. Conseqüentemente, dois segmentos elementares perfazem três espiras, e assim sucessivamente. Portanto, um enrolamento contínuo que contenha N espiras e apresente um comprimento ℓ , terá como o segmento mais elementar com o comprimento dado por :

$$\Delta x = \frac{\ell}{N} \quad (2.7)$$

Assim, quando o número de espiras, N , tende a ser infinito o comprimento do segmento elementar, Δx , tende a ser zero, tornando-se um elemento infinitesimal. Substituindo a expressão (2.7) na expressão (2.6) e diferenciando-a em relação a t , obtém-se: :

$$\frac{\partial^2 V(x,t)}{\partial x \partial t} = -\left(\frac{N}{Ce \ell}\right) ie(x,t) \quad (2.8)$$

Portanto, a Equação (2.5) torna-se :

$$ix(x,t) = i(x,t) + \left(\frac{Ce \ell}{N}\right) \frac{\partial^2 V(x,t)}{\partial x \partial t} \quad (2.9)$$

Aplicando-se a expressão (2.9) à expressão (2.3) e repetindo-se a expressão (2.4), obtém-se o seguinte sistema, que pode agora ser resolvido :

$$\frac{\partial V(x,t)}{\partial x} = -Re \left(i(x,t) + \left(\frac{Ce \ell}{N}\right) \frac{\partial^2 V(x,t)}{\partial t \partial x} \right) - Le \left(\frac{\partial i(x,t)}{\partial t} + \left(\frac{Ce \ell}{N}\right) \frac{\partial^3 V(x,t)}{\partial t^2 \partial x} \right) \quad (2.10)$$

e

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = -Cg \frac{\partial V(x,t)}{\partial t} \quad (2.11)$$

Para a resolução desse sistema é possível obter uma só equação diferencial, através de substituições, feitas a seguir, optando-se por resolver o sistema pela tensão, $V(x,t)$.

Então, derivando-se a Equação (2.11) em relação a t , de ambos os lados esta se torna :

$$\frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial x \partial t} = -Cg \frac{\partial^2 V(x,t)}{\partial t^2} \quad (2.12)$$

Derivando-se agora a Equação (2.10) de ambos os lados, em relação a x , e utilizando-se das expressões (2.11) e (2.12), e obtém-se uma equação diferencial em $V(x,t)$, somente :

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 V(x,t)}{\partial x^2} = & -Re \left(-Cg \frac{\partial V(x,t)}{\partial t} + \left(\frac{Ce \ell}{N} \right) \frac{\partial^3 V(x,t)}{\partial t \partial x^2} \right) + \\ & -Le \left(-Cg \frac{\partial^2 V(x,t)}{\partial t^2} + \left(\frac{Ce \ell}{N} \right) \frac{\partial^4 V(x,t)}{\partial t^2 \partial x^2} \right) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Esta é, então, a equação clássica que descreve o comportamento de enrolamentos contínuos frente a surtos. Sua solução analítica completa é significativamente mais complexa que a da equação da onda em linhas de transmissão simples. O método clássico propõe que a solução dessa equação considera o uso de transformadas de Laplace e de suas propriedades. Para isso, a solução da equação é dividida em três passos, cada um referente um intervalo de tempo distinto, contados a partir da incidência do surto de tensão[16]. Esses intervalos são :

Intervalo Inicial : Desde o instante $t = 0$ até o instante $t = 0_+$;

Intervalo Intermediário : Desde $t = 0_+$ até o início do regime permanente ;

Intervalo Final : Desde o início do regime permanente até um tempo infinito;

Então, ao se aplicar transformadas de Laplace à Equação (2.13) , a solução terá a seguinte expressão :

$$V(x, s) = V(x = 0, s) \left(\frac{\sinh(\alpha(\ell - x))}{\sinh(\alpha \ell)} \right) \quad (2.14)$$

Na qual s refere-se à frequência, $V(x = 0, s)$ refere-se à transformada de Laplace da expressão analítica da tensão aplicada na entrada do enrolamento, em $x = 0$. Ainda, o parâmetro α é dado por :

$$\alpha^2 = \left(\frac{R e C g s + L e C g s^2}{1 + \frac{R e C e l s + s^2 L e C e l}{N}} \right) \quad (2.15)$$

Ainda de acordo com o método clássico, considera-se que o surto incidente seja do tipo degrau de tensão, de amplitude V_0 .

A divisão da solução em três passos referentes aos três instantes descritos anteriormente é inteiramente providencial. Afinal, essa divisão permite o uso de propriedades bastante simples das transformadas de Laplace, que por sua vez facilitam por demais a obtenção da solução da Equação (2.13) para os intervalos inicial e final. Esses resultados são então utilizados para a obtenção da solução válida para o intervalo intermediário, que requer um pouco mais de sofisticação.

Assim sendo, de acordo com [16], apresenta-se a seguir uma breve descrição da solução para os intervalos inicial e final, por serem essas soluções as mais simples. Ao fim da apresentação descrição, a solução para o intervalo intermediário é apresentada, também de acordo com o método clássico.

2.1.1.1 - Intervalo Inicial de Análise

Esse intervalo corresponde ao exato instante em que o surto incide na entrada do enrolamento. Para esse intervalo, o uso do teorema do valor inicial das transformadas de Laplace permite a obtenção de resultados interessantes. Daí, aplicando o referido teorema à Equação (2.15) se verifica que o valor de α tende a um valor constante, independente de s :

$$\lim_{t \rightarrow 0} \alpha = \lim_{s \rightarrow \infty} \alpha(s) = \lim_{s \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{Re Cg s + Le Cg s^2}{1 + \frac{Re Ce l s + s^2 Le Ce l}{N}}} = \sqrt{\frac{N Cg}{Ce l}} \quad (2.16)$$

Aplicando-se simultaneamente o mesmo limite à Equação (2.14), se obtém que

$$\lim_{t \rightarrow 0} V(x,t) = \lim_{s \rightarrow \infty} s V(x,s) = \lim_{s \rightarrow \infty} s \frac{Vo}{s} \left(\frac{\sinh(\alpha(\ell - x))}{\sinh(\alpha \ell)} \right) \quad (2.17)$$

Ou

$$\lim_{t \rightarrow 0} V(x,t) = Vo \left(\frac{\sinh\left(\sqrt{\frac{N Cg}{Ce l}} (\ell - x)\right)}{\sinh\left(\sqrt{\frac{N Cg}{Ce l}} \ell\right)} \right) \quad (2.18)$$

Então, considerando o valor de α dado pela Equação (2.16), a Figura 2.3 apresenta os gráficos da expressão (2.18) para valores de $\alpha \ell = 1; 2,5$ e 10 . Nestes gráficos, a abscissa é considerada como sendo por unidade de comprimento, ℓ , enquanto que a tensão ao longo do enrolamento é considerada por unidade da amplitude do degrau, Vo .

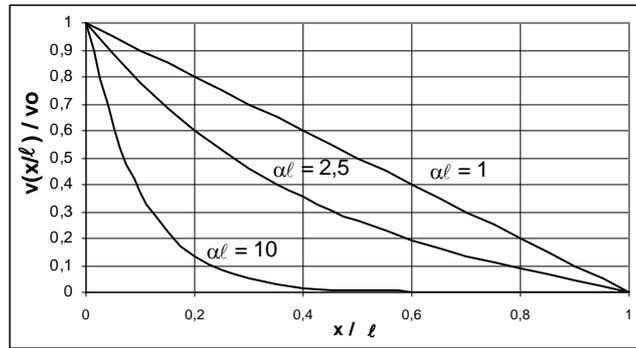


Figura 2.3 – Distribuição de tensão ao longo do enrolamento, no instante inicial para alguns valores de $\alpha\ell$.

Pelos gráficos da Figura 2.3 se percebe que a distribuição de tensão ocorre instantaneamente ao longo de todo o enrolamento, sem haver intervalo de propagação do surto, diferentemente do caso de linhas de transmissão. A razão disso é que no instante $t = 0$ a presença das capacitâncias entre espiras, C_e , garante que a divisão de tensão ocorra ao longo do enrolamento, a partir da combinação dessas capacitâncias com aquelas distribuídas à terra, C_g . Por outro lado, neste mesmo instante as indutâncias série são ainda um circuito aberto. Portanto, no instante $t = 0$, o enrolamento pode ser considerado uma rede de capacitâncias distribuídas, multiplamente combinadas em série e em paralelo. Essas capacitâncias carregam-se instantaneamente, por não haver praticamente resistências em série com as mesmas. A Figura 2.4 apresenta o circuito equivalente de um enrolamento no instante inicial da aplicação do surto :

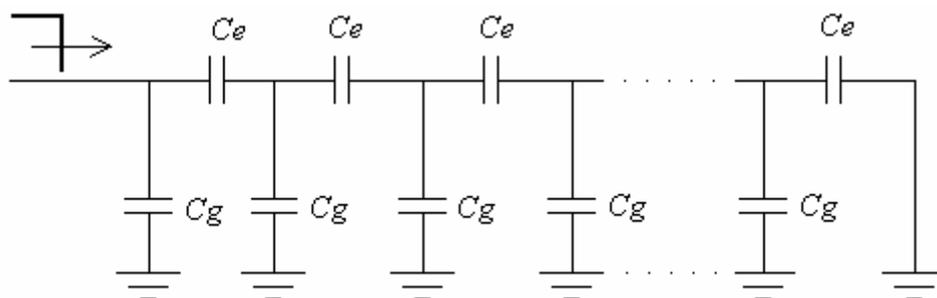


Figura 2.4 – Representação do enrolamento para o instante inicial da incidência do surto.

Conseqüentemente, valores de C_e e C_g combinados entre si e com os valores do comprimento do enrolamento, ℓ , e do número de espiras, N , é que definirão o grau de uniformidade da distribuição da tensão. Usualmente [16,32], enrolamentos contínuos acondicionados em tanques de óleo ou em isolamento a seco, de resina, apresentam o produto NC_g com valores de pelo menos 10.000 vezes valores de $C_e \ell$. Então, de acordo com a Equação (2.16), valores usuais de α são, pelo menos, da ordem de 100 (cem).

Conseqüentemente ao comportamento predominante do enrolamento como uma rede de capacitores associados, a sua capacitância equivalente apresentada ao surto, C_{eq} , é calculada aplicando-se o teorema do valor inicial [16]:

$$C_{eq} = \frac{C_g}{\alpha} \operatorname{cotanh}(\alpha \ell) = \sqrt{\frac{C_g C_e \ell}{N}} \operatorname{cotanh}\left(\sqrt{\frac{NC_g}{C_e \ell}} \ell\right) \quad (2.19)$$

Esse resultado demonstra como transformadores de enrolamentos contínuos se comportam capacitivamente frente a surtos de tensão, no instante da incidência desses.

Ainda em relação à distribuição instantânea de tensão ao longo do enrolamento, é importante notar como o aumento dos valores de $\alpha \ell$ implica na concentração do campo elétrico nas primeiras espiras do enrolamento. Uma vez que a solitação dielétrica dos isolamentos elétricos se dá pela intensidade do campo elétrico aplicado, se nota que os projetos usuais de enrolamentos são inerentemente passíveis de falhas nas primeiras espiras quando da incidência de surtos, uma vez que eles apresentam valores de $\alpha \ell$ elevados. Para isso, considere que no instante $t = 0$, da aplicação do surto, o campo elétrico ao longo de x pode ser obtido a partir da derivação da expressão de $V(x,t)$, da Equação (2.14) :

$$E(x,t) = -\operatorname{Grad}(V(x,t)) = -\frac{\partial V(x,t)}{\partial x} = \alpha V_0 \left(\frac{\cosh(\alpha \ell (1 - x/\ell))}{\operatorname{senh}(\alpha \ell)} \right) \quad (2.20)$$

Considerando como referência o campo elétrico na condição de uniformidade, E_0 , dado por :

$$E_0 = \frac{V_0}{\ell} \tag{2.21}$$

A Equação (2.20) é arrumada com base no valor de E_0 , para facilidade de representação gráfica :

$$\frac{E(x,t)}{E_0} = \alpha \ell \left(\frac{\cosh(\alpha \ell (1 - x/\ell))}{\sinh(\alpha \ell)} \right) \tag{2.22}$$

A Figura 2.5 apresenta os gráficos do campo elétrico distribuído ao longo do enrolamento, em $t = 0$, para os mesmos valores de $\alpha \ell$ usados na Figura 2.4. Desses gráficos se percebe que o caso de $\alpha \ell = 1$ implica num campo elétrico uniformemente distribuído ao longo do enrolamento, já no instante inicial. Entretanto, enrolamentos que apresentem características que impliquem em valores de $\alpha \ell$ acima da unidade terão o campo elétrico nas espiras iniciais dado por $\alpha \ell$ vezes o campo uniforme, o que representará uma solicitação à isolamento do enrolamento no instante da incidência do surto.

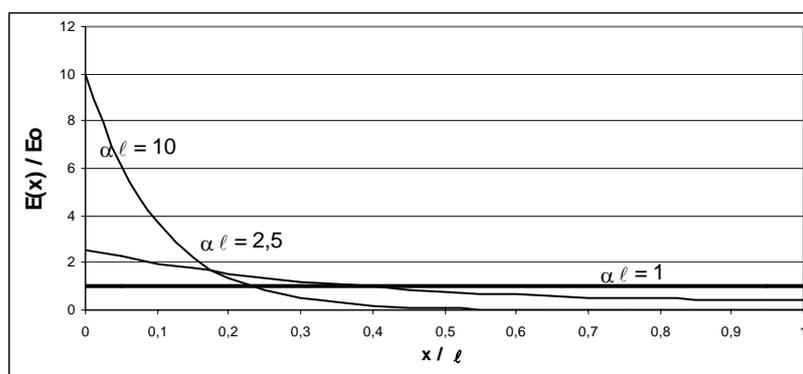


Figura 2.5 – Campo Elétrico ao longo do enrolamento, para os mesmos valores de $\alpha \ell$

2.1.1.2 - Intervalo Final de Análise

A análise do comportamento do enrolamento no intervalo final se dá de forma análoga à análise do intervalo inicial. Então, o teorema do valor final, das transformadas de Laplace, é utilizado. Considerando que um mesmo degrau de tensão, com mesma amplitude máxima, V_0 , é aplicado na origem do enrolamento contínuo homogêneo, estando o outro extremo aterrado, tem-se que a tensão tem o seguinte valor, no estado permanente :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} V(x,t) = \lim_{s \rightarrow 0} s V(x,s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{V_0 \left(\frac{\sinh(\alpha(\ell - x))}{\sinh(\alpha \ell)} \right)}{s} \quad (2.23)$$

Por sua vez, ao aplicar o limite acima na Equação(2.16) se percebe que valor de α torna-se nulo :

$$\lim_{s \rightarrow 0} \alpha(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \sqrt{\frac{R e C g s + L e C g s^2}{1 + R e C e s + s^2 L e C s}} = 0 \quad (2.24)$$

Desta forma, o limite da expressão (2.23) torna-se :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} V(x,t) = \lim_{\alpha \rightarrow \infty} V_0 \left(\frac{\sinh(\alpha(\ell - x))}{\sinh(\alpha \ell)} \right) = V_0 \left(\frac{\ell - x}{\ell} \right) \quad (2.25)$$

Da qual conclui-se que a distribuição final de tensão ao longo do enrolamento contínuo tende a ser uniforme ao longo dele, independentemente das capacitâncias, que são determinantes somente na distribuição inicial da tensão. Este resultado se deve ao fato que após um longo período desde a incidência do surto ocorre o completo carregamento elétrico das capacitâncias e magnético das indutâncias. Uma vez que o enrolamento é homogêneo, a distribuição final uniforme se dará inerentemente. Conseqüentemente, o campo elétrico torna-se constante ao longo do enrolamento, dado por :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E(x,t) = \frac{V_o}{\ell} = E_o \quad (2.26)$$

Esses resultados somados aos resultados referentes ao intervalo inicial permitem concluir que enrolamentos contínuos que apresentem valores de $\alpha\ell$ bem próximos à unidade já apresentam condições para que surtos incidentes alcancem instantaneamente o estado final de distribuição sem a ocorrência de transitórios intermediários. Ainda que seja de realização difícil[16], essa é uma característica importante de enrolamentos que pode sempre ser considerada ao se projetá-los.

2.1.1.3 - Intervalo Intermediário de Análise

Após o conhecimento da distribuição da tensão ao longo de enrolamentos contínuos nos instantes inicial e final desde a incidência de um surto de tensão do tipo degrau, é necessário conhecer como se comporta essa distribuição nos instantes intermediários. Conforme concluído anteriormente, enrolamentos homogêneos que apresentem valores de $\alpha\ell$ próximos à unidade tendem a alcançar o estado permanente imediatamente após incidência do surto. Não obstante, conforme já mencionado, a maioria dos enrolamentos de transformadores existentes apresenta $\alpha\ell$ superior a 100. Portanto, na maioria dos enrolamentos há um período intermediário, durante o qual as indutâncias distribuídas pelo enrolamento iniciarão o acúmulo de energia magnética, sofrendo influência das capacitâncias já carregadas. Há, portanto, uma interação entre esses dois tipos de elementos, que permitirá a manifestação de ressonâncias nas frequências naturais do enrolamento [6-9,16,17], causando tensões oscilantes que podem ainda representar a elevação do campo elétrico em segmentos do enrolamento, segundo sua característica construtiva. Portanto, essas ressonâncias significam mais solicitações ao isolamento do enrolamento e conseqüentes ocorrências de falhas. Muito embora a resistência distribuída do enrolamento pudesse dissipar energia, atenuando amplitudes das sobretensões ressonantes, na prática, verifica-se que essa resistência distribuída tem realmente pouco efeito na atenuação das oscilações[16], o que faz com que essa resistência seja freqüentemente desconsiderada.

Para esse intervalo intermediário, a obtenção da expressão da tensão ao longo do enrolamento, após a incidência de um degrau de tensão V_0 , pode se dar pela transformada inversa da expressão de $V(x,s)$, da Equação (2.14). Entretanto, como o cálculo é consideravelmente complexo, mesmo com a desconsideração da resistência série, R_e [16], é utilizado o Método de Separação de Variáveis, que faz o uso dos resultados obtidos nos intervalos final e inicial para as condições de contorno.

Considere a Equação (2.13), que descreve de forma diferencial a tensão ao longo do enrolamento contínuo. Nessa equação, $V(x,t)$, é função do espaço, x , e do tempo, t . O Método de Separação de Variáveis preconiza que a expressão analítica de $V(x,t)$ é o produto de uma função do tempo por uma outra função do espaço, separadamente. A expressão de $V(x,t)$ é, então [16]:

$$V(x,t) = V_0 \left(\frac{\ell - x}{\ell} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ k_n \operatorname{sen} \left(\frac{n\pi x}{\ell} \right) \cos \left(\frac{n\pi t}{\ell \sqrt{L_s C_g + \left(\frac{n\pi}{\ell} \right)^2 \left(\frac{C\ell}{N} \right)}} \right) \right\} \quad (2.27)$$

Onde

$$k_n = \frac{2V_0}{\ell} \int_0^{\ell} \left(\frac{\operatorname{senh}(\alpha(\ell - x))}{\operatorname{senh}(\alpha\ell)} - \frac{\ell - x}{\ell} \right) \operatorname{sen} \left(\frac{n\pi x}{\ell} \right) dx \quad (2.28)$$

e

$$\alpha = \sqrt{\frac{N C_g}{C\ell}} \quad (2.29)$$

Para ilustrar o resultado obtido, na Figura 2.6 é mostrado o gráfico do comportamento da tensão ao longo do tempo num ponto fixo de um enrolamento contínuo hipotético. O ponto de análise está a uma distância de 15 % do início do enrolamento, onde foi aplicado o degrau de tensão em $t = 0$. O gráfico foi obtido a partir da Equação

(2.27) e apresenta a ordenada normalizada em V_0 . Neste gráfico se pode observar a ocorrência de sobretensões ao longo do tempo, neste ponto do enrolamento. A Figura 2.7 mostra, também com grandezas normalizadas, o comportamento da distribuição de tensão ao longo desse mesmo enrolamento, em cinco instantes distintos : $t = 0$; 1 ; 1,75 ; 3 e 6,6 μs . Desta figura, verifica-se que a ocorrência de sobretensões não se dá num só local, mas sim ao longo de todo o enrolamento, à medida que o tempo passa e as oscilações naturais do enrolamento se manifestam.

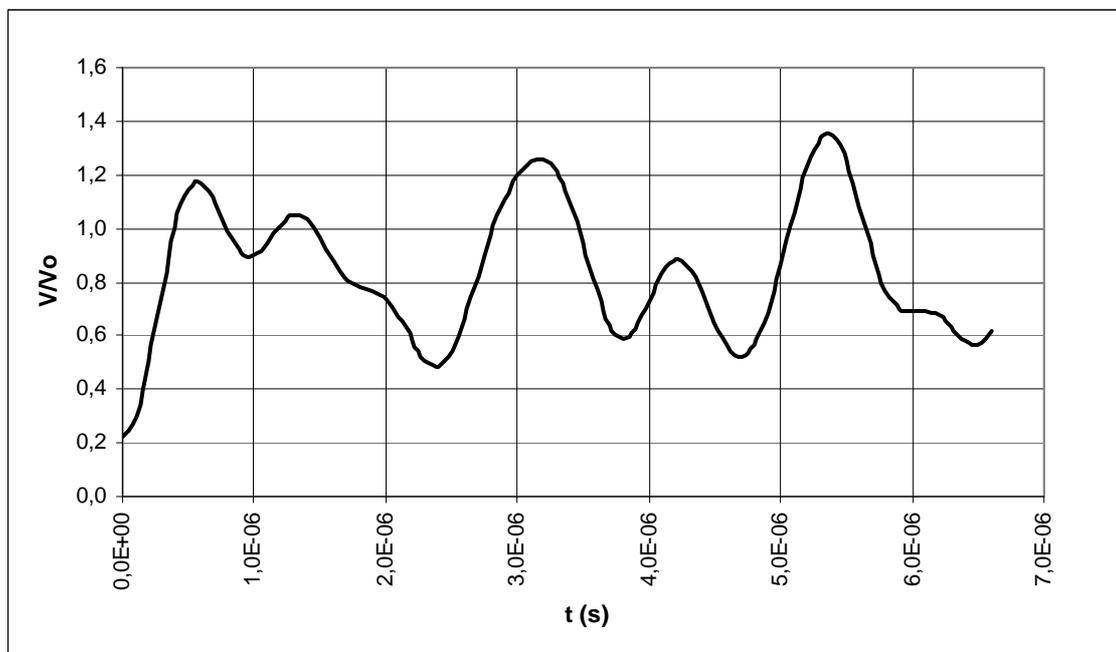


Figura 2.6 - Tensão ao longo do tempo em $x / \ell = 0,15$.

