



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

FELIPE NASCIMENTO GOMES



Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DO FENÔMENO DE FERRORESSONÂNCIA EM
TRANSFORMADORES



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
Outubro de 2016

FELIPE NASCIMENTO GOMES

ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DO FENÔMENO DE FERRORESSONÂNCIA EM
TRANSFORMADORES

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande como
parte dos requisitos necessários para a obtenção
do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Orientador

Professor Francisco das Chagas Fernandes Guerra, D.Sc.

Campina Grande, Paraíba
Outubro de 2016

FELIPE NASCIMENTO GOMES

ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DO FENÔMENO DE FERRORESSONÂNCIA EM
TRANSFORMADORES

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande como
parte dos requisitos necessários para a obtenção
do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Aprovado em / /

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Francisco das Chagas Fernandes Guerra, D.Sc.

Universidade Federal de Campina Grande
Orientador

Dedico este trabalho aos meus pais e meus irmãos. Em especial ao meu irmão que não está mais entre nós para testemunhar essa vitória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus por ter me dado saúde e forças para chegar até esta etapa da minha vida.

Aos meus pais, Ivan e Rosely, tenho meus eternos agradecimentos pela dedicação e carinho que sempre tiveram na minha educação.

Aos meus irmãos, Ivan Neto e Helder, que sempre estiveram ao meu lado. Em especial ao meu irmão Ivan Neto que antes de falecer me falou para não desistir da graduação em Engenharia Elétrica.

Aos meus amigos que encontrei nesta caminhada e me ajudaram a continuar e abstrair os problemas.

Ao meu orientador, Francisco das Chagas, agradeço pela dedicação do seu tempo e atenção ao me orientar neste TCC.

“Seja bendito o nome de Deus de eternidade a eternidade, porque dele é a sabedoria e a
força”.
Daniel. 2: 20

RESUMO

A ferroressonância é um evento transitório eletromagnético de caráter não linear e sustentado e que pode ser responsável pelo aparecimento de altos valores de tensões e correntes em equipamentos do sistema elétrico. As características magnéticas do núcleo do transformador dão o caráter não linear ao fenômeno e também, devido a estas características, podem surgir diversas respostas em regime permanente ou transitória para vários valores dos parâmetros do sistema. Este trabalho se propôs a desenvolver um estudo que mostrasse como este fenômeno poderia surgir. Puderam ser analisados os comportamentos dos transformadores quando se tinha uma configuração série entre capacitores e indutores no sistema. A ferramenta de simulação utilizada para a análise foi o *Simscape*, que é uma ferramenta do Matlab, e para poder validar os resultados encontrados foi realizado um ensaio do transformador monofásico em laboratório. Pela análise dos resultados encontrados devido a variação dos parâmetros do circuito e do tipo de manobra realizada no primário do transformador trifásico, foi possível observar a influência destes sobre o aparecimento da ferroressonância no transformador.

Palavras-chave: Ferroressonância. Transformador monofásico. Transformador trifásico. Simulações. Ensaio. *Simscape*.

ABSTRACT

Ferroresonance is an electromagnetic transient event of non-linear and sustained character that may be responsible for the appearance of high values of voltage and current in power system equipment. The transformer core magnetic characteristics give the non-linear character to the phenomenon and, due to those features, there may be various responses in steady or transient state for different system parameters. This paper aimed to develop a study to show how this phenomenon may arise. The behavior of transformers was analyzed when there was a series configuration between capacitors and inductors in the system. The simulation tool used for the analysis was Simscape, which is a Matlab tool, and in order to validate the results, a laboratory test with a single-phase transformer was performed. According to the analysis of the results found, the appearance of ferroresonance in the transformer was observed through the influence of the variation of the parameters of the circuit and the type of maneuver carried out in the primary winding of the three-phase transformer.

Keywords: Ferroresonance. Single-phase transformer. Three-phase transformer. Simulations. Test. Simscape.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Circuito LC série | 15 |
| Figura 2 – Operação estável de um circuito LC em série não linear | 16 |
| Figura 3 – Representação gráfica para diferentes valores de capacitância | 16 |
| Figura 4 – Representação gráfica para o aumento de U | 17 |
| Figura 5 – Curvas de tensão e corrente..... | 17 |
| Figura 6 – Curva tensão-corrente resultante do circuito LC série | 18 |
| Figura 7 – Modo Fundamental da Ferroressonância | 19 |
| Figura 8 – Modo sub-harmônico da Ferroressonância | 19 |
| Figura 9 – Modo quase periódico da ferroressonância | 20 |
| Figura 10 – Modo caótico da ferroressonância..... | 20 |
| Figura 11 – Situação de ferroressonância causada pelo fechamento monopolar | 21 |
| Figura 12 – Situação de ferroressonância causada por uma abertura monopolar | 21 |
| Figura 13 – Situação de ferroressonância causada por uma operação monopolar..... | 22 |
| Figura 14 – Ferroressonância em um transformador de potencial | 22 |
| Figura 15 – Transformador Monofásico | 25 |
| Figura 16 – Circuito utilizado para levantamento da característica de saturação e curva de histerese | 25 |
| Figura 17 – Curva de histerese | 26 |
| Figura 18 – Montagem realizada em laboratório..... | 27 |
| Figura 19 – Circuito utilizado para analisar a ferroressonância | 27 |
| Figura 20 – Montagem realizada em laboratório..... | 28 |
| Figura 21 – Diagrama do circuito que representa uma combinação LC..... | 29 |
| Figura 22 – Parâmetros da fonte AC | 29 |
| Figura 23 – Parâmetros de C | 30 |
| Figura 24 – Parâmetros do transformador | 30 |
| Figura 25 – Diagrama da simulação da ferroressonância em um Trafo trifásico | 31 |
| Figura 26 – Curva de saturação ($V \times I$) | 34 |
| Figura 27 – Curva de Saturação | 35 |
| Figura 28 – Tensão no primário do transformador monofásico | 36 |
| Figura 29 – Corrente no primário do transformador monofásico | 36 |
| Figura 30 – Oscilograma de Tensão | 37 |
| Figura 31 – Oscilograma de Corrente..... | 37 |
| Figura 32 – Tensão primária da Fase A do transformador trifásico – chaveamento monopolar | 38 |
| Figura 33 – Tensões primárias das Fases A, B e C do transformador trifásico – chaveamento monopolar..... | 39 |
| Figura 34 – Tensão primária da Fase A – chaveamento bipolar..... | 39 |
| Figura 35 – Tensão primária da Fase B – chaveamento bipolar..... | 40 |
| Figura 36 – Tensões nas fases A, B e C - chaveamento bipolar | 40 |
| Figura 37 - Tensão primária da fase A para diferentes comprimentos da linha de distribuição sob operação monopolar..... | 41 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Pontos da curva de saturação do transformador de 75 kVA | 32 |
| Tabela 2 – Levantamento dos dados de $V \times I$ | 33 |
| Tabela 3 – Levantamento dos dados de λ -I | 34 |
| Tabela 4 - Dados da simulação e do ensaio para o regime permanente..... | 38 |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Introdução..... | 12 |
| 2 | Embasamento Teórico | 14 |
| 2.1 | Ferroressonância | 14 |
| 2.2 | Modos da Ferroressonância | 18 |
| 2.3 | Configurações Típicas | 20 |
| 2.3.1 | Transformadores energizados em apenas uma ou duas fases | 21 |
| 2.3.2 | Transformadores energizados através de chaves com capacitância de equalização de tensão (<i>grading capacitor</i>) | 22 |
| 2.4 | Consequências da ferroressonância e soluções para evitá-la | 23 |
| 3 | Material e Métodos..... | 24 |
| 3.1 | Transformador Monofásico..... | 24 |
| 3.2 | Obtenção da Ferroressonância..... | 28 |
| 4 | Resultados e Discussões | 33 |
| 4.1 | Curvas de Saturação..... | 33 |
| 4.2 | Resultados das Simulações | 35 |
| 4.2.1 | Transformador Monofásico | 35 |
| 4.2.2 | Transformador Trifásico | 38 |
| 5 | Conclusão | 42 |
| 6 | Referências Bibliográficas..... | 43 |

1 INTRODUÇÃO

A qualidade de energia elétrica tem sido um assunto de bastante interesse para as concessionárias e consumidores de energia. Para se ter um fornecimento de energia elétrica de qualidade é necessário a monitoração da operação do sistema elétrico, sendo preciso ter estudos constantes e detalhados dos diversos fenômenos elétricos e magnéticos que podem ser encontrados nos equipamentos desse sistema (RIBAS,2012). Os circuitos elétricos a serem considerados são formados por combinações entre resistências, capacitâncias e indutâncias, que possuem suas devidas representações em equipamentos ligados em série ou em derivação.

O fenômeno de ferroressonância ocorre em circuitos que possuem capacitores interagindo com indutâncias não lineares. Este fenômeno, de caráter não linear, causa oscilações com formas de onda não senoidais e que levam os indutores a operar na região de saturação. A ocorrência da ferroressonância é muito prejudicial ao sistema e ela se manifesta em termos de sobretensões e sobrecorrentes sustentadas nas quais se acham presente significativos conteúdos de harmônicos. O uso de cabos subterrâneos, transformadores com indutâncias não lineares em seu núcleo magnético, e inúmeras operações monophasares de chaveamento têm resultado no crescente número de falhas ocorridas devido a este fenômeno (BALDWIN *et al*, 2013).

Nas redes elétricas a ferroressonância surge em transformadores que estejam conectados com elementos de caráter capacitivo, como as linhas aéreas. Devido às características magnéticas do núcleo do transformador, cujo núcleo possui propriedades não lineares, as formas de onda de tensão, de corrente e de fluxo magnético podem se apresentar muito distorcidas. O seu aparecimento acarreta em algumas consequências sérias ao sistema de potência, como falhas na ação dos dispositivos de proteção, danos a pára raios, transformadores e demais equipamentos e um grande aumento das perdas de potência responsáveis pelas dissipações de calor.

