

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ROGÉRIO COELHO GUIMARÃES

**MODELO ELÉTRICO DA IMPEDÂNCIA DO TRANSFORMADOR
BASEADO EM CÉLULAS RLC PASSIVAS**

Porto Alegre

2010

ROGÉRIO COELHO GUIMARÃES

**MODELO ELÉTRICO DA IMPEDÂNCIA DO TRANSFORMADOR
BASEADO EM CÉLULAS RLC PASSIVAS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas de Energia

ORIENTADOR: Roberto Petry Homrich

Porto Alegre

2010

ROGÉRIO COELHO GUIMARÃES

MODELO ELÉTRICO DA IMPEDÂNCIA DO TRANSFORMADOR BASEADO EM CÉLULAS RLC PASSIVAS

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich, UFRGS

Doutor pela Universidade Estadual de Campinas – Campinas, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho, UFRGS

PhD pela Cardiff University - Cardiff, País de Gales, GB

Prof. Dr. Lúcio Almeida Hecktheuer, IFSul

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Marcos Teló, PUC-RS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. Alexandre Sanfelice Bazanella

Porto Alegre, julho de 2010.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e minha família, os quais sempre acreditaram na minha capacidade e perseverança em todos os projetos que participei.

AGRADECIMENTOS

- A Deus, que sempre está do nosso lado.
- Ao Professor Dr. Roberto Petry Homrich, orientador do trabalho, pelo seu conhecimento transmitido e sensibilidade, contribuindo com sugestões valiosas para o desenvolvimento deste trabalho e pelo estímulo e apoio nos momentos em que mais necessitamos.
- Aos Professores Dr. Roger Hoefel, Dr. Alexandre Sanfelice Bazzanela, Dr. Adalberto Schuck, Dr. Arturo Suman Bretas e Dra. Gladis Bordin pelos conhecimentos transmitidos e pela oportunidade de aprendizado.
- Ao Engenheiro Eletricista Marcelo Paulino, da Adimarco Representações e Serviços Ltda., pelas informações técnicas fornecidas durante o trabalho de pesquisa.
- Ao Sr. Gilmar Genoin, da WEG Equipamentos Elétricos S.A., pelas informações técnicas fornecidas para a realização do trabalho de pesquisa.
- Aos meus pais, Joaquim (*in memoriam*) e Daura, pelos exemplos de caráter e de dedicação, sempre investindo na Educação como o maior “tesouro” a ser deixado às gerações futuras.
- A minha esposa Ester e aos meus filhos Mariana e Eduardo pela compreensão, pelo companheirismo e pelo incentivo dado durante todo este período de desafios e de aprendizado pelo qual passamos.
- À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – **CAPES** e a Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica do Ministério da Educação – **SETEC** por promover este MINTER.

RESUMO

No novo contexto do setor elétrico brasileiro, as concessionárias passam a ter uma nova postura quanto à gestão. A energia elétrica, como produto, como negócio, deve levar lucro às empresas concessionárias. Começam a dar mais importância aos custos, entendendo que vários aspectos técnicos devem ser analisados, visando reduzir perdas substanciais.

Assim sendo, o transformador de potência assume uma posição destacada, considerando sua posição estratégica no sistema elétrico, fundamental no processo de transporte e entrega de energia elétrica. Por este motivo vem despertando o interesse no desenvolvimento de estudos e pesquisas no sentido de aumentar sua vida útil.

O método de Análise da Resposta em Frequência da impedância do transformador permite obter a “assinatura” do mesmo, a fim de verificar futuras degradações. Este método é adotado por várias empresas em todo o mundo, há mais de três décadas.

Embora sua ampla aplicação entre muitas técnicas utilizadas na monitoração e análise de falhas em equipamentos, até agora não houve consenso na interpretação dos resultados obtidos por este método. A dificuldade de correlacionar parâmetros com prováveis falhas tem suscitado pesquisas para obtenção de resultados confiáveis e de interpretação fácil.

Este trabalho objetiva determinar um modelo elétrico que represente a característica da resposta em frequência para fins de armazenamento de dados e simulações. A partir de dados reais do teste de resposta em frequência da impedância inseridos no modelo proposto, através de um programa computacional, foi verificada a confiabilidade nas respostas obtidas, comparadas com as reais. Os resultados obtidos asseguram que o modelo proposto é viável de ser aplicado.

Palavras-chave: setor elétrico, transformadores de potência, análise de resposta em frequência.

ABSTRACT

In the new context of the Brazilian electric industry, the electric power provider companies have adopted a new administration posture. The electric power, as a product and business, should make the companies profitable. They have been paying more attention to the costs, learning that many technical aspects should be analyzed in order to reduce substantial losses.

Therefore, the power transformer takes an outstanding position, considering its strategic position in the electric system and being essential in the process of transport and delivery of the electric power. For this reason, there has been an interest in the development of studies and research in order to increase its useful life.

The method of Frequency Response Analysis of impedance of the power transformer permits to obtain reference parameters of this one, in order to verify future degradations. This method has been adopted by many companies throughout the world for over three decades.

Despite its wide application among several techniques used in the supervision and analysis of faults of equipments, there has been no consensus in the interpretation of the results obtained by this method so far. The difficulty of correlating the parameters with probable faults have increased research in order to obtain reliable results and of easy interpretation.

This study aims to determine an electric model that represents the characteristic of the frequency response in order to store data and simulations. Starting from the real data of the FRA test inserted in the proposed model through a computer program, the reliability of the obtained responses were verified and compared with the real data. The obtained results assure that the proposed model is viable and can be applied.

Keywords: electric industry, power transformers, frequency response analysis.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS.....	10
LISTA DE ABREVIATURAS	11
1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS GERAIS	16
1.2 METODOLOGIA	17
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2 REVISÃO DA LITERATURA	19
3 TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA	23
3.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS	24
3.2 FALHAS	31
3.3 MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO	37
4 FUNDAMENTOS DO ENSAIO FRA	41
5 MODELO CLÁSSICO DO TRANSFORMADOR	46
6 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	50
6.1 CIRCUITO RLC PARALELO	50
6.2 ANÁLISE DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA	52
7 MODELO PROPOSTO	54
8 ESTUDO DE CASOS	68
8.1 CASOS ESTUDADOS	68
8.1.1 CASO 1	69
8.1.2 CASO 2	74
8.1.3 CASO 3	78
8.2 RESULTADOS OBTIDOS	83
9 CONCLUSÕES	84
9.1 PROPOSTA PARA FUTURAS PESQUISAS	85
10 REFERÊNCIAS	87
11 Anexo I	89
12 Anexo II	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Comportamento do módulo da impedância de um circuito RLC paralelo em função da frequência	17
Figura 3.1	Subestação da Votorantin em Pecém-CE	23
Figura 3.2	Núcleo de um transformador trifásico	25
Figura 3.3	Montagem do enrolamento	26
Figura 3.4	Enrolamentos de AT com terminais para ligações no comutador	27
Figura 3.5	Parte ativa de um transformador trifásico - comutador sob carga na	28
Figura 3.6	AT Estufa para o tratamento da parte ativa	29
Figura 3.7	Colocação da parte ativa no tanque	30
Figura 3.8	Transformador trifásico	31
Figura 3.9	Tipos e quantidade de falhas identificadas nos transformadores inspecionados (Bechara, 2009)	36
Figura 3.10	Medição de relação de transformação	38
Figura 3.11	Defeito constatado no enrolamento através do ensaio	40
Figura 4.1	Bobina experimental. (a) posição inicial (b) posição final	42
Figura 4.2	Curvas obtidas através do ensaio FRA (adaptado de MCGrail, 2005) ..	43
Figura 5.1	Modelo elétrico clássico para o transformador	46
Figura 5.2	Comportamento do módulo da impedância de um transformador real	48
Figura 6.1	Circuito RLC paralelo	50
Figura 7.1	Modelo proposto no domínio frequência constituído por células RLC	54
Figura 7.2	Fluxograma do modelo proposto	55
Figura 7.3	Curva do módulo da impedância x frequência	56
Figura 7.4	Curva de fase x frequência	57
Figura 7.5	Frequências de ressonância significativas para o modelo	58
Figura 7.6	Curva do módulo da impedância x frequência para cada célula RLC .	65
Figura 7.7	Curva do módulo da impedância x frequência obtida através de ensaio	66
Figura 7.8	Curva do módulo da impedância x frequência obtida das células RLC ..	66
Figura 8.1	Resposta em frequência do módulo da impedância (caso 1)	69
Figura 8.2	Resposta em frequência: ângulo de fase (caso 1)	70
Figura 8.3	Resposta em frequência do módulo da impedância de cada célula (caso 1)	70
Figura 8.4	Ângulo de fase a partir das células identificadas (caso 1)	71
Figura 8.5	Resposta em frequência do módulo da impedância calculada (caso 1) .	71
Figura 8.6	Ângulos de fase calculados (caso 1)	72
Figura 8.7	Comparação da resposta em frequência: módulos das impedâncias (caso 1)	72
Figura 8.8	Comparação da resposta em frequência: ângulos de fase (caso 1)	73

Figura 8.9	Resposta em frequência do módulo da impedância (caso 2)	74
Figura 8.10	Resposta em frequência: ângulo de fase (caso 2)	74
Figura 8.11	Resposta em frequência do módulo da impedância de cada célula (caso 2)	75
Figura 8.12	Ângulos de fase a partir das células identificadas (caso 2)	75
Figura 8.13	Resposta em frequência do módulo da impedância calculada (caso 2) .	76
Figura 8.14	Ângulo de fase calculado (caso 2)	76
Figura 8.15	Comparação da resposta em frequência: módulos das impedâncias (caso 2)	77
Figura 8.16	Comparação da resposta em frequência: ângulos de fase (caso 2)	77
Figura 8.17	Resposta em frequência do módulo da impedância (caso 3)	78
Figura 8.18	Resposta em frequência: ângulo de fase (caso 3)	79
Figura 8.19	Resposta em frequência do módulo da impedância de cada célula (caso 3)	79
Figura 8.20	Ângulo de fase a partir das células identificadas (caso 3)	80
Figura 8.21	Resposta em frequência do módulo da impedância calculada (caso 3) .	80
Figura 8.22	Ângulo de fase calculado (caso 3)	81
Figura 8.23	Comparação da resposta em frequência: módulos das impedâncias (caso 3)	82
Figura 8.24	Comparação da resposta em frequência: ângulos de fase (caso 3)	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Universo de transformadores de potência	35
Tabela 3.2	Levantamento estatístico de falhas em transformadores de potência	36
Tabela 4.1	Grau de deformação e fator de avaliação	44
Tabela 4.2	Relação faixa de frequência e fator de avaliação	44
Tabela 7.1	Conversão de unidade para frequências de	59
Tabela 7.2	Valores das resistências para as respectivas frequências de ressonância	59
Tabela 7.3	Frequências de meia potência inferior e superior para cada frequência de ressonância definida para o modelo (rad/s)	60
Tabela 7.4	Largura de faixa para cada frequência de ressonância	61
Tabela 7.5	Valores dos fatores de qualidade	62
Tabela 7.6	Valores das indutâncias para as respectivas frequências de ressonância	63
Tabela 7.7	Valores das capacitâncias para as respectivas frequências de ressonância	63
Tabela 7.8	Células RLC para o equipamento analisado	64
Tabela 8.1	Valores de R, L e C para cada célula (caso 1)	73
Tabela 8.2	Valores de R, L e C para cada célula (caso 2)	78
Tabela 8.3	Valores de R, L e C para cada célula (caso 3)	83

LISTA DE ABREVIATURAS

A: Ampère

a : Relação de transformação

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

ANSI: *American National Standards Institute*

AT: Alta tensão

ATP: *Alternative Transients Program*

B: Largura de faixa

BT: Baixa tensão

C: Capacitância

F: Farad

f : Frequência

FRA: *Frequency Response Analysis*

H: Henry

Hz: Hertz

IEC: *International Electrotechnical Commission*

IEEE: *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

I_m : Corrente imposta pela fonte do circuito

I_p : Corrente no enrolamento primário

I_s : Corrente no enrolamento secundário

kHz: Quilo Hertz

kV: Quilo Volt

L: Indutância

L_m : Indutância de magnetização do transformador

L_p : Indutância de dispersão do enrolamento primário

LVI: *Low Voltage Impulse*

MHz: Mega Hertz

MME: Ministério de Minas e Energia

MVA: Mega Volt-Ampère

Q: Fator de qualidade

R: Resistência elétrica

rad/s: Radianos por segundo

R_c : Resistência de perdas no núcleo

R_{HF} : Resistência de alta frequência

RLC: Conjunto Resistência-Indutância-Capacitância

R_{LF} : Resistência de baixa frequência

R_m : Resistência de magnetização

R_{MF} : Resistência de média frequência

R_p : Resistência elétrica do enrolamento primário

R_s : Resistência elétrica do enrolamento secundário

S: Siemens

V: Volt

VFT: *Very Fast Transient*

V_{out} : Tensão de saída

V_p : Tensão no enrolamento primário

V_s : Tensão no enrolamento secundário

X_m : Reatância de magnetização

X_p : Reatância de dispersão do enrolamento primário

X_s : Reatância de dispersão do enrolamento secundário

Y : Admitância

Z : Impedância

Z_p : Impedância primária

Ω : Ohm

ω_{LO} : Frequência angular de meia potência inferior

ω_{HI} : Frequência angular de meia potência superior

ω_o : Frequência angular de ressonância

1 INTRODUÇÃO

A modernização do setor elétrico brasileiro teve como marco a Lei de Concessões de Serviços Públicos, Lei 8.987 de 13 de fevereiro de 1995 e a Lei 9.427/1996, que trata da criação da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, autarquia em regime especial, vinculada ao Ministério de Minas e Energia – MME.

A ANEEL estabeleceu, de forma atualizada e consolidada, as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica, através da Resolução nº 456, de 29 de novembro de 2000.

Dentro deste novo contexto, as concessionárias começaram a ter uma nova postura quanto à gestão do setor elétrico, tendo em vista que o Estado deixou de ser o único investidor.

Com a privatização do setor elétrico, as empresas tratam a energia elétrica como um produto, um negócio, e como tal deve reverter em lucro. Com isso, os investimentos feitos pelas empresas concessionárias foram significativos, buscando qualificar ainda mais o sistema elétrico nacional e assim dar mais segurança e confiabilidade no atendimento ao consumidor final.

O sistema elétrico é composto de um substancial número de equipamentos, materiais e acessórios que levam a energia elétrica desde o ponto de geração até o ponto de consumo.

Dentre os equipamentos utilizados, destacamos o transformador de potência, considerando sua importância estratégica no processo de transporte e entrega da energia elétrica.

Nessa nova realidade, onde temos a competição instalada entre as operadoras, deixar de atender o consumidor causa pesadas multas aplicadas pela ANEEL, significando perda de receita das empresas. Portanto, elas começam a dar mais importância aos custos entendendo que vários aspectos técnicos devem ser analisados, visando reduzir perdas significativas. Passam a valorizar ainda mais a conservação e manutenção de seus equipamentos, sendo o transformador um dos mais visados. A longevidade dos transformadores é fundamental, pois são equipamentos caros e colocados em pontos estratégicos do sistema elétrico, não podendo ocorrer danos frequentes.

Os fabricantes de transformadores de potência, por sua vez, estão sempre procurando evoluir na tecnologia de seus produtos, proporcionando mais qualidade e custos compatíveis com o mercado, agregando mais segurança e aumento da vida útil. Isto ocorre desde o projeto do transformador, passando pela escolha de materiais a serem empregados na construção, pela qualificação da mão-de-obra e pelo conjunto de testes realizados antes da entrega do produto.

Por outro lado, as concessionárias começam a dar mais atenção aos resultados dos testes apresentados pelos fabricantes, compreendendo que vários aspectos técnicos podem ser analisados e prováveis problemas futuros podem ser evitados ou minimizados.

O transformador de potência, por estar localizado em posição fundamental no sistema, desperta o interesse no desenvolvimento de estudos e pesquisas no sentido de realizar a modelagem de um transformador de potência, em especial a sua resposta em frequência, caracterizando-a, objetivando a armazenagem de dados e simulações, confrontando com dados originados pelos ensaios feitos por fabricantes.

No âmbito das pesquisas, muito tem sido feito quando se trata de ensaios em resposta em frequência, considerando que há três décadas são aplicados testes de Análise em Resposta em Frequência (FRA) e os diversos grupos de estudo ainda não entraram em consenso para regulamentação dessa técnica. O problema principal em relação ao teste FRA é a interpretação dos dados oriundos do método e a correspondente identificação de falhas ou tendências de falhas no transformador de potência. A não definição de parâmetros correlacionados às prováveis falhas tem suscitado pesquisas que levem a resultados confiáveis e de fácil interpretação.

Esta realidade tem motivado o desenvolvimento de um modelo elétrico da impedância do transformador com base em rede de células RLC passivas, sendo apresentado como uma proposta para chegarmos à obtenção de parâmetros que satisfaçam as necessidades de interpretação de dados a partir do teste FRA.

1.1- OBJETIVOS GERAIS:

Este trabalho visa desenvolver um modelo elétrico de um transformador com base em rede de células compostas de circuitos RLC passivas obtendo-as a partir do comportamento da impedância, no domínio frequência, do referido transformador.

Através do modelo proposto obteremos os parâmetros que serão simulados e comparados com os dados resultantes de testes reais através do método de resposta em frequência da impedância, objetivando uma interpretação que satisfaça as necessidades de rapidez e confiabilidade.

1.2- METODOLOGIA:

O modelo proposto é baseado em medições obtidas em transformadores de potência existentes em subestações ou que ainda estejam nos pátios dos fabricantes.

A técnica consiste em comparar dados originados pelo método da resposta em frequência da impedância e os obtidos pelo modelo proposto. São avaliadas as impedâncias e admitâncias em relação à frequência, sendo gerados pelo modelo um conjunto equivalente de resistores, capacitores e indutores.

Um arranjo RLC paralelo produz um ponto máximo (Figura 1.1), ou seja, um ponto de ressonância. No modelo proposto, serão dimensionadas células compostas de arranjos RLC paralelo, de acordo com o número de pontos de ressonância encontrados.

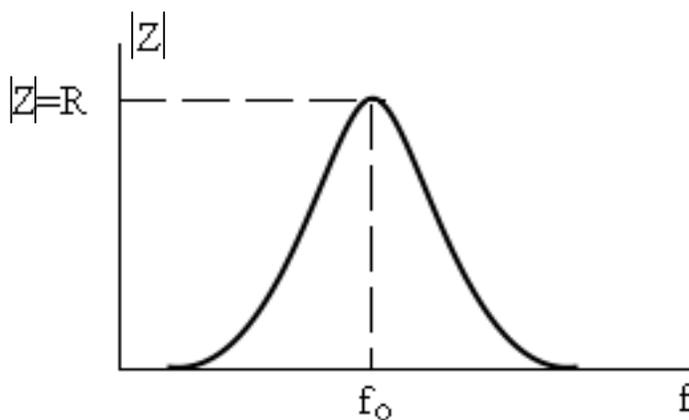


Figura 1.1. Comportamento do módulo da impedância de um circuito RLC paralelo em função da frequência.

Assim, na varredura de frequência, podemos dimensionar várias células com circuitos RLC paralelo. Os dados obtidos permitirão verificar o ajustamento do modelo proposto em relação aos valores reais medidos e assim viabilizar o armazenamento de dados e simulações.

1.3- ESTRUTURA DO TRABALHO:

Esta dissertação foi estruturada conforme descrito a seguir:

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica referente à análise da resposta em frequência. No Capítulo 3 é feita uma abordagem sobre o transformador de potência, descrevendo aspectos construtivos e de manutenção. Como este equipamento é o principal elemento da pesquisa, entendemos pertinente caracterizá-lo e assim servir de base de conhecimento para a elaboração do modelo elétrico. No capítulo 4 é tratado o fundamento do ensaio FRA. O modelo clássico do transformador é abordado no Capítulo 5. O Capítulo 6 descreve uma sucinta fundamentação teórica relativa aos circuitos RLC paralelo.

A apresentação de um modelo elétrico da impedância do transformador com base em rede de células RLC passivas está descrita no Capítulo 7. Já o Capítulo 8 descreve estudos de casos, onde o modelo proposto é experimentado. No Capítulo 9 são apresentadas as conclusões deste trabalho e as perspectivas futuras de novas investigações referentes ao tema central.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Em 1978, Dick e Erven, foram os primeiros a propor o método de análise de resposta em frequência (FRA) para medir externamente deformações nos enrolamentos de transformadores de potência, sendo este método uma alternativa ao método de impulso de baixa tensão (LVI), até então usado como ferramenta de manutenção.

Tony McGrail (2005), em seu artigo, relata que a Análise de Resposta em Frequência (FRA) é uma técnica bem conhecida em testes elétricos. É a razão de uma entrada de tensão ou corrente por uma saída de tensão ou corrente. Desde o trabalho pioneiro de Dick e Erven para a *Ontario Hydro* nos últimos anos da década de 1970, o FRA tem sido aplicado para investigar a integridade mecânica dos transformadores de potência. Experiências tem mostrado o modo de executar as medições com sucesso no campo e o modo de interpretar os resultados.

Em 2002, Pleite et ali, apresentaram uma proposta de modelagem de transformador em resposta em frequência para desenvolver técnicas avançadas de manutenção. São especialmente aplicadas para detectar deslocamentos nos enrolamentos dentro dos transformadores. Segundo os autores, o principal problema sobre técnicas FRA é interpretar os resultados obtidos em resposta em frequência, não só falhas detectadas como tendências a falhas no transformador. Buscando uma solução deste problema, os autores apresentaram uma proposta de ferramenta de modelagem usando a resposta em frequência medida no transformador. Nesse artigo, os autores ressaltaram que o procedimento de modelagem do transformador para resposta em frequência tivesse especial cuidado para garantir um significado físico do transformador medido. Portanto, a modelagem é útil para o método FRA

em transformadores. Essas técnicas são baseadas na comparação entre a resposta em frequência medida e os dados de referência do transformador. Se existem alterações significativas, então algum dano ocorreu no interior do transformador. Alguns resultados experimentais foram apresentados, os quais mostram que há um bom desempenho da modelagem proposta.