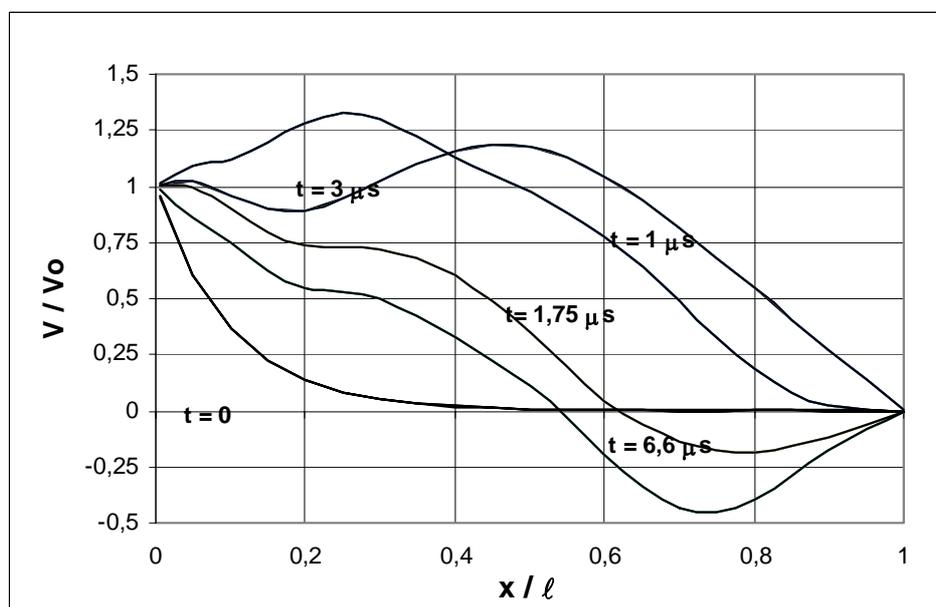


Figura 2.7 - Tensão ao longo do enrolamento em cinco instantes diferentes.

Os dados do enrolamento hipotético, usados na Equação (2.27) são:

$$\ell = 0,35 \text{ m}; \quad \frac{C_s \ell}{N} = 1,05 \text{ pFm/espira}; \quad C_g = 85,6 \text{ nF/m} \text{ e } L_s = 10 \text{ mH/m} \quad (2.30)$$

Conseqüentemente, de acordo com a Equação (2.29),

$$\alpha \ell = \sqrt{\frac{N C_g}{C_e \ell}} \ell = \sqrt{\frac{85,6 \text{ nF/m}}{1,05 \text{ pFm/espira}}} 0,35 \cong 100 \quad (2.31)$$

Desta forma, se percebe então que as equações obtidas pelo método analítico não apresentam facilidades para lidar, mesmo tendo esse enrolamento características ideais. Portanto, tal como se verifica na literatura sobre o assunto, os resultados obtidos pelo método clássico devem ser utilizados somente como base para o estudo de casos reais. Também, fica clara a necessidade de ferramentas computacionais para a análise desse problema em condições que se considerem fatores construtivos reais de enrolamentos de transformadores.

2.1.2 - A Transferência de Surtos de Tensão Através de Enrolamentos de Transformadores

No que diz respeito à análise da transferência de surtos de tensão através de enrolamentos de transformadores, um dos principais itens a se considerar é a composição de surtos de tensão do tipo rápido no domínio da frequência. Esses surtos de tensão possuem um espectro de frequências relativamente amplo, porém as componentes de baixas frequências têm importante presença. Esse fato, por si, já descarta o princípio de funcionamento de blindagens eletromagnéticas para total bloqueio de surtos, citadas no capítulo 1. Afinal, para as baixas frequências (de zero até alguns hertz) que compõem um surto, o caminho oferecido para o desvio do surto à terra, que é aquele formado pela reatância capacitiva distribuída entre a blindagem e o corpo do enrolamento sob surto, terá reatância capacitiva relativamente alta, fazendo com que componentes dessas frequências não utilizem esse suposto caminho. Então, o principal caminho pelo qual se dá transferência de surtos, mesmo nos casos em que há a blindagem, é mesmo o circuito magnético do transformador. Assim, uma vez que um surto de tensão incidente num enrolamento de um transformador causa a variação do fluxo magnético no interior do mesmo, de acordo com a Lei de Lenz, essa mesma variação faz surgir uma diferença de potencial nos terminais dos enrolamentos adjacentes que são enlaçados por esse acréscimo de fluxo magnético. Entretanto, ainda considerando a Lei de Lenz, é importante frisar que esse acréscimo de fluxo é relativamente pequeno. Pois, embora o surto possa ter amplitude máxima muito maior que a tensão nominal do enrolamento, a sua duração relativamente curta faz com que o acréscimo de fluxo magnético seja relativamente pequeno. Conseqüentemente, esses pequenos acréscimos de fluxo magnético garantem que a transferência de surtos entre enrolamentos guarde a mesma razão de transformação que a nominal, dada pela razão entre os números de espiras. E, ainda, fazem ainda com que a influência da saturação magnética do circuito seja muito pequena.

A quantificação dessas conclusões pode se dar da seguinte forma. Considere inicialmente um transformador que possua num de seus enrolamentos N_1 espiras e que esse enrolamento tenha uma tensão nominal eficaz dada por V_{ef} , em volts. Em regime senoidal nominal, operando a uma frequência f (em hertz), o fluxo magnético (em weber) máximo,

$\phi_{m\acute{a}x}$, no circuito magnético do transformador será dado pela conhecida expressão[16], da Equação (2.32):

$$\phi_{m\acute{a}x} = \frac{V_{ef} \sqrt{2}}{2\pi f N_1} \quad (2.32)$$

Considere agora que um surto de tensão incidente nesse mesmo enrolamento tenha o aspecto de uma função exponencial que sofre um corte súbito quando praticamente atinge o valor de pico, V_o . Desta forma a representação matemática deste surto será :

$$\Delta V(t) = \begin{cases} V_o (1 - e^{-t/\tau}), & \text{para } 0 \leq t \leq 5\tau \\ 0, & \text{para } t > 5\tau \end{cases} \quad (2.33)$$

Onde τ é a constante de tempo do crescimento exponencial. Decorrido um intervalo de tempo correspondente a 5τ , a onda sofre uma queda brusca para tensão nula. A escolha desse tipo de surto permite que se represente de forma mais simples que através da dupla-exponencial[16] os tipos mais freqüentes de surto de tensão [33]. Na Figura 2.8 está mostrado o gráfico desse surto de tensão.

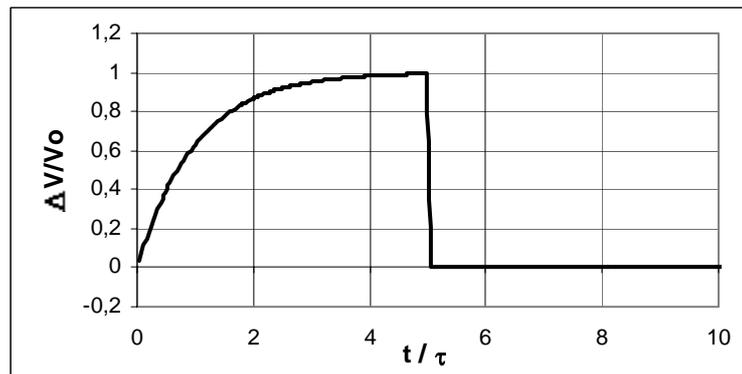


Figura 2.8 - Aspecto do surto de tensão incidente no enrolamento

Aplicando-se a *Lei de Lenz* para os terminais do enrolamento, a diferença de potencial entre esses terminais , no intervalo desde $t = 0$ até 5τ , será :

$$\Delta V(t) = N_1 \frac{d\phi}{dt} = V_o(1 - e^{-t/\tau}) \quad (2.34)$$

Da Equação (2.33) se calcula então a variação de fluxo magnético decorrente da incidência do surto, desde o instante $t = 0$ até o instante $t = 5 \tau$:

$$\phi(t = 5\tau) - \phi(t = 0) = \frac{V_o}{N_1} \int_0^{5\tau} (1 - e^{-t/\tau}) dt = \frac{V_o}{N_1} (t + \tau e^{-t/\tau})_0^{5\tau} \quad (2.35)$$

Então, desde que o surto incide até que atinja sua amplitude máxima, após 5τ , a variação de fluxo no circuito magnético do transformador, $\Delta\phi_1$, será:

$$\Delta\phi_1 = \phi(t = 5\tau) - \phi(t = 0) = \frac{V_o}{N_1} (5\tau + \tau e^{-5} - 0 - \tau) \cong \frac{4\tau V_o}{N_1} \quad (2.36)$$

Por unidade de fluxo máximo nominal do regime senoidal, dado pela Equação (2.30), essa variação de fluxo magnético será, então:

$$\frac{\Delta\phi_1}{\phi_{m\acute{a}x}} \cong \frac{\frac{4\tau V_o}{N_1}}{\frac{V_{ef}\sqrt{2}}{2\pi f N_1}} = \frac{8\pi f \tau V_o}{V_{ef}\sqrt{2}} \quad (2.37)$$

Portanto, essa variação percentual é independente do número de espiras do enrolamento, N_1 . Por outro lado, considerando a Lei de Lenz e a Equação (2.34) esse acréscimo de fluxo ao enlaçar um enrolamento de N_2 espiras fará aparecer em seus terminais uma diferença de potencial dada por:

$$\Delta V_2(t) = \frac{N_2}{N_1} V_o(1 - e^{-t/\tau}), \quad (2.38)$$

o que demonstra a transferência do surto na razão nominal de transformação.

Agora, para ilustrar quão pequena é a variação percentual de fluxo decorrente da incidência de surtos, considere que a tensão nominal do enrolamento seja de 220 V e que sua frequência nominal seja de 60 Hz. Então, na Tabela I estão apresentados diversos valores de variação de fluxo magnético por unidade de máximo fluxo nominal, calculados de acordo com a Equação (2.37). Esses valores representam os tipos mais freqüentes de surto, através das diferentes combinações de V_o e de τ :

τ , em s	V_o , em V	$\Delta\phi_l / \phi_{m\acute{a}x}$
10^{-9}	1000	$4,85 \times 10^{-6}$
10×10^{-9}	1000	$48,5 \times 10^{-6}$
240×10^{-9}	4000	$4,65 \times 10^{-3}$
10^{-6}	1000	$4,85 \times 10^{-3}$
10^{-9}	4000	$19,4 \times 10^{-6}$
10×10^{-9}	4000	194×10^{-6}
10^{-6}	4000	$19,4 \times 10^{-3}$

Tabela I - Variação de fluxo magnético de surto, por unidade de fluxo nominal senoidal, para tipos mais freqüentes de surtos incidentes.

Dos resultados da Tabela I se percebe que os surtos mais freqüentes causam variações percentuais pequenas de fluxo magnético. Mas são justamente essas pequenas variações de fluxo magnético que ao passarem pelo interior do enrolamento adjacente do mesmo circuito magnético do transformador fazem surgir uma diferença de potencial entre os terminais desse enrolamento adjacente, de acordo com a Lei de Lenz. Portanto, esse surto de tensão transferido deveria apresentar a mesma forma da tensão incidente e com amplitude proporcional à razão entre os números de espiras dos enrolamentos atingido e transferido. Outra conclusão muito importante dos resultados da Tabela I é que a pequena variação de fluxo magnético causada pela incidência de surtos faz com que o acréscimo de fluxo magnético seja insuficiente para saturar um transformador. Portanto, embora seja bem possível que a saturação magnética tenha alguma influência na transferência de surtos, o fato é que surtos dificilmente saturam transformadores. Um resultado importante mostrado na Tabela I corresponde ao surto do tipo 1,2/50 μ s - 4 kV, que está representado

na terceira linha da Tabela I. Esse surto, com valor de pico de 4 kV é um surto padronizado para ensaios, e nota-se que esse tipo de surto causa uma variação percentual sensivelmente pequena do fluxo máximo (menos que 1 %), tal como os demais surtos.

Esses importantes resultados teóricos são decisivos para entender como se dá a transferência de surtos em transformadores e explicam o fracasso das técnicas de bloqueio anteriormente citadas. Ainda, demonstram que a influência da saturação é realmente desprezível.

Entretanto, é importante considerar que a breve análise teórica apresentada considerou premissas simplificadoras, pois não considerou os parâmetros capacitivos do circuito equivalente do enrolamento. De fato, a inerente presença de capacitâncias parasitas em enrolamentos contribuem para alterar as formas de onda de surtos incidente e transferido, podendo vir a excitar frequências naturais desses enrolamentos, a partir de interações com indutâncias distribuídas no interior do mesmo[7,9]. Então, a modelagem mais detalhada de enrolamentos de transformadores, através de circuitos elétricos mais complexos é necessária, o que faz com que o uso de ferramentas computacionais seja mais uma vez imprescindível.

2.2 - O COMPORTAMENTO DE TRANSFORMADORES FRENTE AOS TRANSITÓRIOS ELÉTRICOS NA FREQUÊNCIA INDUSTRIAL - Corrente de *Inrush*

A corrente de *Inrush* é uma sobrecorrente transitória, relativamente intensa, decorrente da energização de circuitos indutivos contendo núcleo magnético saturável a fontes senoidais. Mesmo em circuitos magnéticos lineares se verifica a existência de sobrecorrentes transitórias de energização à fonte senoidal, embora a intensidade seja moderada. A presença do material magnético saturável, bem como de seu magnetismo residual são a causa da intensa elevação da sobrecorrente de energização.

Inicialmente, para entender como a corrente de *inrush* ocorre, considere o caso de um circuito linear e depois os seus resultados serão extrapolados para os casos reais, não-lineares.

Seja um circuito indutivo, representado por um circuito RL -série equivalente, conectado a uma fonte senoidal no instante considerado como $t = 0$, conforme mostrado na Figura 2.9. Considere o circuito RL na condição trivial de corrente inicial nula.

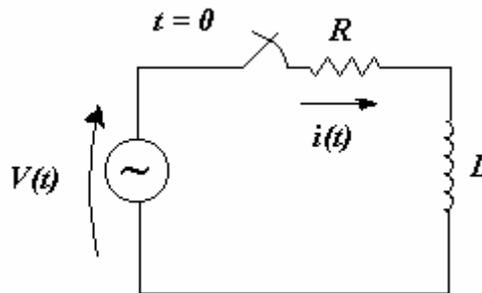


Figura 2.9 - Energização de circuito RL -série por fonte senoidal

Seja a expressão da tensão da fonte dada pela Equação (2.39),

$$V(t) = V_m \text{sen}(\omega t + \theta) \quad (2.39)$$

Onde V_m é a amplitude máxima da tensão senoidal da fonte, ω é a sua frequência angular e θ é o ângulo da tensão no instante da energização, $t = 0$. A corrente no circuito será, a partir das técnicas triviais de circuitos elétricos, dada por

$$i(t) = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \left(\text{sen}(\omega t + \theta - \varphi) + e^{-Rt/L} \text{sen}(\varphi - \theta) \right) \quad (2.40)$$

Para todo $t \geq 0$. Em relação à Equação (2.39), φ será dado por

$$\varphi = \text{arctg}\left(\frac{\omega L}{R}\right) \quad (2.41)$$

Que corresponde ao ângulo de atraso da corrente em relação à tensão, no estado permanente.

Pelas Equações (2.40) e (2.41) se verifica que a condição de corrente nula no instante da energização é sempre obedecida. Também é obedecida a condição de estado

permanente, na qual a corrente senoidal estará atrasada da tensão por um ângulo φ , que depende dos parâmetros R e L , bem como da frequência angular da fonte, ω . Ainda pelas Equações (2.40) e (2.41), verifica-se que desde o instante da energização até a condição de estado permanente, o circuito poderá apresentar, ou não, uma componente transitória contínua. A condição de existência da componente transitória é que no instante da energização o ângulo da tensão, θ , e da carga, φ , se combinem de forma que :

$$\varphi - \theta = 0, \pm \pi, \pm 2\pi, \dots \quad (2.42)$$

Conseqüentemente, essa é uma combinação pouco provável de ocorrer, diante das diversas possibilidades de combinações entre esses ângulos. Portanto, considerando que o ângulo de tensão tem um valor aleatório, provavelmente haverá uma componente transitória exponencialmente decrescente após a energização e sua amplitude, i_{trans} , será dada por :

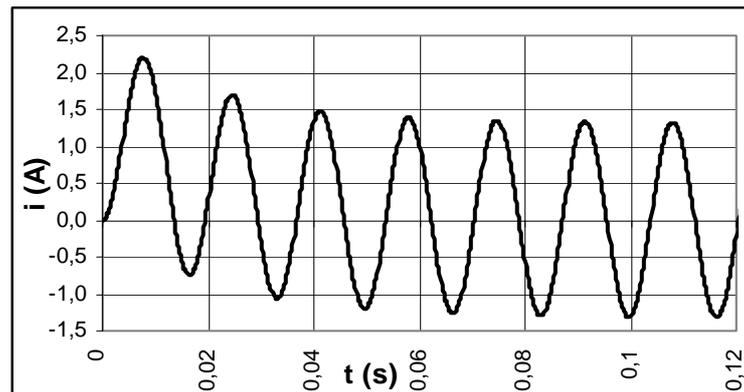
$$i_{trans} = \frac{Vm}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \text{sen}(\varphi - \theta) \quad (2.43)$$

Pela Equação (2.43) se verifica que o valor de pico da componente transitória também depende da combinação dos parâmetros R , L , bem como dos ângulos φ e θ , podendo inclusive vir a ter polaridade negativa. Em valor absoluto a amplitude máxima da componente transitória pode, no máximo, vir a ser igual à amplitude máxima da corrente de regime permanente. Para isso é necessário que

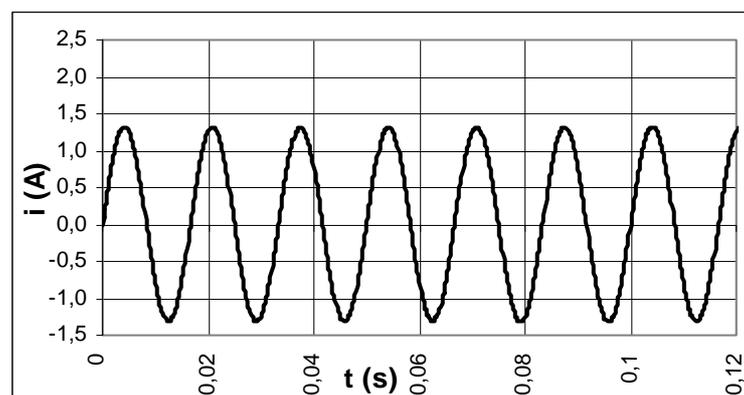
$$\varphi - \theta = \pm \pi/2, \pm 3\pi/2, \dots \quad (2.44)$$

Para ilustrar o comportamento da corrente durante a energização do circuito, nas Figuras 2.10 e 2.11 estão mostradas correntes de energização de um circuito RL -série nas duas condições limites determinadas pelas Equações (2.42) e (2.44) : Na condição de máxima componente transitória e na condição de nenhuma componente transitória. O

circuito apresenta valores de $R = 10 \Omega$, $L = 0,2 \text{ H}$, $V_m = 100 \text{ V}$ a 60 Hz . Conseqüentemente, o valor de φ será $1,43897 \text{ rad}$ ou $82,4 \text{ graus}$. Para a Figura 2.10 o valor inicial de tensão é tal que $\theta = -7,6 \text{ graus}$, enquanto que para a Figura 2.11 o valor inicial de tensão corresponde a um ângulo $\theta = 82,4^\circ$.



**Figura 2.10 - Corrente de energização em circuito RL-série por fonte senoidal .
Presença da componente transitória contínua.**



**Figura 2.11 - Energização de circuito RL-série por fonte senoidal.
Ausência da componente contínua.**

Pelo que foi exposto e pelos gráficos das Figuras (2.10) e (2.11) é possível notar que a intensidade da componente transitória é uma variável aleatória. A probabilidade de que essa componente seja pequena é significativamente inferior à possibilidade de que a

mesma ocorra. Porém, essa probabilidade é a mesma de que a componente transitória seja grande.

Portanto, a provável ocorrência da componente transitória é que causa a sobrecorrente na energização do circuito. Assim sendo, para uma primeira avaliação do comportamento de transformadores energizados em vazio, o circuito *RL*-série analisado anteriormente pode ser considerado como suficiente. Não obstante, os transformadores apresentam uma característica agravante para a ocorrência de sobrecorrentes transitórias de energização ainda maiores que a corrente prevista anteriormente. Essa característica é a saturação magnética, que é típica dos materiais ferromagnéticos que compõem o circuito magnético da grande maioria dos transformadores. Afinal, a saturação magnética causa a redução da indutância de magnetização do circuito, fazendo com que a corrente de energização apresente componente contínua cuja amplitude máxima pode ser pelo menos 10 (dez) vezes superior à corrente eficaz nominal do transformador[16,30,34]. E a existência dessa componente é agora não somente influenciada pelo instante da energização à fonte, mas também do magnetismo residual do material magnético. Por outro lado, a presença da histerese magnética nesse mesmo material contribui para amortecer os picos de corrente transitória, reduzindo ainda que pouco a severidade do evento.

Por essas condicionantes, o estudo do comportamento dessa corrente de energização de um transformador é de extrema complexidade. Para realizar tal estudo, a forma mais viável é a modelagem do comportamento do transformador através de circuitos não-lineares, incluindo a histerese, e a sua solução através de métodos numéricos, computacionais. Com esse intuito, o circuito utilizado para modelar o transformador neste trabalho está baseado na modelagem de histerese desenvolvida pelo autor, publicada em trabalhos anteriores[35-37], cuja abordagem está voltada para representar de forma simplificada transformador através de um circuito não-linear que será solucionado utilizando-se o método TLM. O modelo simplificado de histerese é apresentado a seguir.