Dentro deste contexto, este trabalho tem o objetivo de avaliar a resposta transitória dos transformadores a partir do estudo e simulações do fenômeno de ferroressonância em um transformador. Para tanto, será utilizada uma abordagem de medições dos parâmetros de um transformador monofásico, onde são medidos os seus parâmetros relacionados aos enrolamentos e ao núcleo. A curva de saturação expressa em termos de tensão e corrente

(valores RMS) é levantada experimentalmente, sendo depois convertida em outra curva de saturação que fornece fluxo e corrente em valores de pico, utilizando o programa ATP. Também são efetuados ensaios para registro dos oscilogramas de tensão e corrente no transformador em condições de ferroressonância, os quais serão comparados com os resultados coletados das simulações realizadas no *simscape*, que é uma ferramenta do Matlab.

Além disso, utiliza-se da mesma ferramenta para realizar simulações em um transformador de distribuição trifásico de 13,8kV/220V, 75kVA e observar como este transformador se comporta sob certos tipos de operação. O modelo utilizado foi de 3 colunas (*three-limb core - core-type*).

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Nesta seção é apresentado o embasamento teórico para o desenvolvimento deste trabalho. Apresentando as definições da ferroressonância, os tipos de ferroressonância, sua ocorrência e prováveis consequências do fenômeno.

2.1 FERRORESSONÂNCIA

A ferroressonância é um fenômeno de ressonância não linear, que afeta os sistemas elétricos de potência. Em resumo, o termo ferroressonância significa a ressonância entre os parâmetros do sistema com os materiais ferromagnéticos, geralmente, com a presença de transformadores operando em condições a vazio. Em geral, surge em sistemas que estejam desbalanceados, durante operações de chaveamento monopolares que resultam em uma combinação série entre os capacitores e a indutância não linear dos transformadores. Quando ocorre a ferroressonância, ao ser atingida a saturação, é percebido uma variação das amplitudes e fases das correntes e tensões, surgindo ondas não senoidais com altos valores de pico, prejudicando assim, os equipamentos dos circuitos elétricos. Segundo Batista *et al*, (2003), quando a tensão permanece acima de 125% da nominal, o sistema está sob efeito do fenômeno, mas os valores típicos das sobretensões são geralmente de 2 a 3 pu.

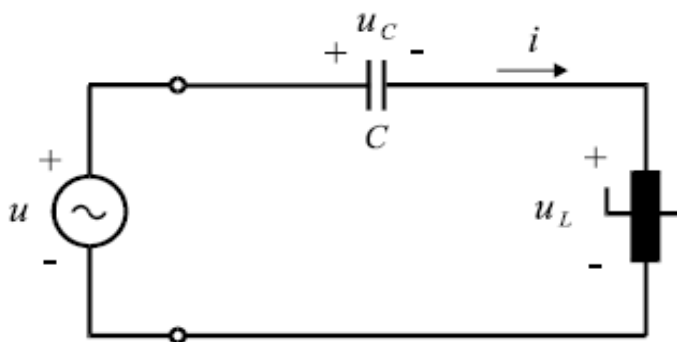
A oscilação ferroressonante ocorre em circuitos que contenham pelo menos os seguintes elementos (FERRACI, 1998):

- 1 – Indutância não-linear.
- 2 – Capacitor.
- 3 – Fonte de Tensão.
- 4 – Baixas Perdas.

Em que, as indutâncias saturáveis são representadas por transformadores de potencial indutivo TP, reatores *shunt* e transformadores de energia. Os capacitores são representados por linhas longas, bancos de capacitores em série ou derivação e transformadores de potencial capacitivos. Já as fontes de tensão podem ser representadas por geradores.

No estudo da ferroressonância, é adotado a análise gráfica para avaliar de forma qualitativa o fenômeno, utilizando, inicialmente, apenas a componentenente fundamental da tensão e corrente, desconsiderando as suas distorções, e também as perdas. No circuito apresentado na Figura 1, a tensão através da indutância depende da frequência angular ω e da corrente descrita por uma função $f(I)$. Esta função é não linear e representa a relação entre tensão e corrente.

Figura 1 – Circuito LC série



Fonte: (GUERRA, 2015)

As tensões sobre a indutância e a capacitância, são dadas por:

$$U_L = j\omega f(I) \quad (1)$$

$$U_C = -j \frac{I}{\omega C} \quad (2)$$

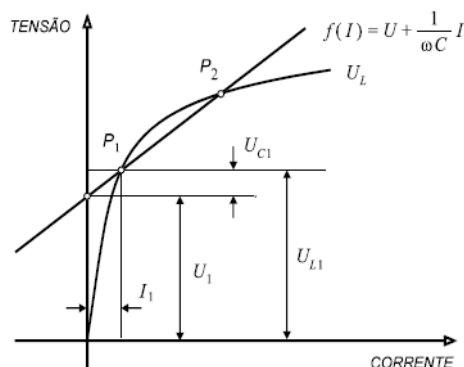
O sinal negativo da equação (2) indica que a tensão sobre o capacitor está oposta à tensão sobre o indutor. A tensão total é dada por:

$$U = U_L + U_C = j\omega f(I) - j \frac{I}{\omega C} \quad (3)$$

$$U_L = U + j \frac{I}{\omega C} \quad (4)$$

Com base nesta equação (4), pode-se construir o gráfico da Figura 2, onde o ponto de operação inicial correspondente a intersecção da reta descrita pela equação (4) e a curva de magnetização do indutor descrita pela equação (1), é indicado pelo ponto de operação P_1 , para uma tensão da fonte $U = U_1$:

Figura 2 – Operação estável de um circuito LC em série não linear



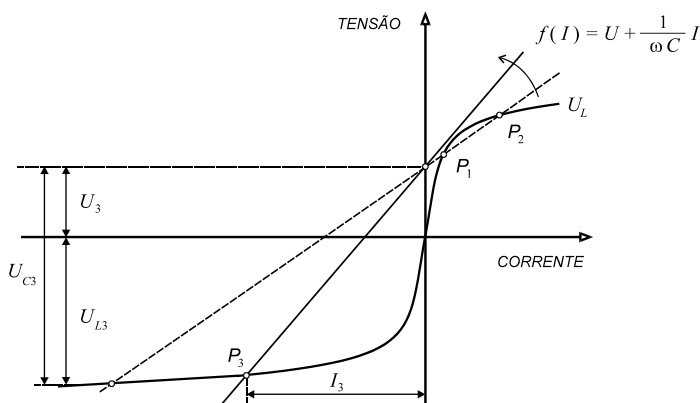
Fonte: (GUERRA, 2015)

A tensão sobre o capacitor é dada por U_{C1} e a tensão sobre o indutor é dada por U_{L1} , onde pode ser visto que $U_{L1} > U_{C1}$. Então neste ponto de operação estável, o circuito assume um comportamento predominantemente indutivo.

Para diferentes valores da frequência angular ω ou de capacitância a inclinação da reta vai mudar. Quando o valor da capacitância sofre uma elevação, o ângulo da inclinação da reta vai diminuir, com isso o ponto de operação se desloca para cima. O comportamento do gráfico para diferentes valores de capacitância é apresentado na Figura 3, onde para diferentes valores de inclinação existe um efeito diferente no circuito ferroressonante. A inclinação da reta é representada pela equação (5):

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{\omega C} \quad (5)$$

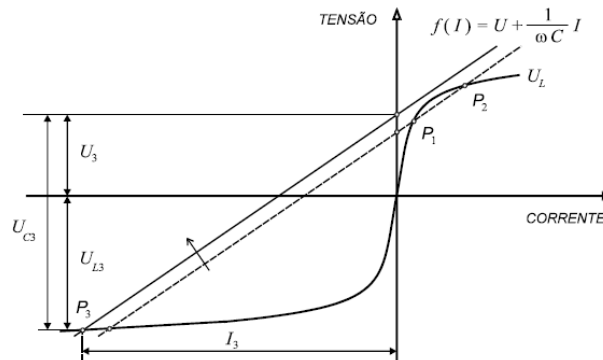
Figura 3 – Representação gráfica para diferentes valores de capacitância



Fonte: (GUERRA, 2015)

O comportamento do gráfico para valores maiores de tensão da fonte U é apresentado na Figura 4:

Figura 4 – Representação gráfica para o aumento de U

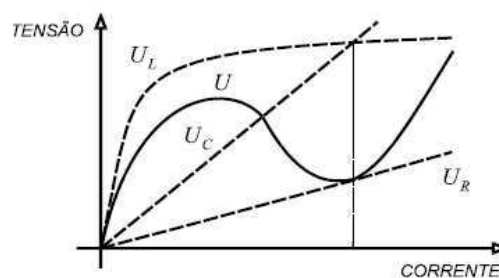


Fonte: (GUERRA, 2015)

Pode-se observar que neste novo ponto de operação P_3 ocorre grande aumento nos valores de tensão e corrente. Como este ponto está situado em uma região considerada de saturação da curva $U \times I$, as ondas de tensão e corrente apresentam um caráter acentuadamente não senoidal.

As curvas características de tensão e corrente do resistor, capacitor e indutor da Figura 1, respectivamente representadas por $U_R = RI$, $U_C = \frac{I}{\omega C}$ e $U_L = f(I)$, são apresentadas na Figura 5:

Figura 5 – Curvas de tensão e corrente



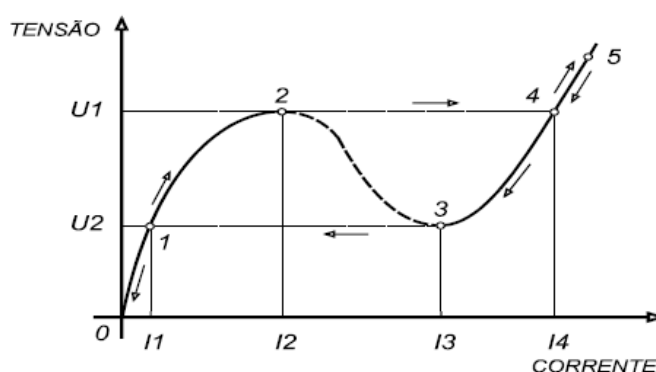
Fonte: (GUERRA, 2015)

Segundo Ferraci (1998), o fenômeno da ferroressonância tem a possibilidade de ter mais de uma resposta estável em regime permanente para o mesmo conjunto de parâmetros da rede. Em que, a resposta pode mudar de forma instantânea, saindo do

regime permanente normal (senoidal com a mesma frequência da fonte) para outra resposta ferroressonante em regime permanente.