O procedimento da modelagem apresentado no artigo referido no parágrafo acima pode ser estendido a outras diferentes aplicações na Engenharia (sistema térmico, sistemas mecânicos, etc.), sendo adaptados os modelos e algoritmos para o projeto particular ou sistema no qual podemos estar interessado.

Larry Coffeen e Charles Sweetser (2002) analisando vários aspectos do método FRA concluíram que este é uma valiosa ferramenta para verificação da integridade geométrica de máquinas elétricas, especialmente os transformadores. A técnica FRA proporciona informações de diagnóstico interno por procedimentos não-intrusivos.

Stefan Tenbohlen e Simon A. Ryder (2003) analisaram e fizeram uma comparação entre dois métodos utilizados para diagnosticar possíveis defeitos nos transformadores. Compararam os métodos de varredura de frequência e impulso de baixa tensão.

Concluíram que o método impulso de baixa tensão apresenta alguns pontos negativos, tais como a resolução de frequência é limitada em até 2,5 MHz, e para baixas frequências é insuficiente. Isto dificulta detectar as faltas elétricas e filtrar ruídos na saída. A quantidade de potência injetada no teste é diferente para diferentes frequências. Isso leva a diferenças na precisão sobre a frequência limite. Obtem, somente, as medições de transferência de tensões (não mede impedância terminal). Muitos equipamentos são necessários para fazer as medidas.

Como aspectos positivos, o método LVI permite que algumas funções de transferência possam ser medidas simultaneamente e o tempo de realizar cada medição é tipicamente em torno de 1 minuto.

Já o método varredura de frequência apresenta algumas desvantagens em relação ao outro método citado. Segundo os autores, apenas uma medição pode ser realizada por vez, ou seja, não é possível a determinação simultânea de funções de transferência. O tempo de realização de cada medição será tipicamente de alguns minutos, dependendo do número de pontos e do grau de filtragem.

Nos pontos considerados vantajosos, destacam-se o alto sinal em proporção ao ruído. Isto permite filtrar uma faixa de ruídos. Também, uma grande faixa de frequências pode ser aplicada no teste (até 10 MHz). É possível usar uma resolução fina de frequência para baixas frequências. Alternativamente, a resolução de frequência pode ser adaptada para a faixa de frequência medida. Além das medições de tensão de transferência entre enrolamentos, é possível a medição de impedância terminal. Adicionalmente, apenas um equipamento é necessário para fazer as medidas.

S. Birlasekaran e Fred Fetherson (1999) investigaram a aplicabilidade de sua técnica de manutenção preditiva para diagnosticar falhas no transformador de potência, caracterizar o transformador numa frequência plana para operação segura, e desenvolver a técnica de monitoramento *on line*. A efetividade dessa técnica foi demonstrada num transformador abrigado de 2,5 MVA para a *High Voltage Laboratory of Pacific Power International (PPI)* e também testado em três transformadores de campo. A técnica *on line* é verificada num transformador monofásico, na alta tensão.

Nessa pesquisa os autores chegaram a conclusão de que a técnica proposta foi bem desenvolvida. O método é muito sensível e pode detectar faltas maiores ou menores com suficiente seletividade. Três configurações do método, *Low Voltage Out (LVO)*, *High Voltage Out (HVO)*, e *Transfer Voltage (TransfV)*, para uma faixa de frequência selecionada, são de grande importância na identificação de faltas, com o máximo de sensibilidade e seletividade. Outra vantagem é que a técnica proposta pode monitorar faltas *on line*, estimando elevação de L ou carga de C, com mais sensibilidade quando o transformador está operando.

3 TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

Os transformadores de potência são equipamentos elétricos estáticos compostos de dois ou mais circuitos elétricos, os quais são acoplados magneticamente. Nos sistemas elétricos de potência, são equipamentos importantes e de alto custo.

A principal função desse equipamento é a transferência de potência, por meio da indução eletromagnética, transformando tensões e correntes alternadas entre dois ou mais circuitos, sem alterar a frequência. Quando o equipamento está em operação, são detectadas algumas falhas, as quais podem ser originadas durante o processo de construção do transformador, no transporte, no seu funcionamento ou na sua manutenção (DEMARTINI, 2007). A Figura 3.1 ilustra uma aplicação do transformador de potência.



Figura 3.1. Subestação da Votorantin em Pecém-CE (WEG, 2008).

3.1-ASPECTOS CONSTRUTIVOS:

Os transformadores são construídos com as mais diversas características, as quais dependem do tipo de carga que se deseja alimentar, bem como o ambiente onde estes equipamentos deverão ser instalados. Cada transformador exige um projeto específico, que depende de algumas características próprias, tais como: potência, tensão de trabalho, corrente e frequência.

O processo de fabricação e a linha de produção das fábricas de transformadores são, de maneira geral, semelhantes, porém apresentando sensíveis diferenças quanto aos recursos técnicos disponíveis, o que muitas vezes implicam a qualidade final do equipamento (MAMEDE, 2005).

O processo de fabricação de um transformador divide-se nas seguintes etapas:

- montagem do núcleo;
- bobinagem;
- montagem da parte ativa (núcleo e enrolamentos);
- tratamento térmico;
- montagem final;
- ensaios.

A) Núcleo:

O núcleo é constituído de uma grande quantidade de chapas de ferro-silício de grãos orientados, montadas em superposição. A Figura 3.2 ilustra o núcleo de um transformador e alguns elementos de fixação.



Figura 3.2. Núcleo de um transformador trifásico (Demartini, 2007).

As chapas de ferro-silício são ligas que contém em torno de 5% de silício, cuja função é reduzir as perdas por histerese e aumentar a resistividade do núcleo a fim de reduzir as correntes parasitas.

Com o núcleo completamente montado e prensado, são enroladas algumas espiras provisórias sobre as colunas, aplicando-se uma tensão para produzir a indução nominal de operação do núcleo. Desta forma, são verificadas as perdas, a corrente de excitação percentual e eventuais zonas de aquecimento irregular.

B) Enrolamentos:

Os enrolamentos são os componentes mais complexos do transformador, exigindo rigorosos requisitos de qualidade nesse setor, bem como profissionais experientes no processo de bobinagem.

Eletricamente, devem possuir características de isolamento para sua classe de tensão e temperatura de operação compatível com sua classe de temperatura. No aspecto mecânico, os enrolamentos estão sujeitos a grandes esforços oriundos das forças mecânicas de origem eletromagnética que atuam durante curtos-circuitos que ocorrem no sistema elétrico em que estão inseridos.

A montagem dos enrolamentos (Figura 3.3), tanto primários como secundários, e terciários em alguns casos, se processa paralelamente ao corte das chapas do núcleo.



Figura 3.3. Montagem do enrolamento (Demartini, 2007).

Como o material isolante absorve a umidade, as bobinas devem ser tratadas em estufa antes de montadas sobre o núcleo. O referido tratamento é realizado por um período entre 24 a 36 horas, em temperaturas que variam de 90 a 100°C.

As bobinas devem estar submetidas a uma tensão de prensagem constante à medida que a bobina vai perdendo a umidade.

A Figura 3.4 mostra um enrolamento de alta tensão (AT) com terminais para ligações no comutador.

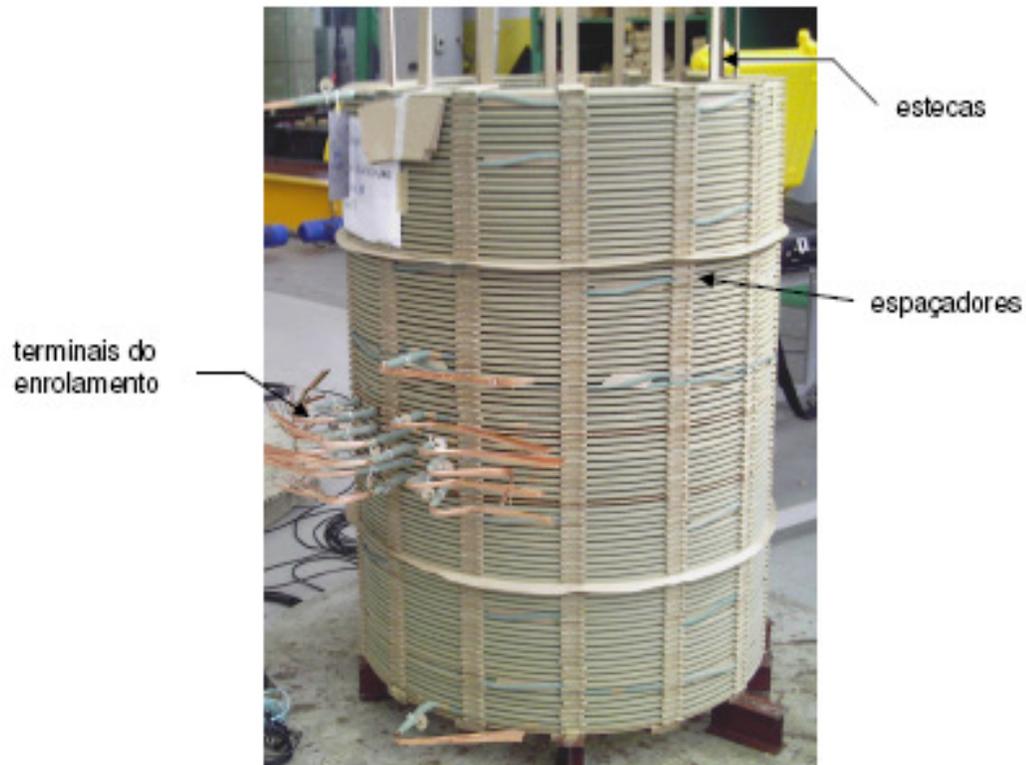


Figura 3.4. Enrolamentos de AT com terminais para ligações no comutador (Demartini, 2007).

C) Parte ativa:

A parte ativa do transformador é composta pelos enrolamentos (primário, secundário, terciário e de regulação, se houver) e pelo núcleo, com seus dispositivos de prensagem e calços. Mecanicamente, este conjunto deve ser rígido, a fim de suportar condições adversas de funcionamento.

Após o processo de secagem, é feito o enrolamento. No caso dos transformadores de potência, as bobinas de baixa tensão (BT), alta tensão (AT) e regulação são montadas umas sobre as outras, de forma concêntrica. A bobina de BT ocupa normalmente a parte interna.

Realizado o processo de enrolamento, são montadas sobre o núcleo, concluindo-se com a execução das conexões e colocação do comutador. A Figura 3.5 mostra uma parte ativa de um transformador trifásico, indicando as derivações do enrolamento de AT (pontos conectados ao comutador).

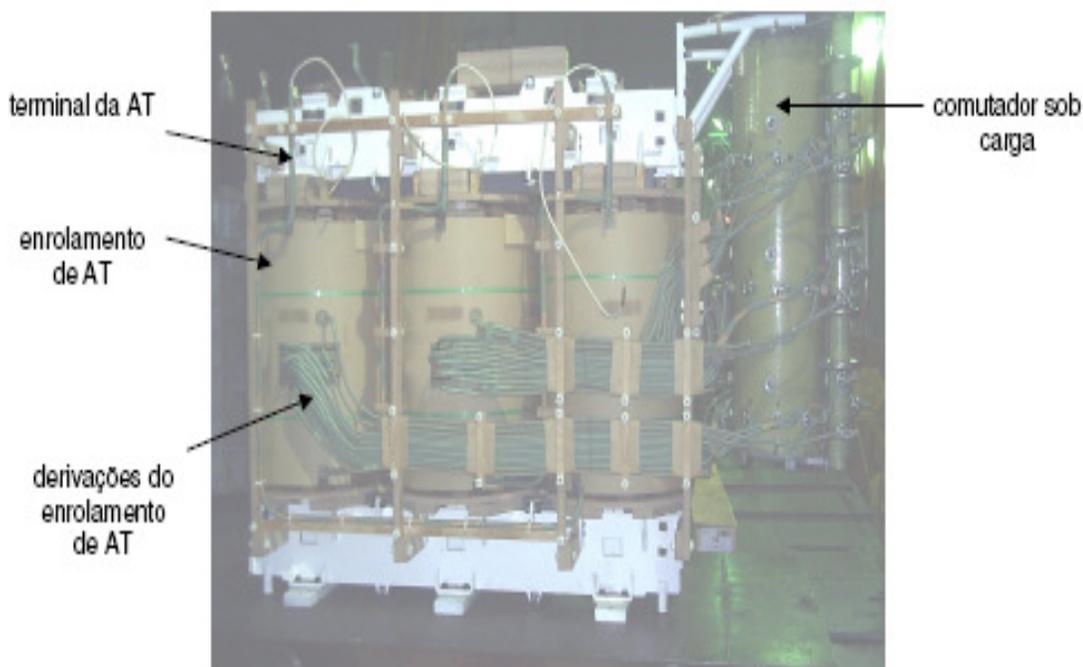


Figura 3.5. Parte ativa de um transformador trifásico - comutador sob carga na AT (Demartini, 2007).

Após a sua montagem, a parte ativa do transformador é levada à estufa onde recebe tratamento especial para a retirada de toda a água absorvida pelo material isolante, em consequência da exposição ao meio ambiente.

O tempo de secagem depende do tamanho do transformador, podendo variar de 10 horas até cinco dias. A Figura 3.6 apresenta uma estufa onde é realizado o tratamento térmico.



Figura 3.6. Estufa para o tratamento da parte ativa (Demartini, 2007).

Concluído o tratamento térmico, são feitos os processos de prensagem e reaperto da parte ativa, tendo em vista que o material isolante perde uma grande quantidade de água. É importante que sejam realizados testes elétricos após esta etapa para verificar a integridade dos enrolamentos e conferir a relação de tensão, a interligação das armaduras e a isolação entre núcleo, armadura e tirante.

D) Montagem final:

Realizados os processos de secagem e reaperto, a parte ativa está em condições para ser colocada no tanque, conforme ilustra a Figura 3.7.



Figura 3.7. Colocação da parte ativa no tanque (Demartini, 2007).

A parte ativa deve ser fixada no interior do tanque através de parafusos e, a seguir, o tanque recebe o óleo isolante, sendo observado que a parte isolante deve estar isenta de gases e que o óleo deve estar a uma temperatura elevada o suficiente para não absorver umidade, preservando as características químico-físicas.

Montadas as buchas e os acessórios, o transformador está pronto e deve seguir para a área do laboratório de ensaios, onde será submetido a ensaios elétricos e dielétricos, atendendo as normas técnicas nacionais e internacionais e as especificações definidas pelo cliente. A Figura 3.8 mostra um transformador de potência pronto.

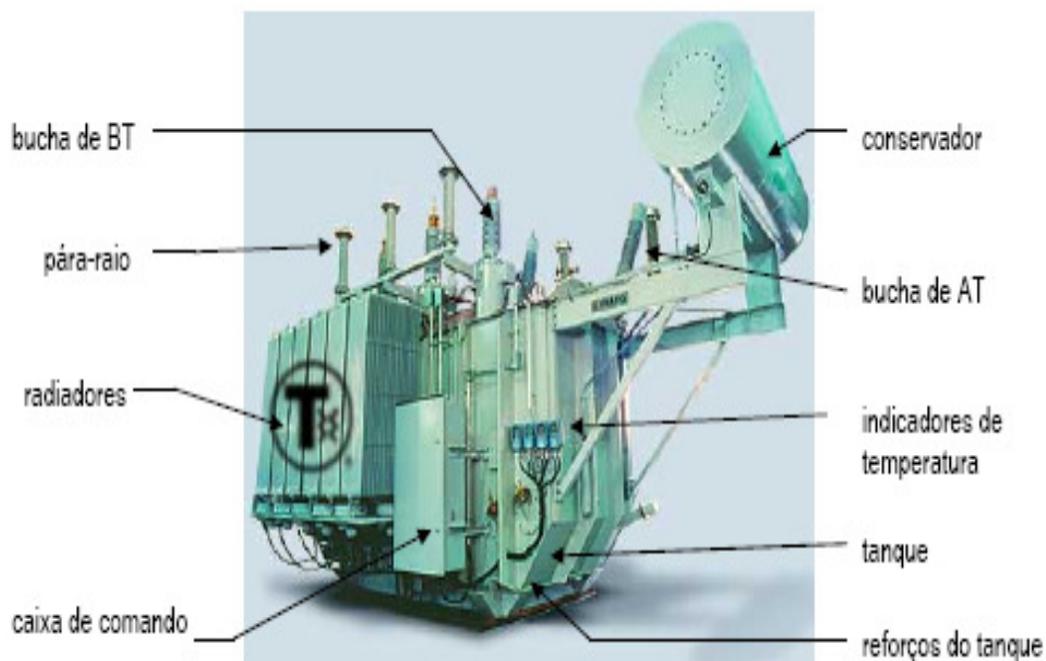


Figura 3.8. Transformador trifásico (Demartini, 2007).

E) Ensaios:

Consiste na determinação das características do transformador e dos acessórios, conforme os procedimentos especificados. Os ensaios são feitos com base nas normas ABNT-NBR 5356, ABNT-NBR 5380, ABNT-NBR 10295, IEC 76, ANSI e IEEE.

3.2- FALHAS:

Durante o funcionamento dos transformadores de potência vários processos de desgaste e de envelhecimento ocorrem no sistema de isolamento.

Os efeitos de fadiga térmica, química, elétrica e mecânica, tais como, pontos quentes, sobreaquecimentos, sobretensões e vibração são responsáveis por alterações do sistema isolante e devem ser monitorados para garantir a eficiência do equipamento, permitindo intervenções de manutenção preditiva, a fim de evitar paradas do equipamento e, conseqüentemente, aumento dos custos.

Dessa forma, a diminuição da vida útil dos transformadores está relacionada com a qualidade dos materiais dielétricos utilizados durante o processo de fabricação. O estabelecimento de um programa de supervisão e manutenção preditiva e preventiva, pelo conhecimento dos materiais dielétricos envolvidos, proporcionará um aumento na vida útil do equipamento em serviço (MORAIS, 1990).

Uma deformação de um ou mais enrolamentos do transformador, conseqüente de algum impacto ou forças eletromagnéticas certamente reduz a vida útil do equipamento. Este tipo de defeito é considerado como uma “falta mecânica”, que não é observado visualmente, tendo em vista as características construtivas dos transformadores.

Transformadores de potência destacam-se entre os componentes de maior porte e valor em subestações e usinas, como já comentado anteriormente. A ocorrência de uma falha nesse tipo de equipamento resulta em transtornos operacionais e financeiros de grande monta, uma vez que:

- nem sempre se dispõe de unidade reserva;
- o custo de aquisição/reparo é elevado;
- são equipamentos produzidos especificamente para uma determinada instalação;
- os prazos envolvidos nos serviços de reparo, fabricação e transporte são ordem de meses.

Assim, no sentido de aumentar a confiabilidade dos transformadores, além de critérios rigorosos de manutenção e operação, é muito importante entender o seu funcionamento, os tipos e as causas dos principais modos de falhas que podem ocorrer.

Segundo (BECHARA, 2009), são oito os agentes causadores de falhas consideradas mais significativas num transformador de potência. São eles: defeito de fabricação, curto-circuito externo, envelhecimento, falhas de acessórios e componentes, sobretensões, manutenção inexistente ou inadequada, ataque por enxofre corrosivo e defeito após reparo do equipamento.

- Defeito de fabricação:

Podem ocorrer falhas desde o projeto, passando pela construção e transporte até a instalação do equipamento no usuário final.

- Curto-circuito externo:

Quando o transformador de potência está operando normalmente, está submetido a esforços mecânicos internos de origem eletromagnética.

Além disto, fica sujeito a curtos-circuitos que ocorrem no sistema em que está conectado, originando grandes esforços eletrodinâmicos.

- Envelhecimento:

A degradação da isolação é outro fator de falhas do transformador de potência, pois com o passar do tempo o papel utilizado como isolante torna-se quebradiço, diminuindo a capacidade de suportar esforços mecânicos.

- Falhas de acessórios e componentes:

Dependendo da falha em acessórios e componentes do equipamento, podem causar pequeno ou grande impacto.

As falhas de menor impacto financeiro e de prazos de manutenção do transformador de potência, em geral são ocasionadas por procedimentos de manutenção simples, apenas com o equipamento sem energia, não necessitando desmontagem ou remoção do mesmo.

Por outro lado, as falhas de grande impacto financeiro e de prazos de manutenção, normalmente ocorrem devido a acidentes no sistema com significativas consequências. Isto implica que o equipamento ficará indisponível por longo tempo até a manutenção ser concluída, chegando eventualmente a ser inviabilizada sua manutenção.

- Sobretensões:

Estes fenômenos transitórios causam um acréscimo na solitação dielétrica dos materiais isolantes dos enrolamentos e ligações.

A sobretensão pode ser dividida em sobretensões de manobra, transitórias muito rápidas (*Very Fast Transient – VFT*) e por descargas atmosféricas.

- Manutenção inexistente ou inadequada:

A manutenção de transformadores é tarefa importante, que depende do emprego de técnicas de monitoração e acompanhamento das condições operacionais do equipamento pelo usuário. Assim, devem ser realizadas análises periódicas das quantidades de gases dissolvidos no óleo isolante e suas propriedades físico-químicas, além da verificação do estado de conservação e funcionamento de acessórios (BECHARA, 2009).

- Ataque por enxofre corrosivo:

A reação do enxofre corrosivo, presente no óleo isolante, com o cobre, causa danos de tal ordem que provocam a falha do transformador.

- Defeito após reparo:

De forma semelhante a defeitos de fabricação, a ocorrência de falhas em transformadores após a execução de reparos ou manutenções nem sempre é detectada nas etapas de ensaios em fábrica ou comissionamento em campo, trazendo grandes transtornos operacionais e financeiros (BECHARA, 2009).