2.2.1 - Modelagem Simplificada de Histerese

Considere um transformador monofásico em vazio funcionando em regime senoidal permanente e considere também que associado ao transformador está seu laço de histerese. O circuito representativo desse transformador em vazio é o mesmo que é tradicionalmente utilizado em estudos de transformadores, tal como mostrado na Figura 2.12. Neste circuito a resistência r_s representa a resistência total do enrolamento submetido à fonte senoidal de tensão, enquanto L_s representa a indutância de dispersão, L_m representa a indutância de magnetização, responsável pelo estabelecimento do fluxo magnético no interior do circuito magnético do transformador, e R_p representa as perdas magnéticas no interior desse circuito magnético.

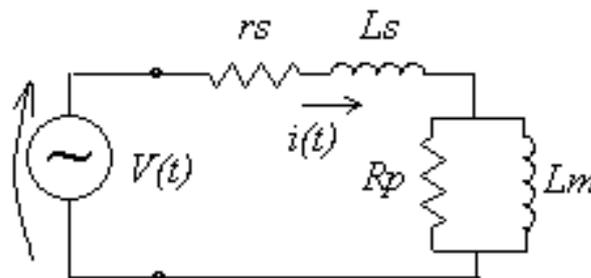


Figura 2.12 - Circuito representativo de transformador em vazio.

Se todos os parâmetros do circuito forem lineares e a tensão aplicada na entrada do transformador for senoidal pura, a corrente na entrada do transformador, $i(t)$, também será puramente senoidal e estará atrasada da tensão de entrada por um ângulo entre zero e noventa graus. O valor exato desse ângulo depende tanto dos parâmetros elétricos do circuito quanto da frequência da fonte senoidal. Em vazio as quedas de tensão nos parâmetros r_s e L_s são usualmente desprezíveis, de forma que praticamente toda a tensão da fonte está aplicada sobre a associação em paralelo dos parâmetros R_p e L_m . Então, o fluxo magnético que se estabelece no circuito magnético do transformador também é senoidal puro. Esse fluxo está em fase com a corrente da indutância L_m . Já a corrente de entrada do transformador é composta pela soma fasorial dessa corrente da indutância L_m com a corrente no resistor R_p .

Então, um gráfico que apresente na sua abscissa valores da corrente de entrada no transformador e na sua ordenada, valores do fluxo magnético, deverá ter o aspecto de uma elipse. Daí, o modelo de histerese proposto considera que o laço de histerese seja uma elipse degenerada, devido ao fato da indutância L_m não ser linear,.

O entendimento do surgimento da elipse pode se dar da seguinte forma : Sejam duas grandezas variáveis senoidalmente no tempo, $x(t)$ e $y(t)$, com defasamento entre elas, θ :

$$x(t) = x_{max} \text{sen}(\omega t) \quad (2.45)$$

$$y(t) = y_{max} \text{sen}(\omega t - \theta) \quad (2.46)$$

As Equações (2.45) e (2.46) definem a equação de uma elipse na forma paramétrica. Essa elipse é visualizada quando a variável tempo é tornada implícita e o gráfico de y versus x é traçado como tendo cada ponto correspondente a um valor de t . Para isso, as Equações (2.45) e (2.46) podem ser arrumadas :

$$\frac{x(t)}{x_{max}} = \text{sen}(\omega t) \quad (2.47)$$

$$\frac{y(t)}{y_{max}} = \text{sen}(\omega t)\cos\theta - \cos(\omega t)\text{sen}\theta \quad (2.48)$$

Ou

$$\frac{x(t)}{x_{max}} = \text{sen}(\omega t) \quad (2.49)$$

$$\frac{1}{\text{sen}\theta} \left(\frac{x(t)}{x_{max}} \cos\theta - \frac{y(t)}{y_{max}} \right) = \cos(\omega t) \quad (2.50)$$

Então, considerando que

$$\text{sen}^2(\omega t) + \cos^2(\omega t) = 1 \quad (2.51)$$

Obtém-se a equação de uma família de cônicas centradas na origem, sobre o plano xy :

$$\left(\frac{x(t)}{x_{max}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\text{sen}\theta}\left(\frac{x(t)}{x_{max}}\cos\theta - \frac{y(t)}{y_{max}}\right)\right)^2 = 1 \quad (2.52)$$

Sendo x_{max} diferente de y_{max} , a Equação (2.52) corresponde a uma elipse no plano xy , centrada na origem. Na Figura 2.13 estão mostrados os gráficos da Equação (2.52) para três diferentes combinações de valores de θ , x_{max} e y_{max} . De acordo com a legenda da Figura 2.13, essas são as combinações:

A : $x_{max} = 3, y_{max} = 1$ e $\theta = 20$ graus;

B : $x_{max} = 3, y_{max} = 1$ e $\theta = 90$ graus e

C : $x_{max} = 2, y_{max} = 1$ e $\theta = 10$ graus

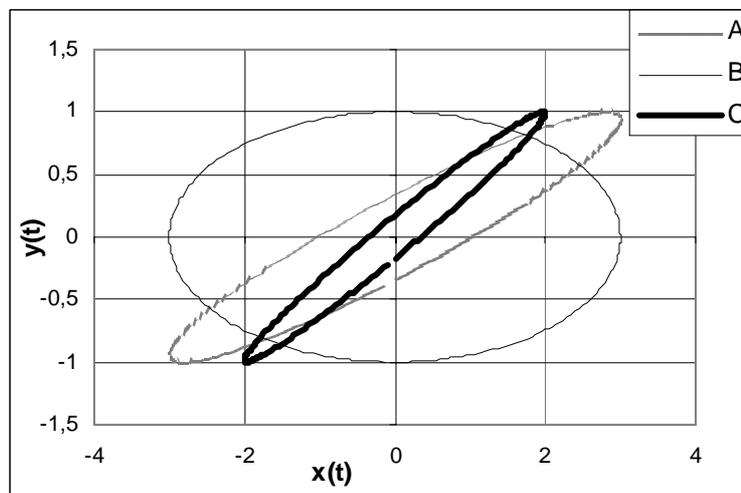


Figura 2.13 - Aspecto das elipses obtidas a partir de três combinações de x_{max} , y_{max} e θ .

Portanto, diferentes combinações implicam em elipses com diferenças de forma e do ângulo de inclinação.

Então, no circuito do transformador com parâmetros lineares, mostrado na Figura 2.12, a corrente de entrada, $i(t)$, faz o papel de $x(t)$, enquanto que a indução magnética no interior do material magnético, $B(t)$, faz o papel de $y(t)$ para que se obtenha

um laço de histerese puramente elíptico, típico de um circuito linear. Agora, para representar a condição real de funcionamento de transformadores, o modelo de histerese proposto considera o fato de que a indutância L_m não é linear, mas sim que apresenta a saturação magnética. Tal característica pode ser depreendida a partir da curva de magnetização normal do transformador, facilmente obtida em regime senoidal[30,34]. Na Figura 2.14 é mostrada uma dessas curvas, obtida de um transformador monofásico de potência de cerca de 100 VA. Como normalmente é difícil avaliar tanto a área da seção reta do circuito magnético do transformador bem como o número de espiras de seus enrolamentos, a grandeza magnética utilizada na ordenada é o enlace de fluxo, λ , cuja relação com a indução e com o fluxo magnético é linear e diretamente proporcional :

$$\phi(t) = B(t)A = \frac{\lambda(t)}{N} \quad (2.51)$$

onde A é a área da seção transversal à passagem do fluxo magnético.

Portanto, o fluxo magnético e o enlace de fluxo são grandezas fasoriais em fase.

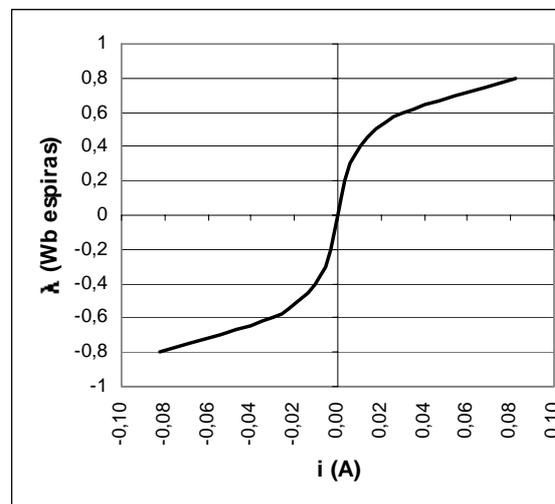


Figura 2.14 - Curva normal de magnetização de um transformador monofásico de potência nominal de cerca de 100 VA.

Em seguida é feito o ajuste da curva normal de magnetização através de uma expressão analítica da corrente como sendo função do enlace de fluxo magnético. Uma

função que representa satisfatoriamente bem curvas desse tipo é a função seno hiperbólico[35-37] :

$$i(\lambda) = m_1 \sinh(m_2 \lambda) \quad (2.54)$$

Onde m_1 e m_2 são constantes de ajuste da curva de magnetização. Então, o modelo propõe que a indutância Lm do circuito da Figura 2.12 seja substituída por uma fonte de corrente dependente cuja expressão seja aquela da Equação (2.54). O circuito representativo do transformador em vazio torna-se então aquele mostrado na Figura 2.15.

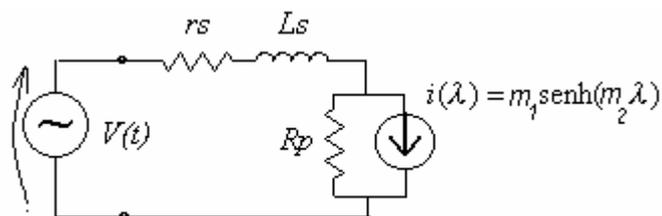


Figura 2.15 - Circuito representativo de transformador em vazio com saturação magnética.

Agora, não só em regime senoidal mas para qualquer fonte de tensão nos terminais do enrolamento, as equações do circuito serão :

$$V(t) = r_s i(t) + L_s \frac{di(t)}{dt} + \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.55)$$

$$i(t) = \frac{1}{R_p} \frac{d\lambda}{dt} + m_1 \sinh(m_2 \lambda) \quad (2.56)$$

Uma vez que as Equações (2.55) e (2.56) formam um sistema de equações não lineares, o mesmo possui solução analítica relativamente complexa. Conseqüentemente, para a solução do sistema se torna mais viável o emprego de métodos numéricos. Trabalhos como [35] e [37] apresentaram propostas da solução pelo método de Euler. Não

obstante, o esforço de cálculo se mostrou razoável, principalmente devido à consideração dos parâmetros série, r_s e L_s . Em os desconsiderando, o sistema é reduzido a uma equação e o esforço de cálculo é menor. Então, com o objetivo de reduzir o esforço de cálculo mas também considerar todos os parâmetros de transformadores, o método numérico TLM será empregado para comparar resultados desse modelo com resultados experimentais.

CAPÍTULO 3

O MÉTODO TLM EM EXEMPLOS

3.1 - A ORIGEM DO MÉTODO : ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DE SURTOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

A origem do método TLM , tal como de outros importantes métodos numéricos [3,16] está em estudos do comportamento transitório de ondas de corrente e de tensão na terminação de linhas de transmissão planas, monofásicas, contendo perdas longitudinais, tendo retorno pelo solo ideal[11,12]. De uma forma geral, nesses estudos se representa toda uma linha à montante do ponto de análise pelo seu circuito equivalente *Thévenin*, consistindo numa fonte de tensão cuja amplitude é o dobro da amplitude da onda de tensão incidente, ligada em série com uma impedância que é a própria impedância de surto da linha, Z_o , dada pela Equação (3.1) :

$$Z_o = \sqrt{\frac{L_e}{C_g}} \quad (3.1)$$

Onde L_e corresponde à indutância distribuída série por unidade de comprimento e C_g corresponde às capacitâncias à terra, distribuídas , por unidade de comprimento da linha.

A Figura 3.1 ilustra essa situação. Nesta figura, o ponto P corresponde ao ponto de terminação da linha. Essa representação da linha descrita anteriormente simplifica sensivelmente o estudo do comportamento da corrente e da tensão na terminação da linha para diversas condições de cargas conectadas. Afinal, tal representação permite o uso de técnicas triviais de análise de circuitos elétricos[15,34].

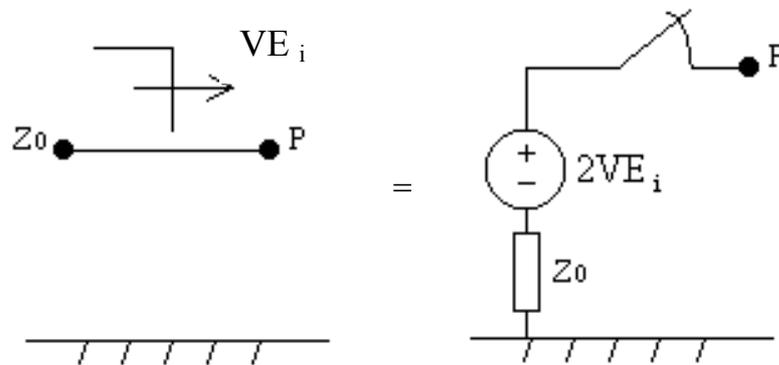


Figura 3.1 - Representação de terminação de linha para estudo de efeitos de cargas conectadas.

Embora essa representação tenha sido muito difundida no estudo de terminações de linhas [15,16,34], foi Johns [11] quem a aplicou para além das terminações, estendendo o ponto P de análise ao longo de toda a linha. Igualmente importante foi que a idéia de Johns permitiu que se considerassem as perdas Joule sofridas pelas ondas de tensão e de corrente ao longo da linha. Isto acarretou na solução de problemas reais de propagação de surtos em linhas de transmissão, de forma mais rápida e precisa que os métodos numéricos então conhecidos[34]. Para tanto, uma linha real, contendo parâmetros distribuídos, deve ser modelada por uma associação série de um número finito de trechos elementares de comprimento infinitesimal e contendo parâmetros concentrados. Então, cada um desses trechos apresentará um ponto P , semelhante àquele citado anteriormente. Conseqüentemente, cada um dos diversos pontos P existentes ao longo da linha terá um circuito *Thévenin* do lado esquerdo e outro do lado direito. Assim, para cada instante de análise são realizados os cálculos de reflexões e de incidências de ondas de tensão e de corrente nesses diversos pontos, considerando as conexões que cada trecho tem com os trechos vizinhos. A representação das perdas longitudinais se dá pela simples adição da impedância de surto com a resistência-série equivalente de cada trecho. Por sua vez, a representação das perdas transversais se dá pela inclusão da condutância equivalente de cada trecho entre o ponto P e o solo. Dada a sua simplicidade para esse tipo de aplicação, o

método consolidou-se rapidamente, e recebeu o nome baseado no ambiente de sua origem, a linha de transmissão : *Transmission Line Modelling*. Rapidamente o método ganhou um grande número de usuários, que logo vislumbraram a aplicação do mesmo em todos os tipos de circuitos, inclusive naqueles contendo parâmetros concentrados, lineares ou não[18-20]. Neste ponto, se torna muito importante esclarecer que, no que diz respeito à modelagem de parâmetros concentrados, o método TLM difere significativamente do método de transformação dos elementos indutor e capacitor em *stubs*[47], apesar desses métodos apresentarem origens semelhantes. Tal como citado em [16], a transformação de um capacitor em *stub*, por exemplo, considera que um capacitor C_e seja substituído por uma impedância Z_o , tal como dada na Equação (3.1), na qual o valor da capacitância a ser aplicado deva ser C_e , enquanto que o valor da indutância deve ser o menor possível. Por outro lado, o método TLM prevê que a representação *stub* de um capacitor deva ter a impedância com o valor dado exata e somente por:

$$Z_c = \frac{\Delta t}{2C_e} \quad (3.2)$$

,onde Δt é o passo de integração numérica e corresponde ao tempo de ida e volta da onda, dentro do *stub*. Assim, se explica a divisão por 2, que corresponde ao tempo de ida, somente[11,12]. Com essa fixação do tempo se reduz substancialmente o erro em que implica o uso do método da simples transformação. Entretanto, a representação *stub* para um elemento concentrado não é a única prevista pelo método TLM, que também prevê a modelagem *link*. Neste caso, a impedância do capacitor passa a ter o dobro do valor previsto na Equação 3.2.

Similarmente, pelo método TLM, a impedância de uma indutância L_e representada na forma de *stub* é dada por :

$$Z_L = \frac{2L_e}{\Delta t} \quad (3.3)$$

onde Δt é o mesmo que descrito anteriormente. Por sua vez, o modelo *link* dessa mesma indutância tem a metade do valor previsto pela Equação 3.3.

Por fim, é importante considerar que a representação de indutâncias e capacitâncias por *stub* ou *link* deve incluir a fonte de tensão equivalente, representada pelo dobro da tensão incidente em cada um desses elementos, bem como os indutores devem se comportar como *stubs* ou *links* abertos, refletindo integralmente qualquer tensão incidente, enquanto que os capacitores comportam-se como um curto-circuito, invertendo o sinal da onda refletida. A especificidade do uso dessas modelagens do TLM, bem como discussões sobre a redução dos erros computacionais possibilitada pelo uso do método TLM podem ser encontradas em [13].

No domínio do tempo, este método é sensivelmente mais eficiente que o método de *Euler*, que é tomado como sendo uma referência de métodos para resolução de circuitos, dada a sua grande difusão. De uma forma geral, o método TLM é um método de solução numérica de equações diferenciais no tempo e/ou no espaço, o que possibilita seu uso em diversos campos da Engenharia. Por exemplo, o método é aplicável na solução de problemas de transmissão de calor e de flexão de vigas, dentre vários outros problemas[13]. No que diz respeito a problemas específicos de Eletromagnetismo, o método TLM permite a análise de problemas tri e bi-dimensionais de propagação de ondas em diversos meios[14,20].

Uma importante característica do método TLM foi então verificada na solução de problemas de propagação de surtos em uma dimensão : O método TLM mostrou-se como uma importante ferramenta para a solução de circuitos elétricos contendo parâmetros concentrados. Esse fato diz respeito especialmente aos circuitos de transformadores, uma vez que o mesmo é freqüentemente modelado por parâmetros concentrados nas diversas condições de estudo. Seja quanto à modelagem dos enrolamentos para a análise da incidência de surtos, seja pela modelagem da histerese magnética ou ainda da transferência de surtos, os circuitos contendo parâmetros concentrados são amplamente utilizados. Desta forma, são apresentadas a seguir duas aplicações do método TLM para a solução de circuitos contendo parâmetros concentrados, de cujo comportamento podem ser feitas associações com circuitos representativos de transformadores. Trata-se da análise do circuito *RLC*-série e do circuito acoplado magneticamente. Enquanto a primeira aplicação está voltada para a análise do enrolamento sob surto de tensão, a segunda aplicação presta-se à análise da transferência de surtos entre enrolamentos e, em bem menor grau, à modelagem histerese. Esses exemplos de aplicação mostram a comparação dos resultados

do método TLM com os resultados analíticos e com outros métodos numéricos. E esses resultados mostram o quanto o método TLM é simples e aplicável para esses tipos de problemas.

3.2 - APLICAÇÃO DO MÉTODO TLM A CIRCUITOS DE PARÂMETROS CONCENTRADOS

Conforme citado anteriormente, é importante avaliar o grau de aplicabilidade do método TLM na solução de circuitos contendo parâmetros concentrados que representem o transformador nas diversas condições de solicitação. Com esta finalidade é apresentada a seguir a aplicação do método TLM em dois circuitos que podem ter seus resultados extrapolados para a análise de problemas freqüentes em transformadores. O primeiro desses circuitos é o clássico *RLC*-série submetido a uma fonte de tensão constante. Os resultados obtidos são aplicáveis à análise de distribuição de surtos de tensão em enrolamentos contínuos de transformadores porque a modelagem desses enrolamentos inclui capacitores e indutores associados em série e em paralelo. Neste caso, a eficiência do método TLM será constatada pela comparação de seus resultados com os resultados do método analítico e de outro método numérico, Euler-simples. A escolha deste outro método numérico deveu-se ao fato de ser o mesmo bastante difundido e, portanto, podendo ser considerado como uma boa referência.

O segundo circuito é o circuito acoplado magneticamente, sob regime de tensão alternada. Os resultados obtidos de sua análise são aplicáveis ao estudo da transferência de surtos em transformadores. A eficiência do método TLM se dá pela comparação de seus resultados somente com os resultados do método analítico.

3.2.1 - O Circuito RLC-série

Considere uma fonte de tensão contínua, constante, ideal e de amplitude V_0 , energizando um circuito *RLC*-série que apresente parâmetros tais que originem uma corrente oscilatória. As condições iniciais são nulas. Ao se utilizar o método de Euler-simples para resolver o circuito, se consideram as duas variáveis de estado, que definem as

equações de recorrência. Uma dessas variáveis é a corrente no indutor enquanto a outra é a tensão no capacitor. As equações obtidas são resolvidas simultaneamente.

Já pelo método TLM, tanto indutor quanto capacitor são modelados por *stubs*, com base nas Equações 3.2 e 3.3, estando o indutor entre os nós 1 e 2 e o capacitor no segundo e último. Nas Figura 3.2a e 3.2.b estão mostradas essas representações, incluindo as respectivas fontes de tensão incidente equivalentes :

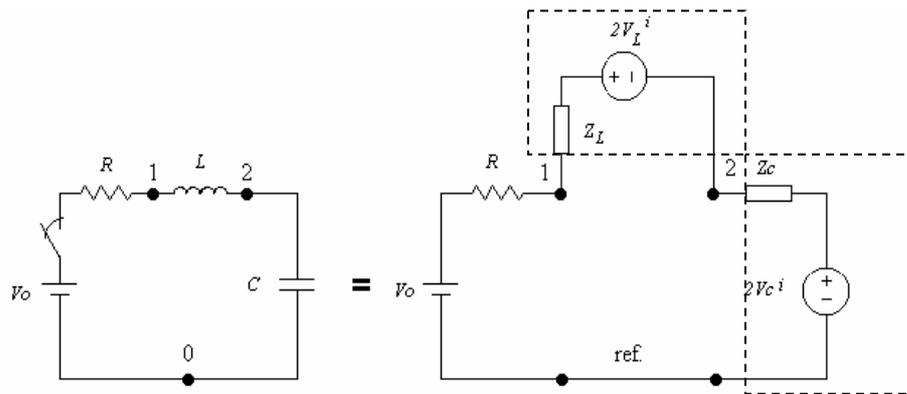


Figura 3.2 - Circuito RLC - Série.