Ao observar a curva $U = f(I)$ da Figura 5, separadamente, representada na Figura 6, observa-se que segundo a afirmação anterior de Ferraci (1998), se a tensão U for aumentada de forma gradual a partir de zero, o trecho (0)-(1)-(2) é percorrido até o ponto (2). Nesse ponto, um acréscimo da tensão U resulta em um pulso para o ponto (4), percorrendo-se o trecho (4)-(5). Quando for atingido o ponto (3) e houver uma redução de U , existirá um pulso para o ponto (1) e então para o ponto (0).

Figura 6 – Curva tensão-corrente resultante do circuito LC série



Fonte: (GUERRA, 2015)

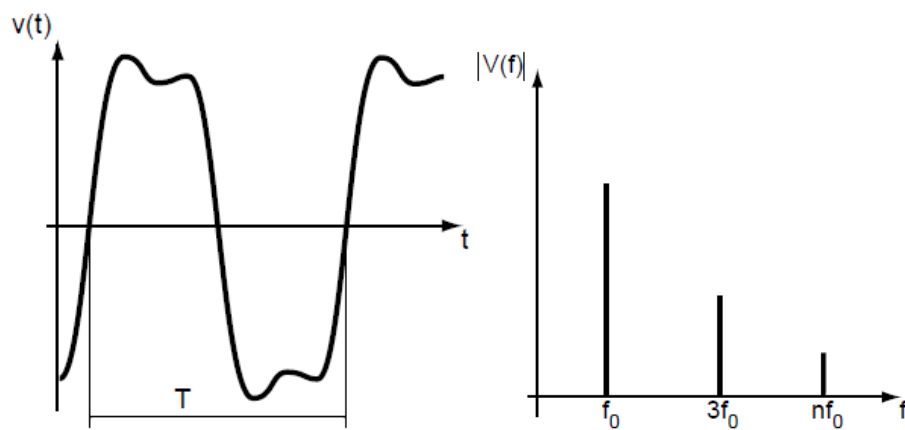
Segundo Guerra (2015), estes pulos são denominados como *salto ressonante*, em que uma variação mínima de tensão é responsável por uma variação abrupta entre dois estados de operação estável do sistema.

2.2 MODOS DA FERRORESSONÂNCIA

Segundo Ferraci (1998), com as informações obtidas por meio de experimentos e análises dos transientes que surgiram nos sistemas de potências, o estado de ferroressonância é classificado em quatro tipos, o modo fundamental, o modo sub-harmônico, o modo quase periódico e o modo caótico.

No modo fundamental, apresentado na Figura 7, as tensões e correntes são periódicas com o período T igual ao período do sistema e possuem uma forma não senoidal com uma certa taxa de harmônicos. O espectro do sinal é constituído da fundamental f_0 e de suas harmônicas.

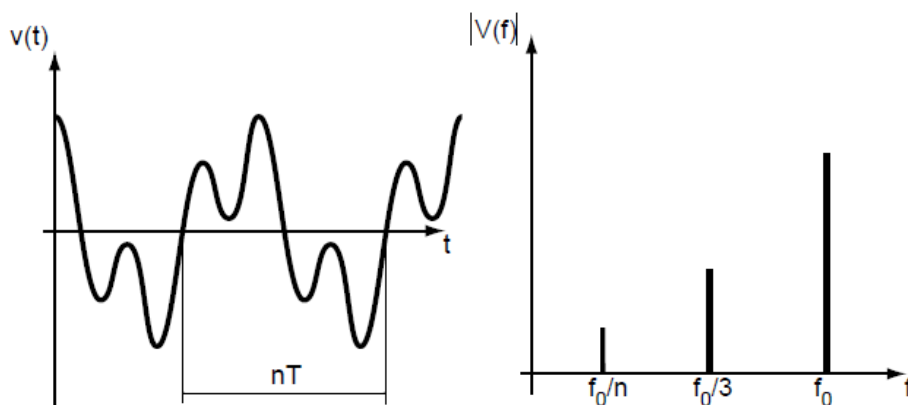
Figura 7 – Modo Fundamental da Ferroressonância



Fonte: (FERRACI, 1998)

No modo sub-harmônico, apresentado na Figura 8, as tensões e correntes são periódicas com o período nT , múltipla do período da fonte de alimentação. O estado sub-harmônico geralmente é de ordem ímpar. O espectro é constituído de uma fundamental de f_0/n e seus harmônicos.

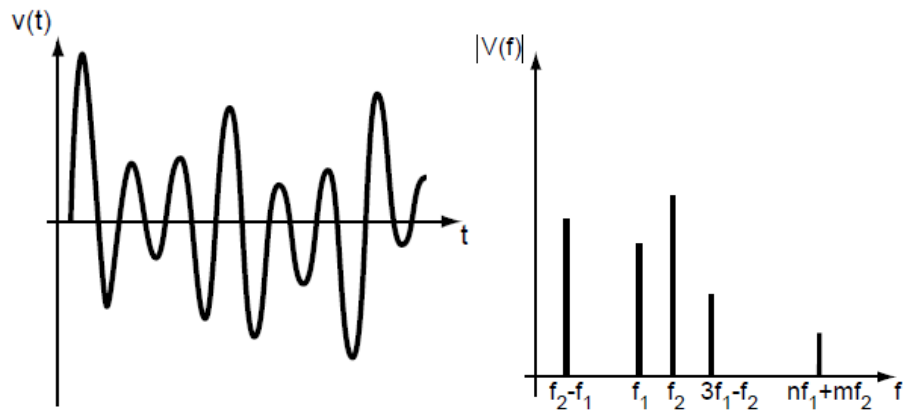
Figura 8 – Modo sub-harmônico da Ferroressonância



Fonte: (FERRACI, 1998)

No modo quase periódico, apresentado na Figura 9, as tensões e correntes não são periódicas. O espectro é descontínuo e suas frequências são expressadas na forma $nf_1 + mf_2$, onde n e m são inteiros e f_1/f_2 um número irracional.

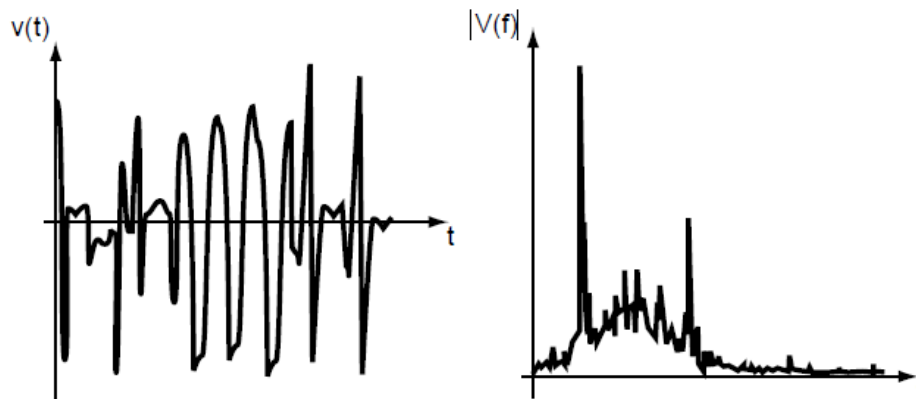
Figura 9 – Modo quase periódico da ferroressonância



Fonte: (FERRACI, 1998)

No modo caótico, apresentado na Figura 10, as tensões e correntes não são periódicas e o espectro é contínuo.

Figura 10 – Modo caótico da ferroressonância



Fonte: (FERRACI, 1998)

Pode-se ver que o fenômeno da ferroressonância é complexo e que existem vários tipos de estado estacionário para um mesmo circuito. Estes estados são bastante sensíveis aos parâmetros do sistema e as condições iniciais. Pequenas variações dos parâmetros podem causar o salto ressonante e iniciar um dos quatro modos de ferroressonância. Segundo Ferraci (1998), os modos mais encontrados são o fundamental e o sub-harmônico.

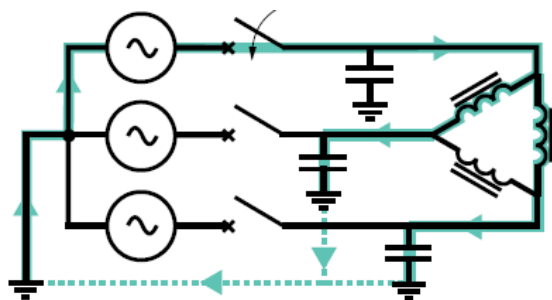
2.3 CONFIGURAÇÕES TÍPICAS

Existem diferentes tipos de configurações e operações que levam o circuito a sofrer com o efeito da ferroressonância.

2.3.1 TRANSFORMADORES ENERGIZADOS EM APENAS UMA OU DUAS FASES

Uma configuração, apresentada na figura 11, mostra um transformador operando a vazio, com primário ligado em delta e com operação monopolar, onde uma de suas fases é fechada ou aberta. As capacitâncias representam as capacitâncias distribuídas dos condutores da linha e demais elementos da rede. Esta operação faz com que uma mudança na configuração do sistema aconteça, onde uma capacitância em série é introduzida, propiciando o surgimento do fenômeno ferroressonante.

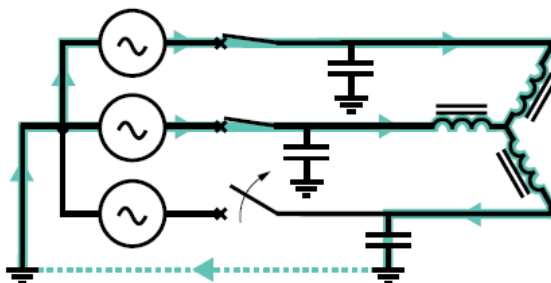
Figura 11 – Situação de ferroressonância causada pelo fechamento monopolar



Fonte: (FERRACI, 1998)

Outra configuração, apresentada na Figura 12, mostra um transformador com o primário em estrela e com operação monopolar, também propiciando o aparecimento do fenômeno.