Um levantamento estatístico realizado a partir de perícias feitas para companhias seguradoras, entre os anos 2000 e 2008, em cerca de cem transformadores com diferentes tipos de aplicação, classes de tensão e níveis de potência, contribuiu para melhor entender as causas de falhas e os tipos de transformadores mais suscetíveis a cada uma delas, segundo (BECHARA, 2009).

As Tabelas 3.1 e 3.2, respectivamente, apresentam as principais características dos equipamentos periciados e as falhas identificadas nos transformadores, conforme descrito pelos autores.

Tabela 3.1. Universo de transformadores de potência inspecionados (Bechara, 2009).

Tipo	Classe de tensão	Potência	Nº de unidades
Elevador	69, 138, 230, 345, 440 e 550 kV	Até 418,5 MVA	23
Transmissão	230, 345, 440, 550 e 765 kV	Até 550 MVA	22
Subtransmissão	69, 88 e 138 kV	Até 60 MVA	47
TOTAL			92

Tabela 3.2. Levantamento estatístico de falhas em transformadores de potência (Bechara, 2009).

Falha Tipos	defeito de fabricação	curto-circuito externo	envelhecimento	componentes		sobretensões transitórias		manutenção Inexistente/ inadequada	enxofre corrosivo	defeito após reparo	não apurado
				comutador	buchas	manobra VFT	descarga atmosférica				
elevadores	2		4		4	6	1		2	1	2
transmissão	4	6		3	4					2	3
subtransmissão	1	16	7	8	1	4	1	3		2	4
TOTAL	7	22	11	11	9	10	2	3	2	5	9

Os modos de falhas mais significativos, em termos de quantidade, por tipo de transformador, são apresentados na Figura 3.9 a seguir.

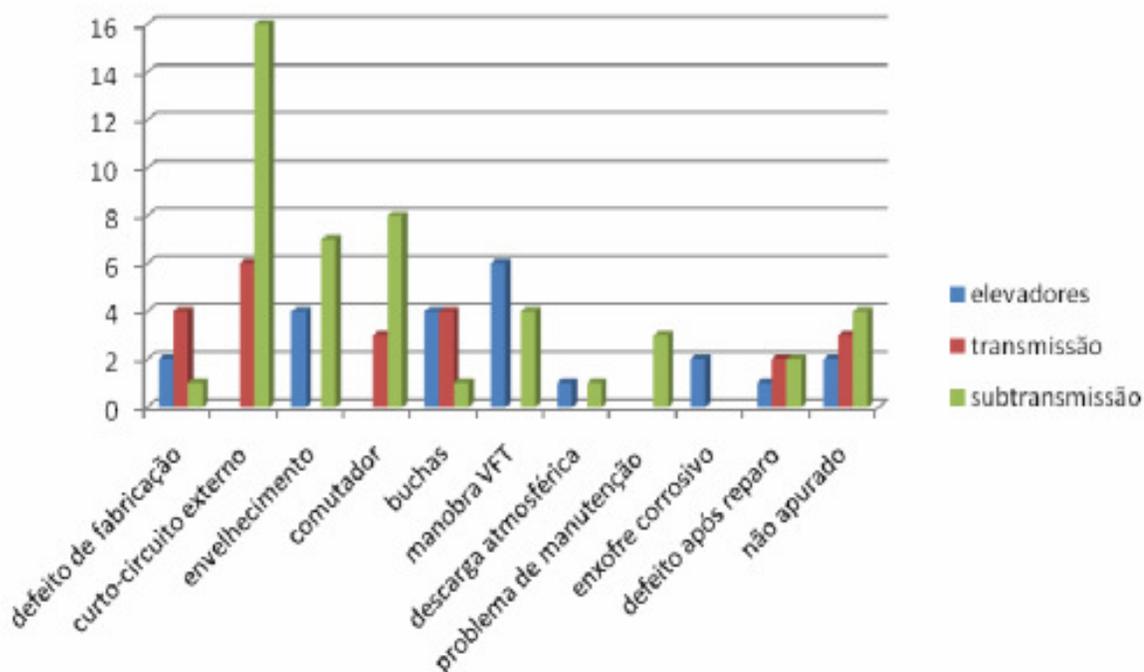


Figura 3.9. Tipos e quantidade de falhas identificadas nos transformadores inspecionados (Bechara, 2009).

Os trabalhos de diagnóstico foram desenvolvidos a partir da coleta e análise de dados acerca dos registros operacionais dos equipamentos, condições circunstanciais das

ocorrências, análises de materiais em laboratórios especializados e inspeções realizadas em campo e em fábrica durante o processo de desmontagem de cada um deles (BECHARA, 2009).

3.3 – MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO:

Muitas empresas mudaram a forma de ver a importância da manutenção e, por conseguinte, a operação dos equipamentos.

O transformador de potência é um equipamento projetado para ter uma longa vida útil. Para que isto aconteça, é fundamental que se tenha conhecimento de suas características elétricas e magnéticas ao longo dos anos em que está em funcionamento, ou seja, que este equipamento seja monitorado periodicamente.

Existem várias técnicas de diagnóstico do circuito elétrico / magnético que através de ensaios de campo permitem verificar uma série de parâmetros do transformador de potência e assim indicar a necessidade de uma manutenção ou até mesmo a substituição do equipamento. Estas técnicas são ferramentas importantes para se detectar com agilidade possíveis avarias existentes no equipamento e executar as ações de manutenção oportunas.

Dentre as diversas técnicas de diagnósticos adotadas pelas empresas, citamos os ensaios a vazio, de tensão de curto-circuito, resistência de enrolamentos e análise de resposta em frequência (FRA).

- Ensaio a vazio:

Este ensaio é feito aplicando uma tensão alternada nominal, preferencialmente no enrolamento de baixa tensão do transformador em cada uma de suas fases estando o

enrolamento de alta tensão aberto. Através deste ensaio são obtidos parâmetros significativos do transformador de potência tais como a relação de transformação, polaridade (grupo de conexão) e corrente de excitação.

A relação de transformação é obtida pela razão tensão na alta pela tensão na baixa, sendo que os valores encontrados devem corresponder com as características de placa do equipamento.

A polaridade é confirmada através da relação de transformação e da constatação da defasagem entre as tensões de alta e de baixa.



Figura 3.10. Medição de relação de transformação (Garcia, 2005).

Outro parâmetro obtido por meio do ensaio a vazio é a corrente de excitação, a qual é a corrente que circula pelo enrolamento de baixa tensão com o enrolamento de alta tensão em

circuito aberto. Não deve existir uma diferença significativa entre os valores medidos entre fases, sendo considerada normal uma pequena diferença devido à geometria entre fases extremas e a central. Existindo significativas variações de valores, isto indica que pode estar acontecendo problemas devido a pontos quentes, núcleo estar frouxo ou derivação magnética solta, por exemplo.

- Ensaio de tensão de curto-circuito:

Este ensaio é baseado na aplicação de uma tensão no enrolamento de alta, por exemplo, estando o enrolamento de baixa em curto-circuito. Neste ensaio é obtida a tensão de curto-circuito, a qual é um parâmetro fornecido em valor percentual e está identificado na placa do transformador.

Havendo diferença significativa entre os valores medidos no ensaio e os característicos podem indicar falhas devido a defeitos no circuito magnético, deformações mecânicas e curtos-circuitos, dentre outras possibilidades.

- Resistência de enrolamentos:

Neste ensaio é determinada a resistência ôhmica dos enrolamentos de cada fase, tanto no enrolamento de alta tensão quanto no enrolamento de baixa tensão e de cada posição do regulador, caso exista.

O resultado obtido no ensaio deve ser comparado com o protocolo do fabricante, indicando o estado dos enrolamentos, do regulador e conexões.

- Análise de resposta em frequência (FRA):

Este ensaio determina a curva de resposta em frequência do conjunto equivalente elétrico, dielétrico, magnético e mecânico do transformador de potência que está sendo

diagnosticado. O ensaio FRA é muito útil como complemento aos demais ensaios tradicionais, servindo para comprovar se os enrolamentos ou o núcleo magnético não sofreram deformações devido ao transporte, por exemplo.

A Figura 3.11 mostra um enrolamento danificado, o qual foi detectado através do ensaio FRA (DEMARTINI, 2007).



Figura 3.11. Defeito constatado no enrolamento através do ensaio (Demartini, 2007).

O ensaio FRA será abordado com mais profundidade no próximo capítulo, tendo em vista que o referido teste é um dos pontos que fundamenta este trabalho.

4 FUNDAMENTOS DO ENSAIO FRA

Para se detectar possíveis problemas na parte ativa dos transformadores (enrolamentos e núcleo), em particular, algumas técnicas foram desenvolvidas. Na década de sessenta, foi proposto o método de Impulso de Baixa Tensão (LVI) com a finalidade de detectar deformações no enrolamento do transformador. Na década seguinte foram realizadas análises no domínio frequência dos testes LVI em transformadores de potência, onde a empresa canadense *Ontário Hydro* foi pioneira no desenvolvimento do método de Análise de Resposta em Frequência (FRA). Neste método de diagnóstico é feita a comparação de dados de referência, provenientes dos testes feitos normalmente pelo fabricante, com os dados levantados no campo. Com isto, é possível verificar futuras degradações que o equipamento pode sofrer e a equipe técnica fazer um planejamento de manutenção preditiva e/ou preventiva.

O FRA consiste na medição da função transferência (corrente/tensão ou tensão saída/tensão entrada) do arranjo dos elementos resistivos, capacitivos e indutivos dos enrolamentos do transformador. A medição é feita sob larga faixa de frequência e os resultados são comparados com uma referência conhecida como “impressão digital” ou “assinatura” do enrolamento do transformador (MARTINS, 2007).

Este teste está baseado no princípio de que todo enrolamento apresenta uma característica única de resposta em frequência, sendo sensíveis a alterações nos parâmetros elétricos, quais sejam, resistência, indutância e capacitância. Por exemplo, se um enrolamento sofre alguma deformação no seu formato devido a forças eletromagnéticas geradas por correntes de curto-circuito, por consequência provocará alterações na sua resposta em

frequência. Portanto, se a curva obtida na aplicação do teste FRA apresentar diferenças com relação à curva de referência, significa que o equipamento sofreu algum dano, sendo necessária uma investigação com auxílio de outros testes ou através de uma inspeção interna.

Um exemplo prático desenvolvido para verificação dos fundamentos do teste FRA foi apresentado por (McGRAIL, 2005). Um circuito simples, com duas bobinas, é mostrado na Figura 4.1.

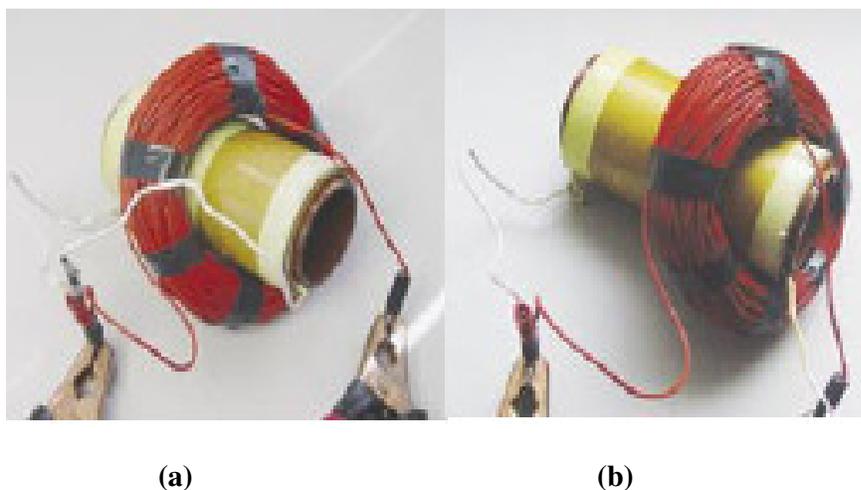


Figura 4.1. Bobina experimental. (a) posição inicial (b) posição final (McGrail, 2005).

Para cada posição das bobinas foi realizado o teste de FRA e obtidas as respectivas curvas, possibilitando a interpretação dos dados. A Figura 4.2 mostra as curvas obtidas antes e depois do movimento das bobinas.

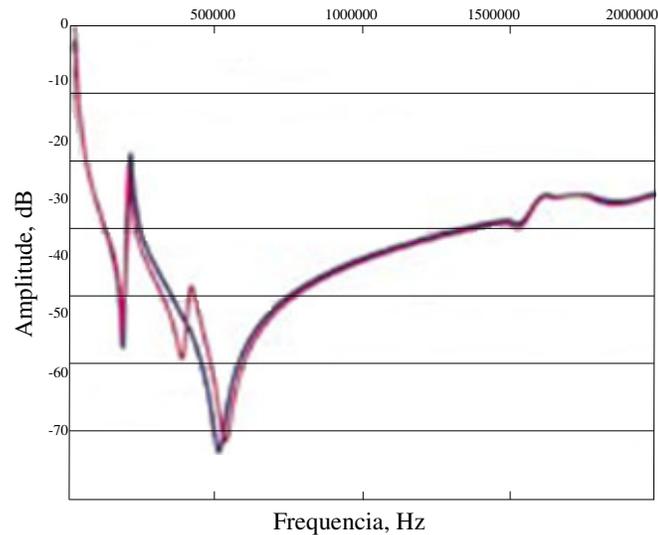


Figura 4.2. Curvas obtidas através do ensaio FRA (adaptado de McGrail, 2005).

Atualmente um grande número de empresas adota esta técnica de diagnósticos pelo mundo todo, mas persiste a dificuldade de interpretação de resultados. Saber se diferenças entre os dados de referência e os obtidos no ensaio FRA são significativos o suficiente para caracterizar falhas ou tendências a falhas no transformador de potência ainda geram dúvidas.

A avaliação de transformadores de potência a partir da resposta em frequência carece de um procedimento adotado internacionalmente, havendo normalmente interpretações qualitativas tanto das curvas de resposta em frequência quanto das de impedância terminal (MARTINS, 2007).

A empresa *China Electric Power Publishing Co.* publica em 2004, uma norma para análise de resposta em frequência, sendo considerada o Padrão Chinês de Análise do FRA – Norma DL/T911-2004.

Esta norma, adotada na República Popular da China, utiliza um algoritmo que avalia a similaridade de duas respostas em frequência de enrolamentos de transformadores, ou seja,

duas assinaturas. Isto é feito através do cálculo dos fatores de avaliação R_{LF} (resistência de baixa frequência), R_{MF} (resistência de média frequência) e R_{HF} (resistência de alta frequência), os quais definem as condições de deformação do enrolamento do transformador.

A norma apresenta uma relação do grau de deformação do enrolamento com os valores calculados para os fatores R_{LF} , R_{MF} e R_{HF} . Esta relação é mostrada na Tabela 4.1 a seguir.

Tabela 4.1. Grau de deformação e fator de avaliação.

Grau de deformação do enrolamento	Fator de avaliação do enrolamento
Enrolamento normal (<i>normal winding</i>)	$R_{LF} \geq 2,0$ e $R_{MF} \geq 1,0$ e $R_{HF} \geq 0,6$
Deformação leve (<i>slight deformation</i>)	$2,0 > R_{LF} \geq 1,0$ ou $0,6 \leq R_{MF} < 1,0$
Deformação óbvia (<i>obvious deformation</i>)	$1,0 > R_{LF} \geq 0,6$ ou $R_{MF} < 0,6$
Deformação severa (<i>severe deformation</i>)	$R_{LF} < 0,6$

A DL/T911-2004 define, também, as faixas de frequências relativas aos fatores a serem calculados. A Tabela 4.2 apresenta estas faixas.

Tabela 4.2. Relação faixa de frequência e fator de avaliação.

Faixa de frequência	Fator de avaliação do enrolamento
1 kHz – 100 kHz	R_{LF}
100 kHz – 600 kHz	R_{MF}
600 kHz – 1 MHz	R_{HF}

O FRA ainda não é um método normalizado, pois para algumas variáveis (interpretação dos resultados, por exemplo) não existe consenso. O Padrão Chinês está passando por avaliações em muitas empresas, mas as pesquisas sobre sua aplicabilidade e confiabilidade continuam.

Diversas técnicas de modelagem já foram propostas a fim de verificar a eficácia do FRA na detecção de degradações no equipamento. Neste contexto, modelar um transformador é a melhor maneira de avaliar sua sensibilidade aos diversos tipos de degradações ou falhas.

Este trabalho está propondo um modelo do transformador, em especial a sua impedância a partir de rede de células RLC passivas, a fim de permitir o emprego deste modelo em rotinas computacionais para cálculo de transientes como o ATP, por exemplo.

Não é objetivo deste trabalho, vincular defeitos no transformador com a respectiva resposta em frequência.

Relacionar o resultado da resposta em frequência com prováveis defeitos requer muito mais tempo de pesquisa e análise de falhas. Nesse sentido, muitos trabalhos tem sido divulgados no mundo inteiro e com eles surgem uma série de indagações. Isto mostra que persiste a dificuldade de se chegar a um consenso numa relação confiável quanto a associar uma alteração na resposta em frequência com uma determinada alteração interna no circuito ativo do transformador.

A própria concepção do dispositivo, quanto ao seu projeto e condições construtivas, difere entre os diferentes fabricantes, o que dificulta uma generalização do comportamento em se tratando de faixas de potência ou de tensão para este tipo de equipamento.

Deve-se ter em mente que o ensaio de resposta em frequência é realizado com tensão aplicada muito inferior à tensão nominal. Considerando este aspecto, é de se questionar se a tentativa de obtenção dos parâmetros do circuito equivalente clássico do transformador, a partir deste ensaio, leva a valores coerentes aos obtidos a partir do ensaio em vazio e de tensão de curto-circuito que, em princípio, traduzem situações de operação nominal do equipamento.

5 MODELO CLÁSSICO DO TRANSFORMADOR

O modelo elétrico clássico para o transformador é apresentado na Figura 5.1, em que R_p e R_s representam as resistências elétricas dos enrolamentos primário e secundário, respectivamente, X_p e X_s as reatâncias de dispersão dos enrolamentos primário e secundário, respectivamente, R_c e X_m correspondem a resistência de perdas no núcleo e a reatância de magnetização, respectivamente. A tensão e a corrente no enrolamento primário estão representadas por V_p e I_p , assim como V_s e I_s representam a tensão e a corrente no enrolamento secundário. A relação de transformação a é definida em (5.1).

$$a = \frac{V_p}{V_s} \quad (5.1)$$

Este modelo é aplicado à baixa frequência, e representa muito bem o comportamento do transformador nas condições de regime permanente e na frequência industrial (60 ou 50 Hz).

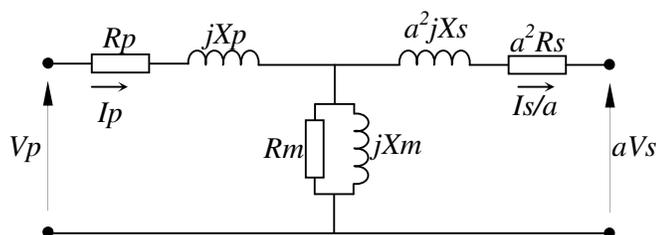


Figura 5.1. Modelo elétrico clássico para o transformador.

Os parâmetros presentes no modelo elétrico podem ser determinados por testes normalizados denominados de ensaio em vazio e ensaio de tensão de curto-circuito.

Se no ensaio em vazio, mantém-se o enrolamento secundário em aberto, a impedância $Z_p(\omega)$, vista a partir dos terminais do enrolamento primário, será dada por (5.2) assumindo que R_p e R_m não dependem da frequência e L_p e L_m representam a indutância de dispersão do enrolamento primário e a indutância de magnetização do transformador respectivamente.

$$Z_p(\omega) = R_p + j\omega L_p + \frac{jR_m \omega L_m}{R_m + j\omega L_m} \quad (5.2)$$

O comportamento da impedância Z_p em função da frequência pode ser analisado como segue. Primeiramente, pode ser verificado o comportamento da impedância quando a frequência tende para zero.

$$Z_p(0) = \lim_{\omega \rightarrow 0} \left(R_p + j\omega L_p + \frac{jR_m \omega L_m}{R_m + j\omega L_m} \right) \quad (5.3)$$

$$Z_p(0) = R_p \quad (5.4)$$

O comportamento da impedância quando a frequência tende para infinito é apresentado em (5.5).

$$Z_p(\infty) = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \left(R_p + j\omega L_p + \frac{jR_m \omega L_m}{R_m + j\omega L_m} \right) \quad (5.5)$$

Note-se que o ramo de excitação do transformador apresenta valores de resistência elétrica e de reatância indutiva muito maiores do que os valores para a resistência elétrica do enrolamento e sua respectiva reatância de dispersão. Em (5.5) é interessante notar que na medida em que a frequência tende a valores altos a impedância equivalente do ramo de excitação tende ao valor de R_m , conforme (5.6).

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \left(\frac{jR_m \omega L_m}{R_m + j\omega L_m} \right) = R_m \quad (5.6)$$

Entretanto, a impedância primária $Z_p(\omega)$ tende a valores muito grandes já que depende diretamente de ωL_p . Assim, tem-se que para frequência elevada a impedância primária é regida por $Z_p(\omega) = j\omega L_p$, analisando à luz no modelo clássico proposto.

A Figura 5.2 apresenta o comportamento da impedância de um transformador real, obtido a partir de um ensaio de resposta em frequência.

Pode-se observar que este comportamento não é coerente com o previsto pela análise baseada no circuito elétrico clássico para o transformador.