3.2a - Circuito original;

**3.2b - Representação do Circuito RLC-Série para a resolução pelo método TLM :
Capacitor e indutor representados por *stubs*.**

Já pelo método analítico, considerando que os parâmetros R , L e C sejam tais que a resposta seja do tipo oscilatória, a expressão da corrente do circuito, $i(t)$, será dada por :

$$i(t) = \frac{V_o}{\omega L} e^{-t/\tau} \text{sen}(\omega t) \tag{3.4}$$

onde

$$\tau = \frac{2L}{R} \quad \text{e} \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \tag{3.5}$$

Que são as constante de decaimento e a frequência angular de oscilação, respectivamente.

Considerando, então ,os seguintes valores de parâmetros :

$$V_0 = 100 \text{ V}; L = 0,6 \text{ H}; C = 0,1 \mu\text{F} \text{ e } R = 1000 \Omega ,$$

Obtém-se prontamente a resposta analítica. Então, a partir das constantes de tempo do circuito descritas na Equação 3.5 , se escolhe o intervalo (passo) de integração de forma a ser suficientemente pequeno, para as análises pelos métodos TLM e de Euler-simples. Para tanto, foi escolhido o valor de 0,1 ms, uma vez que esse valor corresponde a menos que 1/10 da menor grandeza relativa ao tempo, descritas na Equação 3.5, que são :

$$\tau = \frac{2L}{R} \cong 1,2 \text{ ms} \quad \text{e} \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \cong 3996 \text{ rad/s} \quad \therefore T = \frac{2\pi}{\omega} \cong 1,57 \text{ ms} \quad (3.6)$$

Então, em se tomando o nó 0 (zero) da Figura 3.2 como referência de potencial e analisando o circuito pelo método dos nós, se inicia a solução do circuito pelo método TLM¹. Assim, as fontes de tensão com impedância série são transformadas em fontes de corrente (*Norton*), tal como mostrado na Figura 3.3.

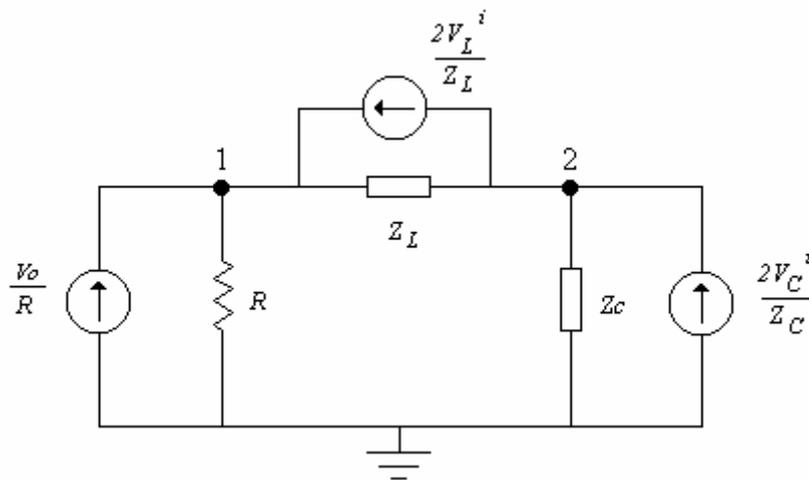


Figura 3.3 - Circuito TLM para solução baseada na análise de nós

¹ A resolução pelo método TLM poderia também estar baseada na análise por malhas. A preferência pela análise de nós advém do uso de TLM em estudos de propagação em linhas unidimensionais.

A solução do circuito consiste em determinar, a cada instante k , o potencial dos nós 1 e 2, que são $V1_k$ e $V2_k$, respectivamente, sendo nulo o potencial da referência. Para tanto, é necessário resolver o seguinte sistema de segunda ordem :

$$\begin{bmatrix} \frac{V_o}{R} + 2\frac{V_L^i}{Z_L} \\ 2\frac{V_C^i}{Z_c} - 2\frac{V_L^i}{Z_L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R} + \frac{1}{Z_L} & -\frac{1}{Z_L} \\ -\frac{1}{Z_L} & \frac{1}{Z_L} + \frac{1}{Z_C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V1_k \\ V2_k \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Cuja solução se dá pela regra de *Cramer*, para cada instante, k :

$$V1_k = \left(\frac{V_o}{R} + 2\frac{V_L^i}{Z_L} \right) \left(\frac{1}{Z_c} + \frac{1}{Z_L} \right) + \left(2\frac{V_C^i}{Z_c} - 2\frac{V_L^i}{Z_L} \right) \left(\frac{1}{Z_L} \right) \quad (3.8)$$

e

$$V2_k = \left(2\frac{V_C^i}{Z_c} - 2\frac{V_L^i}{Z_L} \right) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{Z_L} \right) + \left(\frac{V_o}{R} + 2\frac{V_L^i}{Z_L} \right) \left(\frac{1}{Z_L} \right) \quad (3.9)$$

No instante $t = 0$, V_L^i e V_C^i , incidentes, têm valor nulo. Calculam-se, então, $V1_0$ e $V2_0$, pelas Equações (3.8) e (3.9). No instante $t = k$, em seguida, V_L^r e V_C^r , são as tensões refletidas para o indutor e para o capacitor, respectivamente. Essas tensões são calculadas pelo princípio do método TLM, no qual a tensão refletida para cada um dos elementos é calculada pela subtração da tensão incidente em seus terminais da tensão do próprio terminal :

$$V_L^r = V1_k - V2_k - V_L^i \quad (3.10)$$

e

$$V_C^r = V2_k - V_C^i \quad (3.11)$$

Essas mesmas tensões refletidas para o indutor e para o capacitor serão, no instante seguinte refletidas internamente e retornarão a incidir nos terminais desses elementos.

Porém, antes dessa nova incidência cada uma das tensões poderá sofrer uma alteração de sinal de acordo as características do elemento. Ou seja, para o indutor, a terminação *stub* em curto-circuito causa inversão na reflexão da onda de tensão incidente :

$$V_L^i{}_{k+1} = -V_L^r{}_k \quad (3.12)$$

Já para o capacitor, a terminação *stub* aberta causa a reflexão simples da onda incidente, sem alterar sua polaridade :

$$V_C^i{}_{k+1} = V_C^r{}_k \quad (3.13)$$

Os valores então obtidos para V_L^i e V_C^i são utilizados no instante $k + 1$ nas equações (3.10) e (3.11) e o processo continua até um instante de tempo pré-definido , quando o circuito atinge seu estado permanente.

Com o objetivo de comparação, a Figura 3.4 mostra o gráfico com o comportamento da tensão transitória no capacitor, pelos métodos TLM, Euler-simples e analítico. Pelos gráficos, se depreende que o método TLM apresentou considerável convergência numérica, apresentando resultados muito próximos dos resultados obtidos pelo método analítico, que neste caso é preciso. Já o método de Euler-simples demonstrou que o intervalo de integração utilizado também pelo método TLM é ainda grande, sendo necessária sua redução. Isso pode ser notado pela oscilação constante da resposta da tensão no capacitor. Assim, embora o método TLM apresente um pequeno acréscimo de passos de cálculo em relação ao o método de Euler-simples, o seu resultado é mais preciso e com menor número de iterações para um mesmo passo de integração, o que confirma o bom desempenho do método TLM.

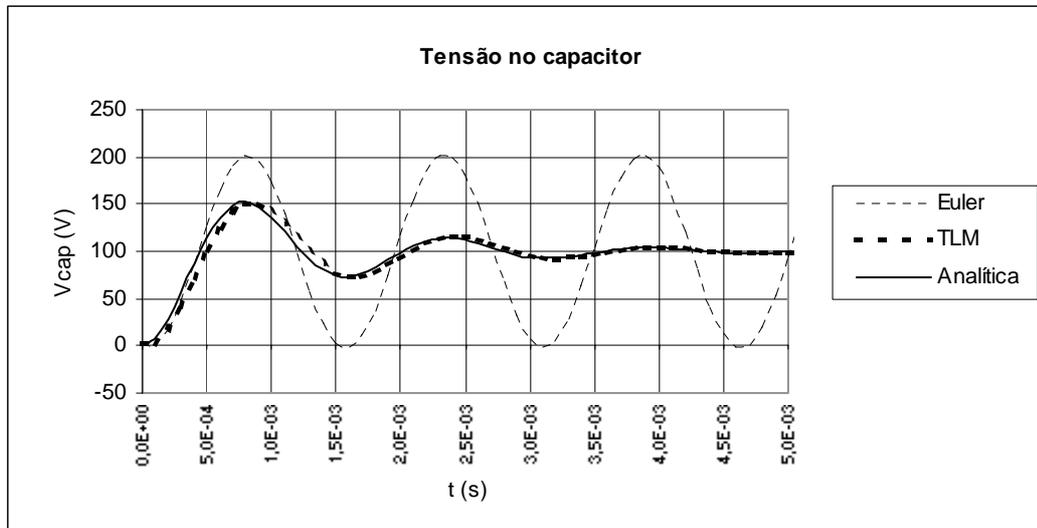


Figura 3.4 - Tensão no capacitor. Métodos de Euler, TLM e analítico

3.2.2 - Circuitos Acoplados Magneticamente

Seja um circuito contendo fonte senoidal, resistores, indutâncias próprias e mútuas, tal como no circuito mostrado na Figura 3.5, energizado em $t = 0$:

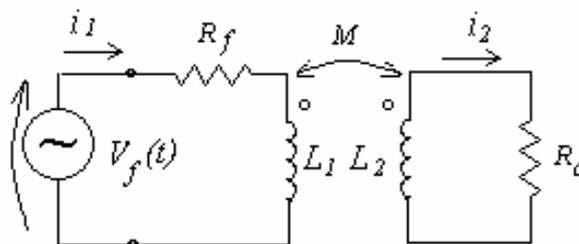


Figura 3.5 - Circuito contendo mútuas em regime senoidal

Considerando os seguintes de parâmetros de circuito :

$$V_f(t) = 100 \text{ sen}(800\pi t) \text{ V}; \quad R_f = 1 \text{ } \Omega; \quad R_c = 2 \text{ } \Omega; \quad L_1 = 0,1 \text{ H}; \quad L_2 = 0,2 \text{ H} \quad \text{e} \quad M = 0,1273 \text{ H}$$

($k = 0,9$)

A corrente i_1 , no domínio do tempo, será :

$$i_1(t) = -2,09 \cos(800\pi t) + 0,079 \sin(800\pi t - \pi/2) + 0,105e^{-5,3t} + 1,985e^{-99,9t} \text{ (A)} \quad (3.14)$$

Essa expressão analítica é obtida a partir de métodos tradicionais de análise de circuitos.

Para resolver esse circuito pelo método TLM é possível considerar o circuito como tendo dois nós, tal como mostrado na Figura 3.6. Esses nós estão acoplados somente pelas tensões induzidas pela impedância mútua entre os enrolamentos. Então, a fonte de tensão senoidal com a sua resistência série é transformada em fonte de corrente em paralelo com a resistência e as indutâncias L_1 e L_2 são modeladas por *stubs*. Em cada instante de análise, o valor da tensão incidente nos terminais de cada um desses *stub* possui o valor do dobro da tensão refletida no instante anterior acrescida de um termo referente à tensão mútua induzida pela corrente do enrolamento adjacente, transferida pela impedância mútua. Esse termo deve ter o sinal estabelecido de acordo com a regra dos pontos, para indutâncias mútuas, em circuitos elétricos.

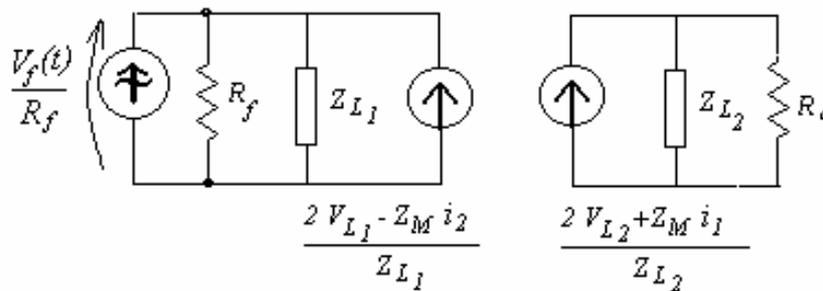


Figura 3.6 - Modelagem TLM para o circuito exemplo

As equações de tensão e de corrente, respectivamente, na modelagem TLM são:

Para o Nó 1, no instante k :

$$V_{1_k} = \frac{\left(\frac{Vf(t=k)}{R_f} + \left(\frac{2V_{L1_k}^i - Z_M i_{2_k}}{Z_{L1}} \right) \right)}{\frac{1}{R_f} + \frac{1}{Z_{L1}}} \quad (3.15)$$

e

$$i_{1_k} = \frac{Vf(t=k) - V_{1_k}}{R_f} \quad (3.16)$$

Simultaneamente, para o Nó 2 :

$$V_{2_k} = \frac{\left(\frac{2V_{L2_k}^i + Z_M i_{1_k}}{Z_{L2}} \right)}{\frac{1}{R_c} + \frac{1}{Z_{L2}}} \quad (3.17)$$

e

$$i_{2_k} = \frac{V_{2_k}}{R_c} \quad (3.18)$$

A conexão com os instantes seguintes é feita da forma usual, onde a tensão refletida em um instante k será a tensão incidente no instante seguinte, $k + 1$, multiplicada por (-1), devido ao curto-circuito no *stub* representativo da indutância.

A Figura 3.7 exibe os gráficos da corrente i_1 , obtidos analiticamente e por TLM. Nos gráficos estão incluídas as componentes transitórias dessas. Em se comparando as correntes se verifica a boa precisão obtida pelo método TLM. Para este caso, o intervalo de integração utilizado nos cálculos foi $\Delta t = 4 \mu\text{s}$, escolhido de forma a ser menor que pelo menos 1/10 da menor constante de tempo envolvida[16].

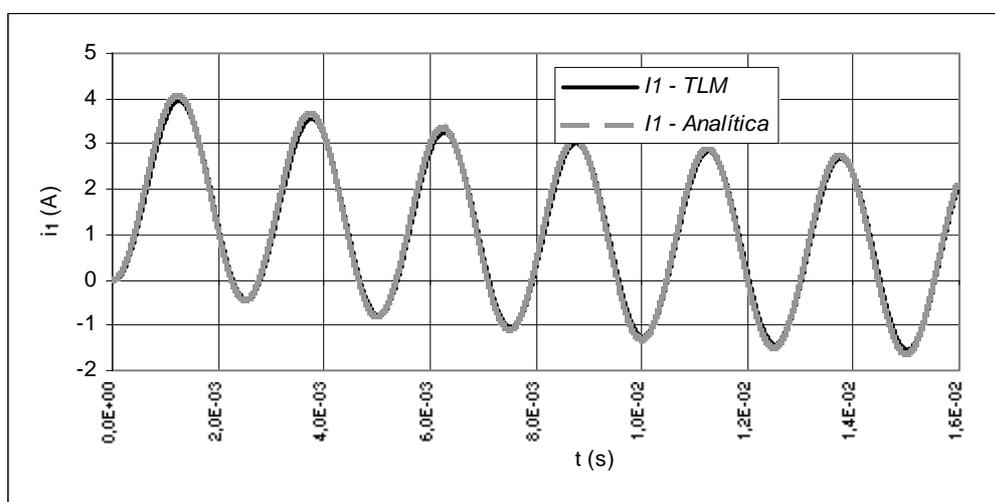


Figura 3.7 - Corrente i_1 obtida pelos métodos analítico e TLM.

Os dois casos apresentados permitem mostrar a plena viabilidade do uso do método TLM em circuitos contendo parâmetros concentrados. E esses resultados, por sua vez, permitem vislumbrar a análise através do método TLM dos três casos de transitórios, citados no Capítulo 1 e estudados teoricamente no Capítulo 2, uma vez que em todos eles os circuitos representativos do transformador podem ser considerados como tendo parâmetros concentrados.

Complementarmente, estudos a respeito da precisão do método TLM em problemas de propagação em linhas de transmissão contendo perdas longitudinais são apresentados em [38] e em [39], ratificando a sua simplicidade na estruturação dos cálculos.

CAPÍTULO 4

APLICAÇÃO DO MÉTODO TLM À ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS ELÉTRICOS EM TRANSFORMADORES

4.1 - APLICAÇÃO DO MÉTODO TLM PARA ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE TRANSFORMADORES FRENTE A TRANSITÓRIOS ELÉTRICOS RÁPIDOS

Conforme descrito no Capítulo 1, são dois os principais efeitos da incidência de um surto de tensão num transformador. O primeiro desses efeitos decorre do fato que em sendo esse enrolamento contínuo, ele apresentará uma distribuição inicial de tensão que poderá a causar falha em seu isolamento devida à excessiva concentração do campo elétrico nas suas primeiras espiras. Ainda, sobretensões de natureza oscilatória poderão ocorrer até a acomodação de distribuição irregular de tensão, representando também uma importante solicitação ao isolamento do enrolamento. O segundo desses efeitos ocorre concomitantemente a essas solicitações anteriormente descritas, quando parte do surto incidente poderá vir a se transferir para outros enrolamentos adjacentes que apresentem fluxo magnético concatenado com o enrolamento inicialmente atingido. Esses dois efeitos foram analisados teoricamente nos Capítulos 1 e 2 e são agora estudados através de simulações computacionais, utilizando o método TLM ,apresentado no capítulo anterior. O objetivo desse capítulo é mostrar os quanto os resultados obtidos pelo método TLM são similares aos obtidos por outros pesquisadores, em trabalhos listados como referência nos

Capítulos 1 e 2, motivando então a uma realização de testes para a comparação com os resultados experimentais, a ser mostrada em capítulo seguinte.

4.1.1 - Aplicação do Método TLM para Estudo do Comportamento de Transformadores Frente à Distribuição de Surtos de Tensão :

Assim como em estudos de linhas de transmissão, um enrolamento contínuo e homogêneo de transformador pode ser representado de forma discretizada. Ou seja, esse enrolamento que apresenta parâmetros elétricos uniformemente distribuídos pode ser considerado como uma associação série de um número finito de seguimentos idênticos, contendo cada um parâmetros elétricos concentrados. Conforme visto no Capítulo 2, esses parâmetros elétricos de cada seguimento são a capacitância equivalente entre espiras, a indutância equivalente série e a capacitância à terra. Portanto, para a aplicação do método TLM são utilizados os mesmos princípios de modelagem *stub* ou *link* para esses parâmetros. Antes da aplicação, um ponto fundamental consiste em definir o número de seguimentos que representem o enrolamento. Tal como em linhas de transmissão, quanto maior for o número de seguimentos, mais precisos serão os resultados. Então, para mostrar a aplicabilidade do método TLM considere o mesmo estudo feito com o enrolamento contínuo homogêneo, apresentado no Capítulo 2. Ou seja, o caso da aplicação de um degrau de tensão em enrolamento contínuo com um de seus extremos solidamente aterrado é analisado através da modelagem TLM. Inicialmente, o enrolamento é representado por uma associação série de 10 (dez) seguimentos iguais. A Figura 4.1 mostra o circuito representativo do enrolamento sendo submetido ao degrau de tensão. Também neste caso, o solo considerado perfeito e como referência de potencial. Nesse circuito, o enrolamento apresenta 11 (onze) nós e os parâmetros elétricos série equivalentes que estão conectados entre cada par de nós têm sub-índices correlatos, enquanto que as capacitâncias entre cada nó e a terra têm no sub-índice a referência ao nó.

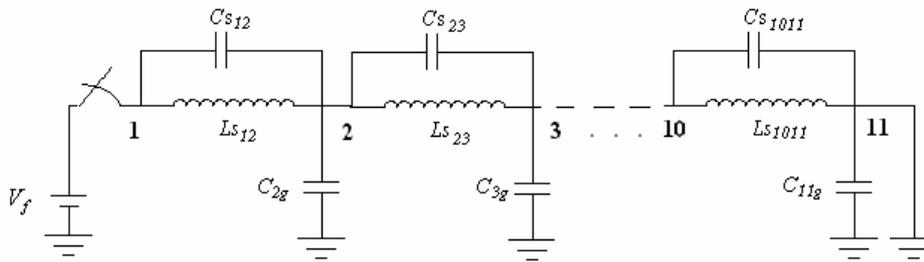


Figura 4.1 - Circuito representativo do enrolamento estudado no Capítulo 2

Para representar o enrolamento estudado no Capítulo 2, os parâmetros de cada um dos dez seguimentos devem ser :

$$\Delta \ell = 0,035 \text{ m}; \quad \Delta C_e = 10,5 \text{ pF}; \quad \Delta C_g = 8,56 \text{ nF} \quad \text{e} \quad \Delta L_e = 1 \text{ mH} \quad (4.1)$$

Pelo método TLM, a simulação do degrau de tensão sendo aplicado no início do enrolamento se dá pela análise nodal simultânea das tensões incidentes e refletidas nos 11 (onze) nós representativos do enrolamento. Esse cálculo se dá de forma matricial, analogamente ao que foi apresentado no Capítulo 3, na análise do circuito *RLC*-série. No caso do enrolamento, o sistema utiliza uma matriz de admitâncias 11×11 . Para tanto, de acordo com a modelagem TLM, a definição dos valores das impedâncias depende do intervalo de integração utilizado, Δt . Neste caso, de acordo com o critério usual de escolha do passo de integração[16], o Δt escolhido foi menor que 1/10 da menor constante de tempo presente dentro de cada trecho. O valor então utilizado foi de 8 ns. Uma vez utilizados os mesmos procedimentos de cálculo do circuito *RLC*-série do capítulo anterior, os mesmos não são aqui repetidos. Apresentam-se somente os resultados. Entretanto, no Anexo 1 é mostrada a matriz de cálculo desse exemplo, utilizada no programa elaborado para esse fim, em planilha eletrônica, constante no disco do Anexo 2. A Figura 4.2 mostra o comportamento da tensão no meio do enrolamento obtido pelos métodos TLM, ao longo do tempo, e sua comparação com o comportamento da tensão no mesmo ponto, obtida analiticamente pela forma descrita no capítulo 2. Essa última, por ter análise baseada na divisão do enrolamento em trechos mais discretizados, é considerada como referência.