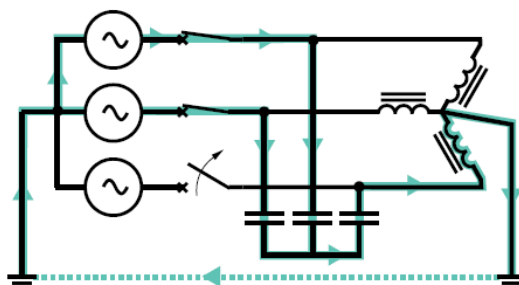
Figura 12 – Situação de ferroressonância causada por uma abertura monopolar



Fonte: (FERRACI, 1998)

Outra configuração, apresentada na Figura 13, de um transformador com ligação em estrela e neutro aterrado, operando com abertura monopolar, também é sujeito a sofrer com a ferroressonância.

Figura 13 – Situação de ferroressonância causada por uma operação monopolar

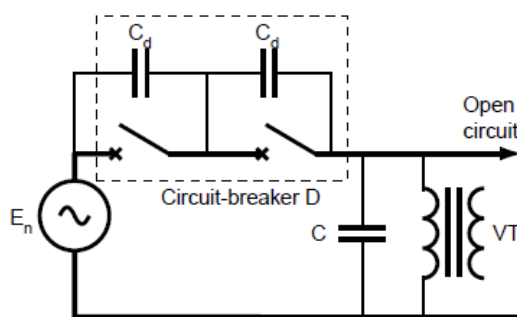


Fonte: (FERRACI, 1998)

2.3.2 TRANSFORMADORES ENERGIZADOS ATRAVÉS DE CHAVES COM CAPACITÂNCIA DE EQUALIZAÇÃO DE TENSÃO (*GRADING CAPACITOR*)

Disjuntores podem energizar parcialmente um barramento que está desligado via capacitância através de contatos abertos, podendo levar o transformador conectado entre fases e terra a ferroressonância. A capacitância ligada em paralelo a chave e o transformador de potencial podem formar um caminho para que isto ocorra. Esta configuração é mostrada na Figura 14.

Figura 14 – Ferroressonância em um transformador de potencial



Fonte: (FERRACI, 1998)

2.4 CONSEQUÊNCIAS DA FERRORESSONÂNCIA E SOLUÇÕES PARA EVITÁ-LA

Conforme mencionado, este tipo de sobretensão e sobrecorrente leva os equipamentos da malha energética a estresses elétricos elevados. As principais consequências oriundas deste fenômeno são descritas a seguir (VIENA, 2010).

- Sobretensões sustentadas elevadas: o nível das sobretensões podem levar a falha repentina de componentes elétricos como os transformadores, pára raios e cabos.
- Problemas com qualidade de energia: as ondas de tensão e corrente são altamente não senoidais com elevadas distorções harmônicas.
- Aquecimento do transformador e elevado ruído: devido a saturação do núcleo magnético, o transformador alcança altas temperaturas, resultado das sobrecorrentes no enrolamento primário. A circulação de fluxo parasita pela parte externa do transformador como o tanque e outras partes metálicas é uma outra fonte para o aquecimento do transformador. Como consequência, o transformador pode ser levado a falha de suas isolações, curto-circuito e explosão.

O surgimento da ferroressonância pode ser evitado ou atenuado baseando-se em três pontos principais:

- Procurar evitar que no processo do projeto e da operação seja adotada as configurações que são propensas a este tipo de fenômeno, selecionando a melhor combinação entre as conexões do transformador e o tipo de construção do seu núcleo.
- O sistema tem que ter seus parâmetros fora da zona de perigo da ferroressonância, ou seja, a capacitância deve ser minimizada para evitar o aparecimento do fenômeno.
- Assegurar que a energia fornecida pela fonte não seja suficiente para que o fenômeno se mantenha, introduzindo perdas para reduzir os seus efeitos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção é feita uma breve apresentação do material e dos métodos utilizados para a coleta dos parâmetros do transformador monofásico e para obtenção das simulações do fenômeno da ferroressonância neste mesmo transformador e em um transformador trifásico.

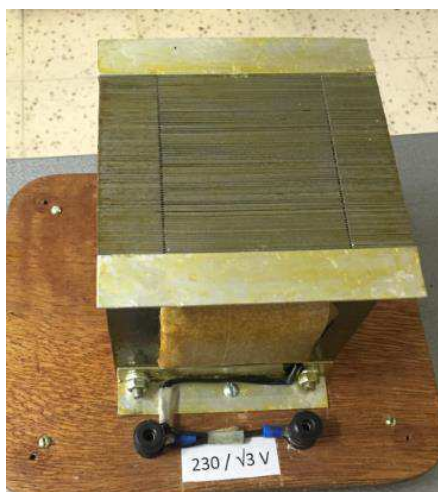
3.1 TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

Para o levantamento do estudo de ferroressonância foi utilizado um transformador de potencial monofásico, que tem as seguintes especificações:

1. Tensão primária nominal: $230/\sqrt{3}$;
2. Tensão secundária nominal: $115/\sqrt{3}$;
3. Carga nominal: 160 VA;
4. Classe de exatidão: 0,6;
5. Número de espiras do enrolamento primário: 180;
6. Número de espiras do enrolamento secundário: 90;
7. Resistência do enrolamento primário: $2,27\Omega$;
8. Resistência do enrolamento secundário: $0,608\Omega$;
9. Indutância do primário: $1098,1\mu\text{H}$;
10. Indutância do secundário: $274,4\mu\text{H}$;
11. Área de seção reta do núcleo: $(4,0 \times 8,0) \text{ cm}^2$;
12. Comprimento médio da trajetória magnética do núcleo: 25 cm;
13. Fator de empilhamento das lâminas do núcleo: 0,95;
14. Massa do núcleo: 6,5 kg;
15. Perdas do núcleo $529,85 \text{ W}$.

A Figura 15 apresenta o modelo que foi utilizado em laboratório:

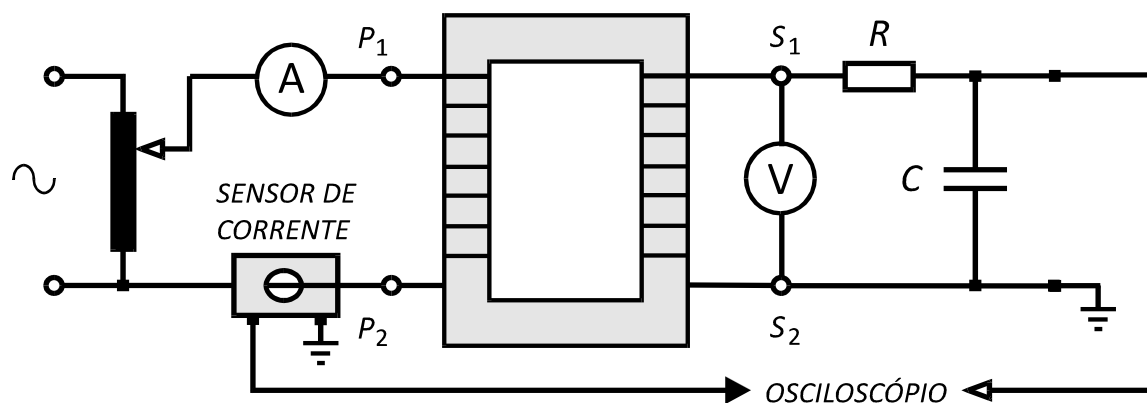
Figura 15 – Transformador Monofásico



Fonte: Autoria Própria

Para o levantamento da característica de saturação e da curva de histerese do transformador foi utilizado uma montagem que tem o seu circuito representado pelo diagrama da Figura 16:

Figura 16 – Circuito utilizado para levantamento da característica de saturação e curva de histerese



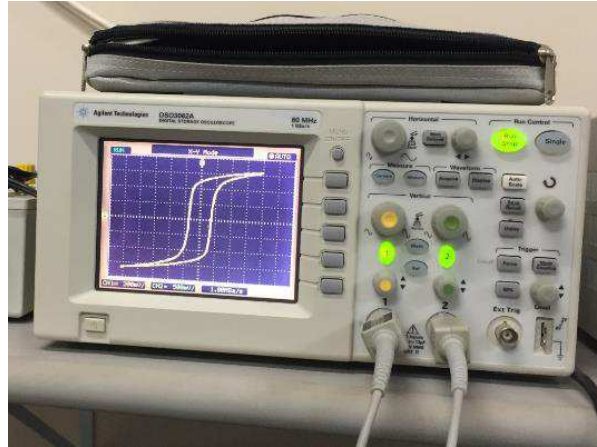
Fonte: Autoria Própria

O amperímetro no lado de baixa tensão e o voltímetro no lado de alta tensão foram utilizados para levantar a curva de saturação em termos de tensão e corrente ($V \times I$ RMS). Para o levantamento dessa curva, a tensão medida do lado de alta foi refletida para o enrolamento de baixa tensão do transformador.

O integrador no lado de alta tensão junto com o sensor de corrente (transformador de corrente de liga nanocristalina), foram utilizados para obter a curva de histerese do núcleo do transformador, para que assim, fosse possível ter uma ideia do grau de

saturação sofrido pelo núcleo magnético enquanto a tensão era variada na fonte. A curva de histerese é apresentada na Figura 17:

Figura 17 – Curva de histerese



Fonte: Autoria Própria

O integrador do lado de alta tensão tem a resistência muito maior que a capacitância C ($R \gg 1/\omega C$). Com essa suposição pode ser considerado que praticamente toda a queda de tensão vai ser sobre o resistor, o que nos possibilita a seguinte análise, segundo a *Lei de Faraday/Lenz*:

$$u = - \frac{d\lambda}{dt}$$

$$d\lambda = u dt$$

$$\lambda = \int u dt$$

$$\lambda = \int R i dt$$

$$\lambda = R \int c \frac{du_c}{dt} dt$$

$$\lambda = RCu_c \quad (6)$$

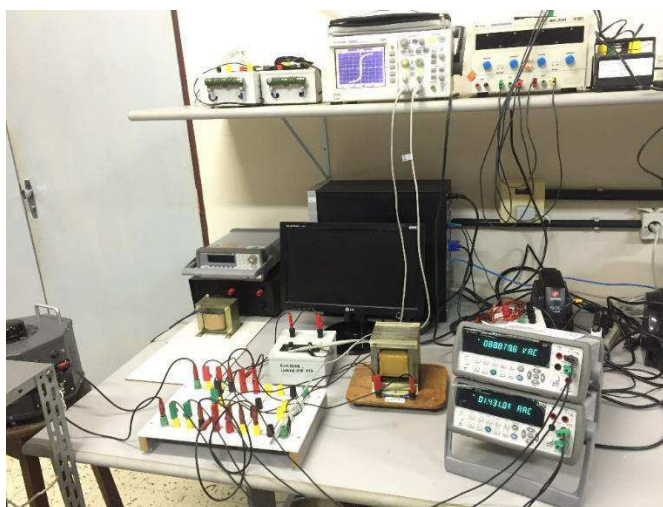
Onde u é a tensão do enrolamento de alta tensão e u_c é a tensão sobre o capacitor.