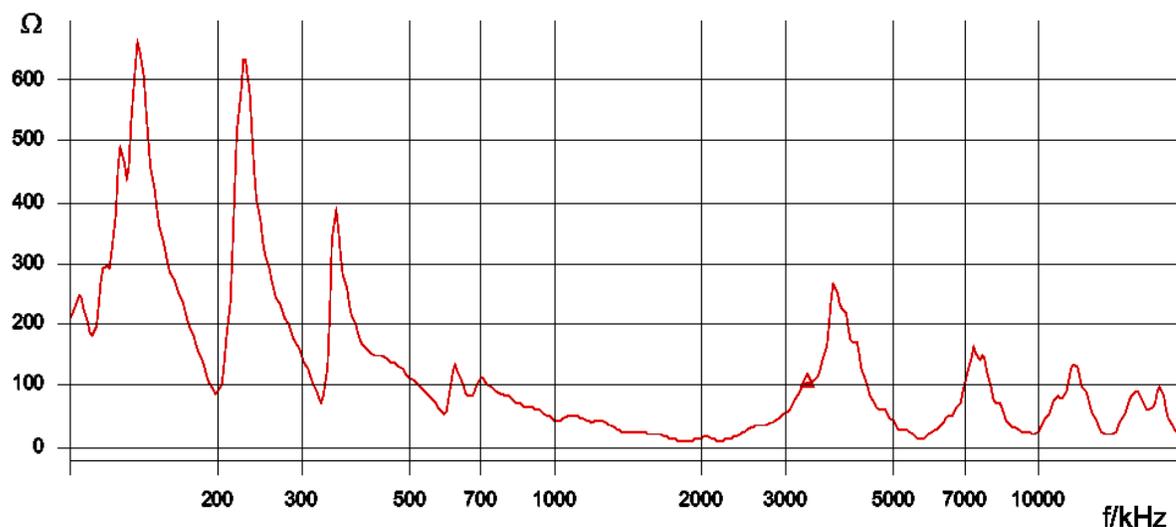


Figura 5.2. Comportamento do módulo da impedância de um transformador real.

Conclui-se que para frequências elevadas outros efeitos passam a se manifestar de forma a invalidar o modelo clássico. Mas inserir outros elementos passivos no modelo clássico não é uma tarefa simples.

Pode-se considerar, por exemplo, a existência de capacitâncias entre os enrolamentos, bem como entre espiras de cada enrolamento. Mensurar os valores destas capacitâncias e como ocorrem suas distribuições, em toda a parte ativa do transformador, exige um trabalho que provavelmente poderia ser executado com o emprego de um método computacional dedicado como, por exemplo, o método baseado em elementos finitos.

Mesmo assim, há a necessidade de conhecer, e com muita exatidão, todos os detalhes geométricos da parte ativa, incluindo os detalhes geométricos das ligações internas e transposições existentes nos enrolamentos, entre outros. Mas, ainda não há garantia de que se obtenha um modelo mais coerente, pois tem se observado que unidades, em princípio idênticas, apresentam diferentes comportamentos quanto à resposta em frequência da impedância. Provavelmente há pequenas diferenças construtivas entre estas unidades, mas que não manifestam diferenças perceptíveis para condição de operação nominal.

Uma inspeção no comportamento apresentado na Figura 5.2 induz a refletir a respeito de um modelo elétrico que apresente o comportamento apresentado, de forma que os vários picos de impedâncias sejam reproduzidos em suas respectivas frequências.

É de conhecimento clássico da teoria de circuitos elétricos que circuitos passivos constituídos por elementos resistivo, indutivo e capacitivo, conectados em paralelo, apresentam um comportamento semelhante cada um dos picos presentes na curva da Figura 5.2.

A proposta deste trabalho consiste em determinar os valores dos elementos R, L e C, conectados em paralelo, constituindo células RLC passivas, sintonizadas com a frequência de cada um dos picos principais presentes na característica de resposta em frequência da impedância do transformador.

Estas células, por sua vez, são conectadas em série de tal forma que sua manifestação predomina sobre as outras, quando a frequência coincide com sua respectiva frequência de ressonância.

A determinação dos valores dos elementos passivos das células é baseado no estudo deste tipo de configuração apresentado no capítulo 6.

6 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta o estudo da configuração RLC proposta a fim de poder-se determinar os valores dos elementos passivos em cada célula. Os conceitos introdutórios aqui apresentados são abordados nas literaturas tradicionais sobre análise de circuitos elétricos, e constituem a base teórica para o desenvolvimento do modelo proposto.

6.1- CIRCUITO RLC PARALELO.

A análise conceitual é baseada no circuito RLC paralelo, conforme apresenta a Figura 6.1.

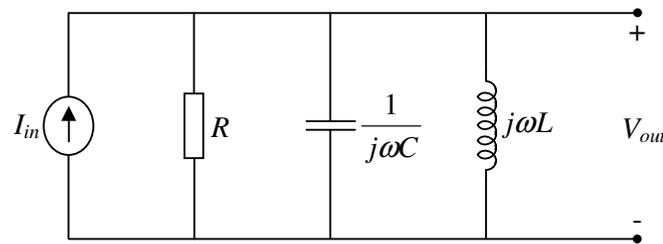


Figura 6.1. Circuito RLC paralelo.

A tensão de saída V_{out} , em V, é definida em (6.1), onde I_{in} é a corrente imposta pela fonte do circuito, em A e Y a admitância do circuito, em S.

$$V_{out} = \frac{I_{in}}{Y} \quad (6.1)$$

A magnitude da característica da transferência pode ser escrita como sendo o módulo da impedância de transferência do circuito e obtido em (6.2), onde R é a resistência elétrica, em Ω , C a capacitância, em F, L a indutância, em H, e ω a frequência angular, em $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$.

$$\left| \frac{V_{out}}{I_{in}} \right| = \frac{1}{\sqrt{(1/R^2) + (\omega C - 1/\omega L)^2}} \quad (6.2)$$

A frequência de ressonância, ω_0 , ocorre quando $(\omega C - 1/\omega L)=0$ e é definida em (6.3).

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (6.3)$$

onde a resistência R nessa frequência é expressa por

$$R = \left| \frac{V_{out}}{I_{in}} \right|_{\max} \quad (6.4)$$

Conceitualmente, a frequência de meia potência corresponde a frequências nas quais a potência na saída de um circuito elétrico é reduzida a metade da potência da faixa de passagem. Portanto, nas frequências de meia potência a magnitude do módulo da impedância corresponde a $1/\sqrt{2}$ do seu valor máximo, sendo expresso por

$$\frac{R}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{(1/R^2) + (\omega C - 1/\omega L)^2}}$$

Considerando-se apenas os valores positivos da frequência, obtêm-se os valores inferiores ω_{LO} e superiores ω_{HI} , respectivamente, através de

$$\omega_{LO} = -\frac{1}{2RC} + \sqrt{\frac{1}{(2RC)^2 + LC}} \quad (6.5)$$

e de

$$\omega_{HI} = \frac{1}{2RC} + \sqrt{\frac{1}{(2RC)^2 + LC}} \quad (6.6)$$

Outro dado importante é a largura de faixa, a qual pode ser escrita por

$$B = \omega_{HI} - \omega_{LO} = \frac{1}{RC} \quad (6.7)$$

Obtida a largura de faixa, é possível a determinação do fator de qualidade, expresso por

$$Q = \frac{\omega_o}{B} = \frac{RC}{\sqrt{LC}} = R\sqrt{\frac{C}{L}} \quad (6.8)$$

As equações (6.5) e (6.6), podem ser reescritas utilizando-se as expressões (6.3), (6.7) e (6.8), resultando nas seguintes (6.9) e (6.10).

$$\omega_{LO} = \omega_o \left[\frac{-1}{2Q} + \sqrt{\frac{1}{(2Q)^2} + 1} \right] \quad (6.9)$$

e

$$\omega_{HI} = \omega_o \left[\frac{1}{2Q} + \sqrt{\frac{1}{(2Q)^2} + 1} \right] \quad (6.10)$$

Dentro do que foi exposto, é de relevante importância para a proposta de modelo do transformador, as equações relativas à frequência de ressonância, largura de faixa e fator de qualidade. São parâmetros fundamentais para o desenvolvimento do modelo elétrico da impedância do transformador.

6.2- ANÁLISE DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA.

O método da resposta em frequência de um sistema é a resposta deste considerando um sinal senoidal de entrada, variando-se a frequência dentro de uma faixa estabelecida.

A vantagem deste método é que se obtém experimentalmente uma resposta, sem necessariamente ter o conhecimento prévio da função transferência.

Neste estudo em particular, o objetivo é o estudo da relação entre a tensão e a corrente em um enrolamento do transformador, o que resulta em uma impedância de transferência.

7 MODELO PROPOSTO

No trabalho ora apresentado, o objetivo é disponibilizar uma ferramenta para simulações e análise de parâmetros a partir do ensaio de resposta em frequência da impedância do transformador, baseado em um modelo elétrico de rede de células RLC passivas.

O desenvolvimento deste modelo visa à obtenção de uma resposta rápida e confiável relativa ao comportamento da impedância no transformador de potência, onde foram considerados conceitos abordados por Pleite (2002), bem como de circuitos RLC paralelo, tendo em vista que os parâmetros e o comportamento apresentam resultados muito semelhantes com os encontrados nos testes de resposta em frequência da impedância do transformador.

O modelo proposto consiste na associação de células RLC em série. Tais células são constituídas de um resistor R_k , um capacitor C_k e um indutor L_k em paralelo, onde k refere-se à célula 1, 2, 3, ..., como ilustra a Figura 7.1, no domínio frequência.

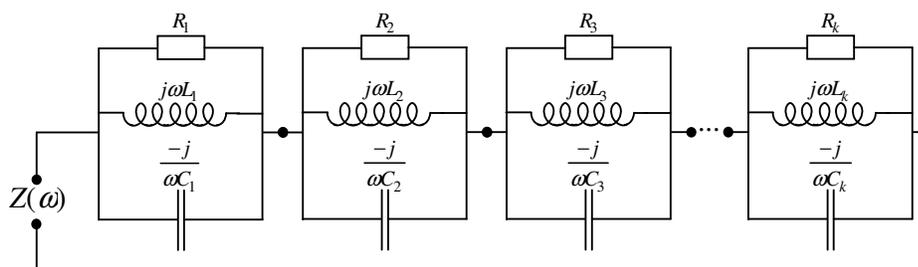


Figura 7.1. Modelo proposto no domínio frequência constituído por células RLC.

Como ferramenta computacional foi utilizado o *software* MatLab®, sendo desenvolvido um programa computacional que calcula os valores dos elementos passivos de cada célula e, por conseguinte, permite a obtenção do modelo elétrico da impedância do equipamento, a

partir de seus terminais. O programa computacional desenvolvido está apresentado na íntegra no Anexo II. Basicamente, o modelo proposto segue o fluxograma apresentado na Figura 7.2, a seguir.

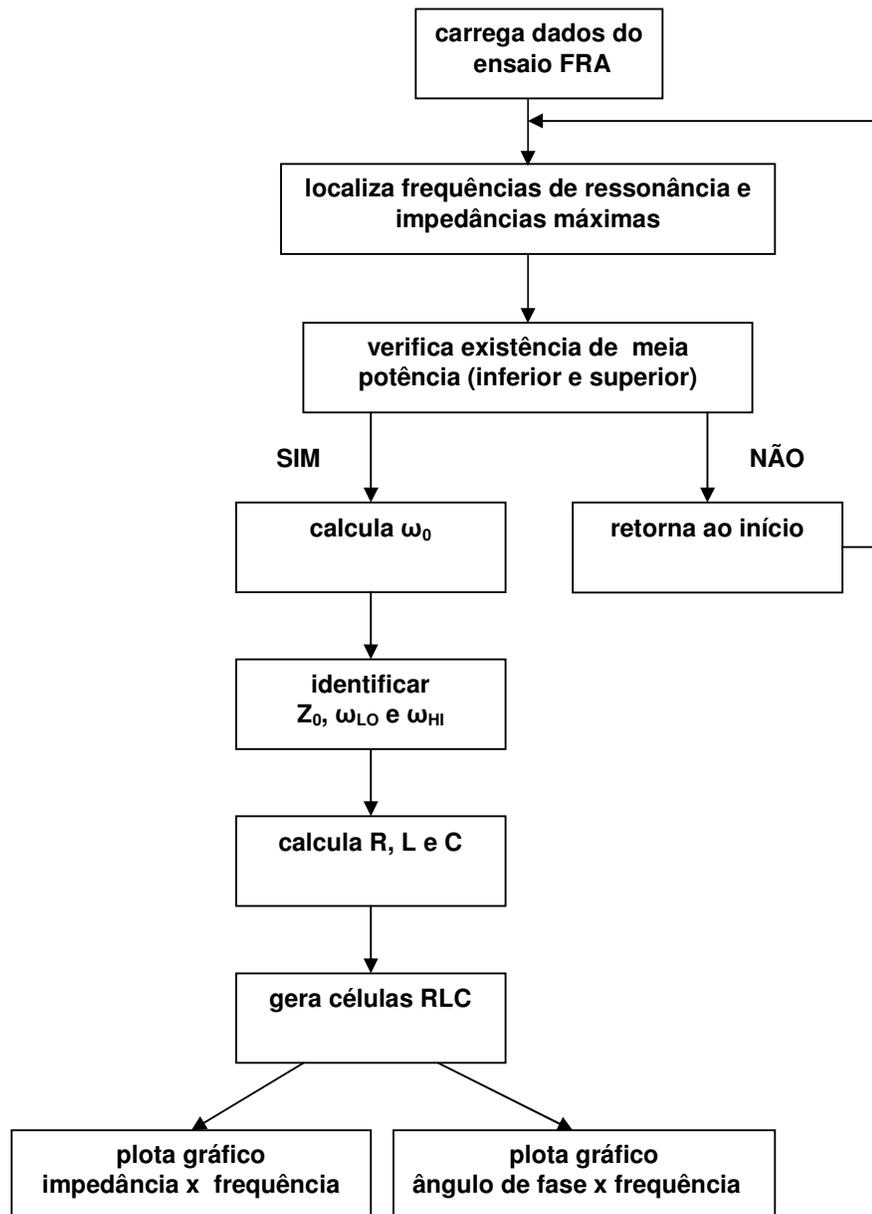


Figura 7.2. Fluxograma do modelo proposto.

Inicialmente foram coletados dados reais de testes de resposta em frequência da impedância, realizados em transformadores de potência. Estes serviram de referência para o

desenvolvimento do programa computacional e para as simulações necessárias com o intuito de avaliar o modelo proposto.

Partindo de dados de ensaio realizado em um determinado equipamento, em especial os dados referentes ao módulo da impedância e a fase em função da frequência, foi elaborado um modelo elétrico constituído por um conjunto de células passivas RLC. Cada célula RLC foi dimensionada a fim de que o conjunto destas possa representar o comportamento apresentado pelo equipamento no ensaio obtido pela resposta em frequência da impedância do transformador.

Com base nas curvas exemplificadas a seguir, Figuras 7.3 e 7.4, extraídas de um ensaio FRA real, o modelo proposto será apresentado.

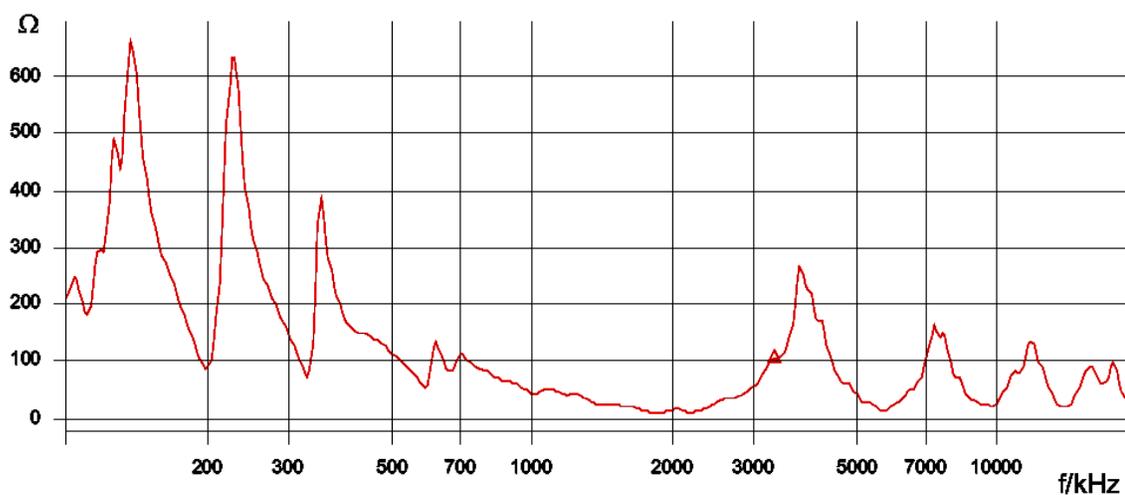


Figura 7.3. Curva do módulo da impedância x frequência.

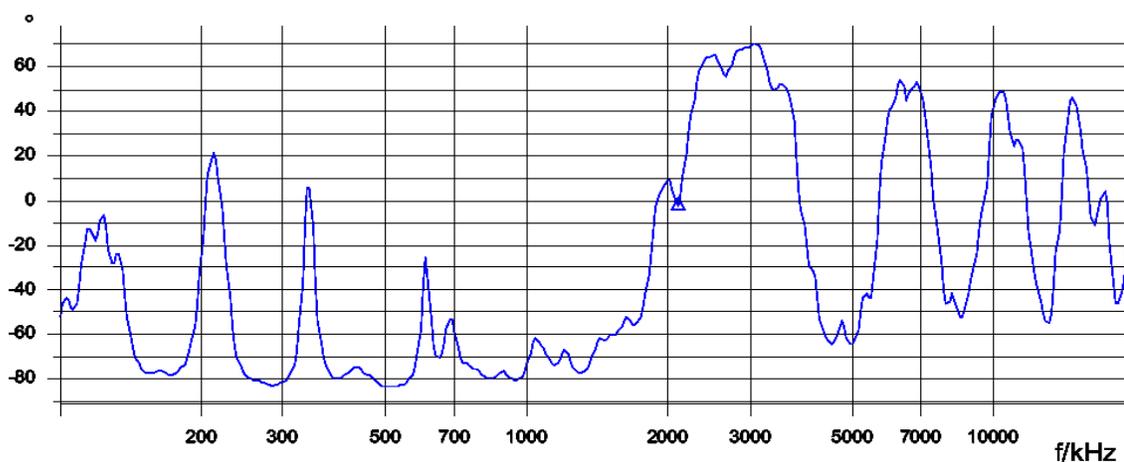


Figura 7.4. Curva de fase x frequência.

Na curva da característica de resposta em frequência da impedância são identificados os picos significativos da impedância. A cada um destes picos é associada uma célula RLC correspondente e, na frequência em que estes picos ocorrem, é considerada a existência de uma frequência de ressonância associada à célula. Assim, nestas supostas frequências de ressonância a impedância é puramente resistiva.

Para o modelo, serão consideradas significativas apenas as frequências de ressonância que apresentem valores de meia potência inferior e superior. A Figura 7.5 mostra as frequências de ressonância significativas para o modelo.

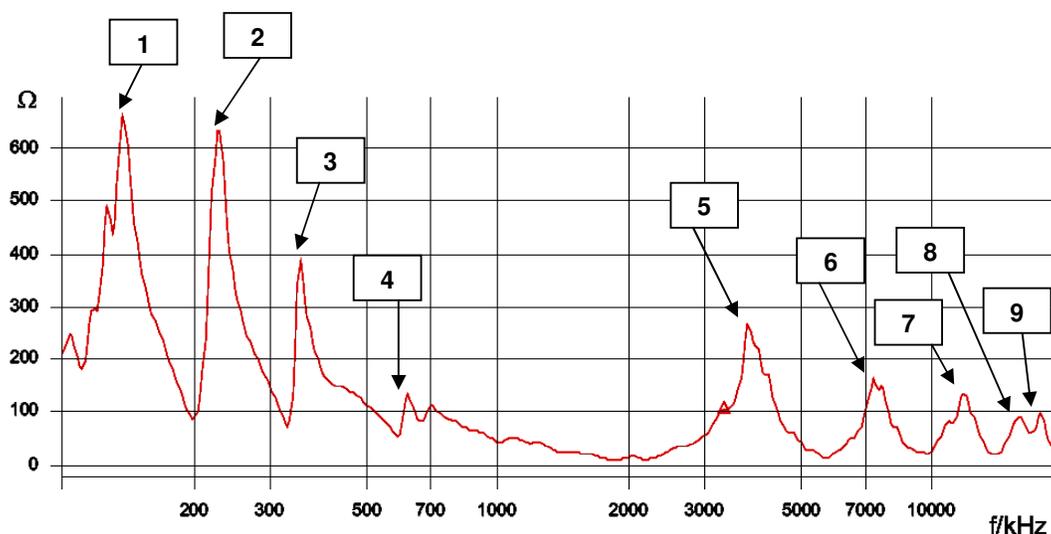


Figura 7.5. Frequências de ressonância significativas para o modelo.

Analisando a curva de impedância, são verificados os pontos em que existem frequências de ressonância e impedância, em meia potência. Neste primeiro momento são descartados os pontos em que esta condição não é satisfeita.

Para a determinação da largura de faixas e outros parâmetros, as frequências de ressonância que apresentem valores de meia potência anterior e posterior ao ponto de pico são consideradas. O motivo é simplificar o cálculo da largura de faixas.

As curvas originais fornecem as frequências em Hertz, mas para a continuidade dos cálculos torna-se necessário a conversão para frequência angular, expressa em radianos por segundo. Portanto, para as frequências consideradas pelo modelo calcula-se as correspondentes frequências angulares, obtidas através da expressão (7.1).

$$\omega_0 = 2\pi f \quad (7.1)$$

A Tabela 7.1, a seguir, apresenta a conversão de unidade para as frequências de ressonância consideradas pelo modelo para o exemplo abordado.

Tabela 7.1. Conversão de unidade para frequências de ressonância.

Frequência de ressonância	
kHz	rad/s
138	866640
229	1438120
355	2229400
603	3786840
3715	23330200
7244	45492320
11481	72100680
15488	97264640
17378	109133840

Definidas as frequências de ressonância relevantes para o modelo, conseqüentemente obtem-se as respectivas resistências elétricas R a partir dos valores de meia potência, para as células RLC paralelo. A Tabela 7.2, a seguir, apresenta os valores obtidos.