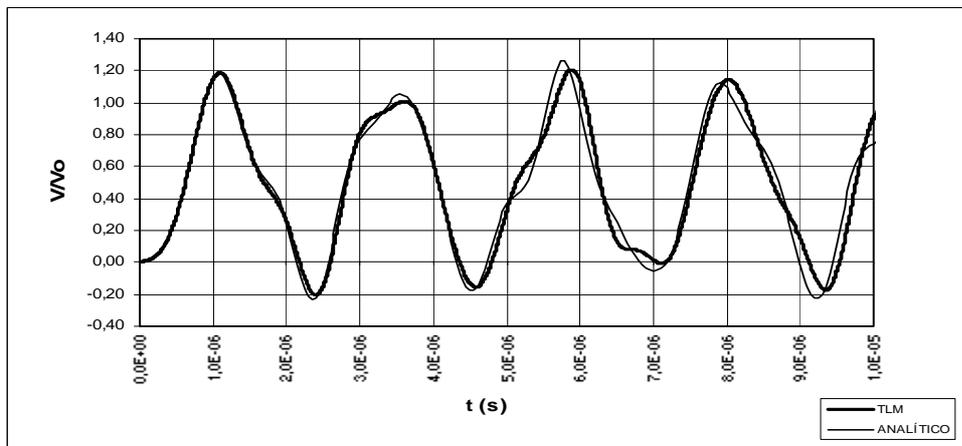


Figura 4.2 - Comportamento da tensão no meio do enrolamento estudado no Capítulo 2 - Analítico versus TLM.

Complementarmente, na Figura 4.3 é mostrada a comparação entre os resultados da simulação TLM e analítico, para o mesmo enrolamento contínuo hipotético, estudado no capítulo 2.

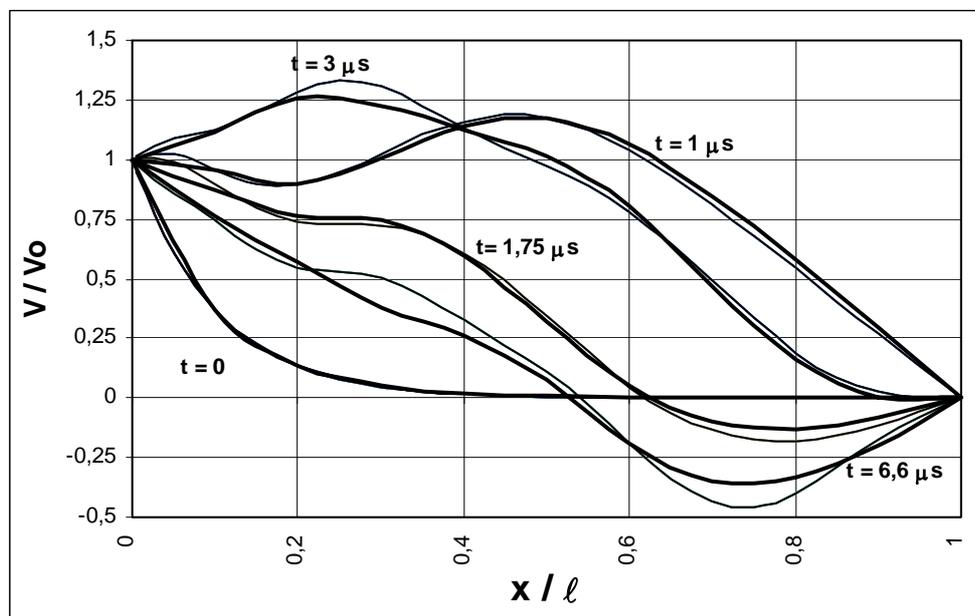


Figura 4.3 - Comportamento da tensão ao longo do enrolamento estudado no capítulo 2. Analítico (traço fino) versus TLM (traço grosso).

Pela comparação entre os gráficos mostrados nas Figura 4.2 e 4.3 se verifica que a modelagem TLM apresenta resultados satisfatórios, permitindo concluir que esses resultados podem ser ainda melhores ao se aumentar o número de secções feitas no enrolamento. Essa comparação entre os resultados do método analítico e do método TLM permite inferir que pelo método TLM não só é possível alcançar todos os casos obtíveis pelo método analítico como também se vislumbra a simulação de casos semelhantes em enrolamentos reais, que não sejam completamente homogêneos. Um exemplo dessa situação é a presença do efeito de bordas que ocorre inerentemente em enrolamentos contínuos de transformadores contínuos. Usualmente, esse efeito faz com que o mesmo não seja homogêneo. Ao se usar o método TLM, a consideração desse efeito pode ser feita pela simples alteração das capacitâncias e indutâncias dos nós localizados nos extremos do enrolamento. Por outro lado, a consideração desse importante efeito torna-se muito complexa ao se usar o método analítico.

Os resultados obtidos neste capítulo são suficientes para motivar a aplicação do método TLM em comparação com resultados experimentais. Neste capítulo, os resultados tidos como referência para qualificar os resultados do método TLM são os resultados obtidos por outros pesquisadores, em condições semelhantes, especialmente [30] e [31]. Não obstante, algumas informações complementares sobre comparações entre os resultados do método analítico e do método TLM podem ser encontradas em [38,39 e 40]. É importante citar que esses mesmos resultados obtidos pelo método TLM podem também ser obtidos através do uso de programas comerciais de simulação de circuitos, relativamente difundidos no meio acadêmico. Não obstante, deve-se considerar que esses programas apresentam reconhecida ênfase em circuitos eletrônicos, possuindo bibliotecas de componentes comerciais que não só lhes causam um aumento de custo como também requerem considerável espaço em disco. Desta forma, a solução do problema através da programação em planilha comercial torna a análise mais simples.

4.1.2 - Aplicação do Método TLM para Estudo do Comportamento de Transformadores Frente à Transferência de Surtos de Tensão :

Conforme foi analisado teoricamente no capítulo 2, o evento da transferência de surtos entre enrolamentos de pequenos transformadores monofásicos se dá essencialmente através do circuito magnético deles. Entretanto, as inerentes capacitâncias parasitas, distribuídas entre espiras e enrolamentos, podem ter influência significativa no surgimento de ressonâncias no surto transferido. Afinal, como todo surto possui um espectro de frequências, algumas dessas frequências podem vir a despertar a ocorrência de ressonâncias, decorrente de interações entre as indutâncias dos enrolamentos com essas capacitâncias. Essas ressonâncias podem então vir a causar alterações na forma de onda da tensão transferida com o possível aparecimento de sobretensões. Para analisar essa possibilidade o método TLM é então utilizado para modelar o circuito dos transformadores. Esse, por sua vez, consiste no circuito tradicional de transformadores, acrescido de capacitâncias concentradas, equivalentes das capacitâncias distribuídas entre espiras de um mesmo enrolamento e entre enrolamentos. Na Figura 4.4 é mostrado esse circuito. Nela estão mostradas as capacitâncias equivalentes à terra, decorrentes da associação série das capacitâncias entre espiras de cada enrolamento, C_{1g} e C_{2g} . Também, está mostrada a capacitância equivalente representativa da capacitância distribuída entre enrolamentos, C_{12} . Essas capacitâncias são adicionadas ao circuito que usualmente representa os transformadores em estado permanente à frequência industrial.

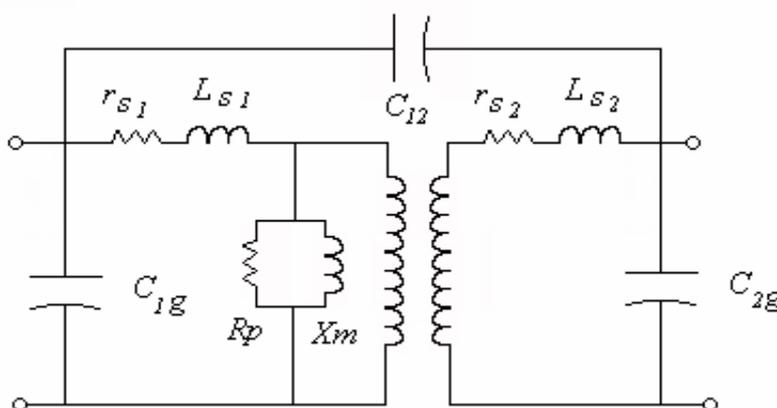


Figura 4.4 - Circuito equivalente representativo de transformadores monofásicos para a incidência de surtos.

O circuito da Figura 4.4 pode então ser facilmente modelado de acordo com a metodologia TLM. Para isso, tanto capacitâncias quanto as indutâncias são modeladas na forma *stub*.

Então, considerando os tipos de transformadores estudados no item 1.2.2, do capítulo 1, os valores típicos de capacitâncias de transformadores monofásicos a serem aplicados ao circuito da Figura 4.4 são os seguintes os [41]:

$$100 \text{ pF} < C_{1g} < 1000 \text{ pF} ; 100 \text{ pF} < C_{2g} < 1000 \text{ pF} ; 0,01 \text{ pF} < C_{12} < 100 \text{ pF} \quad (4.2)$$

Para poder implementar a simulação TLM do comportamento desses tipos de transformadores quanto à transferência de surtos, um transformador monofásico hipotético contendo os seguintes parâmetros, referidos a um só de seus lados, é simulado e tido como representativo:

$$L_1 = L_2 = 3 \text{ mH}; r_1 = r_2 = 3 \text{ } \Omega; R_p = 1\text{k}\Omega \text{ e } L_m = 2,65 \text{ H} \quad (4.3)$$

Os valores de capacitâncias escolhidos foram os seguintes :

$$C_{1g} = 200 \text{ pF} ; C_{2g} = 200 \text{ pF} \text{ e } C_{12} = 100 \text{ pF} \quad (4.4)$$

Na Figura 4.5 está então mostrado o circuito TLM representativo desse transformador hipotético. Pelo circuito se deduz que as transformações dos parâmetros indutâncias e capacitâncias em elementos *stubs* dão origem a um circuito contendo cinco nós. A solução do mesmo pode também se dar pelo método matricial, cujos detalhes de cálculo são semelhantes àqueles mostrados no Anexo 1.

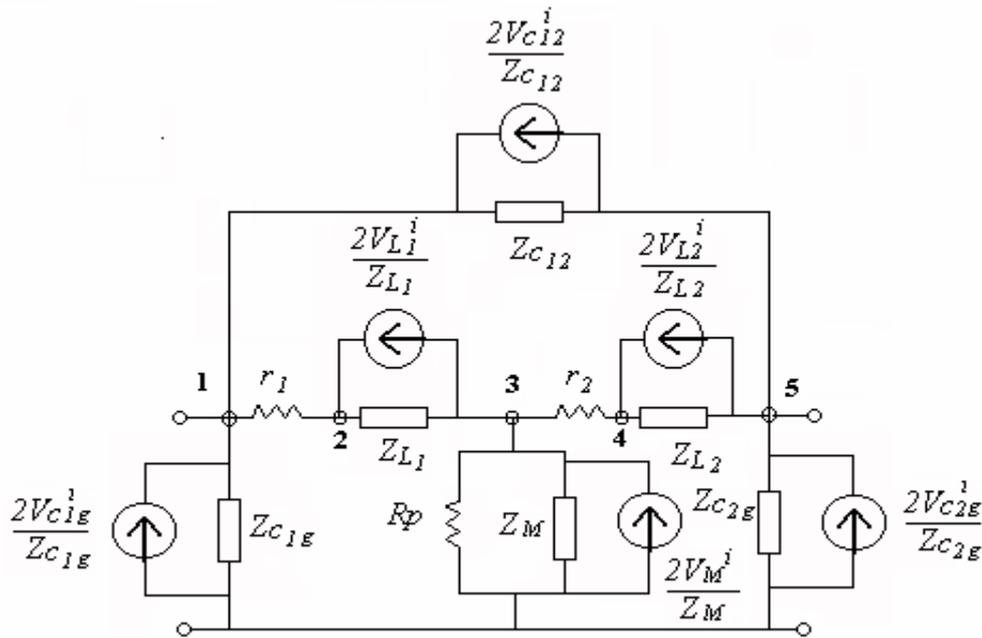


Figura 4.5 - Circuito TLM equivalente representativo de transformadores monofásicos para a incidência de surtos.

Como resultado dessa simulação, na Figura 4.6 estão mostrados os gráficos da tensão do tipo degrau aplicada na entrada do transformador bem como da tensão de saída, referida ao primário. Para facilitar a análise, a amplitude da tensão de entrada pode ser considerada 100 %. Dos gráficos se nota que a tensão de saída de fato apresenta uma ressonância transitória, com frequência da faixa de 500 kHz, decorrente da interação entre os elementos capacitivos e indutivos dos enrolamentos do transformador. Após sofrer atenuação nessas oscilações, a tensão transferida tende então a ter a mesma amplitude da tensão de entrada. E num horizonte de tempo mais longo do que o mostrado no gráfico, a tensão de saída tende a ser constante, definida pela divisão capacitiva de tensão entre os enrolamentos, de acordo com a Figura 4.5.

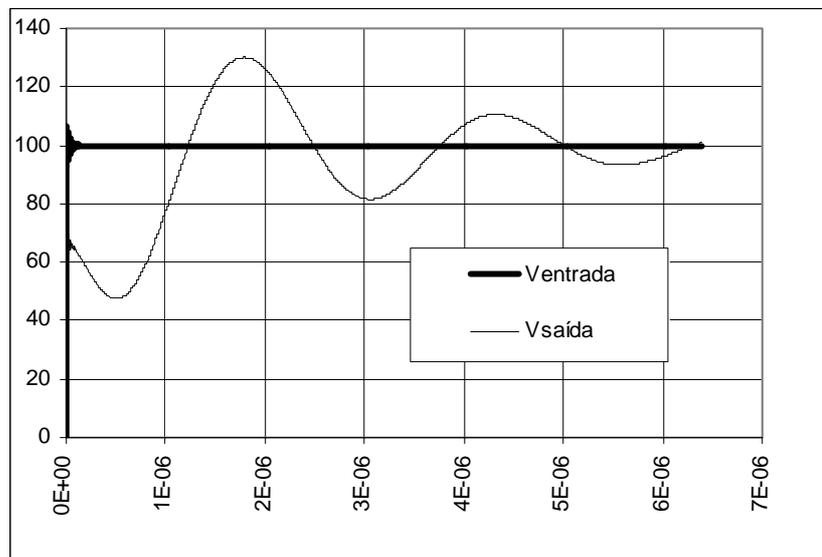


Figura 4.6 - Resultado da simulação TLM da aplicação de degrau de tensão na entrada do circuito mostrado na Figura 4.5

Esses resultados obtidos confirmam a evidência teórica que a transferência do surto entre enrolamentos de transformadores seja essencialmente pelo circuito magnético, e que também a interação entre os elementos internos do transformador tem significativa importância na forma de onda da tensão transferida, fazendo surgir sobretensões ressonantes. Portanto, se justifica que seja feita a comparação entre resultados experimentais e simulacionais, para que se possa definir com mais precisão a forma de transferência dos surtos.

4.2 - APLICAÇÃO DO MÉTODO TLM PARA ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE TRANSFORMADORES FRENTE A TRANSITÓRIOS ELÉTRICOS NA FREQUÊNCIA INDUSTRIAL - *Corrente de Inrush*

Mais uma vez, analogamente ao que foi definido para o estudo do comportamento de transformadores frente a surtos, o estudo do comportamento de transformadores frente a transitórios na frequência industrial é agora feito através de simulações computacionais. Entretanto, neste caso também não será feita uma comparação de resultados de simulação

com outros métodos, mas sim se terá novamente como elemento de comparação os resultados experimentais publicados por outros autores [30-31], consagrados. E desta forma, se verifica que os resultados obtidos pelo método TLM são animadores para a realização de comparação com resultados reais, experimentais, que também será feita no próximo capítulo

Portanto, uma vez verificada no Capítulo 3 a eficiência e simplicidade do método TLM para a solução de circuitos, o método TLM é agora aplicado para o modelo de transformador descrito no capítulo 2, o qual considera a não-linearidade da indutância de magnetização.

Tomando-se então o circuito representativo do transformador em vazio, tal como mostrado no Capítulo 2, o mesmo pode então ser modelado de acordo com as técnicas do método TLM. E esse circuito está mostrado na Figura 4.7. Nele, o ramo de magnetização não sofre qualquer alteração na modelagem TLM, bem como a resistência r_s . A única transformação ocorre para a indutância L_s , que é modelada numa das duas formas possíveis para indutâncias, aquela conhecida como *stub*. A representação desse transformador sendo energizado por uma fonte senoidal é feita pela consideração da fonte de tensão $V(t)$. Pelo fato dessa fonte ser inicialmente uma fonte senoidal do tipo ideal, a sua transformação em equivalente *Norton* utiliza a resistência série do enrolamento, r_s .

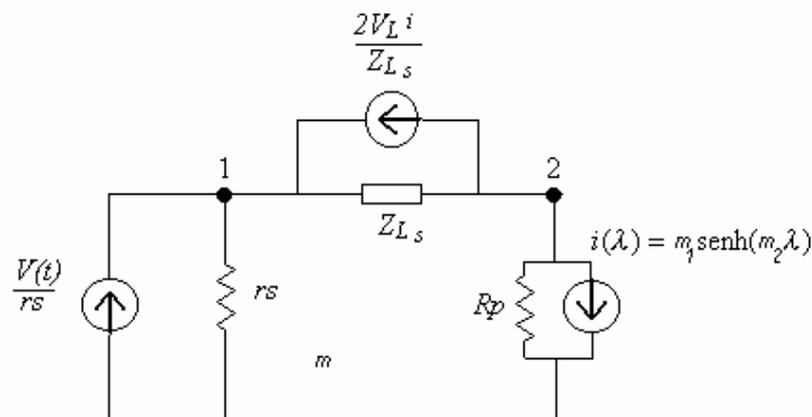


Figura 4.7 - Modelagem TLM do circuito representativo do transformador em vazio para o regime senoidal

A simulação da aplicação da tensão senoidal se dá também pela solução matricial do circuito da Figura 4.7, onde as tensões dos nós 1 e 2 são calculadas de forma semelhante à que foi feita para circuitos mais básicos, no Capítulo 3. Entretanto, por apresentar um elemento singular que é a fonte de corrente representativa da indutância não linear, a matriz utilizada para a solução iterativa do circuito é mostrada na Equação (4.5).

$$\begin{bmatrix} \frac{V(t)}{r_s} + 2\frac{V_L^i}{Z_L} \\ -2\frac{V_L^i}{Z_L} - m_1 \sinh(m_2 \lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r_s} + \frac{1}{Z_L} & -\frac{1}{Z_L} \\ -\frac{1}{Z_L} & \frac{1}{R_p} + \frac{1}{Z_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Onde

$$V(t) = Vm \sin(\omega t + \theta) \quad (4.6)$$

Então, exceto por alguns pequenos detalhes, a solução do circuito TLM através da Equação (4.5) é muito similar às apresentadas para os circuitos básicos, no Capítulo 3. Um desses detalhes está no fato de que em $t = 0$ o enlace de fluxo magnético, λ , pode vir a ser diferente de zero, representando um magnetismo residual no circuito magnético do transformador. Isto é importante para se verificar o limite da corrente de inrush, uma vez que esse limite está relacionado com o magnetismo residual do transformador. Por outro lado, os valores de m_1 e m_2 , descritos no Capítulo 2, são típicos de cada tipo de transformador que devem sempre ser conhecidos, uma vez que são facilmente obtidos experimentalmente[30,36,37,41]. Então, a solução do circuito se dá pela forma tradicional do método TLM, considerando as sucessivas reflexões no elemento indutivo, representativo do fluxo de dispersão. Um último importante detalhe diz respeito à atualização do valor do enlace de fluxo. Pois, para cada valor de V_2 calculado num instante $t = k$, esse enlace de fluxo é atualizado com base na equação da lei de Lenz. :

$$\lambda_{t=k+1} = \lambda_{t=k} + \Delta t(V_{2_{t=k}}) \quad (4.7)$$

Onde $t = k+1$ corresponde que um intervalo de tempo Δt decorreu após o instante $t = k$. Δt é o mesmo intervalo de integração numérica do método, discutido no capítulo anterior.

Uma vez feitas essas considerações, é possível avaliar o comportamento de transformadores frente à energização com o método TLM. Então, com a finalidade de ilustrar a validade de aplicação do método, um transformador hipotético, contendo os seguintes parâmetros foi simulado pelo método TLM, na condição de energização:

$$m_1 = 27,04 \text{ mA}; m_2 = 5,8 \text{ Wb}^{-1}; r_s = 2,5 \text{ } \Omega; L_s = 0,5 \text{ mH}; R_p = 1,38 \text{ k}\Omega;$$

$$V(t) = 311,13 \text{ sen}(120\pi t + \theta) \text{ e } \theta = 0 \text{ graus} = 0 \text{ radianos} \quad (4.8)$$

Na Figura 4.8 é mostrado o gráfico contendo o comportamento da corrente de energização desse transformador, obtida pela simulação através do método TLM para a condição de fluxo magnético residual nulo.