A equação (6) mostra que o fluxo pode ser obtido a partir de medições da tensão sobre o capacitor, com a suposição de que $R \gg 1/\omega C$.

O valor de resistência utilizado foi $R = 118,3 \text{ k}\Omega$ e o de capacitância foi de $C = 3,31 \mu\text{F}$.

A montagem do circuito para as medições é apresentada na Figura 18:

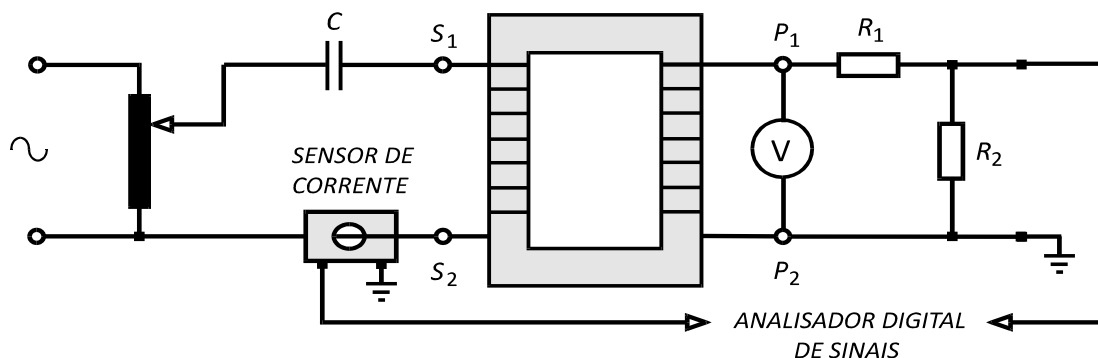
Figura 18 – Montagem realizada em laboratório



Fonte: Autoria Própria

Com o objetivo de obter experimentalmente os oscilogramas de tensão e corrente do transformador monofásico sob o efeito da ferroressonância, foi realizada a montagem do circuito representado pela Figura 19:

Figura 19 – Circuito utilizado para analisar a ferroressonância



Fonte: Autoria Própria

A capacitância e o transformador representam uma ligação *LC* série e o núcleo magnético representa a indutância não linear.

Para o registro dos oscilogramas, utiliza-se as saídas do sensor de corrente e do divisor de tensão na entrada de um analisador digital de sinais. Para poder comparar os dados dos oscilogramas com as simulações do *simscape*, é necessário realizar algumas transformações dos dados coletados, devido a atenuação sofrida pela tensão no divisor de tensão e o ganho sofrido pela corrente no sensor de corrente, tirando essa atenuação e dividindo os valores de corrente pelo ganho do sensor de corrente. Esta tensão também precisa ser refletida para o lado de baixa tensão do transformador, já que os dados que vão ser obtidos pelas simulações serão para o lado de baixa tensão.

Os valores das resistências são de $R_1 = 9,6 \text{ k}\Omega$ e $R_2 = 218,6 \Omega$. Para a capacitância foi utilizado 5 capacitores em paralelo no valor de $3,33 \mu\text{F}$, dando um total de $16,53 \mu\text{F}$ de capacitância

A montagem que foi feita é representada pela Figura 20:

Figura 20 – Montagem realizada em laboratório

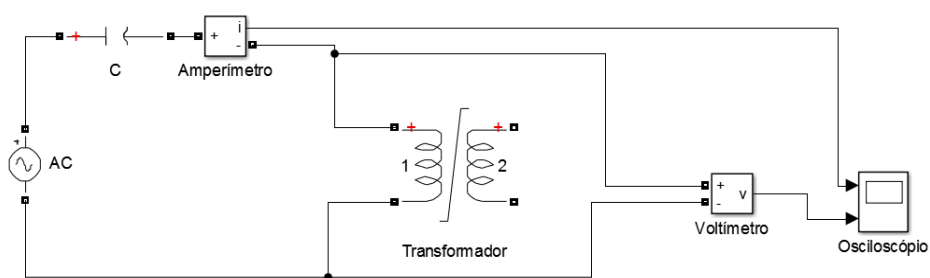


Fonte: Autoria Própria

3.2 OBTENÇÃO DA FERRORESONÂNCIA

Para obter o fenômeno ferroressonante em um transformador monofásico foi utilizado o *simscape*, que é uma ferramenta do *Simulink-Matlab*. A montagem apresentada na Figura 21, representa a conexão série de um capacitor e um indutor não linear, este último é representado pelo núcleo magnético do transformador que é operado a vazio. O amperímetro, voltímetro e osciloscópio foram utilizados para obter as curvas de tensão e corrente, separadamente.

Figura 21 – Diagrama do circuito que representa uma combinação LC

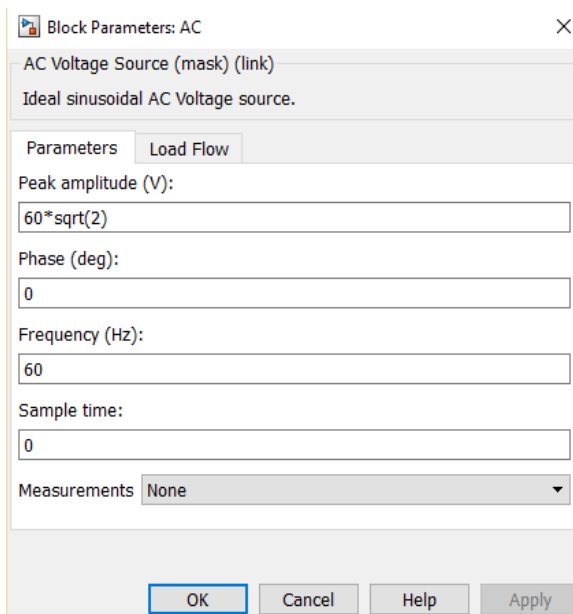


Fonte: Autoria Própria

Os parâmetros utilizados para implementar este circuito e obter o fenômeno desejado, foram adquiridos a partir das especificações do transformador monofásico e pela análise gráfica da sua curva de saturação $V \times I$. Estes parâmetros são especificados abaixo:

1. Fonte de tensão AC:

Figura 22 – Parâmetros da fonte AC



Fonte: Matlab

2. Capacitor C:

Figura 23 – Parâmetros de C

Block Parameters: C

Series RLC Branch (mask) (link)

Implements a series branch of RLC elements.
Use the 'Branch type' parameter to add or remove elements from the branch.

Parameters

Branch type: C

Capacitance (F):
16.5e-6

☐ Set the initial capacitor voltage

Measurements: None

OK Cancel Help Apply

Fonte: Matlab

3. Transformador:

Figura 24 – Parâmetros do transformador

Block Parameters: Transformador

Click the Apply or the OK button after a change to the Units popup to confirm the conversion of parameters.

Configuration Parameters Advanced

Units: SI

Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)]:
[160 60]

Winding 1 parameters [V1(Vrms) R1(ohm) L1(H)]:
[66.395 0.60799 0.0002744]

Winding 2 parameters [V2(Vrms) R2(ohm) L2(H)]:
[132.79 2.2701 0.0010981]

Winding 3 parameters [V3(Vrms) R3(ohm) L3(H)]:
[3.15e+05 4.9228e+08 1.3855e+05]

Saturation characteristic [i1(A) phi1(V.s); i2 phi2; ...]:
[6; 7.3225 0.3845; 10.0584 0.4147; 13.8387 0.4492; 18.8216 0.4899]

Core loss resistance and initial flux [Rm(ohm) phi0(V.s)] or [Rm(ohm)]:
[529.85 0]

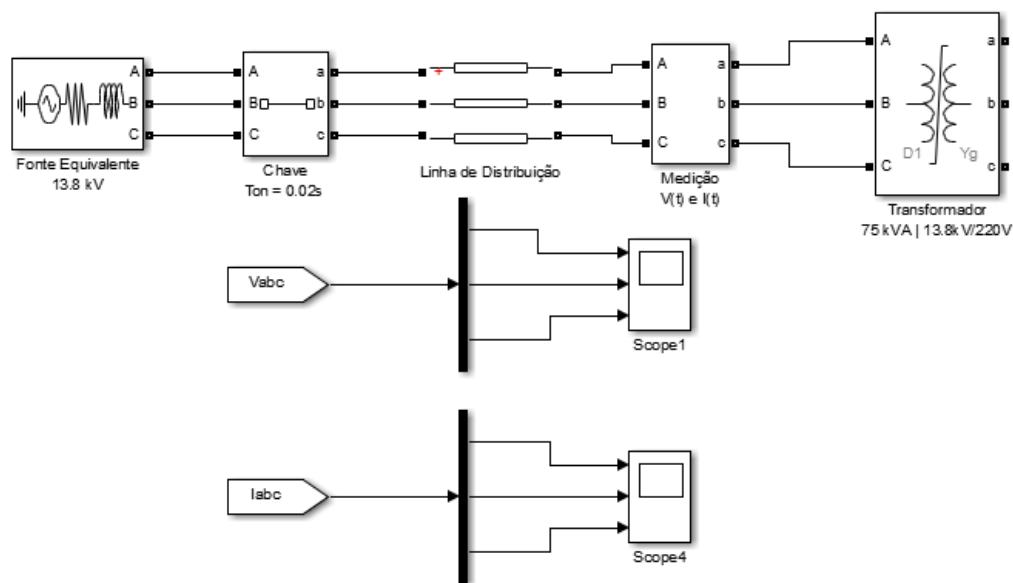
OK Cancel Help Apply

Fonte: Matlab

Além da simulação do transformador monofásico, foi simulado um transformador de distribuição trifásico de 75kVA e 13,8 kV/220V para duas situações de operação, uma

situação com chaveamento monopolar do circuito e outra com chaveamento bipolar, sendo as duas para um transformador operando a vazio. O circuito utilizado consiste de ligações entre uma fonte de tensão em série com uma impedância interna, uma chave, uma linha de distribuição e um transformador trifásico de média tensão. A configuração é representada pela Figura 25, também obtida pela utilização do *simscape*:

Figura 25 – Diagrama da simulação da ferroressonância em um Trafo trifásico



Fonte: Autoria Própria

Os dados utilizados para implementar este circuito e obter o fenômeno desejado são discriminados abaixo (VIENA, 2010):

1. Linha de Distribuição:
 - a. Comprimento: 50m, 150m 250m;
 - b. Resistência de sequência positiva: $0,6726 \Omega/\text{km}$;
 - c. Reatância de sequência positiva: $0,1793 \Omega/\text{km}$;
 - d. Resistência de sequência zero: $1,6793 \Omega/\text{km}$;
 - e. Reatância de sequência zero: $0,6332 \Omega/\text{km}$;
 - f. Capacitância: $0,2240 \mu\text{F}/\text{km}$.
2. Fonte de Tensão:
 - a. Tensão L-L (V_{rms}): 13,8 kV;
 - b. Relação X/R: 222,21699.
3. Chave:

- a. Tempo do chaveamento: 0,02 s;
- 4. Transformador de 75 kVA:
 - a. Tensão nominal: 13,8 kV – 220V
 - b. Tipo de ligação: delta – estrela;
 - c. Núcleo: trifásico a 3 colunas;
 - d. Resistência do enrolamento primário: 59,4173 Ω ;
 - e. Resistência do enrolamento secundário: 0,0053 Ω ;
 - f. Indutância do primário: 316,704 mH;
 - g. Indutância do secundário: 0,0268 mH;
 - h. Resistência de magnetização: 2,00463 M Ω ;
 - i. Dados para implementar o indutor não linear do núcleo:

Tabela 1 – Pontos da curva de saturação do transformador de 75 kVA

| Corrente de pico (A) | Fluxo de pico (v.s) |
|----------------------|---------------------|
| 0,00382 | 36,28949 |
| 0,01515 | 41,932232 |
| 0,02971 | 46,953746 |
| 0,05890 | 51,923492 |
| 0,11395 | 56,945006 |
| 0,23738 | 62,587739 |

Fonte: (VIENA, 2010)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas seções seguintes são apresentados os dados e resultados obtidos pelos ensaios em laboratório para obtenção da curva de saturação e análise do fenômeno ferroressonante.

4.1 CURVAS DE SATURAÇÃO

A Tabela 2 mostra os pontos da curva de saturação do transformador de potencial coletados experimentalmente através da montagem mostrada anteriormente pela Figura 18:

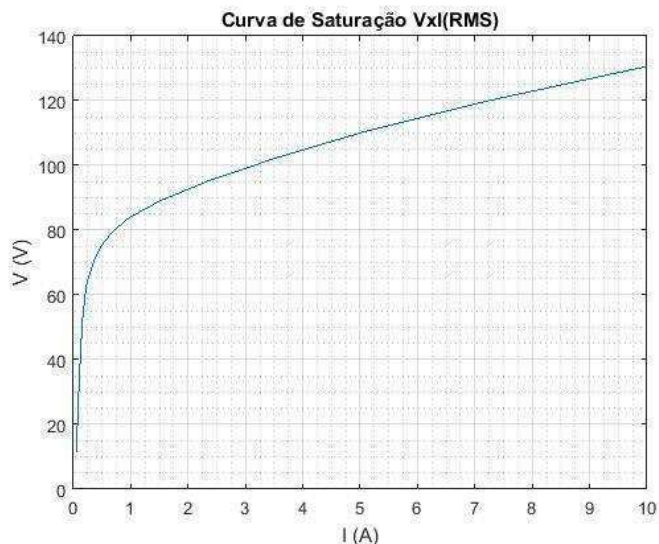
Tabela 2 – Levantamento dos dados de $V \times I$

| I(mA) | Vat(V) | Vbt(V) |
|-------|--------|--------|
| 50 | 22,67 | 11,335 |
| 76 | 45,39 | 22,695 |
| 100 | 67,3 | 33,65 |
| 153 | 103,4 | 51,7 |
| 225 | 126,3 | 63,15 |
| 372 | 142,7 | 71,35 |
| 511 | 151,6 | 75,8 |
| 691 | 159,5 | 79,75 |
| 975 | 167,8 | 83,9 |
| 1506 | 178,1 | 89,05 |
| 2406 | 191,2 | 95,6 |
| 3566 | 205 | 102,5 |
| 5100 | 221,1 | 110,55 |
| 7170 | 239,5 | 119,75 |
| 10000 | 261,2 | 130,6 |

Fonte: Autoria Própria

Utilizando o Matlab foi levantada a curva de saturação em termos de tensão e corrente ($I(A)$ e $V_{bt}(V)$), apresentada na Figura 26,.

Figura 26 – Curva de saturação ($V \times I$)



Fonte: Autoria Própria

Com a utilização de uma rotina do ATP chamada de *saturation*, foi transformado os pontos RMS($V - I$) de tensão e corrente na característica fluxo concatenado e corrente ($\lambda-i$) em valores de pico, utilizada para implementar o indutor não-linear do transformador. Estes dados são apresentados na Tabela 3 e a sua característica de magnetização é apresentada na Figura 27:

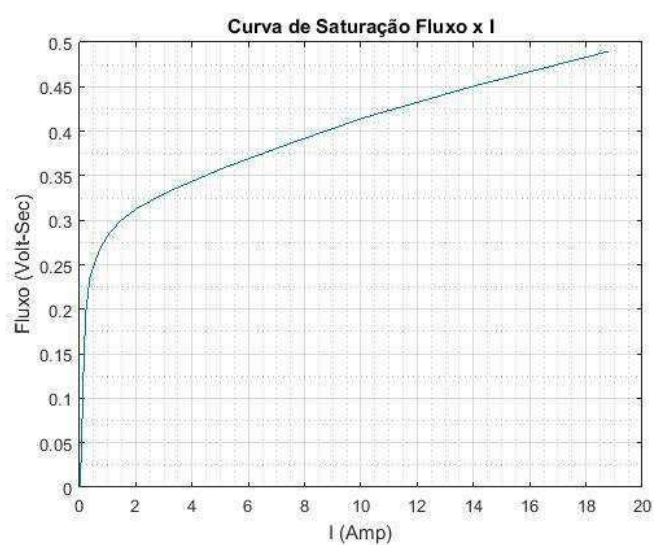
Tabela 3 – Levantamento dos dados de $\lambda-I$

| $I(mA)$ | Fluxo (Volt-Sec) |
|---------|------------------|
| 0 | 0 |
| 0,0707 | 0,0426 |
| 0,0971 | 0,0851 |
| 0,1335 | 0,1262 |
| 0,2112 | 0,1939 |
| 0,3711 | 0,2369 |
| 0,7147 | 0,2677 |
| 1,0349 | 0,2843 |
| 1,4403 | 0,2992 |

| | |
|---------|--------|
| 2,0994 | 0,3147 |
| 3,2868 | 0,3341 |
| 5,1043 | 0,3586 |
| 7,3225 | 0,3845 |
| 10,0584 | 0,4147 |
| 13,8387 | 0,4492 |
| 18,8216 | 0,4899 |

Fonte: Autoria Própria

Figura 27 – Curva de Saturação



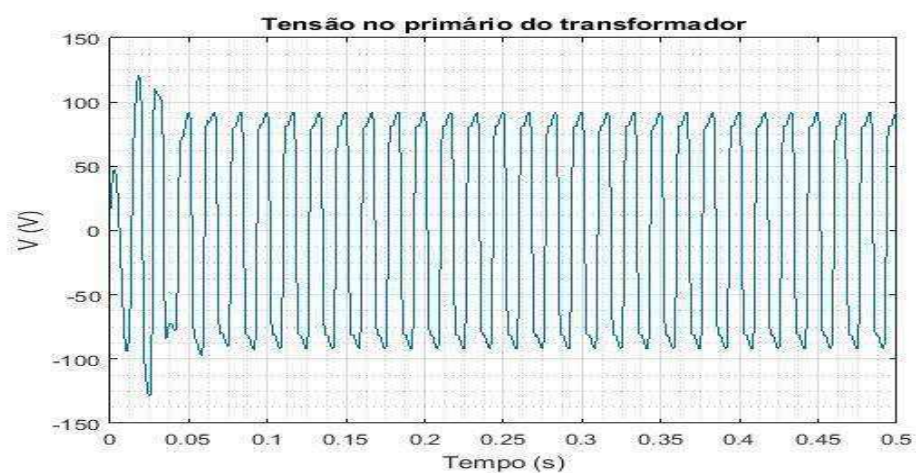
Fonte: Autoria Própria

4.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

4.2.1 TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

Na Figura 28 é apresentado o resultado da simulação do transformador monofásico saturável, onde foi verificado sobretensões sustentadas com características de ferroressonância no seu modo fundamental. O valor máximo de pico verificado foi de 120,5V (1,81 pu) e após 0,05 segundos uma característica periódica se estabeleceu, com valores de pico de tensão chegando a 92V (1,39 pu).