Tabela 7.2. Valores das resistências para as respectivas frequências de ressonância.

Frequência de ressonância ω_0, rad/s	Resistência, Ω
866640	660
1438120	630
2229400	390
3786840	128
23330200	260
45492320	160
72100680	128
97264640	95
109133840	100

Conhecendo as frequências angulares, o próximo passo é determinar as respectivas frequências de meia potência inferior (ω_{LO}) e superior (ω_{HI}) para cada frequência relevante para o modelo. Isto é realizado utilizando as seguintes equações (7.2) e (7.3):

$$|Z(\omega_{LO})| = \frac{|Z(\omega_0)|}{\sqrt{2}} \quad \omega_{LO} < \omega_0 \quad (7.2)$$

$$|Z(\omega_{HI})| = \frac{|Z(\omega_0)|}{\sqrt{2}} \quad \omega_{HI} > \omega_0 \quad (7.3)$$

Para o exemplo apresentado, obtém-se as frequências de meia potência inferior e superior correspondentes a todas frequências de ressonância, resultante dos cálculos referidos anteriormente. A Tabela 7.3 mostra os valores encontrados para as frequências de ressonância relevantes para o modelo.

Tabela 7.3. Frequências de meia potência inferior e superior para cada frequência de ressonância definida para o modelo (rad/s).

Frequência de ressonância ω_0	Frequência de meia potência inferior ω_{LO}	Frequência de meia potência superior ω_{HI}
866640	847109,2	928874,8
1438120	1342601,2	1506446,4
2229400	2202710,0	2387593,2
3786840	3872248	4054996
23330200	22282256,4	25001119,6
45492320	43950077,6	48748311,6
72100680	69656127,2	76376480,8
97264640	95054333,6	99531280,4
109133840	107884647,5	110397602,1

A partir destes parâmetros conhecidos, segue-se uma sequência de cálculos baseados nos conceitos dos circuitos RLC paralelo objetivando a determinação de indutâncias e capacitâncias, e assim, concluir o dimensionamento das células RLC.

De posse destes dados, o próximo passo é a determinação da largura de faixa (B) para cada frequência de ressonância. Para calcular B é feita a diferença entre as frequências de meia potência inferior e superior associada a cada respectiva célula, como em (7.4).

$$B = \omega_{HI} - \omega_{LO} \quad (7.4)$$

A Tabela 7.4 apresenta os resultados obtidos para o exemplo.

Tabela 7.4. Largura de faixa para cada frequência de ressonância, em rad/s.

Frequência de ressonância ω_0	Largura de faixa B
866640	81765,6
1438120	163845,2
2229400	184883,2
3786840	182748
23330200	2718863,2
45492320	4798234
72100680	6720353,6
97264640	4476946,8
109133840	2512954,56

Outro parâmetro importante para a sequência de cálculos para determinar as células RLC é o chamado fator de qualidade, Q, um adimensional dado pela relação entre a frequência de ressonância e a respectiva largura de faixa como em (7.5).

$$Q = \frac{\omega_0}{B} \quad (7.5)$$

A Tabela 7.5, a seguir, apresenta os resultados do fator de qualidade para as frequências de ressonância do exemplo abordado.

Para a determinação dos valores das indutâncias, L , e das capacitâncias, C , é necessário o conhecimento do fator de qualidade, Q , das resistências elétricas, R , obtidas, as quais correspondem a cada frequência de ressonância ω_0 .

Tabela 7.5. Valores dos fatores de qualidade.

Frequência de ressonância ω_0 , rad/s	Fator de qualidade Q
866640	10,6
1438120	8,78
2229400	12,06
3786840	20,72
23330200	8,58
45492320	9,48
72100680	10,73
97264640	21,73
109133840	43,43

Da equação (6.7) temos que $C = \frac{1}{BR}$ e da equação (6.8) temos que $B = \frac{\omega_0}{Q}$.

Substituindo (6.7) e (6.8) na equação (6.3) resulta na expressão (7.6).

$$L = \frac{R}{\omega_0 Q} \quad (7.6)$$

Na obtenção dos valores das indutâncias, é aplicada a expressão (7.6), sendo que a Tabela 7.6 mostra os resultados para o exemplo apresentado para desenvolver o modelo.

Tabela 7.6. Valores das indutâncias para as respectivas frequências de ressonância.

Frequência de ressonância ω_0 , rad/s	Indutância (Henry)
866640	$71,845 \times 10^{-6}$
1438120	$49,894 \times 10^{-6}$
2229400	$14,505 \times 10^{-6}$
3786840	$1,63 \times 10^{-6}$
23330200	$1,299 \times 10^{-6}$
45492320	$0,371 \times 10^{-6}$
72100680	$0,165 \times 10^{-6}$
97264640	$44,948 \times 10^{-9}$
109133840	$21,098 \times 10^{-9}$

Da equação (6.7) temos que $C = \frac{1}{BR}$ e da equação (6.8) temos que $B = \frac{\omega_0}{Q}$.

Substituindo (6.8) em (6.7) resulta a expressão (7.7), a qual será utilizada para o cálculo das capacitâncias do modelo. A Tabela 7.7 mostra os valores para o exemplo desenvolvido.

$$C = \frac{Q}{\omega_0 R} \quad (7.7)$$

Tabela 7.7. Valores das capacitâncias para as respectivas frequências de ressonância.

Frequência de ressonância ω_0 , rad/s	Capacitância (Farad)
866640	$18,53 \times 10^{-9}$
1438120	$9,69 \times 10^{-9}$
2229400	$13,87 \times 10^{-9}$
3786840	$42,75 \times 10^{-9}$
23330200	$1,41 \times 10^{-9}$
45492320	$1,30 \times 10^{-9}$
72100680	$1,16 \times 10^{-9}$
97264640	$2,35 \times 10^{-9}$
109133840	$3,98 \times 10^{-9}$

Realizados estes cálculos e com os resultados obtidos para resistência elétrica, para a indutância e para a capacitância, a formação das células RLC paralelo está viabilizada para o equipamento analisado.

Para o exemplo estudado, o modelo proposto apresenta nove células RLC, conforme mostra a Tabela 7.8.

Na sequência, a Figura 7.6 apresenta a resposta em frequência da impedância de cada célula RLC paralelo, cujos parâmetros foram calculados e apresentados na Tabela 7.8.

Tabela 7.8. Células RLC para o equipamento analisado.

Células	Resistência (Ohm)	Indutância (Henry)	Capacitância (Farad)
1	660	$71,845 \times 10^{-6}$	$18,53 \times 10^{-9}$
2	630	$49,894 \times 10^{-6}$	$9,69 \times 10^{-9}$
3	390	$14,505 \times 10^{-6}$	$13,87 \times 10^{-9}$
4	128	$1,63 \times 10^{-6}$	$42,75 \times 10^{-9}$
5	260	$1,299 \times 10^{-6}$	$1,41 \times 10^{-9}$
6	160	$0,371 \times 10^{-6}$	$1,30 \times 10^{-9}$
7	128	$0,165 \times 10^{-6}$	$1,16 \times 10^{-9}$
8	95	$44,948 \times 10^{-9}$	$2,35 \times 10^{-9}$
9	100	$21,098 \times 10^{-9}$	$3,98 \times 10^{-9}$

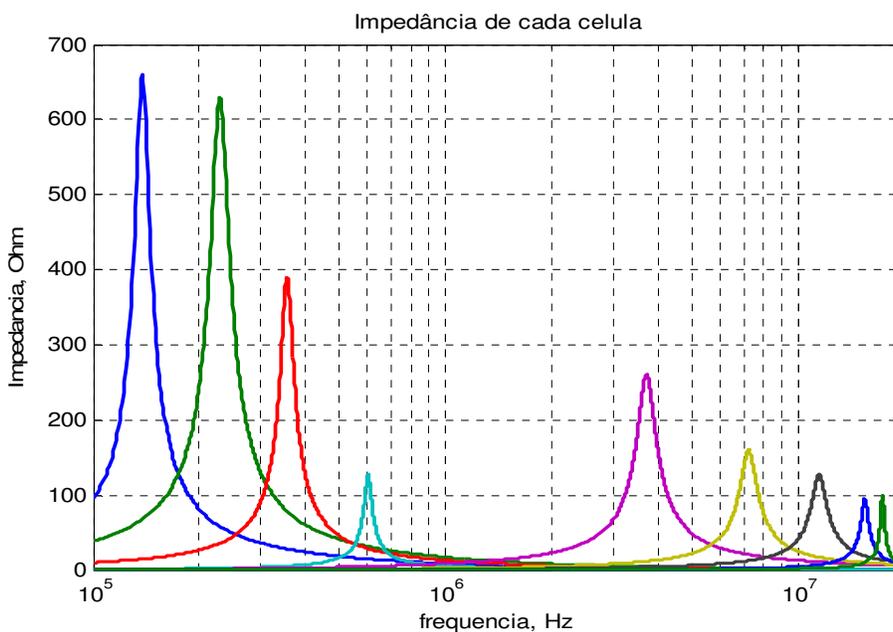


Figura 7.6. Curva do módulo da impedância x frequência para cada célula RLC.

Neste capítulo foi apresentado o cálculo de forma manual a fim de detalhar o processo de dimensionamento das células. É importante ter em conta que nem sempre poderão estar disponíveis os dados obtidos do ensaio de resposta em frequência da impedância na forma de arquivo de dados. Neste caso, o dimensionamento das células passa a ser de forma manual. Se os dados estiverem na forma de arquivos de dados o programa computacional pode ser empregado. No caso até aqui estudado pode-se verificar que o resultado obtido com o emprego do modelo de células é satisfatório uma vez que se apresenta resultado muito próximo ao comportamento obtido nos testes de resposta em frequência da impedância, como pode ser observado na comparação entre a Figura 7.7 e a Figura 7.8.

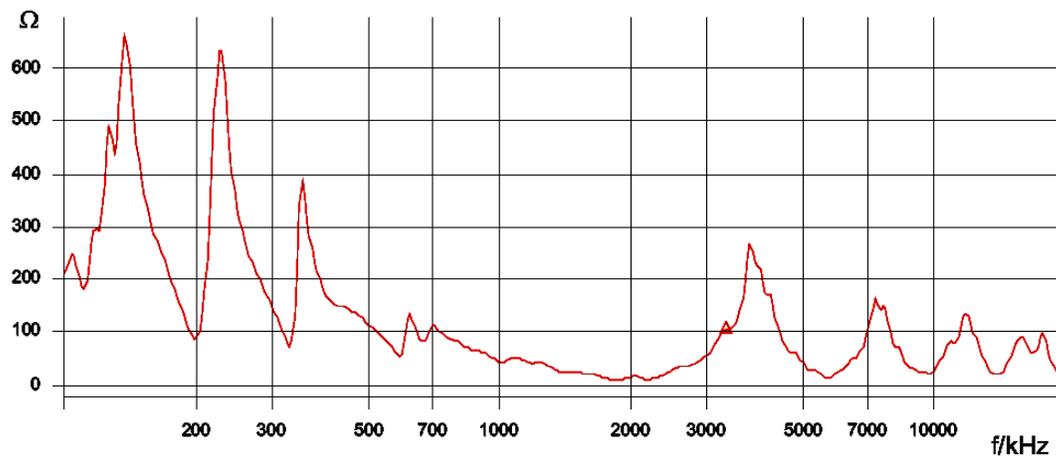


Figura 7.7. Curva do módulo da impedância x frequência obtida através de ensaio.

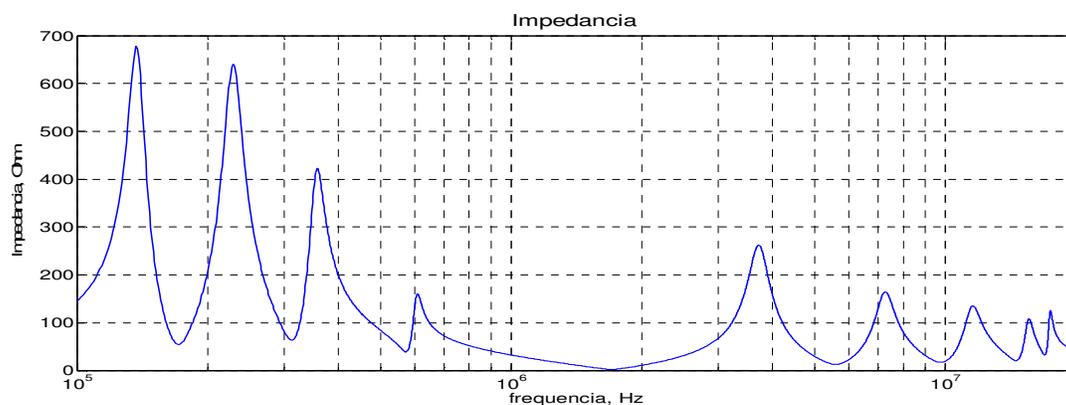


Figura 7.8. Curva do módulo da impedância x frequência obtida das células RLC.

Melhorias ainda podem ser apontadas para melhor aproximação do modelo de células RLC passivas.

É importante comentar que se houver ocorrência de frequências e resistências elétricas de meia potência relativas à frequências de ressonância adjacentes, o resultado do comportamento obtido pelo método proposto diverge do obtido através de ensaio. Isto se deve ao fato de que quando há ocorrência de picos muito próximos ocorre um efeito residual de uma célula RLC na outra vizinha.

Uma solução para reduzir este efeito residual é incluir no programa computacional uma rotina que detecte este comportamento e, localmente, reduza a largura de banda das células próximas até que ocorra uma convergência considerada satisfatória. Também pode ser salientado que nem sempre ocorrem definidamente as frequências de meia potência.

Neste caso uma solução pode ser a de recorrer à curva de comportamento da fase da impedância em função da frequência em conjunto com a curva da impedância.

8 ESTUDO DE CASOS

Neste capítulo são apresentados resultados obtidos com a aplicação do modelo proposto tendo por base as medições realizadas em transformadores de potência. Os resultados são armazenados e analisados para possibilitar uma melhor compreensão do modelo utilizado, bem como o comportamento dos transformadores no domínio da frequência.

Na realização das simulações com o modelo proposto, foram utilizados resultados obtidos em autotransformador submetido ao teste de resposta em frequência da impedância, sendo que cada teste gerou 801 dados, na varredura de frequências.

O experimento foi realizado aplicando o algoritmo desenvolvido e utilizando as planilhas de dados geradas pelo teste de resposta em frequência da impedância, estando os casos descritos a seguir.

8.1- CASOS ESTUDADOS:

Para analisar o desempenho do modelo proposto, foram utilizados resultados oriundos de testes realizados em um autotransformador monofásico de 100 MVA – 500 kV / 230 kV / 13,8 kV.

Como o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo elétrico da impedância do transformador, baseado em rede de células RLC passivas, foram utilizados os dados obtidos no teste de impedância terminal do autotransformador para a realização das simulações do modelo proposto.

Com base nos resultados obtidos nestes ensaios, foi aplicado o algoritmo do modelo proposto, sendo gerados os gráficos da impedância em função da frequência e ângulo de fase em função da frequência apresentados na sequência.

São apresentados os resultados obtidos para a impedância e ângulo de fase a partir do teste de resposta em frequência da impedância, das respostas em frequência de cada célula, do cálculo realizado pelo algoritmo e a resposta em frequência (impedância e ângulo de fase) comparativa entre os dados gerados no teste e os dados gerados pelo modelo proposto, respectivamente.

A seguir são descritos os casos estudados para comprovação da aplicabilidade do modelo proposto.

8.1.1- CASO 1:

Resultados obtidos nos testes feitos no mês de abril de 2008, no enrolamento H0-H1 (500 kV) do autotransformador caracterizado anteriormente.

As Figuras 8.1 e 8.2, a seguir, mostram os gráficos obtidos no ensaio de resposta em frequência da impedância, realizado no campo, respectivamente da impedância e ângulo de fase.

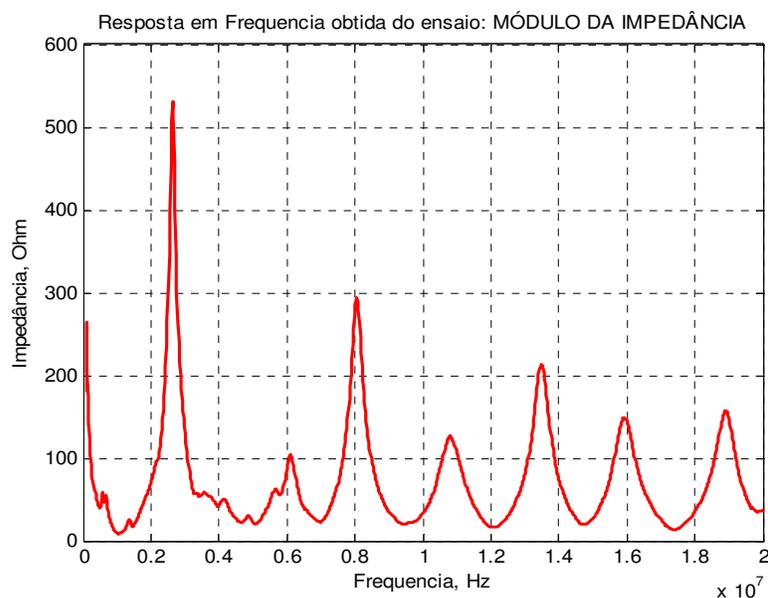


Figura 8.1. Resposta em frequência do módulo da impedância (caso 1).

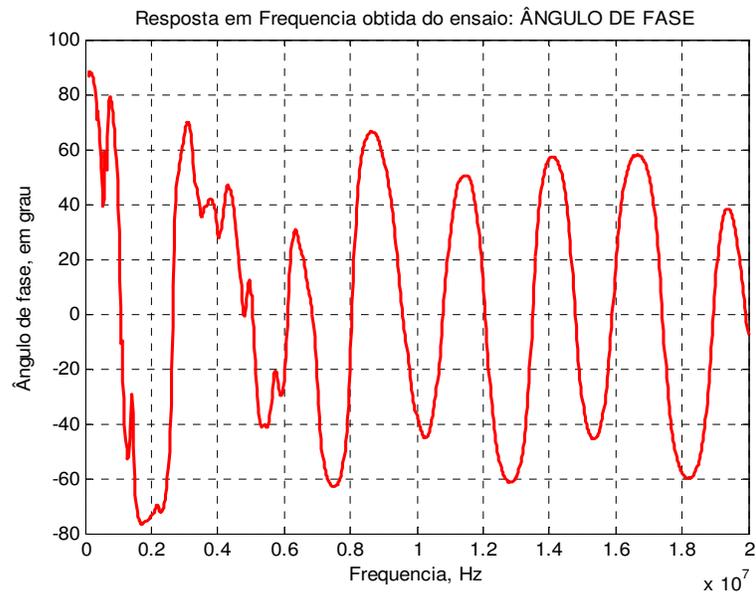


Figura 8.2. Resposta em frequência: ângulo de fase (caso 1).

As influências da impedância em cada célula e respectivo ângulo de fase, obtidos através do modelo proposto são mostradas nas Figuras 8.3 e 8.4. Observa-se que neste caso o programa computacional reconhece nove frequências de ressonância, portanto, existem nove células RLC que constituirão o modelo elétrico.

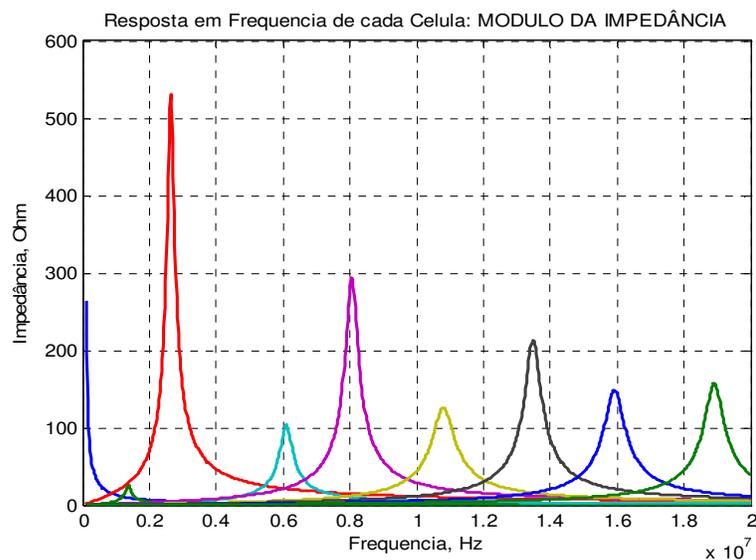


Figura 8.3. Resposta em frequência do módulo da impedância de cada célula (caso 1).

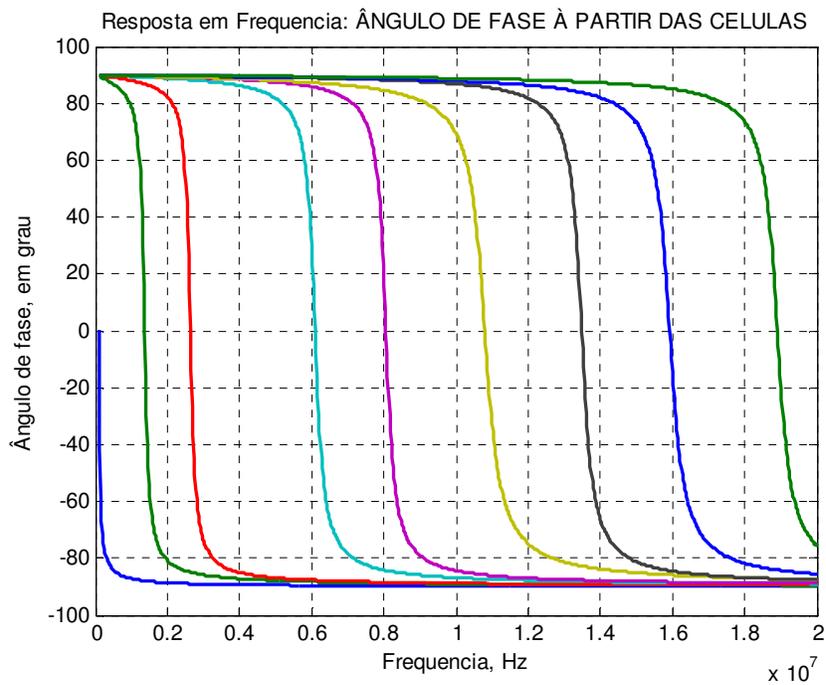


Figura 8.4. Ângulos de fase a partir das células identificadas (caso 1).