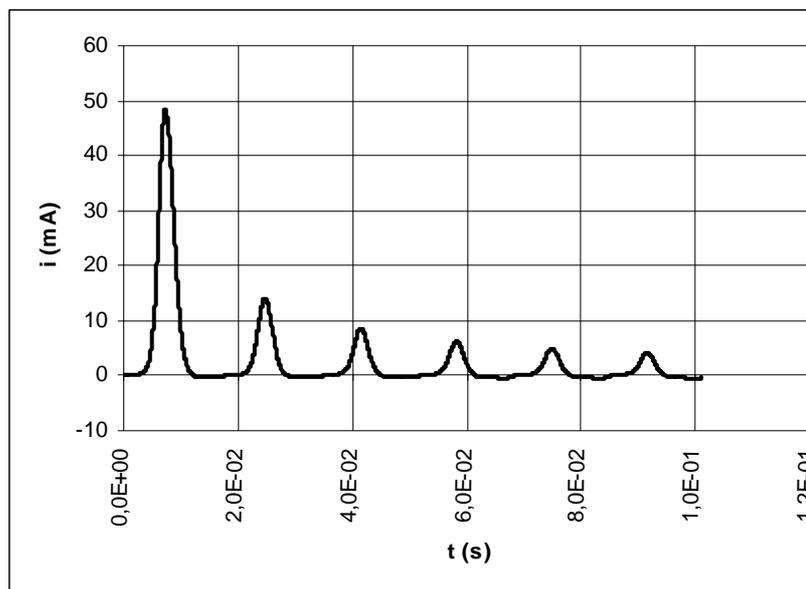


Figura 4.8 - Resultado da simulação TLM da energização por tensão senoidal: corrente de Inrush.

Pelo gráfico mostrado, se nota que o pico da corrente no primeiro semi-ciclo é mais de 2 vezes superior ao pico da corrente do semi-ciclos seguinte e maior ainda em relação

aos posteriores. Desta forma, se percebe que o comportamento do modelo de histerese é perfeitamente coerente quando nele é aplicada a modelagem TLM.

Tal como os casos anteriormente estudados para transitórios rápidos, esse resultado obtido permite que sejam levados adiante os testes do uso do método TLM com resultados experimentais, tal como também concluído nos itens anteriores deste capítulo. Também, este teste será apresentado no capítulo seguinte.

Não obstante, é importante ainda apresentar um dado importante do comportamento da modelagem TLM do transformador. No capítulo 2 foi mostrado que atingido o regime permanente após a energização, o laço de histerese corresponderia a uma degeneração de uma elipse, no gráfico do enlace de fluxo *versus* a corrente total de entrada no transformador. Na Figura 4.9 é então mostrado esse gráfico para o mesmo transformador hipotético, cujos parâmetros estão descritos na Equação (4.8). Nesta Figura se vê que, de fato, o laço de histerese aparece quando as referidas grandezas atingem o regime permanente.

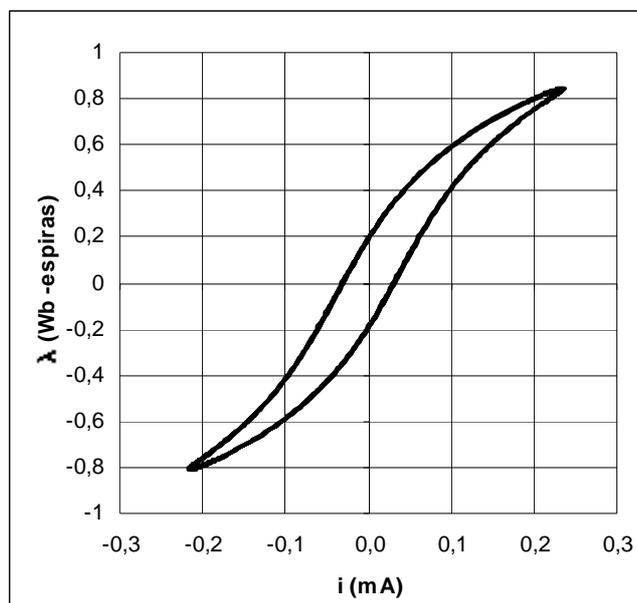


Figura 4.9 - Laço de histerese obtido pela simulação TLM para o regime senoidal.

Esse resultado demonstra a vasta amplitude do modelo de histerese proposto e, conseqüentemente, permite se vislumbrar a aplicabilidade do método TLM nas diversas

condições de energização e mesmo de funcionamento em regime de transformadores. Afinal, o comportamento transitório do transformador é definido a partir de condições obtidas a partir do regime permanente, que é a curva de magnetização.

CAPÍTULO 5

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO MÉTODO TLM FRENTE A RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 - COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DO MÉTODO TLM PARA ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE TRANSFORMADORES FRENTE A TRANSITÓRIOS ELÉTRICOS RÁPIDOS

Conforme demonstrado no capítulo 4, a utilização do método TLM permitiu a reprodução de forma coerente e significativamente precisa dos resultados teóricos dos dois principais efeitos da incidência de um surto de tensão num transformador : A distribuição da tensão de surto e a transferência do mesmo para outros enrolamentos. Tal fato encorajou, então, a realização de testes definitivos, que consistem na comparação entre resultados experimentais e resultados da modelagem do método TLM, que são mostrados a seguir.

5.1.1 - Comparação para o Estudo de Distribuição de Surtos de Tensão de Enrolamentos Contínuos e Homogêneos

Uma vez que, em comparação com o método analítico, o método TLM mostrou-se como satisfatoriamente precisa para a análise de surtos em enrolamentos contínuos homogêneos, o passo seguinte, e mais importante, consiste em confrontar resultados experimentais com os de simulação TLM . Para tanto, um enrolamento contínuo foi construído e ensaiado, permitindo a obtenção de diversos dados experimentais.

Características do Enrolamento e do Arranjo de Ensaio

O enrolamento contínuo construído para a obtenção de resultados experimentais foi elaborado de forma a ser o mais homogêneo possível, de acordo com os objetivos deste trabalho. Entretanto, é importante citar que esse objetivo é muito difícil de ser plenamente alcançado, pois enrolamentos contínuos reais apresentam características construtivas que inerentemente implicam na redução da homogeneidade. A principal característica dessa redução de homogeneidade vem a ser o efeito de borda dos campos elétrico e magnético, representado pela distorção dessas de linhas equipotenciais desses campos nos extremos do enrolamento. Ainda assim, a concepção do enrolamento contínuo foi baseada no máximo de semelhanças de características com um enrolamento contínuo de um transformador comercial de distribuição. Para ser mais específico, o enrolamento contínuo feito para o teste assemelha-se a uma das camadas do enrolamento de Alta-Tensão (25 kV) de um transformador de distribuição, cuja potência situa-se na faixa de 45 kVA. Na Tabela I estão apresentadas as características construtivas do enrolamento.

Diâmetro do condutor (mm)	1,00
Camada de verniz (mm)	0,1
Número de espiras (cobre)	248
Diâmetro interno (mm)	200
Isolamento externo	Papel <i>Presspan</i>
Isolamento interno (molde)	Bobina de papelão <i>Kraft</i>

Tabela I - Características construtivas do enrolamento utilizado para obtenção de dados experimentais.

Esse enrolamento possui nove terminais externos, para retirada de sinal de tensão. Desses terminais, 02 (dois) estão em seus extremos, enquanto que 07 (sete) são intermediários, igualmente separados por 31 espiras. Portanto, o enrolamento possui 08 (oito) seções iguais. Embora o núcleo desse enrolamento fosse de ar, no interior do mesmo foi colocado um cilindro de 175 mm de diâmetro, de comprimento de cerca de 50

cm, feito de alumínio, solidamente aterrado e centrado. Desta forma, se obteve uma capacitância à terra uniformemente distribuída¹, pelo fato da componente radial interna de campo elétrico se tornar uniformemente distribuída. Entretanto, esse cilindro não reduziu o efeito de bordas de campo elétrico radial interno, o que não garantiu a tanta uniformidade da capacitância entre espiras. Analogamente, o efeito desse mesmo cilindro é pouco significativo para o campo magnético, implicando na redução da uniformidade do parâmetro indutância do enrolamento.

Por sua vez, de forma a melhor reproduzir a situação teórica da aplicação de degrau de tensão, analisado em capítulos anteriores, essa aplicação de degrau de tensão se deu num dos terminais extremos do enrolamento, estando o outro aterrado. Para essa aplicação, foi utilizado um gerador de funções de bancada (*Minipa*®), ajustado com a saída de 50 Ω com onda-quadrada a 1,0 (um) Hz; tempo de frente de 100 ns e tempo de duração superior a 200 μ s, aproximando-se da condição de aplicação de um degrau de tensão por segundo. Para evitar sollicitação ao isolamento do enrolamento, a amplitude de tensão aplicada ficou em torno de 5 V. Na aplicação de tensão, registraram-se em osciloscópio simultaneamente a tensão de entrada do enrolamento e a tensão em cada um dos terminais, por vez. O terminal do extremo oposto ao da aplicação da tensão foi solidamente aterrado junto com o cilindro interno, de alumínio. E para evitar interferências de elementos de conexões, todos os pontos a aterrar foram unificados e somente uma conexão ao solo foi feita. A Figura 5.1 apresenta o arranjo experimental descrito, incluindo o sistema de medição utilizado.

De acordo com [16, 17 e 48], considerando as características construtivas do enrolamento, tem-se que são os seguintes os parâmetros elétricos do enrolamento :

Capacitância total à terra, $C_g \text{ total} = 1,6 \text{ nF}$;

Indutância efetiva total, $L_e \text{ efetiva} = 160 \text{ } \mu\text{H}$;

Capacitância total equivalente entre espiras, $C_s \text{ equivalente} = 1/8 \text{ pF}$;

É importante lembrar que, conforme citado no capítulo 1, o objetivo da aplicação do método TLM não contemplou o cálculo dos parâmetros, mas sim de considerá-los como conhecidos.

¹ Essa é uma característica de transformadores, garantida pela presença do núcleo magnético aterrado.

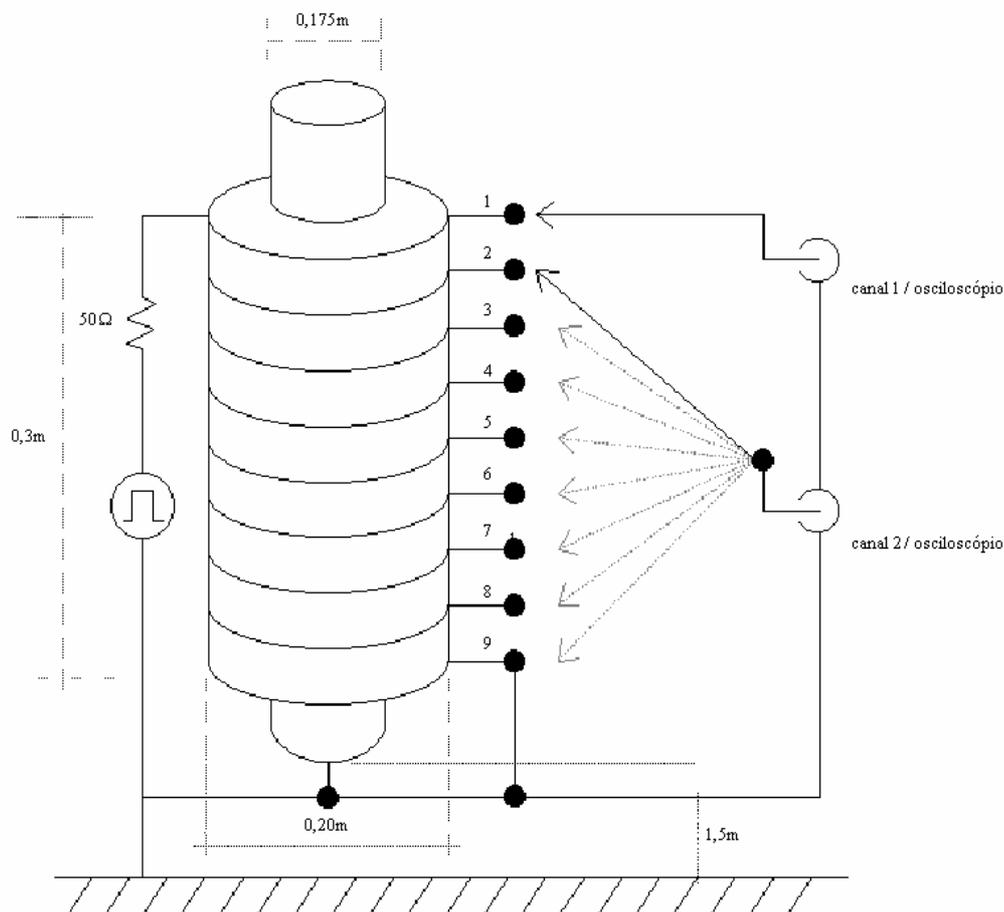


Figura 5.1 - Arranjo experimental para ensaio do enrolamento

Os resultados experimentais estão mostrados a seguir. Considerando a numeração utilizada na Figura 5.1 para os terminais do enrolamento testado, foi registrado o comportamento da tensão nos terminais 2; 3; 5 e 8, separadamente, durante a incidência do degrau entre o terminal 1 e a terra. Esse registro está apresentado nas Figuras 5.2 a 5.5, respectivamente, acrescido de resultados obtidos por simulação-TLM, para os terminais correspondentes. Em cada um dos gráficos anteriores está também apresentado o comportamento da tensão de entrada do enrolamento (terminal 1). Nos respectivos gráficos, as ordenadas apresentam a escala de 1 volt por divisão e a abscissa apresenta escala de 1 μ s por divisão.

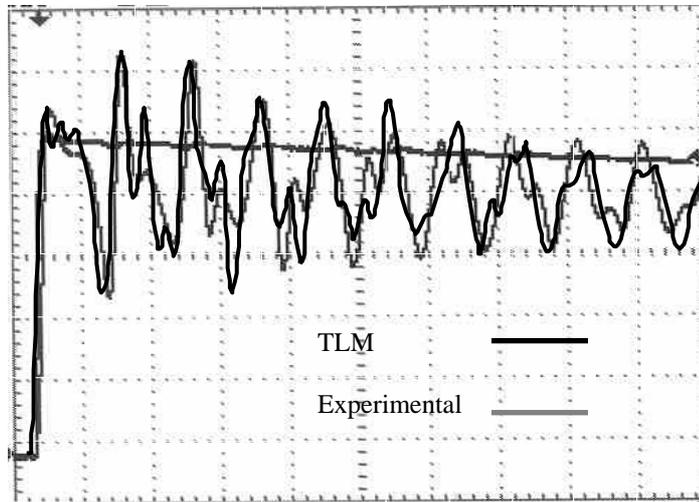


Figura 5.2 - Tensão de entrada e tensão no segundo terminal.

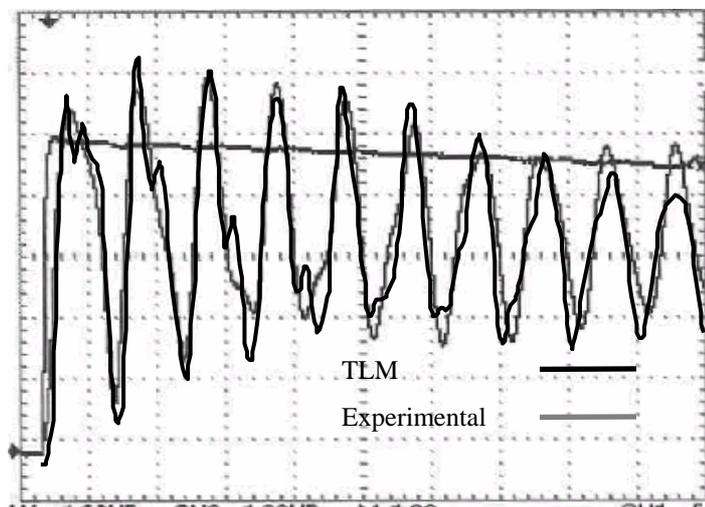


Figura 5.3 - Tensão de entrada e tensão no terceiro terminal.

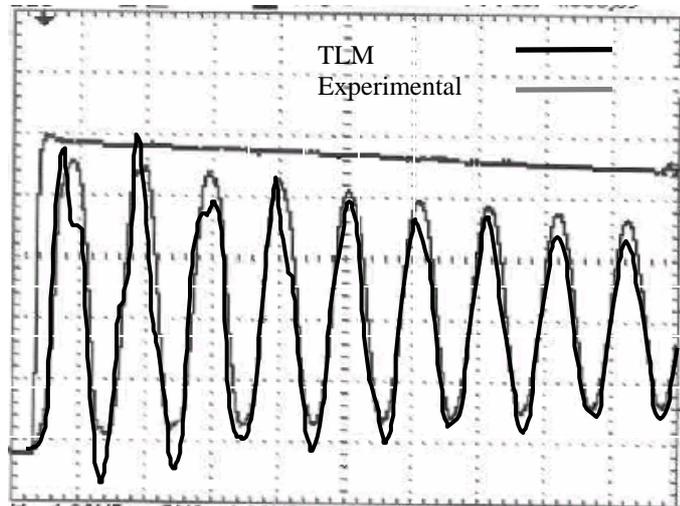


Figura 5.4 - Tensão de entrada e tensão no quinto terminal.

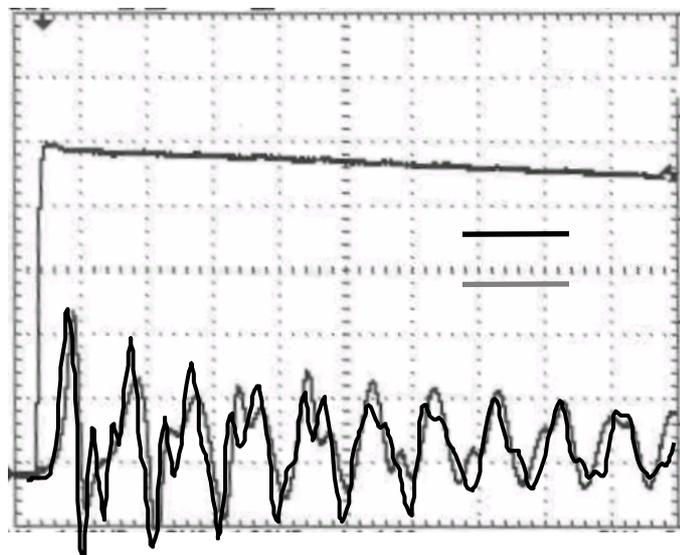


Figura 5.5 - Tensão de entrada e tensão no oitavo terminal.

A obtenção dos resultados pelo método TLM se deu pela modelagem do arranjo de teste de forma muito semelhante àquela feita no capítulo 4, onde foi utilizada a modelagem TLM para a reprodução de resultados teóricos. Uma singela diferença do estudo do capítulo 4 é tão somente a dimensão da matriz de admitâncias, que para o caso experimental deve ser 8×8 , de forma a cada seguimento elementar do enrolamento coincidir com um dos oito seguimentos existentes entre terminais do enrolamento de teste. Complementarmente, as outras informações imprescindíveis para a modelagem do enrolamento são: Primeiramente, no que diz respeito à discretização do enrolamento, esta baseou-se nas secções existentes no enrolamento. Portanto, o enrolamento foi dividido em 8 (oito) trechos, contendo cada um os seguintes parâmetros:

$$\Delta C_s = 1 \text{ pF}; \Delta L_s = 20 \mu\text{H}; \Delta C_g = 0,2 \text{ nF} \quad (5.1)$$

Complementarmente, se verificou que para a simulação por TLM apresentasse resultados mais próximos aos experimentais, a capacitância de entrada do canal do osciloscópio teve que ser considerada, representando um acréscimo no valor de ΔC_g , da Equação (5.1), de 10 pF entre a terra e cada um dos terminais onde foi registrado o comportamento da tensão. Então, para a simulação, o intervalo de integração, Δt , foi de 10 ns, e foi obtido também por base em valores de constantes de tempo envolvidas no circuito.

De acordo com as Figuras 5.2 a 5.5, a comparação entre os resultados experimentais e os resultados obtidos utilizando o método TLM mostra que o método apresenta resultados satisfatórios, mais uma vez. Não obstante existam pequenas diferenças entre os resultados, é importante salientar que uma das prováveis causas dessas diferenças está na opção pelo número de seguimentos utilizados na discretização do enrolamento, oito. Afinal, das Figuras 5.2 a 5.5 se percebe que há uma pequena diferença de resposta em frequência do enrolamento real e de seu modelo. Por sua vez, trabalhos como [16], mais especificamente, e [49], apresentam discussões apropriadas sobre situações bastante semelhantes, para o caso de comparação entre resultados experimentais e de modelos de linhas de transmissão sob o efeito de propagação de surtos. Não obstante, é ainda muito importante citar que a comparação entre os resultados da simulação TLM e os teóricos,

apresentada no capítulo 4, também demonstra singelas discrepâncias semelhantes às notadas nas Figuras 5.2 a 5.5. Naquele caso, a solução teórica é tomada como referência por considerar o enrolamento como discretizado em trechos infinitesimais, enquanto que a discretização do enrolamento em apenas dez trechos dá um resultados significativamente satisfatórios. Essas deduções afastam significativamente a possibilidade que a discrepância entre os resultados sejam de origem numérica, somando-se a isso o fato de o método TLM ser intrinsecamente convergente, tal como em resultados mostrados em [11-14] e em [18-21].

No que diz respeito ao comportamento da tensão nos terminais escolhidos do enrolamento, se verifica que ao longo do mesmo efetivamente ocorrem tensões oscilantes com amplitudes maiores que a tensão de entrada, o que confirma a severidade de solicitação ao isolamento antes que o enrolamento entre em regime permanente, tal como descrito teoricamente no Capítulo 1. Conforme mencionado naquele capítulo, o valor de $\alpha \ell$ é que define a existência dos transitórios no enrolamento, após a incidência do degrau. E um enrolamento homogêneo que tenha $\alpha \ell$ próxima à unidade apresentará prontas condições para que a tensão distribua-se prontamente uniforme ao longo do enrolamento. Por outro lado, à medida em que $\alpha \ell$ é maior que a unidade, mais condições haverá para a existência de transitórios, que originam tensões ainda maiores que a incidente. Pela simulação TLM, utilizando os valores dos parâmetros, da Equação 5.1, calcula-se o valor de $\alpha \ell$ do enrolamento construído :

$$\alpha \ell = \sqrt{\frac{N C_g}{C_e \ell}} \ell = \sqrt{\frac{8 * 500 \text{pF/m}}{(20 \text{pF m} / 8)}} 0,3 = 22 \quad (5.2)$$

O que representa um valor propício para que o enrolamento apresente as condições favoráveis para ocorrências de falhas de isolamento, no caso de surtos de elevada amplitude incidentes no mesmo. Deve-se, entretanto, considerar que enrolamentos instalados em transformadores comerciais apresentam parâmetros de capacitâncias diferentes daqueles utilizados no experimento. Na maioria das vezes, a proximidade da bobina de baixa tensão aumenta o valor da capacitância C_g , contribuindo para o aumento de $\alpha \ell$. Também, contribuem para o aumento de C_g a presença de materiais dielétricos

como resinas ou óleos. Conseqüentemente, em condições normais, esse enrolamento tenderia a apresentar um valor de αl ainda mais elevado.