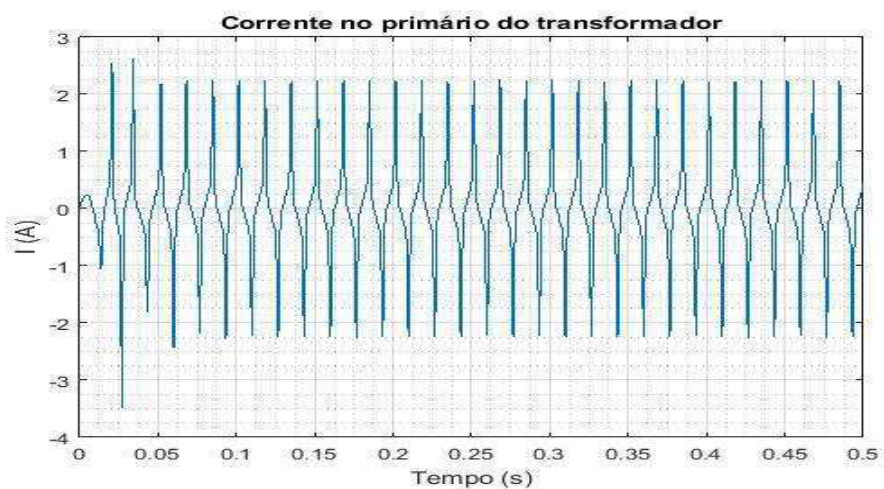
Figura 28 – Tensão no primário do transformador monofásico



Fonte: Autoria Própria

A característica da corrente primária é apresentada na Figura 29, sendo verificado que esta tem uma forma acentuadamente não senoidal, apresentando um valor máximo de pico de 2,6A e se estabilizando para um valor de 2,25A no regime.

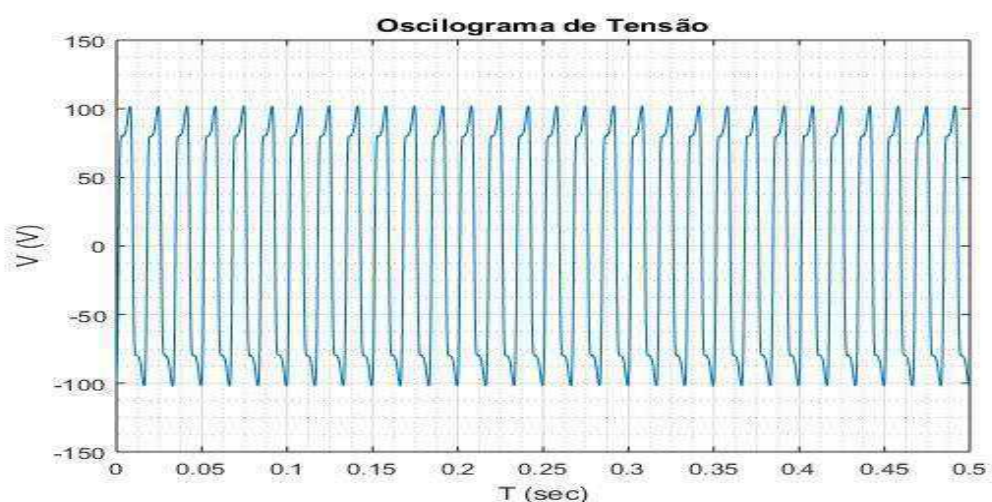
Figura 29 – Corrente no primário do transformador monofásico



Fonte: Autoria Própria

Os ensaios em laboratório do transformador simulado gerou o oscilograma de tensão apresentado na Figura 30:

Figura 30 – Oscilograma de Tensão

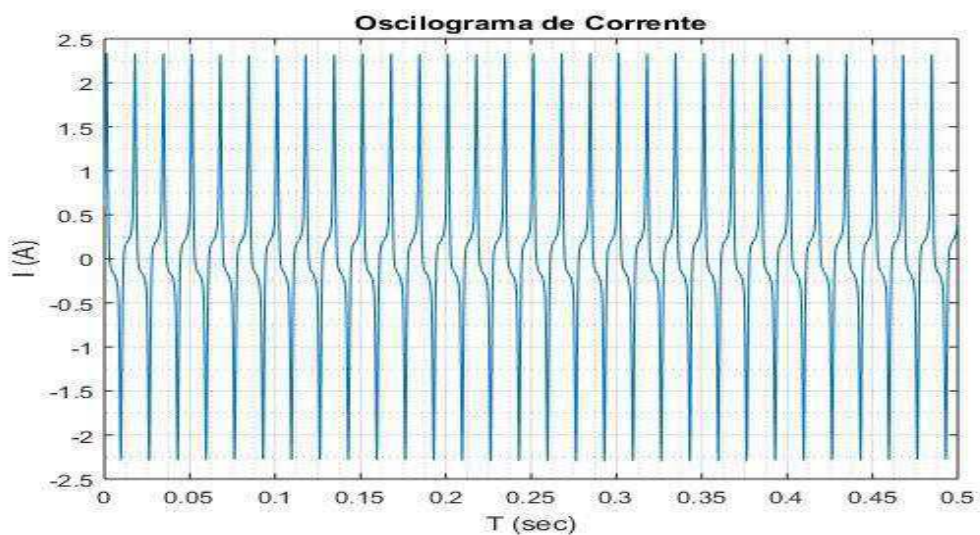


Fonte: Autoria Própria

Pôde ser observado o mesmo modo fundamental de ferroressonância que foi obtido na simulação e um valor máximo de pico para o regime de 102 V.

O oscilograma de corrente coletado no ensaio é representado pela Figura 31:

Figura 31 – Oscilograma de Corrente



Fonte: Autoria Própria

Também mostra coerência com o resultado da simulação, em que foi obtido uma forma de onda não senoidal, caracterizando a ocorrência de ferroressonância. O valor máximo de pico observado para o regime foi de 2,34 A.

A tabela 4 mostra os dados coletados na simulação e no ensaio, considerando o regime:

Tabela 4 - Dados da simulação e do ensaio para o regime permanente

| | Simulação | Ensaio |
|----------------|-----------|--------|
| Tensão (V) | 92 | 102 |
| Corrente (Amp) | 2,25 | 2,34 |

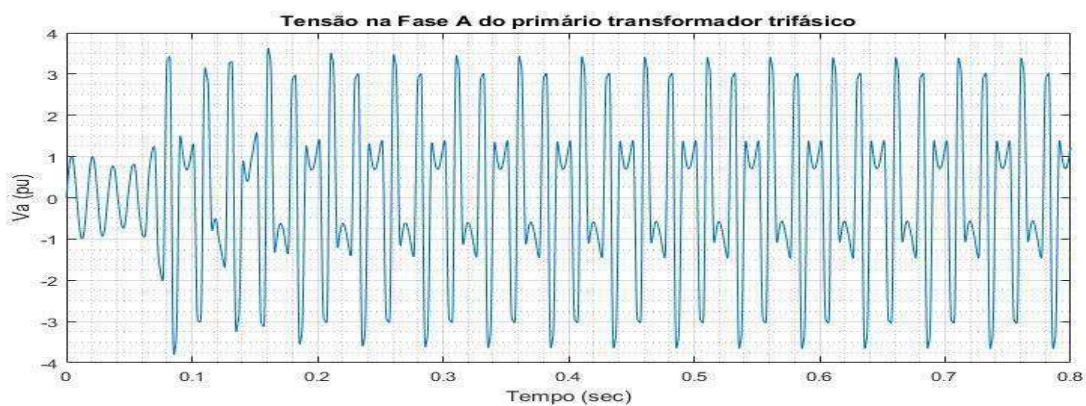
Fonte: Autoria Própria

4.2.2 TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

O transformador trifásico foi simulado para a operação de chaveamento monopolar da fase A e chaveamento bipolar da fase A e fase B.

Na Figura 32 é apresentada a tensão na fase A para a manobra monopolar quando a linha de distribuição tem um comprimento de 50 metros e o transformador opera a vazio. Pode-se observar o surgimento de uma sobretensão sustentada com característica ferroressonante no seu modo fundamental, tendo um valor máximo de pico de tensão em 3,63 pu.

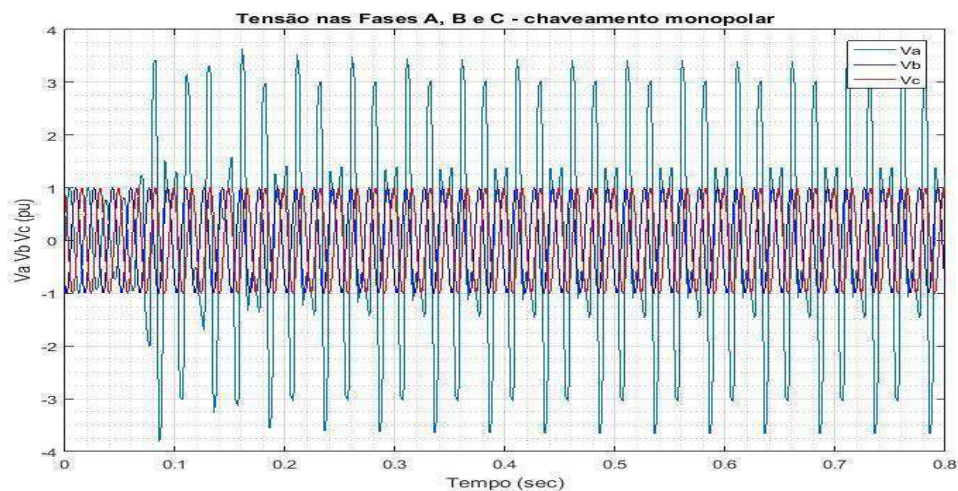
Figura 32 – Tensão primária da Fase A do transformador trifásico – chaveamento monopolar



Fonte: Autoria Própria

Ainda neste mesmo caso foi observado que as fases B e C não sofreram com nenhuma sobretensão, como pode ser visto na Figura 33:

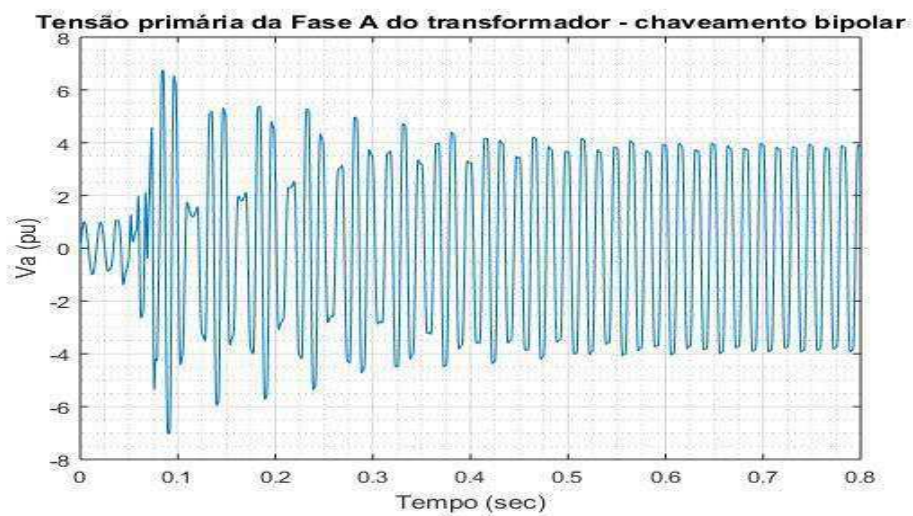
Figura 33 – Tensões primárias das Fases A, B e C do transformador trifásico – chaveamento monopolar



Fonte: Autoria Própria

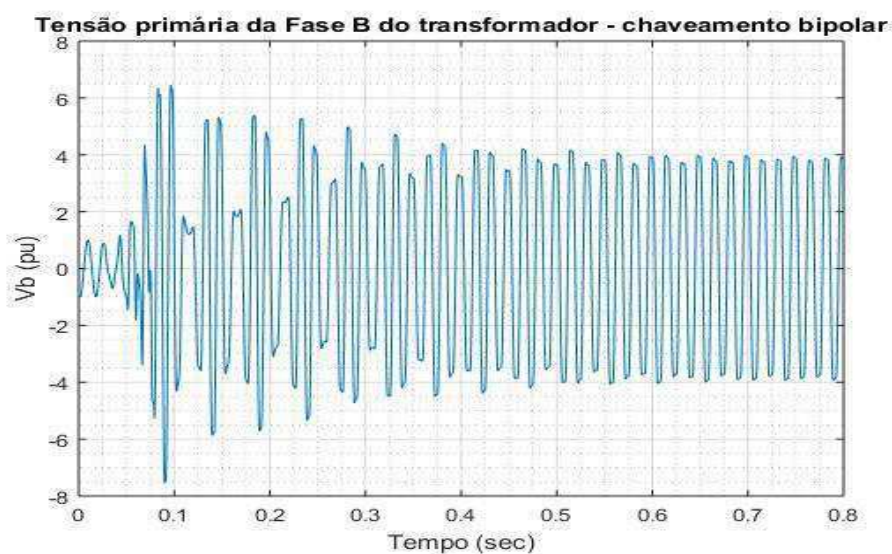
Além dos resultados referentes ao chaveamento monopolar da Fase A, é apresentado nas Figuras 34 e 35 as tensões das Fases A e B para o chaveamento bipolar:

Figura 34 –Tensão primária da Fase A – chaveamento bipolar



Fonte: Autoria Própria

Figura 35 – Tensão primária da Fase B – chaveamento bipolar

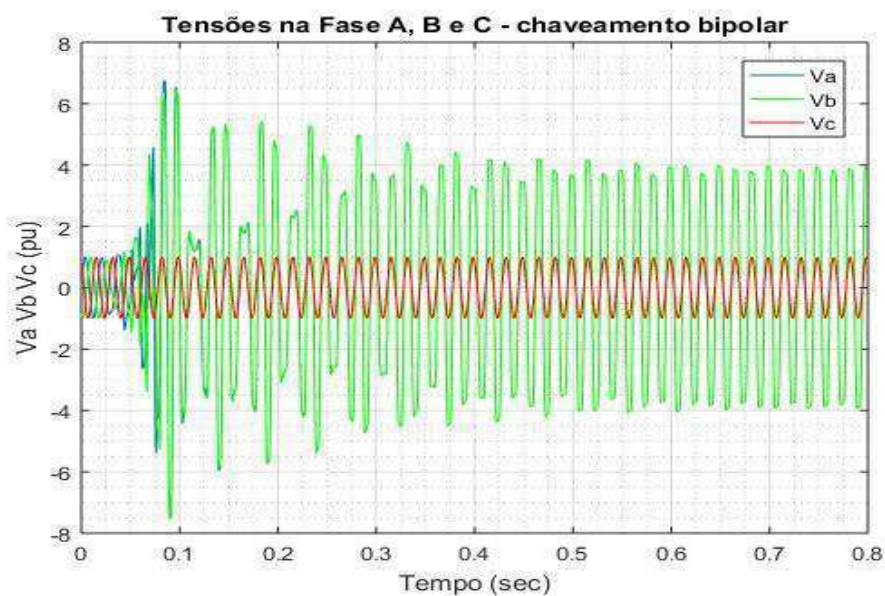


Fonte: Autoria Própria

Pode-se constatar que existiu sobretensões sustentadas em ambas as fases e que estas apresentaram um comportamento semelhante de tensão, com um valor de pico de 6,7 pu para o transitório e de 3,9 pu para o regime.

Observou-se também que a Fase C não sofreu sobretensões para este tipo de chaveamento, como apresentado na Figura 36:

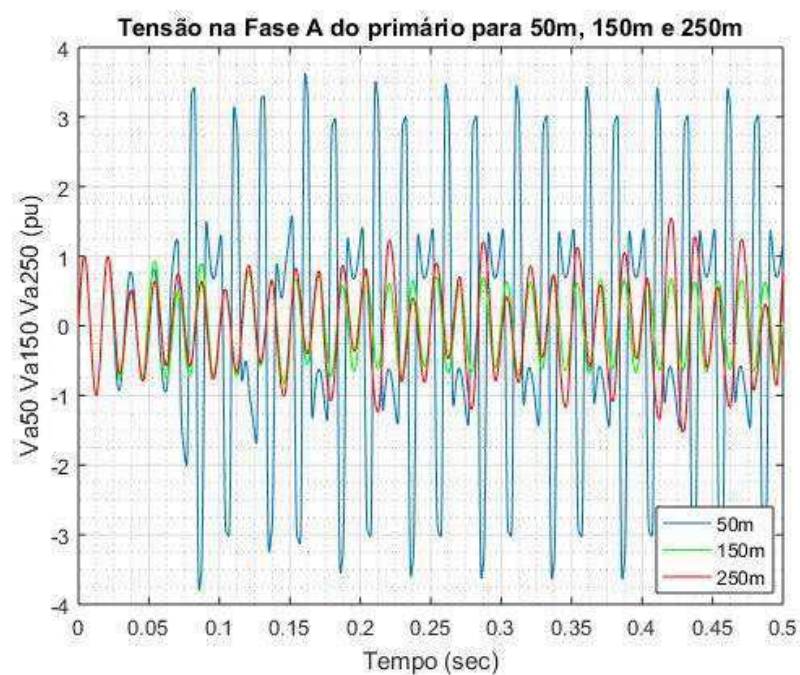
Figura 36 – Tensões nas fases A, B e C - chaveamento bipolar



Fonte: Autoria Própria

Para o caso da operação monopolar ainda foi analisado como a variação do comprimento da linha de distribuição poderia influenciar no surgimento ou não da ferroressonância neste transformador. Foi considerado comprimentos da linha de 50 m, 150m e 250m e os resultado obtidos são evidenciados na Figura 37:

Figura 37 - Tensão primária da fase A para diferentes comprimentos da linha de distribuição sob operação monopolar



Fonte: Autoria Própria

Pôde ser observado que existiu sobretensões para os comprimentos de linha de 50m e 250m e que a sobretensão causada pela linha mais curta foi a que evidenciou maiores valores de tensão de pico.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um ensaio e algumas simulações para o estudo da ferroressonância sobre o transformador monofásico e trifásico.

O objetivo foi demonstrar como o sistema se comporta mediante o seu tipo de configuração, as características dos seus parâmetros, e o tipo de manobra que o mesmo está sofrendo.

Foi visto que é possível realizar o estudo deste transitório eletromagnético utilizando a ferramenta de simulação *simscape* do Matlab, onde foi comprovado que os resultados obtidos eram coerentes com a realidade e reproduziram o comportamento do componente real quando comparados com o ensaio do transformador monofásico em laboratório.

A partir das simulações realizadas do transformador trifásico evidenciou-se que uma pequena variação de parâmetros do circuito ou o tipo de operação realizada poderiam causar facilmente o surgimento da ferroressonância.

Comprovou-se que a variação do comprimento da linha de distribuição pode desencadear ou não o transitório ferroressonante no transformador, visto que existe o efeito capacitivo da linha e a variação do seu comprimento resulta em uma variação deste componente no sistema

Mesmo que os dados coletados do transformador trifásico não tenham sido comparados com um caso real, os resultados aqui obtidos ainda são coerentes com outros estudos, quando visto o efeito que a variação de parâmetros e o tipo de operação de chaveamento causa ao transformador.

6 REFERÊNCIAS

RIBAS, J. C. L. (2012). *Modelagem do Fenômeno da Ferroressonância Considerando a Histerese: Análise em Subestação de Energia*, Dissertação de mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE, Departamento de Engenharia Elétrica – Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba - PR.

GUERRA, F. D. C. F.(2015) *Notas de Aula de Proteção de Sistemas Elétricos*. Universidade Federal de Campina Grande.

JACOBSON, D. A. N. (2000). *Field Testing, Modelling and Analysis of Ferroresonance in a High Voltage Power System*, Doctor Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering The University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada.

ERBAY, A. (2012). *Parameter Study of Ferro-Resonance with Harmonic Balance Method*, Master Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

VIENA, L.B (2010). *Modelagem de Transformadores no Programa ATP para o estudo do Fênomeno da Ferroressonância*, Dissertação de mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia – UFBA, Salvador-BA.

BALDWIN, B.; SABADE, S.; JOSHI, S. (2013). *A Study of Ferroresonance and Mitigation Techniques*, Master Thesis, Michigan Technological University, Michigan, EUA.

FERRACI, P. *Ferroresonance*, Cahier Technique n° 190, Groupe Schneider, 1998.