Identificadas as células existentes, o modelo proposto realiza os cálculos das respectivas impedâncias e ângulo de fase, sendo reproduzidos nos gráficos das Figuras 8.5 e 8.6.

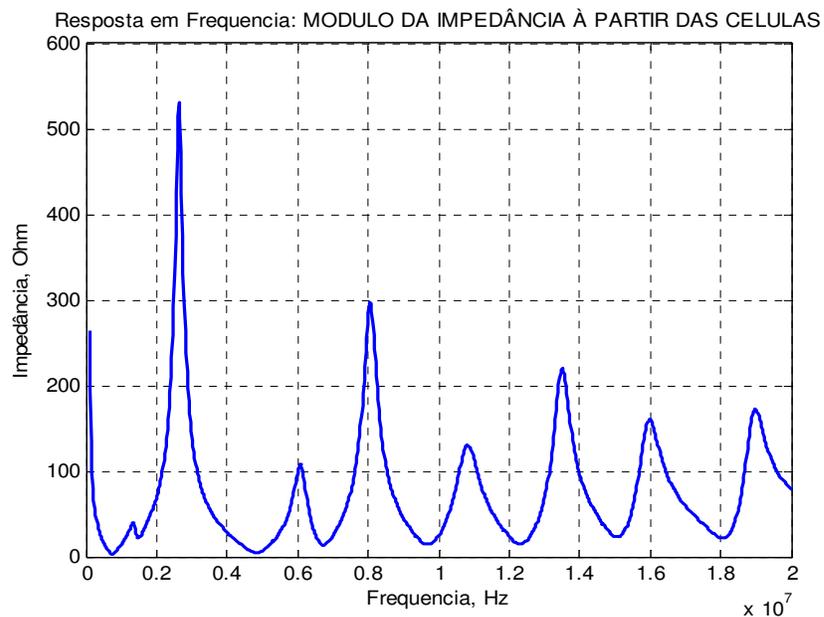


Figura 8.5 Resposta em frequência do módulo da impedância calculada (caso 1).

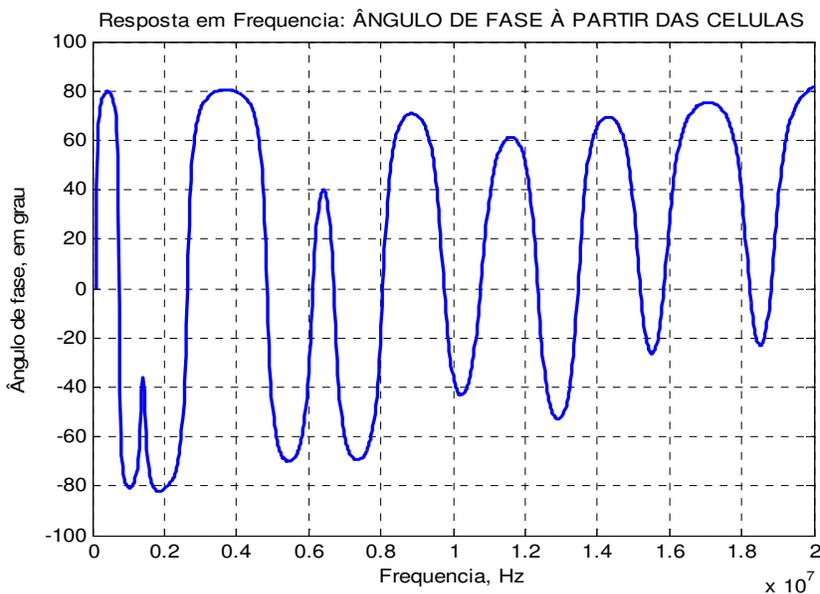


Figura 8.6. Ângulo de fase calculados (caso 1).

As Figuras 8.7 e 8.8 reproduzem a superposição dos gráficos das impedâncias e respectivos ângulos de fase, obtidos através do ensaio de resposta em frequência da impedância e dos calculados com o modelo proposto. Observa-se que os resultados obtidos pelo modelo proposto são muito próximos dos obtidos no ensaio.

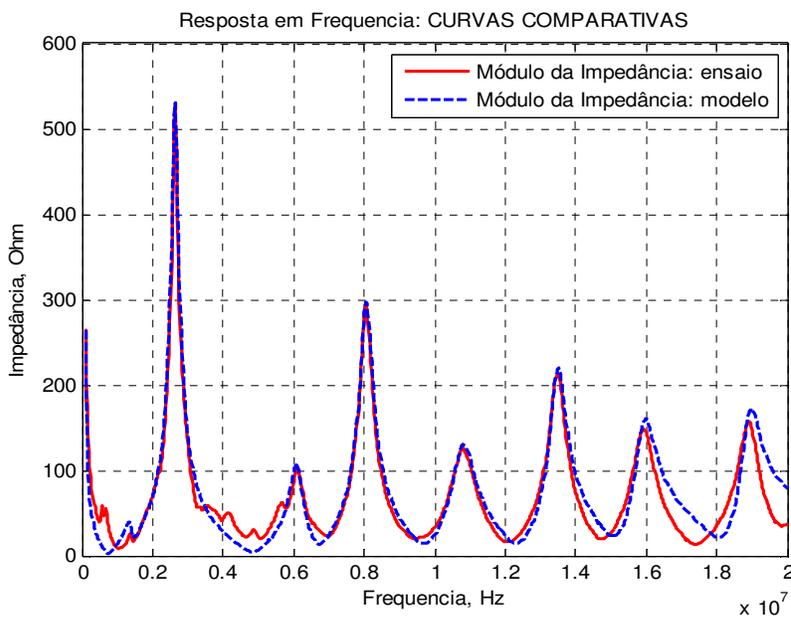


Figura 8.7. Comparação da resposta em frequência: módulos das impedâncias (caso 1).

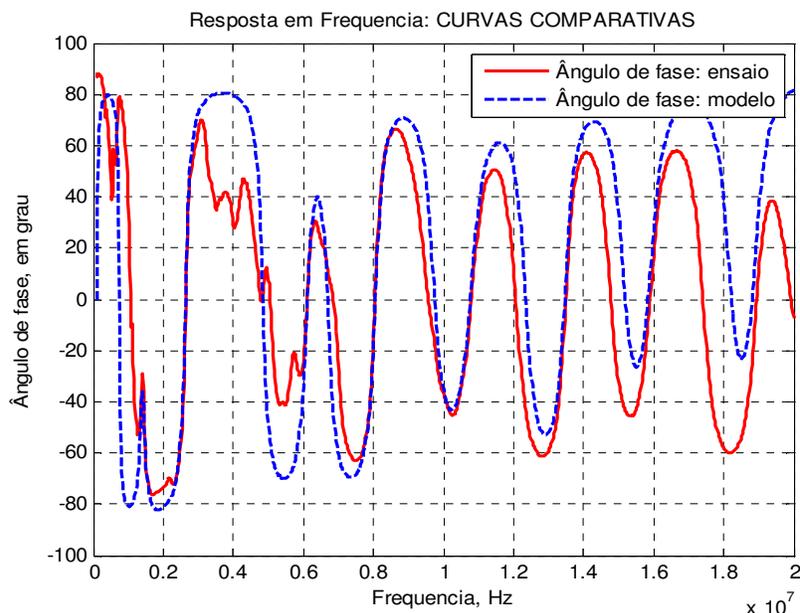


Figura 8.8. Comparação da resposta em frequência: ângulos de fase (caso 1).

Além de gerar gráficos das impedâncias em função da frequência e dos ângulos de fase, a ferramenta computacional desenvolvida, disponibiliza todos os valores de R, L e C relativos a cada célula, bem como as respectivas frequências de ressonância. A tabela 8.1 apresenta estes resultados.

Tabela 8.1. Valores de R, L e C para cada célula (caso 1).

Células	R (Ω)	L (H)	C (F)	f (Hz)
1	264,8874	$209,7410 \times 10^{-6}$	$12,0769 \times 10^{-9}$	$100,0000 \times 10^3$
2	26,0502	$385,4102 \times 10^{-9}$	$35,0872 \times 10^{-9}$	$1,3686 \times 10^6$
3	529,9102	$2,4131 \times 10^{-6}$	$1,5093 \times 10^{-9}$	$2,6372 \times 10^5$
4	103,5441	$154,4924 \times 10^{-9}$	$4,4137 \times 10^{-9}$	$6,0949 \times 10^6$
5	294,5201	$251,2789 \times 10^{-9}$	$1,5517 \times 10^{-9}$	$8,0600 \times 10^6$
6	126,3357	$107,2763 \times 10^{-9}$	$2,0258 \times 10^{-9}$	$10,7963 \times 10^6$
7	213,3248	$83,6257 \times 10^{-9}$	$1,6663 \times 10^{-9}$	$13,4827 \times 10^6$
8	148,6778	$53,4126 \times 10^{-9}$	$1,8710 \times 10^{-9}$	$15,9205 \times 10^6$
9	157,2433	$38,3179 \times 10^{-9}$	$1,8495 \times 10^{-9}$	$18,9055 \times 10^6$

8.1.2- CASO 2:

Neste segundo caso estudado, foram utilizados os resultados obtidos nos testes realizados no mês de abril de 2008, no enrolamento Y1-Y2 (13,8 kV) do autotransformador caracterizado anteriormente.

As Figuras 8.9 e 8.10 apresentam os gráficos relativos às impedâncias e os ângulos de fase obtidos no ensaio de resposta em frequência da impedância, realizado em campo.

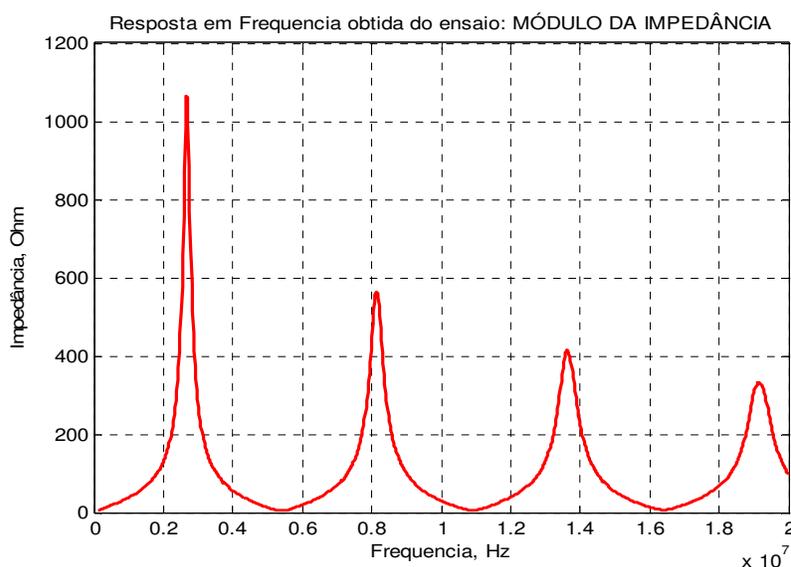


Figura 8.9. Resposta em frequência do módulo da impedância (caso 2).

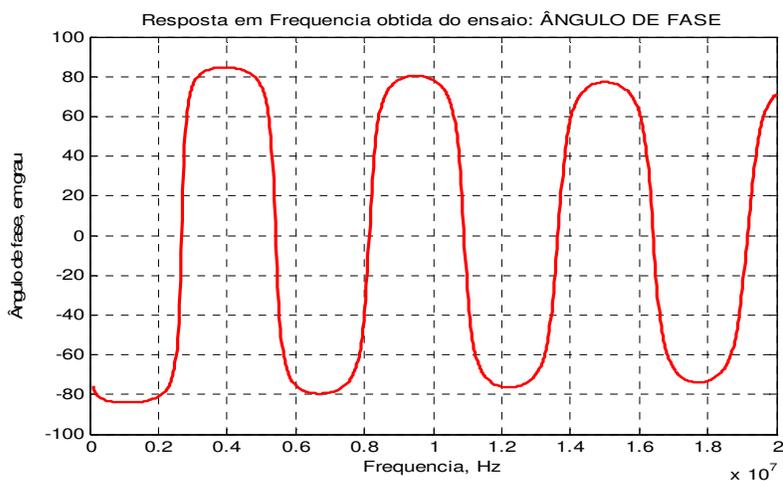


Figura 8.10. Resposta em frequência: ângulo de fase (caso 2).

As influências da impedância em cada célula e respectivos ângulos de fase, obtidos para o modelo proposto, são mostradas nas Figuras 8.11 e 8.12. Neste caso observa-se que o programa computacional desenvolvido reconhece quatro frequências de ressonância, o que implica em quatro células RLC.

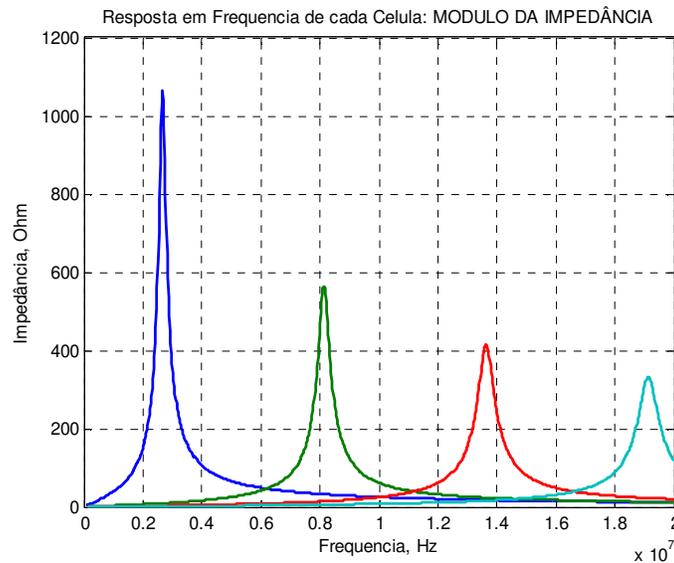


Figura 8.11. Resposta em frequência do módulo da impedância de cada célula (caso 2).

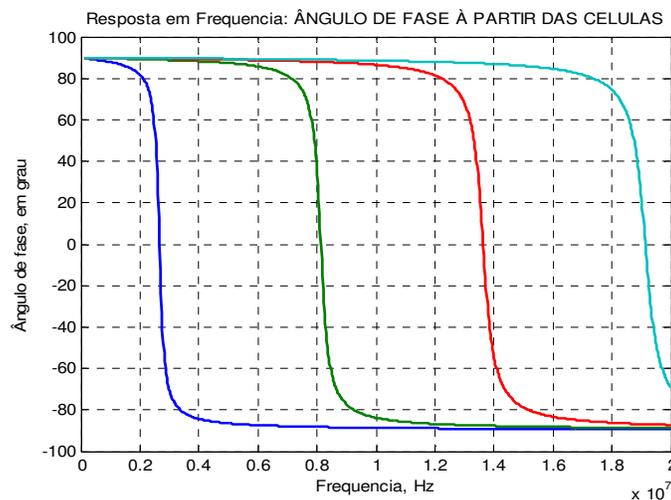


Figura 8.12. Ângulos de fase a partir das células identificadas (caso 2).

A partir da identificação das células existentes, o programa computacional apresenta o comportamento das respectivas impedâncias e ângulos de fase, os quais estão reproduzidos nos gráficos das Figuras 8.13 e 8.14.

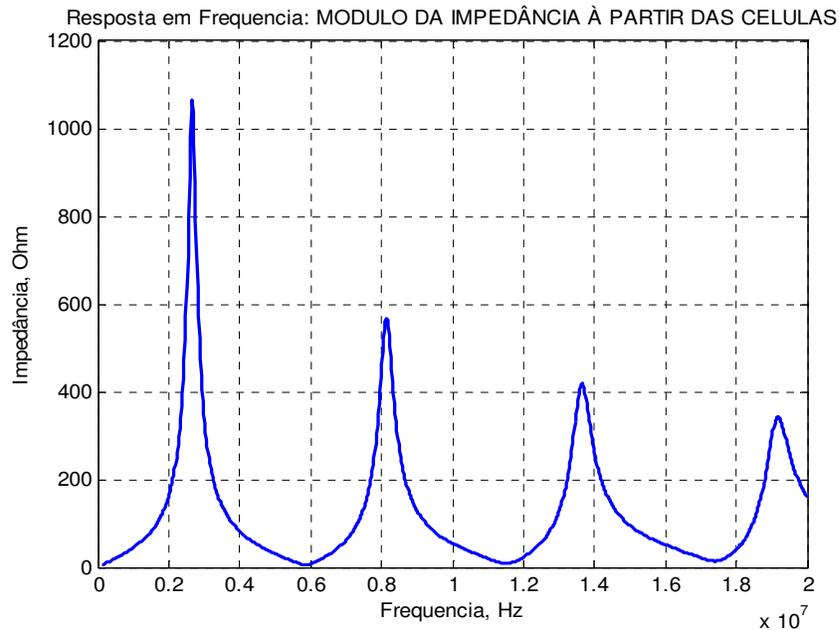


Figura 8.13. Resposta em frequência do módulo da impedância calculada (caso 2).

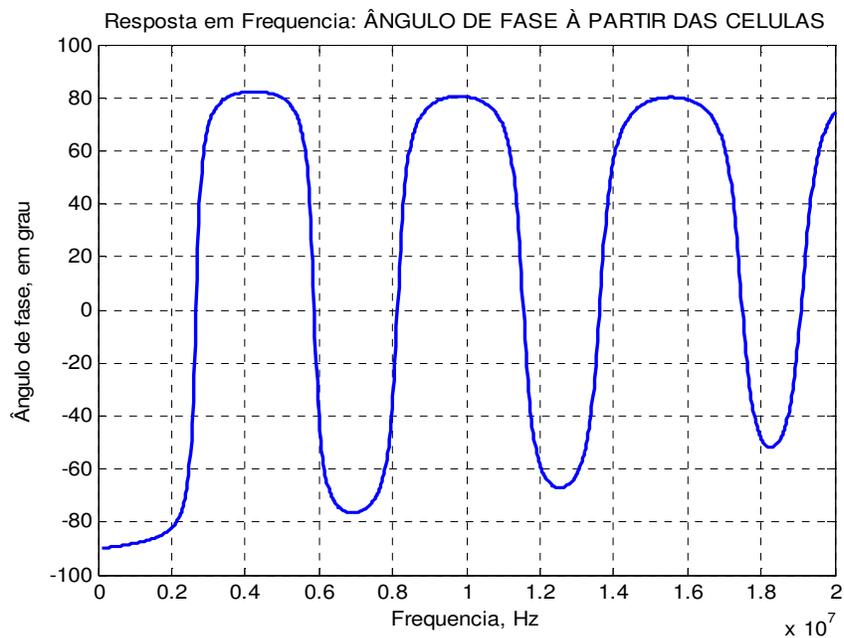


Figura 8.14. Ângulo de fase calculados (caso 2).

As Figuras 8.15 e 8.16, a seguir, reproduzem a superposição dos gráficos das impedâncias e ângulos de fase obtidos através do ensaio de resposta em frequência da impedância e dos calculados com o modelo proposto. Observa-se que os resultados do ensaio e do modelo são muito próximos.

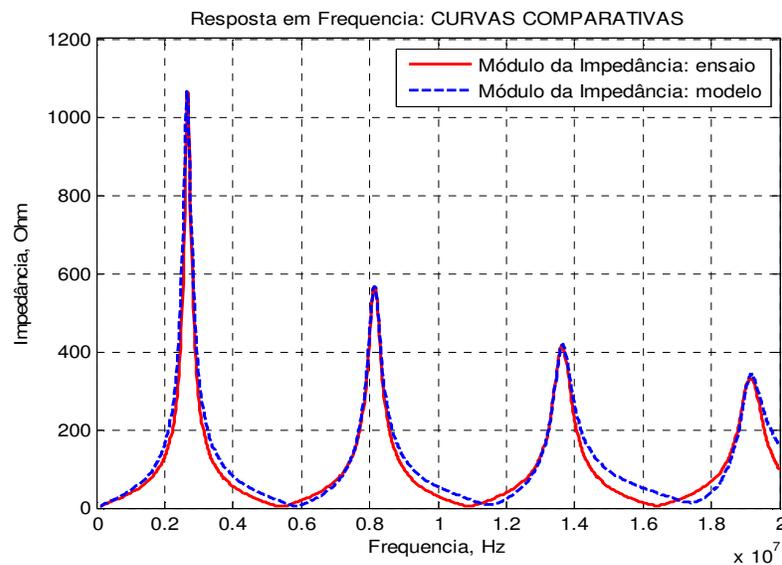


Figura 8.15. Comparação da resposta em frequência: módulos das impedâncias (caso 2).

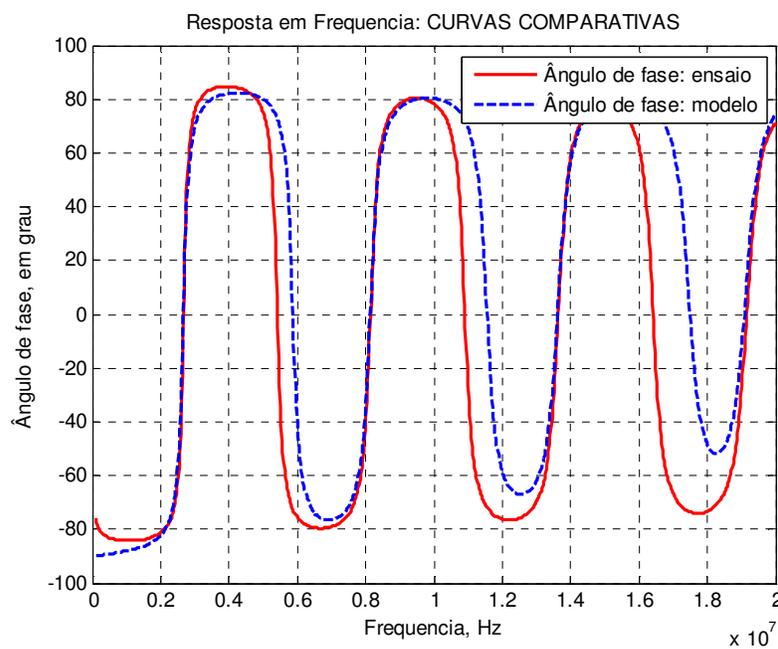


Figura 8.16. Comparação da resposta em frequência: ângulos de fase (caso 2).