Os resultados obtidos até aqui permitem concluir que a modelagem TLM se aplica perfeitamente a ser utilizada como ferramenta para a busca em melhorias de projetos de enrolamentos de transformadores, visando a redução de falhas devidas a incidência de surtos de tensão, através da conformação do surto incidente. Uma análise mais voltada para problemas comuns de projetos de enrolamentos de transformadores está apresentada em [42].

5.1.2 - Comparação para o Estudo da Transferência de Surtos de Tensão entre Enrolamentos de Transformadores

De forma análoga à que foi feita para o caso anterior, a comparação entre os resultados experimentais e da modelagem TLM a respeito da transferência de surtos entre enrolamentos de transformadores isoladores foi efetuada através de realização de teste consistindo na aplicação de um degrau de tensão, de pequena amplitude, num dos enrolamentos de um transformador monofásico e o registro do comportamento da tensão de saída, transferida para o outro enrolamento. Embora essa verificação possa ser feita com o transformador sob carga, deve-se considerar que é muito ampla a variedade de condições e de tipos de cargas. Portanto, a escolha de uma carga em específico tornaria o estudo muito particular. Por exemplo, para uma mesma potência nominal, uma carga de determinada impedância pode apresentar diferentes valores de fator de potência, capacitivo, indutivo ou unitário. Por outro lado, os elementos capacitivos, indutivos e resistivos da carga interagem diferentemente com o circuito do transformador para definir a forma de onda do surto transferido. Portanto, neste trabalho se optou pela realização de ensaios em transformadores em vazio, pela facilidade na repetibilidade dos resultados, uma vez que a condição de transformador em vazio é facilmente possível de se obter, e pelo fato de que essa condição também é freqüente em instalações elétricas.

Desta forma, um tipo de transformador isolador foi definido para ser utilizado no teste. Para se verificar a repetibilidade de comportamento e dada a disponibilidade, cinco exemplares idênticos foram testadas, através da aplicação de um surto do tipo degrau de tensão, de forma análoga ao que foi simulado com o método TLM, no capítulo 3. Com a

finalidade de testar a validade da mesma, o tipo de transformador escolhido possui blindagem eletrostática. Os resultados dos ensaios foram comparados com a simulação da mesma condição de teste, usando a modelagem TLM:

O tipo de transformador utilizado nos testes apresenta as seguintes características: Transformador tipo isolador, 150 V / 500 V - 150 VA - 60 Hz; Blindagem eletrostática em alumínio, disposta entre os enrolamentos de alta (externo) e baixa (interno), estando esses enrolamentos concêntricos e sobrepostos; terminal de terra acessível externamente, através de condutor específico.

Também de forma análoga ao teste descrito no item anterior, o ensaio do transformador através da aplicação de degrau de tensão se deu pelo uso de um gerador de funções de bancada (*Minipa*®), ajustado com a saída de $50\ \Omega$ com onda-quadrada a $1,0$ (um) Hz; tempo de frente de $100\ \text{ns}$ e tempo de duração superior a $200\ \mu\text{s}$, aproximando-se da condição de aplicação de um degrau de tensão por segundo. Para evitar solicitação ao isolamento do enrolamento, a amplitude de tensão aplicada ficou em torno de $5\ \text{V}$. Os registros de tensão de entrada e de saída não foram feitos simultaneamente, para evitar que através do osciloscópio haja a conexão galvânica entre os enrolamentos primário e secundário. A Figura 5.6 mostra um diagrama esquemático do arranjo de ensaio utilizado.

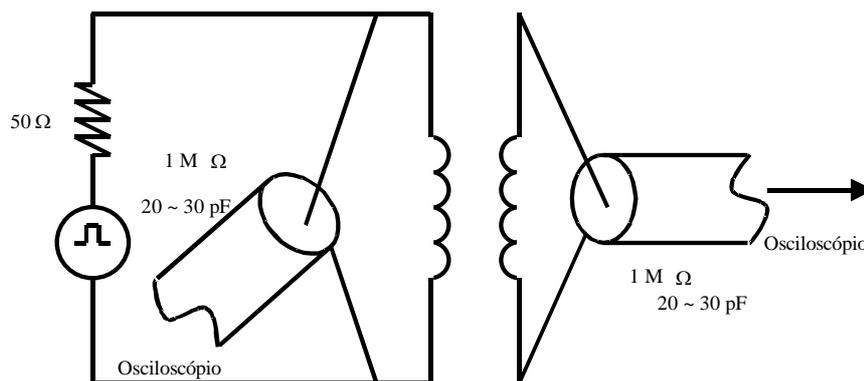


Figura 5.6 - Diagrama esquemático do arranjo de ensaio

Os cinco exemplares testados apresentaram o mesmo comportamento entre si, reforçando as conclusões a serem obtidas a respeito do comportamento desse tipo de transformador.

Na Figura 5.7 estão mostrados os gráficos da tensão de entrada bem como da tensão de saída experimental típica para a condição de teste do transformador sem uso da

blindagem eletrostática. No mesmo gráfico é também apresentado o comportamento da tensão de saída obtida a partir da modelagem do transformador, pelo método TLM. Essa modelagem do transformador, por sua vez, seguiu os mesmos princípios estabelecidos no capítulo 3. Ou seja, os circuitos utilizados para a modelagem do transformador foram aqueles mostrados nas figuras 3.5 e 3.6. De acordo com essas figuras, os parâmetros do transformador referidos ao lado de 500 V, obtidos por ensaio, foram :

$$L_1 = L_2 = 4 \text{ mH}; r_1 = r_2 = 13,5 \text{ } \Omega; R_p = 5,56 \text{ k}\Omega \text{ e } L_m = 67,9 \text{ mH} \quad (5.3)$$

Ainda de acordo com as Figuras 3.5 e 3.6, os valores de capacitâncias referidos ao lado de 500 V, obtidos experimentalmente [4,28], foram :

$$C_{1g} = 10 \text{ pF}; C_{2g} = 5 \text{ pF e } C_{12} = 10 \text{ pF} \quad (5.4)$$

É ainda muito importante frisar que a capacitância de entrada do osciloscópio, de cerca de 50 pF e sua impedância de 1 M Ω também devem ser consideradas.

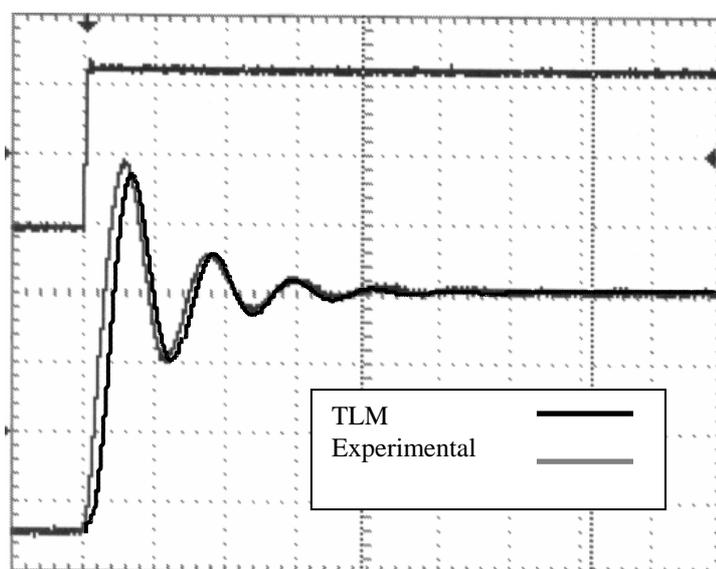


Figura 5.7 - Resultados experimental típico do ensaio do Transformador.

Escalas : Vertical : 10 V/divisão para tensão de entrada e 2 V/div para tensão de saída; Horizontal : 5 μ s/divisão.

Pela comparação entre os gráficos da tensão de saída, da Figura 5.6, se verifica que mais uma vez a modelagem TLM reproduz de forma muito satisfatória o comportamento real do transformador, no que diz respeito à transferência de surtos. Desta forma, se permite certificar da importância da interação entre a fonte e os parâmetros internos do transformador, que define o aparecimento de sobretensões ressonantes, que se tornam um importante fator de solicitação ao isolamento para o qual o surto é transferido.

Adicionalmente, os resultados obtidos permitem que seja utilizado o método TLM para a simulação do comportamento desse mesmo transformador sob outras diversas condições. Por exemplo, a aplicação de um surto de tensão do tipo 1,2/50 μ s; a presença e influência dos diversos tipos de cargas, incluindo cabos e suas impedâncias de surtos, bem como diversas outras situações comumente encontradas em instalações elétricas. Esses resultados realçam a importância da aplicação do método TLM para este tipo de situação.

Complementarmente, é importante citar que um segundo teste foi realizado com o mesmo transformador, tendo conectado à terra o terminal de sua blindagem eletrostática bem como potencial negativo da fonte de degrau. O resultado obtido foi que não se notou nenhuma influência da presença dessa blindagem eletrostática. De fato, a blindagem eletrostática não tem aplicabilidade no desvio de surtos, mas sim de sinais sustentados, de frequências superiores a 10 MHz, quando as capacitâncias envolvidas teriam o efeito desejado de desvio do sinal à terra, através de um caminho de baixa reatância[41].

Um último, porém importante, detalhe a respeito da simulação TLM se refere à influência da saturação magnética na forma da transferência de surtos. Tanto na simulação apresentada como em via de regra, a influência da saturação é desprezível, tal como previsto teoricamente no capítulo 1. Resultados experimentais comprovando essa afirmação estão apresentados em [43-45].

5.2 - COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DO MÉTODO TLM PARA ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE TRANSFORMADORES FRENTE A TRANSITÓRIOS ELÉTRICOS NA FREQUÊNCIA INDUSTRIAL

- *Corrente de Inrush*

Os resultados obtidos no item 4.2 , do capítulo 4 demonstraram que através do método TLM é possível reproduzir de forma coerente o comportamento da corrente de energização de transformadores. Aquele resultado também encorajou a realização de testes de comparação entre resultados experimentais e resultados da modelagem do método TLM. Tais resultados desses testes são mostrados a seguir e confirmam mais uma vez a validade do uso do método para esse tipo de comparação. Portanto, se verifica mais uma situação em que a aplicação da modelagem TLM permite que de forma simples sejam feitos estudos de comportamento transformadores nas diversas condições de chaveamento, permitindo avaliar a amplitude da corrente de energização e de suas conseqüências.

A obtenção de dados experimentais se deu de forma mais simples que nos casos anteriores. Foi realizada a energização por fonte senoidal de um tipo de transformador escolhido e a corrente de energização foi registrada através de ponteira de corrente , ligada a um dos canais do osciloscópio, enquanto no outro canal era registrada a tensão aplicado nos terminais do transformador. O tipo de transformador escolhido apresenta a seguintes características : 120 VA - 60 Hz, (220/380)V. O circuito representativo deste transformador é o mesmo mostrado na Figura 1.16 e seus parâmetros referidos ao lado de 220 V e obtidos experimentalmente são :

$$r_s = 9,7 \Omega, L_s = 1 \text{ mH}; R_p = 10 \text{ k}\Omega \quad (5.5)$$

Também experimentalmente, a curva de magnetização do transformador, ajustada de acordo com a expressão apresentada no Capítulo 2 , tem os seguintes parâmetros :

$$m_1 = 63,084 \text{ mA}; m_2 = 2,4 \text{ Wb}^{-1} \quad (5.6)$$

Experimentalmente, o transformador foi então submetido a diversas energizações na rede de 220 V, até que a condição crítica de máxima corrente de pico fosse alcançada. Uma vez alcançado esse valor de corrente, o gráfico da corrente foi registrado, bem como o da tensão aplicada nos terminais do transformador, a fim de se calcular o ângulo θ correspondente, de acordo com o que foi descrito no Capítulo 2. O valor de θ então calculado foi $\theta = 0$ rad.

A simulação através da modelagem TLM dessa condição crítica de sobrecorrente verificada experimentalmente foi realizada a partir da modelagem do circuito do transformador a partir dos parâmetros das Equações (5.5) e (5.6), tal como feito no capítulo 3. Através da simulação computacional foi verificado que a condição de corrente crítica ocorre quando o fluxo residual é máximo, antes da energização, e a tensão inicial corresponde a $\theta = 0$. Esse máximo fluxo residual é representado pelo enlace de fluxo máximo, que é calculado pela seguinte equação, já utilizada no capítulo 2 :

$$N\phi_{m\acute{a}x} = \lambda_{m\acute{a}x} = \frac{V_{ef} \sqrt{2}}{2\pi f} \quad (5.7)$$

Neste caso, considerando os parâmetros do transformador, o máximo enlace de fluxo inicial foi de 0,8 Wb-espira. Na Figura 5.7 está então mostrada a comparação entre os resultados experimental e da modelagem TLM.

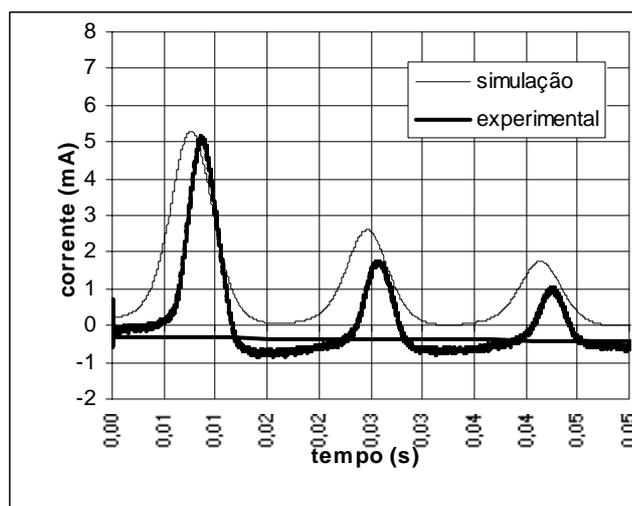


Figura 5.7 - Comparação entre resultados experimental e da simulação TLM para transformador escolhido.

Pela comparação entre os resultados experimentais e da simulação TLM se verifica que os resultados ambos apresentam o mesmo valor de pico de corrente, embora os gráficos tenham discrepâncias para os demais picos, de menor intensidade. A razão dessa discrepância está no fato de que o ajuste da curva de magnetização pela função seno hiperbólico é mais adequado para valores de indução próximos ou mais altos em relação àqueles da região de saturação[46]. De fato, o tipo de ajuste utilizado não permite representar fielmente as variações existentes na curva de magnetização para pequenos valores de indução. Entretanto, o objetivo do uso da modelagem TLM é principalmente o de prever o valor máximo da corrente de *inrush*, o que é alcançado muito satisfatoriamente. Por outro lado, o uso de funções mais complexas para o ajuste da curva de magnetização pode dar resultados quase que idênticos para o caso real e a simulação, representando maior esforço de cálculo.

Portanto, esses resultados obtidos mostram mais uma vez a validade da aplicação da modelagem TLM para o estudo de transformadores em situações diversas que aquelas estudadas aqui e que têm muita importância para estudos de casos de compatibilidade eletromagnética.

5.3 - CONCLUSÃO

Diante da coerência dos resultados aqui apresentados, de forma gradativa ao longo do trabalho, é possível concluir que o método numérico TLM permite o desenvolvimento de ferramentas computacionais eficientes para a análise do comportamento da maioria dos tipos de transformadores frente às solicitações transitórias elétricas. Muito embora tenha sido tornado claro o complexo cenário de condicionantes para análise de problemas relacionados a transitórios elétricos em transformadores, a escolha dos casos tidos como mais representativos para serem simulados pela modelagem TLM permitiu demonstrar como esse método facilita a análise dos problemas de transitórios elétricos em transformadores, contando com o desenvolvimento de programas em ambiente de planilhas eletrônicas, fartamente disponíveis em micro-computadores de empresas.

Então, desde a análise teórica de cada um dos casos seletos, passando pela demonstração do método TLM através de exemplos, até a repetição dos resultados

teóricos, o método se mostrou como promissor. Finalmente, com a validação experimental, para cada um dos casos tidos como mais representativos, o método demonstrou singular eficiência e facilidade em lidar, pelo fato da possibilidade de desenvolver programas em planilhas eletrônicas.

Os resultados obtidos permitem que efetivamente se vislumbre o uso do método, com sua eficiência, na análise do comportamento frente a transitórios elétricos da grande maioria dos transformadores existentes, representando uma opção simples e viável para a solução de problemas de muitos daqueles que lidam com transformadores. Fabricantes e/ou concessionários de energia elétrica.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Diante da coerência dos resultados aqui apresentados, de forma gradativa ao longo do trabalho, é possível concluir que o método numérico TLM permite o desenvolvimento de ferramentas computacionais eficientes para a análise do comportamento da maioria dos tipos de transformadores frente às solicitações transitórias elétricas. Iniciando pela descrição do cenário de complexidades que esse tipo de análise se insere, fica patente como foram acertadas as escolhas do método numérico, com a justificativa pertinente do apoio entre as instituições envolvidas nesse trabalho, bem como dos casos tidos como mais representativos para serem simulados pela modelagem TLM. Em seguida, a análise teórica dos casos escolhidos, com abordagem analítica justificou a necessidade do uso de uma ferramenta computacional simplificadora. Esta ferramenta, por sua vez, se apresentou como sendo baseada no método numérico TLM, que foi apresentado através da análise de circuitos clássicos, com comparação com outro método numérico, o Euler-Simples. A eficiência da aplicação do método justificou a aplicação do método TLM para reproduzir circuitos relacionados com os casos de transitórios previamente escolhidos e, diante de novo sucesso, o método finalmente teve seus resultados confrontados com resultados experimentais, onde a eficiência se mostrou como sendo efetivamente alta, validando a utilização do método TLM para a análise de transitórios elétrico em transformadores. Como principal resultado dessa aplicabilidade está na forma como esse método facilita a análise dos problemas de transitórios elétricos em transformadores, contando com o desenvolvimento de programas em ambiente de planilhas eletrônicas, fartamente disponíveis em micro-computadores de empresas.

Diante disso, as conclusões para cada um dos dois tipos de transitório são apresentadas, incluindo sugestões de diversas outras aplicações do método TLM, em condições semelhantes, advindas do desdobramento dos resultados mostrados neste

trabalho. Desta forma, se permite que a continuidade desse trabalho possa ser realizada, contribuindo para que se consolide o uso do método TLM do método, com sua eficiência, na análise do comportamento frente a transitórios elétricos da grande maioria dos transformadores existentes.

6.1 - CONCLUSÕES REFERENTES AO ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE TRANSFORMADORES FRENTE A TRANSITÓRIOS ELÉTRICOS RÁPIDOS

Os resultados alcançados na análise do comportamento de transformadores frente aos transitórios elétricos rápidos, mostrados ao longo do desenvolvimento deste trabalho, denotam a aplicabilidade do método numérico TLM na solução de problemas dessa natureza, que muito freqüentemente se apresenta para aqueles que lidam com transformadores.

No caso de transitórios rápidos, os resultados obtidos neste trabalho permitem que, através de simples modificações, sejam estudadas as distribuições de surtos de tensão para os tipos de onda padronizadas, 1.2/50 μ s, plena ou cortada, para praticamente qualquer tipo de enrolamento monofásico. De fato, a distribuição para qualquer forma de onda de tensão pode ser estudada, porém as padronizadas têm maior interesse. Já para esse estudo em enrolamentos trifásicos, são necessárias modificações mais significativas, que decorrem dos inerentes acoplamentos capacitivos e indutivos que existem entre os enrolamentos de cada fase. Não obstante, boa parte da complexidade para o caso de enrolamentos trifásicos reside em apenas determinar os valores dos parâmetros de acoplamentos capacitivos e indutivos. Entretanto, tal tarefa é também possível de se fazer com a utilização do mesmo método TLM, em duas ou três dimensões, através de um enfoque de campo, em vez do enfoque de circuito elétrico, como foi decidido para este trabalho, conforme esclarecido na introdução deste trabalho. Evidentemente, os programas que incluam cálculos de parâmetros tornam-se de porte consideravelmente maior e podem mesmo se tornar inviáveis de serem feitos em planilhas, muito embora a eficiência do método TLM, aqui demonstrada, justifica essa pesquisa. Ainda no que diz respeito aos casos que mais são

estudados atualmente, os resultados aqui apresentados permitem deduzir que enrolamentos contínuos vão freqüentemente apresentar uma distribuição inicial de surto de tensão de surto que concentrará elevado campo elétrico nas primeiras espiras do enrolamento, o que é traduzido por um elevado valor do fator de distribuição, αl . Por sua vez, a utilização do método TLM permite que se analise facilmente a distribuição de enrolamentos em *panquecas*, que é um dos recursos mais utilizados para se evitar os danos dessa concentração de campo elétrico. Afinal, o enrolamento contínuo é substituído por vários enrolamentos menores, segmentados, que podem ser analisados separadamente. Por fim, enrolamentos mais complexos, dos tipos barril, por exemplo, requerem ajustes mais refinados, mas que seguem a mesma linha, sendo um problema de cálculo de parâmetros de acoplamentos indutivo e capacitivo.

No que diz respeito à transferência de surtos através de enrolamentos, a análise é ainda mais dependente do cálculo de parâmetros. Afinal, os resultados apresentados demonstram que o método TLM reproduz muito bem os resultados experimentais, desde que os parâmetros do transformador sejam calculados corretamente, incluindo o caso trifásico. Como os problemas da distribuição de surtos de tensão e da transferência entre enrolamentos são problemas muito relacionados, do tipo causa e efeito, essas conclusões permitem que se sugira que trabalhos futuros relacionados com a utilização do método TLM para a análise de surtos em transformadores tratem desses dois problemas simultaneamente, partindo do uso do método TLM para o cálculo de parâmetros de transformadores trifásicos comerciais, seguida da simulação de seus enrolamentos frente à incidência de surtos.

6.2 - CONCLUSÕES REFERENTES AO ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE TRANSFORMADORES FRENTE A TRANSITÓRIOS ELÉTRICOS NA FREQUÊNCIA INDUSTRIAL

Tal como foi frisado durante o desenvolvimento deste trabalho, a preocupação em reproduzir a corrente de energização de transformadores, a dita corrente de *inrush*, ficou por conta de prever satisfatoriamente o valor máximo da amplitude da corrente transitória, considerando os efeitos não-lineares do núcleo do transformador. E, mais uma vez, o método TLM se mostrou como muito eficiente, uma vez que permitiu perfeitamente essa previsão levando ainda em conta a indutância de dispersão do enrolamento, sem aumentar o grau de complexidade do circuito do transformador, o que aconteceria com outros métodos. Entretanto, com o intuito de refinamento ainda maior, a modelagem mais detalhada do laço de histerese é um item importante a se considerar para a utilização do método TLM para uma completa reprodução dos resultados experimentais. Muito embora não fosse essa a intenção deste trabalho, para trabalhos futuros se sugere que essa modelagem detalhada inclua a curva de magnetização inicial, do material magnético, que tem influência na atenuação da componente cc da corrente transitória, mas que não altera o valor da amplitude máxima da mesma, conforme se pode ver na comparação entre os resultados experimentais e de simulação, no final do Capítulo 5.

Não obstante, os resultados alcançados pelo método TLM mais uma vez permitem que as características desse, a eficiência e a simplicidade, façam com que a tarefa de analisar esse importante problema em transformadores seja facilitada. Com isso, a previsão da corrente transitória de energização, utilizando uma modelagem simplificada de histerese, torna-se acessível e possível de também ser estendida para o caso trifásico.

ANEXO 1

SISTEMA MATRICIAL DE CÁLCULO DO POTENCIAL DOS NÓS DO MODELO DO ENROLAMENTO CONTÍNUO

Conforme citado no Capítulo 4, o cálculo do potencial dos nós do modelo TLM para o caso estudado analiticamente se dá pela análise nodal. Considerando o enrolamento seccionado em dez trechos, tal como descrito no referente capítulo, é apresentado na Figura A1.1, se definem os nós que terão o potencial calculado. O solo perfeito é considerado como tendo potencial nulo, de referência :

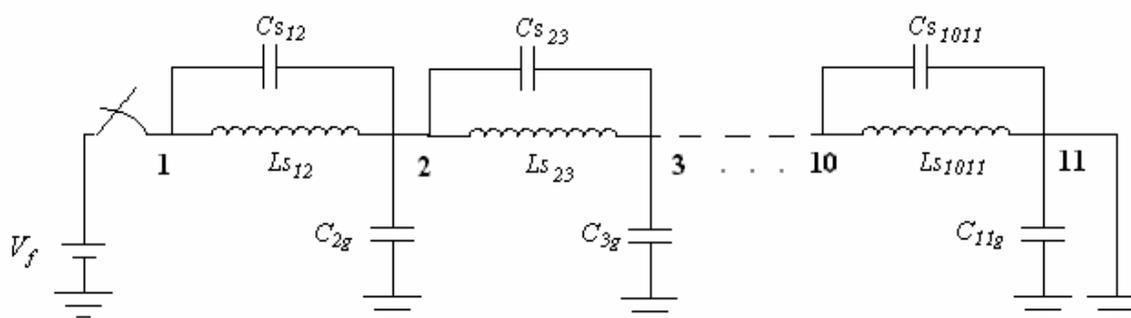


Figura A1.1 - Representação do enrolamento estudado no Capítulo 2 - Definição dos nós

A resolução do circuito, pelo método TLM, é análoga à do circuito *RLC*-série, do Capítulo 2, onde todos os elementos *L* e *C* são modelados por *stub*. Essa utiliza a análise de nós, baseando-se na seguinte forma matricial :

$$\begin{bmatrix} I_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_k \end{bmatrix} \quad (\text{A1.1})$$

Na qual a $[I_k]$ representa as incidências de corrente, que são calculadas pela transformação das fontes de tensão em fontes de correntes. $[V_k]$ representa os potenciais, incógnitas. O índice k , representativo da iteração de cálculo, indica que essas matrizes são atualizadas a cada passo de cálculo. Já a matriz $[Y]$, representativa da admitância, tem

seus parâmetros constantes. A matriz $[I_k]$ é mostrada a seguir, baseando-se na Figura A1.1.

Os resultados obtidos no Capítulo 4 partiram de uma condição inicial nula para todo o circuito do representativo do enrolamento.

Também baseando-se na Figura A1.1, as Equações (A1.3) a (A1.6) definem cada um

$$\begin{aligned}
 [I_k] = & \left[\begin{array}{c}
 \frac{V_o}{R_o} + 2 \frac{V L s^i_{12}}{Z L s_{12}} + 2 \frac{V C s^i_{12}}{Z C s_{12}} \\
 2 \left(\frac{V L s^i_{23}}{Z L s_{23}} - \frac{V L s^i_{12}}{Z L s_{12}} + \frac{V C}{Z C_{2g}} \frac{2g^i}{Z C s_{23}} - \frac{V C s^i_{12}}{Z C s_{12}} \right) \\
 2 \left(\frac{V L s^i_{34}}{Z L s_{34}} - \frac{V L s^i_{23}}{Z L s_{23}} + \frac{V C}{Z C_{3g}} \frac{3g^i}{Z C s_{34}} - \frac{V C s^i_{23}}{Z C s_{23}} \right) \\
 2 \left(\frac{V L s^i_{45}}{Z L s_{45}} - \frac{V L s^i_{34}}{Z L s_{34}} + \frac{V C}{Z C_{4g}} \frac{4g^i}{Z C s_{45}} - \frac{V C s^i_{34}}{Z C s_{34}} \right) \\
 2 \left(\frac{V L s^i_{56}}{Z L s_{56}} - \frac{V L s^i_{45}}{Z L s_{45}} + \frac{V C}{Z C_{5g}} \frac{5g^i}{Z C s_{56}} - \frac{V C s^i_{45}}{Z C s_{45}} \right) \\
 2 \left(\frac{V L s^i_{67}}{Z L s_{67}} - \frac{V L s^i_{56}}{Z L s_{56}} + \frac{V C}{Z C_{6g}} \frac{6g^i}{Z C s_{67}} - \frac{V C s^i_{56}}{Z C s_{56}} \right) \\
 2 \left(\frac{V L s^i_{78}}{Z L s_{78}} - \frac{V L s^i_{67}}{Z L s_{67}} + \frac{V C}{Z C_{7g}} \frac{7g^i}{Z C s_{78}} - \frac{V C s^i_{67}}{Z C s_{67}} \right) \\
 2 \left(\frac{V L s^i_{89}}{Z L s_{89}} - \frac{V L s^i_{78}}{Z L s_{78}} + \frac{V C}{Z C_{8g}} \frac{8g^i}{Z C s_{89}} - \frac{V C s^i_{78}}{Z C s_{78}} \right) \\
 2 \left(\frac{V L s^i_{910}}{Z L s_{910}} - \frac{V L s^i_{89}}{Z L s_{89}} + \frac{V C}{Z C_{9g}} \frac{9g^i}{Z C s_{910}} - \frac{V C s^i_{89}}{Z C s_{89}} \right) \\
 2 \left(\frac{V L s^i_{1011}}{Z L s_{1011}} - \frac{V L s^i_{910}}{Z L s_{910}} + \frac{V C}{Z C_{10g}} \frac{10g^i}{Z C s_{1011}} - \frac{V C s^i_{910}}{Z C s_{910}} \right) \\
 2 \left(\frac{V C}{Z C_{10g}} \frac{11g^i}{Z C s_{1011}} - \frac{V L s^i_{1011}}{Z C s_{1011}} - \frac{V C s^i_{1011}}{Z C s_{1011}} \right)
 \end{array} \right] \quad (A1.2)
 \end{aligned}$$

dos elementos da matriz de admitância, $[Y]$:

$$Y_{11} = \frac{1}{R_f} + \frac{1}{ZLs_{12}} + \frac{1}{ZCs_{12}}; \quad (A1.3)$$

$$Y_{ii} = \frac{1}{ZLs_{i-1,i}} + \frac{1}{ZLs_{i,i+1}} + \frac{1}{ZCs_{i-1,i}} + \frac{1}{ZCs_{i,i+1}} + \frac{1}{ZC_{ig}}, \text{ se } 2 \leq i \leq 10; \quad (A1.4)$$

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -\frac{1}{ZLs_{ij}}, \text{ somente se } j = i + 1; \text{ sendo que } 1 \leq i \leq 10; \quad (A1.5)$$

$$Y_{ij} = Y_{ji} = 0, \text{ se } j \neq i + 1, \text{ sendo que } 1 \leq i \leq 10; \quad (A1.6)$$

$$Y_{1111} = \frac{1}{R_c} + \frac{1}{ZLs_{1011}} + \frac{1}{ZCs_{1011}}; \quad (A1.7)$$

Desta forma, tal como prevê o método TLM, a matriz $[V_k]$ é calculada, a partir do processo de inversão de matriz, obtendo-se os potenciais dos onze nós. Calculam-se, então as respectivas reflexões para os elementos *stubs*, bem como suas reflexões, atualizando a matriz $[I_k]$, através de novos valores de tensões incidentes. O processo é então reiniciado e perdura até que obtenham quantidade de dados suficientes.

A implantação desse tipo de cálculo, em planilhas eletrônicas, é relativamente simples e, normalmente, requer pequeno espaço de disco.

ANEXO 2

Disco contendo os programas de modelagem TLM , referentes aos Capítulos 3 , 4 e 5. Programas em Planilha *Excel*®

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - COLTMAN, J. W. The Transformer. *IEEE Industry Application Magazine*. January / February, 2002.
- [2] - BLUME, L.F. ; BOYAJIAN, A. Abnormal Voltages Within Transformers. *AIEE Transactions*, New York, vol. 38 , pp. 577-620, Feb. 1919.
- [3] - BEWLEY, L. V. *Travelling Waves on Transmission Systems*. 2.ed. New York : John Wiley & Sons, 1951.
- [4] - LAVERS, J. D. ; LAVERS, E. D. 2D vs. 3D Models to Predict Equivalent Circuit Parameters for High Frequency Transformers. In : MAGNETICS CONFERENCE, 2002 - INTERMAG Europe 2002 (Apr.-May 2002 : Amsterdam). *Digest of Technical Proceeding*. Amsterdam, pp. DQ7
- [5] - KHAN, S. H. ; EL-SHAWISH, J. M. ; GRATTAN, K. T. V. Finite Element Modeling of Saturation and Eddy Current Effects in Commercial Variable Transformers. *IEEE Transactions on Magnetics*, New York, Vol. 37, Issue 4, p. 2783-2786, Jul. 2001.
- [6] - ZHOU, L.M. ; BOGGS, S. Effect of High Frequency Cable Attenuation on Lightning-Induced Overvoltages at Transformers. In : RURAL ELECTRIC POWER CONFERENCE 2002 - IEEE (Jul. 2002 : Colorado Springs). *Proceedings*. Colorado Springs, 2002. Paper No. 02 A3. p. A3-A3.7
- [7] - ISHIKAWA, Y. ; YAMADA, T. ; NAKAZAWA. H. ; HIRATSUKA, M. The Study of the Oscillatory Lightning Surge in Transformers and the Calculation Method of its Frequency. In : POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING, 2000, (Jun. 2000: Galaway, Ireland). *Proceedings*. Galaway, Ireland, 2000. Vol. 3, p. 2171-2175.

- [8] - ROSALES-ÁVILA, J. ; ALVARADO, L. F. A Non-Linear Frequency Dependent Transformer Model for Electromagnetic Transient Studies in Power Systems. *IEEE Transactions on PAS*, Vol. PAS-101, No. 11, p. 4281-4288, Nov. 1982.
- [9] - MAZUR, A. ; KERSZENBAUM, I. ; FRANK, J. Maximum Insulation Stresses under Transient Voltages in the HV Barrel Type Winding of Distribution and Power Transformers. *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 24, p. 427-433, May/Jun. 1988.
- [10] - PAUL, D. Failure Analysis of Dry-Type Power Transformer. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 37, No. 3, May/Jun. 2001.
- [11] - AKHTARZAD, S. ,JOHNS, P. B. The Solution of Maxwell's Equations in three Space Dimensions and Time by the TLM Method. *IEE Proceedings*, London , vol. 122, p. 1344-1348, 1975.
- [12] - CHRISTOPOULOS, C. *The Transmission Line Modeling Method TLM*. 1.ed. New York : IEEE Press, 1995.
- [13] - FACCIONI, M. F^o . *O Método da Modelagem por Linhas de Transmissão (TLM) e Aplicações em Compatibilidade Eletromagnética (EMC)*. Florianópolis, 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [14] - FERREIRA, G. S. *Modelagem Numérica de Problemas de Compatibilidade Eletromagnética Utilizando TLM*. Florianópolis, 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [15] - PORTELA, C. M. M. J. C. *Regimes Transitórios*. 1.ed. Rio de Janeiro : COPPE/UFRJ, 1983

- [16] - GREENWOOD, A. N. *Electrical Transients in Power Systems*. 2. ed. New York : John Wiley & Sons, 1991.
- [17] - ABETTI, P. A. ; MAGINNISS, F. J. Natural Frequencies of Coils and Windings Determined by Equivalent Circuit. In : AIEE WINTER GENERAL MEETING (Jun. 1953 : New York). *Proceedings*. New York, 1953. p. 495-405.
- [18] - JOHNS, P. B. The Solution of Inhomogeneous Waveguide Problems Using a Transmission-Line Matrix ; *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Volume: 22 Issue: 3 , p. 209 -215, Mar. 1974.
- [19] - HUI, S. Y. R. ; CHRISTOPOULOS, C. Discrete Transform Technique for Solving Non-linear Circuits and Equations. *IEE Proceedings-A* , London, Vol. 139, No. 6, p. 321-328, 1992.
- [20] - DOMÍNGUEZ, H. ; RAIZER, A. Using TLM Method to Modeling Plane-Type Hyperthermia Applicators. In : THE NINTH BIENNIAL IEEE CONFERENCE ON ELECTROMAGNETIC FIELD COMPUTATION. (Jun. 2000 : Milwaukee, EUA). *Proceedings*. Milwaukee, 2000. p.275-278.
- [21] - CHI, S. ; GUANG-HUI, W. ; ZHONG-NI, Z. A Novel Single-Phase Separated - SPWM Controlled Inverter with a High Frequency Link. In : IEEE POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE , 2002 - PESC 02, 2002. (Jun. 2002 : Cairns, Australia). *Proceedings*. Cairns, Australia, 2002. Vol. 4, p. 1879-1883.
- [22] - ISHIKAWA, H. ; ATACHI, K. ; WANG, D. ; YOSHIDA, Y. ; WATANABE, T. ; SUGIMOTO, S. Voltage Stress Reduction for a Long Lead Motor by Using a New Soft-Switched PWM Inverter, In : POWER ELECTRONICS AND MOTION CONTROL CONFERENCE, 2000 - PIEMC 2000, (Aug.2000 : Beijing, China). *Proceedings*. Beijing, China, 2000. Volume : 2, p. 628-632.

- [23] - RODRIGO, H. ; DANG, H. Q. S. Behaviour of Transformer Winding under Surge Voltages. In : HIGH VOLTAGE ENGINEERING SYMPOSIUM. The Eleventh International Symposium on High-Voltage. (Aug. 1999: London). *Proceedings*. London, 1999. No. 467, Vol: 1p. 1.287.P6 -1.290.P6.
- [24] - POPOV, M. ; VAN DER SLUIS, L. ; PAAP, G.C. A Simplified Transformer Model for the Simulation of Fast Surges and Adequate Protection Measures. In : IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING, 2001 (Jan/Feb. 2001: Columbus, Ohio). *Proceedings*, Columbus, p. 323-327, 2001.
- [25] - HONORATI, O. ; SANTINI, E. New Approach to the Analysis of Impulse Voltage Distribution in Transformer Windings. *IEE Proceedings*, London, vol. 137, Pt. C. , No. 4, p. 283-290, 1990.
- [26] - PIANTINI, A. ; MALAGODI, C. V. S. Voltage Surges Transferred to the Secondary of Distribution Transformers. In : HIGH VOLTAGE ENGINEERING SYMPOSIUM. The Eleventh International Symposium on High-Voltage. (Aug. 1999 : London) . *Proceedings*. London, 1999. No. 467, Vol : 1, p. 1.365.P6 - 1.368.P6.
- [27] - YAGASAKI, A. Characteristics of a Special-isolation Transformer Capable of Protecting From High-Voltage Surges and Its Performance. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 43, No. 3, Aug. 2001.
- [28] - BORGHETI, A. et al. Calculation of Voltages Induced by nearby lightning on Overhead Lines Terminated on Distribution Transformers. In : THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS, (Aug. 1995 : Lisbon) . *Proceedings*. Lisbon, 1995. p. 311-316.
- [29] - DAS, J. C. Surges Transferred Through Transformers. In : PULP AND PAPER INDUSTRY TECHNICAL CONFERENCE, 2002. (Jun. 2002 : Toronto) *Proceedings*. Toronto, 2002. p.139-147.

- [30] - DE LEÓN, F. ; SEMLYEN, A. , A Simple Representation of Dynamic Hysteresis Losses in Power Transformers, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 10, no. 1, p. 315-321, Jan. 1995
- [31]- HUI, S.Y.R.; ZHU, J. Magnetic Hysteresis Modeling and Simulation Using the Preisach Theory and TLM Techniques. In : IEEE POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE. (Jun, 1994 : Taipei, Taiwan) . *Proceedings*. Taipei, Taiwan, 1994. Vol. : 2, p. 837-842.
- [32] - RÜDENBERG, R. Performance of Travelling Waves in Coils and Windings. *AIEE Transactions*, New York, vol. 59, p. 1031-1040, 1940.
- [33] - IEEE / ANSI, Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE & American National Standard Institute. *Surge Protection*. 1ed. Piscataway : IEEE Press, 1995.
- [34] - BESSONOV, L. *Applied Electricity for Engineers*. 1. ed. Moscow : Mir Publishers ,1968.
- [35] - MEYER, L. H. ; CABRAL, S.H.L. ; MUSTAFA, T.I.A.H . Differential Modeling for Hysteresis Loops. In : II INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HYSTERESIS MODELING AND MICROMAGNETICS. (June., 1999 : Perugia) . *Proceedings*. Perugia, 1999. p. 1-2-6/1-2-11.
- [36] - CABRAL, S. H. L.; MEYER, L. H.; MUSTAFA, T. I. A. H. Modelagem Estática e Dinâmica do Comportamento de Materiais Magnéticos Sob Regimes Senoidais Puro e com Harmônicos. In : II SEMINÁRIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA. (April. 1997 : São Lourenço-MG) . *Proceedings*. São Lourenço, 1997. CD-ROM
- [37] - CABRAL, S. H. L ; MEYER, L. H.; MUSTAFA, T. I. A. H. Modelling of Distribution Network Transformer under Transient Conditions - Inrush Current. In : III CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA / III CONFERÊNCIA DE APLICAÇÕES INDUSTRIAIS. (Sep. 1998

- : São Paulo). *Proceedings*. São Paulo. p. 429-431
- [38] - CABRAL, S. H. L. ; RAIZER, A. Análise de Desempenho do Método TLM em Problemas de Propagação Unidimensional Considerando a Existência de Perdas. In : IV CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO. (Nov. 2000 : Natal). *Proceedings*. Natal, 2000. p. 200-203.
- [39] - CABRAL, S. H. L. ; RAIZER, A. Resposta ao Degrau de Tensão para Enrolamentos Contínuos de Transformadores - Comparação entre o Método Analítico e o TLM. In : CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO. (Nov. 2000 : Natal). *Proceedings*. Natal, 2000. p. 179-182.
- [40] - CABRAL, S. H. L. ; RAIZER, A. TLM Method Applied to the Study of Practical Transformer Windings Submitted to Voltage Surges. In : V CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO. (Nov. 2002 : Gramado-RS). *Proceedings*. Gramado, 2002. paper no. 105.
- [41] - IEEE / ANSI, Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE & American National Standard Institute. *Recommended Practice for Testing Electronics Transformers and Inductors* : IEEE Press. 1ed. , Piscataway, 1997.
- [42] - CABRAL, S. H. L. ; RAIZER, A. Desempenho de Transformadores Frente aos Distúrbios Ocorrentes na Rede Elétrica. In : IV SEMINÁRIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA. (Aug. 2001 : Porto Alegre-RS). *Proceedings*. Porto Alegre, 2001. pp 257-262.
- [43] - CABRAL, S. H. L. ; RAIZER, A. Single-phase insulator transformers. How effective are they against voltage surges. *IEEE Potentials Magazine*, 2002. Vol. : 21; p. 35-40, Dec/Jan- 2002/2003.
- [44] - CABRAL, S. H. L., RAIZER, A. Analysis of the Use of Insulator Transformers for Protection Against Voltage Surges. In : EMC EUROPE 2002 (Sep. 2002: Sorrento).

Proceeding. Sorrento 2002. pp.1041-1046.

- [45] - CABRAL, S. H. L., RAIZER, A. Evaluation of the Protection against Voltage Surges Provided by Insulator Transformers. In : THE FIFTH INDUSCON (Jul. 2002 : Salvador). *Proceedings* . Salvador, 2002. pp.413-417.
- [46] - SLEMON, G. R., Equipamentos Magnetelétricos. 1ed. São Paulo : Livros Técnicos e Científicos, 1975.
- [47] - BARTHOLD, L. O. , CARTER, G. K. Digital traveling-wave solutions, *AIEE Transactions on Power Apparatus Systems*, vol. 80, p. 812-820, Dec. 1961.
- [48] - MIKI, A. , HOSOYA, T. , OKUYAMA, K. A Calculation Method for Impulse Voltage Distribution and Transferred Voltage in Transformer Windings. *IEEE Transactions on Power Apparatus System*, Vol. PAS-97, no. 3, p. 930 - 939, May/Jun. 1978.
- [49] - CARSLAW, H. S. , JAEGER, J. C. *Operational Methods in Applied Mathematics*, 2nd. Ed.: Oxford University Press, 1947.