Nestas simulações foram determinados, também, os valores de R, L e C para cada célula, conforme mostra a tabela 8.2, a seguir.

Tabela 8.2. Valores de R, L e C para cada célula (caso 2).

Células	R (Ω)	L (H)	C (F)	f (Hz)
1	$1,0632 \times 10^3$	$5,3452 \times 10^{-6}$	$668,6765 \times 10^{-12}$	$2,6621 \times 10^6$
2	563,9382	$506,0937 \times 10^{-9}$	$756,3700 \times 10^{-12}$	$8,1346 \times 10^6$
3	414,5935	$185,4837 \times 10^{-9}$	$734,8781 \times 10^{-12}$	$13,6320 \times 10^6$
4	333,1561	$93,7136 \times 10^{-9}$	$738,6453 \times 10^{-12}$	$19,1294 \times 10^6$

8.1.3- CASO 3:

Neste estudo foram utilizados os resultados obtidos nos testes realizados no mês de outubro de 2008, no enrolamento Y1-Y2 (13,8 kV) do autotransformador mencionado.

Os gráficos das impedâncias e ângulos de fase obtidos no ensaio de resposta em frequência da impedância, realizado em campo, são reproduzidos nas Figuras 8.17 e 8.18.

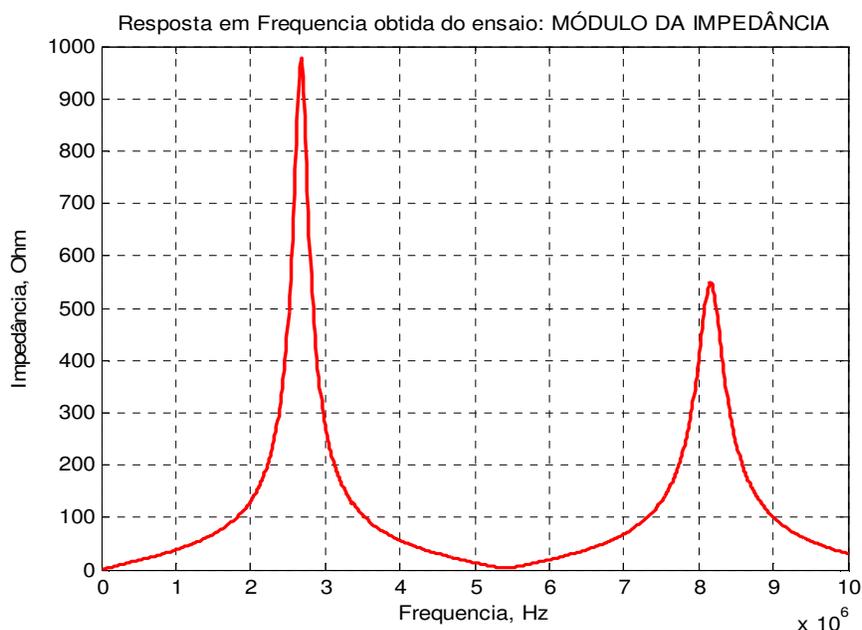


Figura 8.17. Resposta em frequência do módulo da impedância (caso 3).

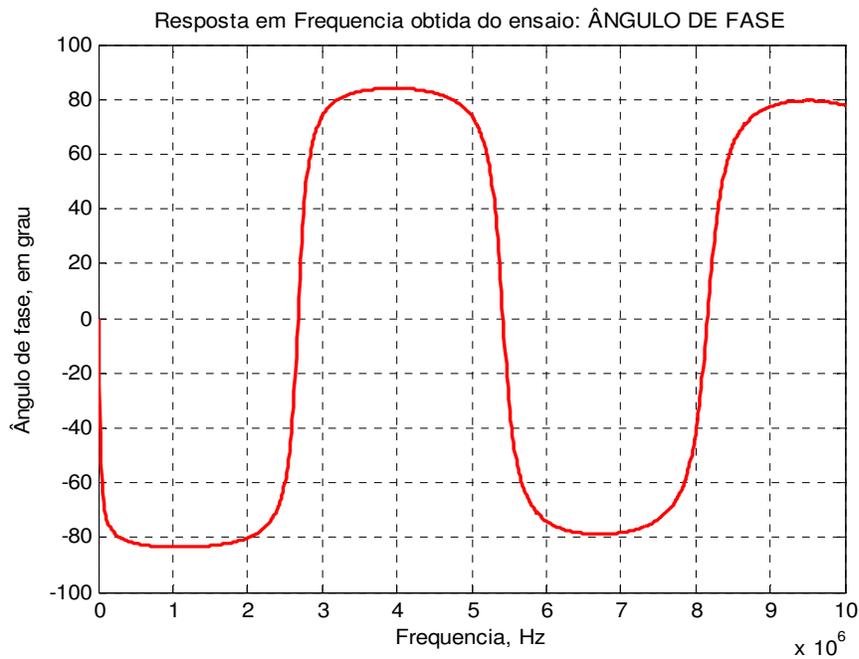


Figura 8.18. Resposta em frequência: ângulo de fase (caso 3).

As Figuras 8.19 e 8.20 apresentam as influências da impedância em cada célula e respectivos ângulos de fase, obtidas através do modelo proposto. Observa-se que neste caso existem duas frequências de ressonância a serem consideradas, portanto, duas células RLC.

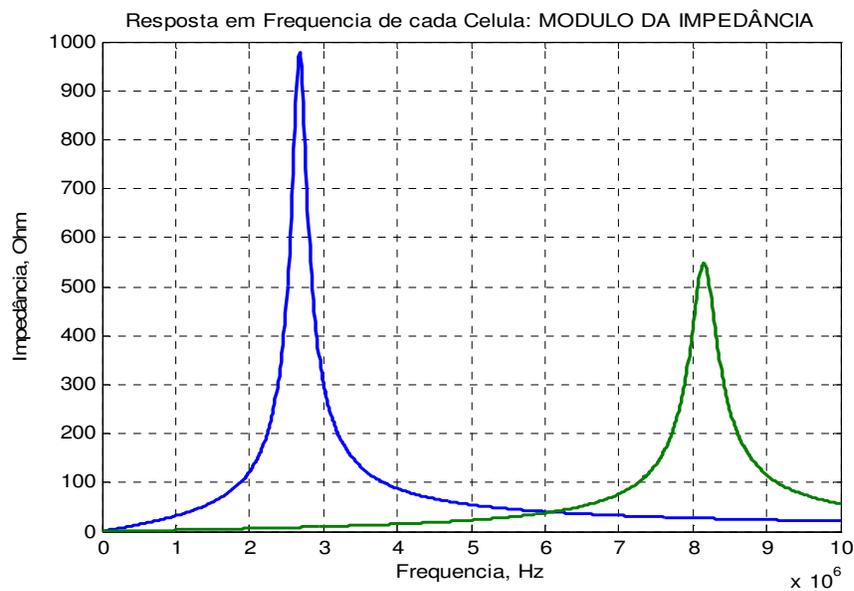


Figura 8.19. Resposta em frequência do módulo da impedância de cada célula (caso 3).

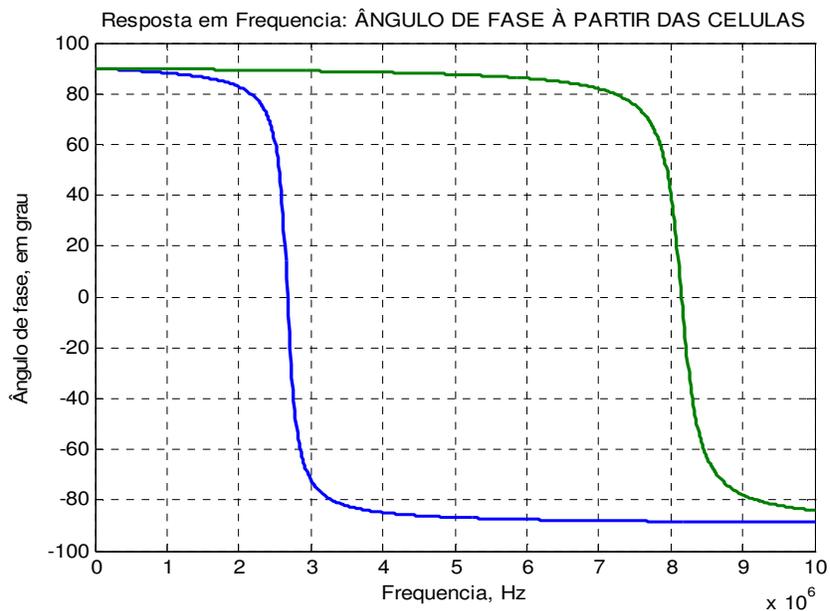


Figura 8.20. Ângulos de fase a partir das células identificadas (caso 3).

Identificadas as células existentes, o programa computacional apresenta o comportamento das respectivas impedâncias e ângulos de fase, reproduzidos nos gráficos das Figuras 8.21 e 8.22.

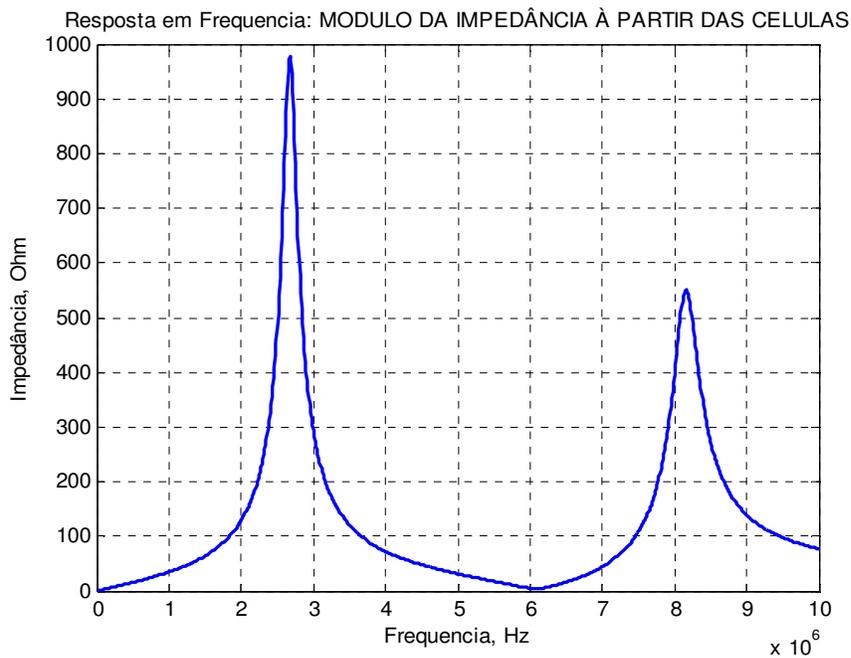


Figura 8.21. Resposta em frequência do módulo da impedância calculada (caso 3).

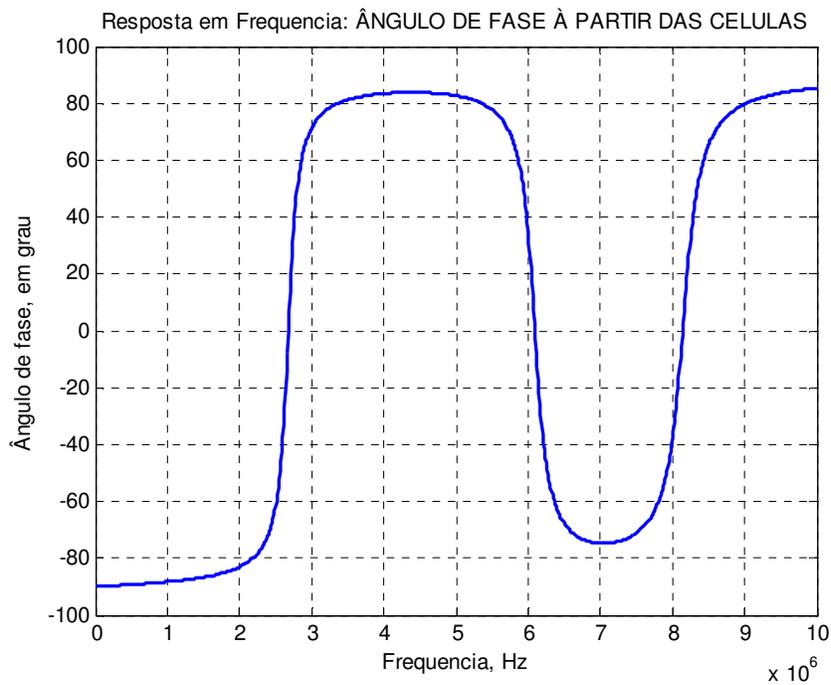


Figura 8.22. Ângulo de fase calculado (caso 3).

A superposição dos gráficos das impedâncias e ângulos de fase obtidos através do ensaio de resposta em frequência da impedância e dos calculados a partir do modelo proposto é mostrada nas Figuras 8.23 e 8.24.

Observa-se que a diferença entre os resultados obtidos através do ensaio de resposta em frequência da impedância e do modelo proposto são próximos, semelhante aos casos apresentados anteriormente.

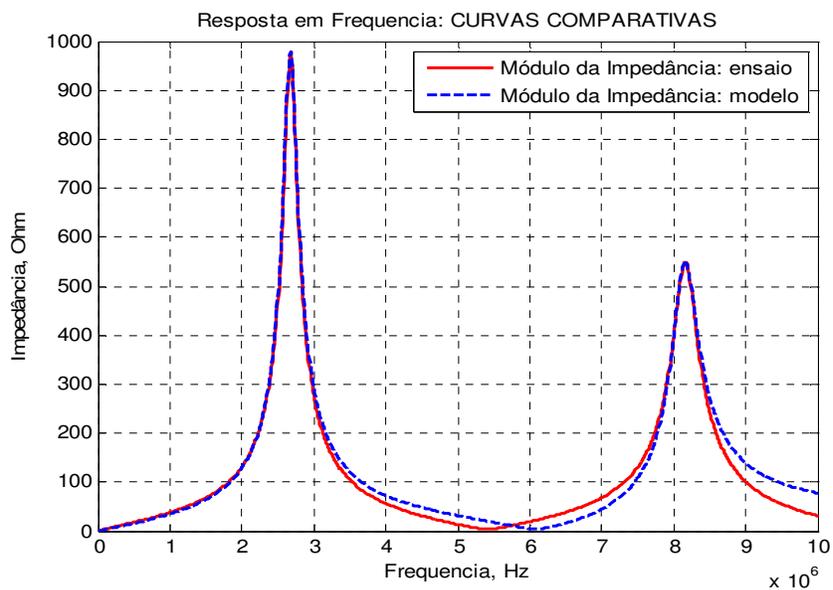


Figura 8.23. Comparação da resposta em frequência: módulos das impedâncias (caso 3).

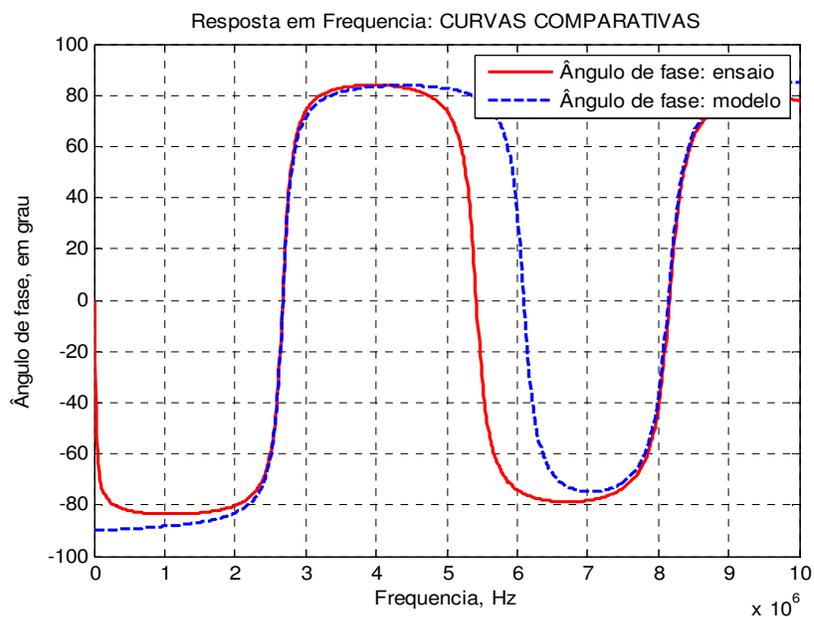


Figura 8.24. Comparação da resposta em frequência: ângulos de fase (caso 3).

Resultantes destas simulações, a tabela 8.3, a seguir apresenta os valores de R, L e C para cada célula do modelo proposto.

Tabela 8.3. Valores de R, L e C para cada célula (caso 3).

Células	R (Ω)	L (H)	C (F)	f (Hz)
1	977,7778	$4,3495 \times 10^{-6}$	$813,8646 \times 10^{-12}$	$2,6750 \times 10^6$
2	548,0343	$459,5990 \times 10^{-9}$	$829,7468 \times 10^{-12}$	$8,1500 \times 10^6$

8.2- RESULTADOS OBTIDOS:

Comparando as simulações dos dados reais do teste de resposta em frequência da impedância, nos casos estudados, com a aplicação do modelo proposto, observa-se que os resultados dos ensaios e dos valores calculados pelo modelo são muito próximos, quando se considera as curvas de magnitude da impedância. Entretanto, pode-se observar que com relação aos ângulos de fases ocorre uma divergência mais significativa. Esta divergência pode ser explicada se for considerado o efeito residual entre as células, conforme anteriormente comentado.

A aplicabilidade do modelo proposto, ao mesmo tempo em que estimula o prosseguimento dos trabalhos no sentido de desenvolver e aperfeiçoar o programa computacional desenvolvido, também instiga a aplicação do modelo proposto em outros tipos de ensaios como o de impulso de tensão aplicada, por exemplo, cuja forma de onda é normalizada e de fácil tratamento no domínio da frequência complexa.

9 CONCLUSÕES

A partir do reconhecimento de um padrão muito semelhante ao comportamento da resposta em frequência da impedância de um circuito RLC paralelo, foi proposto um modelo elétrico para a impedância do transformador com base em rede de células RLC paralelas passivas que obtivesse uma resposta rápida e confiável, objetivando facilitar a interpretação dos resultados e aplicação deste modelo em programas computacionais que envolvam o comportamento do transformador em situações transientes, nas quais o modelo elétrico clássico não traduz fielmente a realidade da operação do equipamento.

Com dados reais obtidos por meio do teste de resposta em frequência da impedância, o modelo proposto apresentou resultados aproximados com relação às simulações realizadas, podendo ser melhorado. Comparando os dados reais do teste para a impedância, com os resultados obtidos através do modelo proposto, este apresentou valores que apresentam divergência com os valores obtidos a partir dos ensaios. A divergência é mais significativa quando se compara os resultados calculados e medidos com relação ao comportamento do ângulo de fase. Em termos de amplitude, o comportamento é mais coerente, como se pode observar nas figuras apresentadas.

O método proposto deve ser aperfeiçoado a fim de que possa ser reduzido o efeito residual entre as células. Uma forma de abordar esta questão seria a de que o programa computacional passe a executar rotinas iterativas, buscando ajustar os valores de R, L e C de cada célula, até que uma diferença percentual (entre 1 e 5%, por exemplo) pré definida fosse atingida. Não há dúvidas de que este procedimento incrementa o tempo de processamento computacional.

Contudo, identifica-se que há necessidade de mais investimento na programação da ferramenta computacional desenvolvida.

Neste trabalho foi desenvolvido um método de células passivas que constituem um modelo elétrico para o transformador. Trata-se de um método simplificado, entretanto de rápida e fácil implementação. Outros métodos de síntese de redes podem ser empregados, talvez com resultados mais próximos dos valores reais, mas este trabalho pode ser rotulado como o início de um campo de investigação no mínimo interessante.

9.1- PROPOSTA PARA FUTURAS PESQUISAS

A proposta deste trabalho foi desenvolver um modelo elétrico da impedância do transformador baseado em um conjunto de células com a topologia de elementos passivos R, L e C conectados em paralelo.

Os parâmetros investigados, bem como os resultados obtidos pelo modelo proposto, neste trabalho relatados podem servir de base para outras investigações, tal como, relacionar ou determinar os parâmetros do modelo clássico do transformador a partir dos dados do ensaio de resposta em frequência da impedância do mesmo. Note-se que talvez o ensaio de resposta em frequência não seja adequado à determinação destes parâmetros, uma vez que neste teste o transformador encontra-se em estado de sub-excitação, bem aquém das condições operacionais de fluxo magnético e saturação magnética.

Na continuidade e melhoria do programa computacional, não menos importante é intensificar a atenção quanto a ocorrência de frequências e resistências elétricas de meia potência relativas à frequências de ressonância adjacentes já que foi possível observa que método proposto diverge do obtido através de ensaio.

Também é importante verificar o potencial e a aplicabilidade deste modelo proposto no intuito de verificar previamente o comportamento da corrente esperada quando o transformador for submetido a um ensaio de tensão impulsiva, bem como analisar o comportamento do transformador para ondas com um importante conteúdo de harmônicas.

E, por fim, a mais complexa, vincular alterações geométricas na parte ativa do dispositivo às alterações que possam ser observadas no ensaio de resposta em frequência da impedância do transformador.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 18 jul. 2009.

ARAÚJO, Igor; SANTOS, Crisluci Karina Souza. **Manutenção elétrica industrial**. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Elétrica. Manutenção Elétrica Industrial, 2008. Disponível em: <<http://www.dee.ufrn.br>>. Acesso em: 17 jul. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR-5356**: transformador de potência: especificação. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR-5380**: transformador de potência: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR-10295**: transformadores de potência secos: especificação. Rio de Janeiro, 1993.

BECHARA R.; BRANDÃO JR., A. F. Análise de falhas em transformadores de potência e seus mecanismos de ocorrência. In: ENCUESTRO REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ (ERAC), 13., 2009, Puerto Iguazú, Argentina. **Anais...** Puerto Iguazú: Cigré, 2009.

BIRLASEKARAN, S.; FETHERSON, F. Off/On-line FRA condition monitoring technique for power transformers. **IEEE Power Engineering Review**, [S. l.], v. 19, n. 8, p. 54-56, Aug. 1999.

COFFEEN, L.; SWEETSER, C. Different aspects of frequency response analysis (FRA). In: IEEE/PES TRANSFORMERS COMMITTEE MEETING, 2002, Vancouver. **Proceedings...** Vancouver: IEEE, 2002.

DEMARTINI, Flávia Bianco. **FRA**: análise de resposta em frequência de transformador de força. 2007. 106 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

DICK, E. P.; ERVEN, C. C. Transformer diagnostic testing by frequency response analysis. **IEEE Transactions On Power Apparatus and Systems**, Toronto, v. 97, n. 6, p. 2144-2153, 1978.

GARCIA, Andrés Taberero. Mantenimiento de los transformadores de potencia. Ensayos de campo. **Revista Mantenimiento**, [S. l.], n. 184, p. 1-20, mayo, 2005.

IRWIN, J. David. **Análise de circuitos em engenharia**. 4. ed. São Paulo: Makron Books do Brasil, 2000. p. 593-594.

MAMEDE, J. **Manual de equipamentos elétricos**. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

MARTINS, H. Métodos disponíveis. In: _____. **Diagnóstico de transformadores de potência através de metodologias no domínio da frequência.** Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2007. p. 14-27.

MARTINS, H. Simulações de defeitos. In: _____. **Diagnóstico de transformadores de potência através de metodologias no domínio da frequência.** Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2007. p. 52-73.

MARTINS, H. et al. **Avaliação de transformadores de potência utilizando a técnica de resposta em frequência.** Rio de Janeiro: CEPEL – Centro de pesquisas de Energia Elétrica. DIE/Labdig – Laboratório de Diagnóstico em Equipamentos Elétricos. 2006.

MARTINS, H. et al. Diagnóstico integrado de transformadores de potência: aplicação. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 15., 1999, Foz do Iguaçu. **Proceedings...** Foz do Iguaçu, 1999.

MATHWORKS. **Matlab for Windows, version 6:** tutorial of optimization toolbox, version 1.2. [S.l.]: The MathWorks Inc., 2001. Conjunto de programas. 1 CD-ROM.

McGRAIL, T. **Transformer frequency response analysis:** an introduction. [S. l.]: Neta World, 2005. Disponível em: <<http://www.netaworld.org>>. Acesso em: 14 jul. 2009.

MORAIS, R. M. N. de. **Estudo do envelhecimento térmico do papel isolante elétrico.** 1990. 152 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Instituto de Macromoléculas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990.

NUNES, A. P. et al. Aplicações de análise de resposta em frequência e impedância terminal para diagnóstico de transformadores. In: ENCUESTRO REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ (ERAC), 13., 2009, Puerto Iguazú, Argentina. **Anais...** Puerto Iguazú: Cigré, 2009.

PLEITE, J. et al. Modeling the transformer frequency response to develop advanced maintenance techniques. In: POWER SYSTEMS COMPUTATION CONFERENCE (PSCC'02), 2002, Sevilla, España. **Proceedings...** [S. l.], 2002.

TENBOHLEN, S.; RYDER, S. A. Making frequency response analysis measurements: a comparison of the swept frequency and low voltage impulse methods. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING, 13., 2003, Rotterdam, Netherlands. **Anais...** Rotterdam: Millpress, 2003.

VAESSEN, P. T. M.; HANIQUE, E. A new frequency response analysis method for power transformers. **IEEE Transactions on Power Delivery.** [S. l.], v. 7, n. 1, p. 384-391, Jan. 1992.

WEG – MOTORES, ENERGIA, AUTOMAÇÃO. Disponível em: <<http://www.weg.net>>. Acesso em: 14 jul. 2009.

ANEXO I

Placa de dados do Transformador referido no Capítulo 5



TRAFO

TRAFO EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S/A

CNPJ.: 90.286.105/0001-41

RS 020, km 6,5 - GRAVATAI - RS - BRASIL

TRANSFORMADOR

ANO: 2007 Nº: KA3002 A002 TIPO: TUC 30-40-50M / 72,5 / 24,2 R 15 NORMA: NBR-5356/93

FREQÜÊNCIA: 60 Hz Nº DE FASES: 3 LIMITE DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA DOS ENROLAMENTOS E ÓLEO: 66 POLARIDADE: SUBTRATIVA

POTÊNCIA CONTÍNUA: 30000 kVA RESFRIAMENTO: ONAN ONAF I ONAF II

CORRENTE DE EXCIT. BASE: 30000 kVA 0,16 %

COMUTADOR SOB CARGA FABRICANTE: MR TIPO: VV11 600 Y 40KV 10193W Nº DE POSIÇÕES: 17 ACIONAMENTO: ED Nº DE SÉRIE: 1033085

PEÇA MAIS PESADA PARA RETIRADA DA PARTE ATIVA DO TANQUE

ALTURA PARA IÇAMENTO DA PARTE ATIVA: 6700 mm

TIPO DO PAPEL: KRAFT PRESSPHAN MASSA DO PAPEL: 1620 kg

ALTA TENSÃO						
LINHAS: H1 - H2 - H3 NEUTRO: H0						
POS.	O LIGA	A LIGA	TENSÃO (VOLTS)	30,0 MVA	40,0 MVA	50,0 MVA
1	1	1	79352	218,3	291,0	363,8
2	2	2	78058	221,9	295,9	369,8
3	3	3	76764	225,6	300,8	376,1
4	4	4	75470	229,5	306,0	382,5
5	5	5	74176	233,5	311,3	389,2
6	6	6	72882	237,7	316,9	396,1
7	7	7	71588	241,9	322,6	403,2
8	8	8	70294	246,4	328,5	410,7
9a	9	9				
9b	K	69000	251,0	334,7	418,4	
10	2	67706	255,8	341,1	426,4	
11	3	66412	260,6	347,7	434,7	
12	4	65118	266,0	354,6	443,3	
13	5	63824	271,4	361,8	452,3	
14	6	62530	277,0	369,3	461,7	
15	7	61236	282,8	377,1	471,4	
16	8	59942	289,0	385,3	481,6	
17	9	58648	295,3	393,8	492,2	

BAIXA TENSÃO				
LINHAS: X1 - X2 - X3 NEUTRO: X0				
PAINEL LIGA	VOLTS	30MVA	40MVA	50MVA
14-17 / 15-18 / 16-19	23000	753,1	1004,1	1255,1
11-17 / 12-18 / 13-19	13800	1255,1	1673,5	2091,8
14-20 / 15-21 / 16-22				

CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO ADMISSÍVEIS			
SIM. 2 seg.	kAef.	ASSIM. 2 seg.	kAcr.
BT-13,8 kV	18,85	BT-13,8 kV	48,89
BT-23,0 kV	12,17	BT-23,0 kV	31,41
AT-38,648 kV	4,77	AT-38,648 kV	12,32

TC1 A TC3	
RELAÇÃO	LINHAS
600 - 5A	S1 - S5
500 - 5A	S2 - S5
450 - 5A	S3 - S5
400 - 5A	S1 - S4
300 - 5A	S2 - S4
250 - 5A	S3 - S4
200 - 5A	S4 - S5
150 - 5A	S1 - S3
100 - 5A	S1 - S2
50 - 5A	S2 - S3
CLASSE: 10B400	
USO: PROTEÇÃO	
FATOR TÉRMICO: 1,2	

TC4 A TC6	
RELAÇÃO	LINHAS
3000 - 5A	S1 - S5
2500 - 5A	S1 - S4
2200 - 5A	S1 - S3
2000 - 5A	S2 - S5
1500 - 5A	S2 - S4
1200 - 5A	S2 - S3
1000 - 5A	S1 - S2
800 - 5A	S3 - S5
500 - 5A	S4 - S5
300 - 5A	S3 - S4
CLASSE: 10B400	
USO: PROTEÇÃO	
FATOR TÉRMICO: 1,2	

TC7	
RELAÇÃO	LINHAS
2095 - 5A	S1 - S3
1260 - 5A	S1 - S2
CLASSE: 1,2C12,5	
USO: COMUTADOR	
FATOR TÉRMICO: 1,2	

TC12	
RELAÇÃO	LINHAS
2095 - 5A	S1 - S3
1260 - 5A	S1 - S2
CLASSE: 3C25	
USO: I.TÉRMICA	
FATOR TÉRMICO: 1,2	

TC11	
RELAÇÃO	LINHAS
495 - 5A	S1 - S2
CLASSE: 3C25	
USO: I. TÉRMICA	
FATOR TÉRMICO: 1,2	

Nº DE MANUTENÇÃO: 21335060

30000 kg

RELAÇÃO DE TENSÕES (KV)	
69 +8	x 1,875% — 23R13,8
-8	

TANQUE, TAMPA, RADIADORES E CONSERVADOR SUPORTAM SOBREPRESSÃO DE 0,5 kg/cm² E VÁCUO PLENO.

VOLUME DE ÓLEO (l)	
TANQUE COM PARTE ATIVA	10500
TOTAL	16500

TIPO DO ÓLEO: NAFTÊMICO

IMPEDÂNCIA A 75°C 60HZ			
BASE (KVA)	TENSÃO (V)	SEQ. POS. SEQ. ZERO	
		%	%
30000	69000 / 23000	6,16	5,38
	69000 / 13800	6,61	5,72

NÍVEIS DE ISOLAMENTO - TENSÕES SUPORTÁVEIS -					
FREQ. INDUSTRIAL (1min.)	kVef	AT	NAT	BT/NBT	TERCIÁRIO
30000	140	70	50	34	
IMPULSO ATMOSFÉRICO	kVcr	350	200	150	110
TENSÃO MAX. DO EQUIPAM.	kVef	72,5	36,2	24,2	15

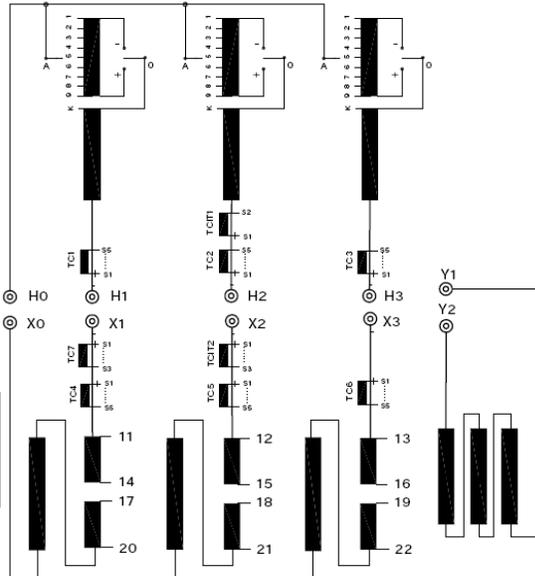
NÍVEIS DE ISOLAM. DAS BUCHAS - TENSÕES SUPORTÁVEIS -					
FREQ. INDUSTRIAL (1min.)	kVef	AT	NAT	BT/NBT	TERCIÁRIO
30000	140	70	50	34	
IMPULSO ATMOSFÉRICO	kVcr	350	200	150	110
TENSÃO MAX. DO EQUIPAM.	kVef	72,5	36,2	24,2	15

MASSA	PARTE ATIVA	TO. ACESSÓRIOS	LÍQUIDO ISOL.	TOTAL
kg	30000	17100	13800	60900

CONTRATO: CEEE/AD/DAG/DAC/Nº 9931057

MANUAL DE INSTRUÇÕES
KA3002

ENROLAMENTO TERCIÁRIO (Y1-Y2) SOMENTE PARA COMPENSAÇÃO DE HARMÔNICOS. DURANTE O FUNCIONAMENTO DEVERÁ CONECTAR-SE Y1 COM Y2 E ATERRAR. 10000/13333/16666 KVA 4600 V



GRADIENTES DE TEMPERATURA (°C)	
AT/ÓLEO (50 MVA)	6,60
BT/ÓLEO (50 MVA)	9,04

DIMENSÕES PARA TRANSPORTE			
ALTURA	COMPRIMENTO	LARGURA	
mm	3900	5500	2100
MASSA SEM ÓLEO P/ TRANSPORTE: 39400 kg			

- INDÚSTRIA BRASILEIRA -

2GV5-3259/00 RE

MATERIAL: AÇO INOX POLIDO AISI 304 ESPESSURA: 0,8mm
GRAVAÇÃO: EM BAIXO RELEVO
OS [] SERÃO PREENCHIDOS APÓS A REALIZAÇÃO DOS TESTES
DIMENSÕES EM mm

Nº SÉRIE	APLICAÇÃO	Nº MANUTENÇÃO
A001	SE PAL3	213350604
A002	SE PAL7	213350605
A003	SE PAL7	213350606
A004	SE PAL 17	213350607

KA3002 A002			
ELABORADO	CONTROLADO	VISTO	TRAFO
DATA: 11/01/08	07/02/07	07/02/07	
NOME: MARCIO	RAFAEL	JORGE	DESCRIÇÃO DA REVISÃO
REV / E: MARCIO	RAFAEL	DATA: 25/02/08	REVISADO DADOS GRAVADOS
ESCALA: 1:1	TR3ª CDC YNyd1 69-23/13,8 kV 30/40/50MVA	TRAFO TUC 30-40-50M / 72,5 / 24,2R15	PLACA DE IDENTIFICAÇÃO
			2GV5-3259/00

ANEXO II

Programa computacional desenvolvido

```

%PROGRAMA "CELULAS.M" CALCULA A RESPOSTA EM FREQUENCIA DA IMPEDANCIA A
%PARTIR DE DADOS DE ENSAIO CONTIDOS NOS ARQUIVOS IMP, IMP2 E IMP3.
clear all
close all
clc
clf
format short eng
%CARREGA O ARQUIVO DE DADOS

%      load imp
%      imp=imp;

%      load imp2
%      imp=imp2;

      load imp3
      imp=imp3;

%
%CONVERTE AS GRANDEZAS DAS COLUNAS 1 E 4 DO ARQUIVO "imp" PARA w E modZ
w=imp(:,1)*2*pi;
modZ=imp(:,4);

%CALCULA OS MAXIMOS E MINIMOS E AS RESPECTIVAS POSIÇÕES
N=length(w);
p=1;
D=0;
for k=1:N-1
    if D==0
        if modZ(k)>modZ(k+1)
            D=1;
            Zmax(p)=modZ(k);
            Wmax(p)=w(k);
            pmax(p)=k;
            p=p+1;
        end
    end
    if D==1
        if modZ(k)<modZ(k+1)
            Zmin=modZ(k);
            pmin(p)=k;
            D=0;
        end
    end
end
pmin(length(pmin)+1)=length(modZ);

% Zmax
% Wmax
% pmax
% pmin

%ENCONTRA OS VALORES PROXIMOS DE 70% A ESQUERDA E A DIREITA DE CADA VALOR
%MAXIMO, APRESENTANDO AS RESPECTIVAS FREQUENCIAS DE MEIA POTENCIA E
%POSIÇÕES

for p=1:length(Zmax);
    D=0;
    for k=pmax(p):-1:pmin(p)+1;
        if D==0

```

```

        if modZ(k) <= Zmax(p) / (2^0.5)
            D=1;
            Zmpi(p)=modZ(k);
            Wmpi(p)=w(k);
            pmpi(p)=k;
        end
    end
end
for k=pmax(p):1:pmin(p+1);
    if D==1
        if modZ(k) <= Zmax(p) / (2^0.5)
            D=0;
            Zmps(p)=modZ(k);
            Wmps(p)=w(k);
            pmps(p)=k;
        end
    end
end
end

% Zmpi
% Wmpi
% pmpi
% Zmps
% Wmps
% pmps

%PLOTA A RESPOSTA EM FREQUENCIA À PARTIR DOS DADOS DE ENSAIO
figure(1)
%loglog(w,modZ,'b',Wmpi,Zmpi,'*c',Wmps,Zmps,'*g',Wmax,Zmax,'*r')
%plot(w/2/pi,modZ,'b.',Wmpi/2/pi,Zmpi,'*c',Wmps/2/pi,Zmps,'*g',Wmax/2/pi,Zmax,'*r')
plot(w/2/pi,modZ,'r','LineWidth',2)

title('Resposta em Frequencia obtida do ensaio: MÓDULO DA IMPEDÂNCIA')
xlabel('Frequencia, Hz')
ylabel('Impedância, Ohm')
set(gcf,'color',[1 1 1]);
grid on

figure(11)
%loglog(w,modZ,'b',Wmpi,Zmpi,'*c',Wmps,Zmps,'*g',Wmax,Zmax,'*r')
%plot(w/2/pi,modZ,'b.',Wmpi/2/pi,Zmpi,'*c',Wmps/2/pi,Zmps,'*g',Wmax/2/pi,Zmax,'*r')
plot(w/2/pi,-atan(imp(:,3)./imp(:,2))*180/pi,'r','LineWidth',2)
title('Resposta em Frequencia obtida do ensaio: ÂNGULO DE FASE');
xlabel('Frequencia, Hz')
ylabel('Ângulo de fase, em grau')
set(gcf,'color',[1 1 1]);
grid on

%CALCULOS
%DETERMINACAO DA RESISTENCIA
R=Zmax;
%DETERMINACAO DAS FREQUENCIAS DE RESSONANCIA
Wo=Wmax;
%DETERMINACAO DAS IMPEDÂNCIAS DE MEIA POTENCIA
Zmp=[Zmpi;Zmps];
%DETERMINACAO DAS FREQUENCIAS DE MEIA POTENCIA

```

```

    Wmp=[Wmpi;Wmps];
%DETERMINACAO DAS LARGURAS DE FAIXA
    B=[Wmps-Wmpi];
%DETERMINACAO DOS FATORES DE QUALIDADE
    Q=Wo./B;
%DETERMINACAO DAS INDUTANCIAS
    L=R./(Wo.*Q);
%DETERMINACAO DAS CAPACITANCIAS
    C=Q./(Wo.*R);

%RESULTADOS PROVISORIOS
    RLCprovisorio=[R;L;C];
%   L
%   C
%   RLCprovisorio

%ELIMINA RESULTADOS INCOERENTES
q=0;
for u=1:length(L)
    if L(u)>0
        q=q+1;
        RLC(:,q)=RLCprovisorio(:,u);
        W0(q)=Wmax(u);
    end
end

%plota as respostas e frequencia de cada celula
[linha,coluna]=size(RLC);
for c=1:coluna
    Celula(c)=c;
    for F=1:length(w)
        Y(F,c)=1./RLC(1,c)+1./(i*w(F)*RLC(2,c))+i*w(F)*RLC(3,c);
    end
end
('R em Ohm, L em Henry e C em Farad')

    RLC
('W0 em rad/s e f0 em Hz')

    W0
    f0=W0/(2*pi);
    f0

figure(2)
%set(0,'DefaultAxesColorOrder',[1 0 0;0 1 0;0 0 1],...
%      'DefaultAxesLineStyleOrder','-o|-s|-*')

plot(w/2/pi,abs(1./Y),'r','LineWidth',2)
title('Resposta em Frequencia de cada Celula: MODULO DA IMPEDÂNCIA')
xlabel('Frequencia, Hz')
ylabel('Impedância, Ohm')
set(gcf,'color',[1 1 1]);
grid on

figure(22)
plot(w/2/pi,angle(1./Y)*180/pi,'LineWidth',2)
title('Resposta em Frequencia: ÂNGULO DE FASE À PARTIR DAS CELULAS')
xlabel('Frequencia, Hz')

```

```

ylabel('Ângulo de fase, em grau')
set(gcf,'color',[1 1 1]);
grid on

Zt=sum(1./Y');
figure(3)
plot(w/2/pi,abs(Zt),'LineWidth',2)
title('Resposta em Frequencia: MODULO DA IMPEDÂNCIA À PARTIR DAS CELULAS')
xlabel('Frequencia, Hz')
ylabel('Impedância, Ohm')
set(gcf,'color',[1 1 1]);
grid on

figure(33)
plot(w/2/pi,angle(Zt)*180/pi,'LineWidth',2)
title('Resposta em Frequencia: ÂNGULO DE FASE À PARTIR DAS CELULAS')
xlabel('Frequencia, Hz')
ylabel('Ângulo de fase, em grau')
set(gcf,'color',[1 1 1]);
grid on

figure(4)
plot(w/2/pi,modZ,'r',w/2/pi,abs(Zt),'b--','LineWidth',2)
title('Resposta em Frequencia: CURVAS COMPARATIVAS')
xlabel('Frequencia, Hz')
ylabel('Impedância, Ohm')
legend('Módulo da Impedância: ensaio','Módulo da Impedância: modelo',1)
set(gcf,'color',[1 1 1]);
grid on

figure(44)
plot(w/2/pi,-
atan(imp(:,3)./imp(:,2))*180/pi,'r',w/2/pi,angle(Zt)*180/pi,'b--',
'LineWidth',2)
title('Resposta em Frequencia: CURVAS COMPARATIVAS')
xlabel('Frequencia, Hz')
ylabel('Ângulo de fase, em grau')
legend('Ângulo de fase: ensaio','Ângulo de fase: modelo',1)
set(gcf,'color',[1 1 1]);
grid on

```