

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

PAULO HENRIQUE BARBOSA DE SOUZA PINHEIRO

**ENSAIO DE FERRO-RESSONÂNCIA EM TRANSFORMADOR DE
POTENCIAL CAPACITIVO**

**VOLTA REDONDA
2018**

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**ENSAIO DE FERRO-RESSONÂNCIA EM TRANSFORMADOR DE
POTENCIAL CAPACITIVO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica do UniFOA como requisito à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aluno:

Paulo Henrique Barbosa de Souza Pinheiro.

Orientador:

Prof. DSc. Hélio de Paiva Amorim Junior

**VOLTA REDONDA
2018**

FOLHA DE APROVAÇÃO

Paulo Henrique Barbosa de Souza Pinheiro

ENSAIO DE FERRO-RESSONÂNCIA EM TRANSFORMADOR DE POTENCIAL CAPACITIVO

Orientador:

Prof. DSc. Hélio de Paiva Amorim Junior

Banca Examinadora

Prof. DSc. Hélio de Paiva Amorim Junior

Prof. MSc. Orlando Moreira Guedes Junior

Prof. Esp. Bruno Moreira da Silva

“A ciência é, portanto, perversa de si mesmo, a menos que tenha como fim último, melhorar a humanidade”.

Nikola Tesla.

Este trabalho é dedicado primeiramente a DEUS por mais este sonho realizado.

Dedico ainda a todos aqueles que de certa forma me ajudaram ao longo de minha caminhada.

Aos meus pais, familiares, amigos, professores e todos aqueles que torceram por mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar a oportunidade de realizar esse sonho por meio do conhecimento e principalmente em momentos difíceis, nunca ter me deixado desistir dos estudos.

Agradeço também a todos meus familiares que sempre me incentivaram, em especial meus pais e minha irmã, que sempre me apoiaram nas minhas escolhas e deram todo apoio possível para que eu pudesse concluir a graduação.

A todos os amigos de infância e amigos que fiz durante a faculdade, que com eles pude ter a oportunidade de registrar grandes momentos em minha vida, e também onde tive grandes trocas de experiências e de conhecimento.

Aos mestres que com toda dedicação, compartilharam seu conhecimento teórico e prático na área de Engenharia Elétrica, em especial aos mestres Maurício Haddad que foi um grande incentivador e uma inspiração.

Ao mestre Hélio de Paiva Amorim Jr. que me orientou durante a construção deste trabalho e também me concedeu a oportunidade do estágio no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), onde com certeza aprendi muito e fiz grandes amizades.

Registro todo meu carinho também por todos profissionais que pude conhecer no período em que realizei meu estágio no CEPEL, destacando todo corpo técnico do laboratório

de Alta Tensão – AT1, que sempre compartilhei de bons momentos e de conhecimento, em especial ao meu supervisor Clóvis José da Silva, ao meu chefe de laboratório Jorge Ribeiro e aos técnicos Neiton, Leonardo, Marcus e Petterson.

Por fim, agradeço aos engenheiros da Siemens, Renata Ramalho e da General Electric, Vagner Lúcio que foram de grande importância no desenvolvimento do meu trabalho, permitindo visitas técnicas e compartilhamento de material necessário para desenvolvimento da minha pesquisa.

RESUMO

O sistema de potência em geral está sujeito a vários problemas de distorções harmônicas e sobretensões. Alguns eventos em subestações como manobras em chaves seccionadoras, sobretensões de impulso atmosférico, ocorrência ou remoção de falhas são alguns dos causadores do fenômeno conhecido como ferro-ressonância. Este fenômeno pode ser descrito por um repentino salto de um estado estacionário inicial (senoidal e com a mesma frequência da fonte) para outra resposta de estado estacionário ferro-ressonante, caracterizado por sobretensões e níveis de harmônicos que podem danificar seriamente equipamentos elétricos. No princípio, quando primeiro foi ouvido o termo ferro-ressonância, este fenômeno era atribuído apenas aos transformadores de potência. Porém, depois alguns anos de estudo, foi possível identificar o fenômeno também em transformadores de potencial capacitivo. Este trabalho foi elaborado para facilitar o estudo nessa área, descrever os principais transitórios que podem levar a ocorrência deste fenômeno, fazer uma descrição sucinta do transformador de potencial capacitivo, seu circuito interno com foco no circuito supressor de ferro-ressonância, sua função no sistema elétrico de potência e também mostrar o que é o ensaio de ferro-ressonância em transformador de potencial capacitivo, qual norma é utilizada, quando se faz necessário a realização deste tipo de ensaio e os critérios de aprovação do mesmo.

Palavras-chave: Ferro-ressonância; Transformador de potencial capacitivo.

ABSTRACT

The power system in general is subject to several problems with harmonics distortions and overvoltages. Some events in substations such as switching moments, lightning impulse overvoltage, occurrence or removal of faults are some of the causes of the phenomenon known as ferroresonance. This phenomenon can be described by a sudden jump from one initial steady-state (sinusoidal and with the same frequency from the source) to another ferroresonant steady-state response, characterized by overvoltages and harmonic levels which can severely damage electrical equipment. In the beginning, when it was first heard the term ferroresonance, this phenomenon was assimilated only to power transformers. However, after many years of study, it was possible to identify the phenomenon in capacitor voltage transformers as well. This work was elaborated to make easier the study in this area, describe the main transients which can lead to the occurrence of this phenomenon, to make a succinct description of the capacitor voltage transformer, its internal circuit focusing on the ferroresonance suppressor circuit, its function in the power system and also show what comes to be the ferroresonance test in capacitor voltage transformer, which standard is used, when it is necessary to make this test and its approval requirements.

Keywords: Ferroresonance; Capacitor voltage transformer.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Motivação	15
1.2 Justificativa	16
1.3 Objetivos	16
2. TRANSFORMADOR DE POTENCIAL	17
2.1 Transformador de Potencial Indutivo	17
2.2 Transformador de Potencial Capacitivo	18
2.2.1 Características elétricas	20
2.2.2 Classes de exatidão	20
2.2.3 Resposta transitória	21
2.2.4 Divisor capacitivo	21
2.2.5 Unidade eletromagnética do TPC	22
2.2.6 Reator de compensação de fase	22
2.2.7 Tensões nominais	23
2.2.8 Ensaio para recebimento	24
2.2.9 O circuito supressor de ferro-ressonância	25
2.2.10 O sistema <i>Power Line Carrier</i>	26
3. DISTÚRBIOS NO SISTEMA DE POTÊNCIA	27
3.1 Sobretensões	27
3.1.1 Sobretensão atmosférica	28
3.1.2 Sobretensão de manobra	29
3.1.2.1 Manobra envolvendo transformadores	29
3.1.3 Sobretensão temporária	30
3.2 Sobrecorrente	31
3.3 Amortecimento	32
3.3.1 Utilização de resistores para manobra	33
3.3.2 Manobra de cargas	34
3.4 Transitórios de manobra normais e anormais	35
3.4.1 Supressão de corrente	35
3.4.2 Manobra de capacitâncias	36
3.4.3 Corrente de magnetização <i>inrush</i> de transformadores	37
3.5 Ferro-ressonância	40

3.5.1 Principais diferenças entre ferro-ressonância e ressonância linear.....	44
3.5.2 Abordagem física do fenômeno	45
3.5.3 Principais Características.....	48
3.5.4 Modos de ferro-ressonância	50
3.5.5 Métodos de diagnóstico	54
3.5.6 Soluções Práticas.....	55
4. ESTUDO DE CASO - O ENSAIO DE FERRO-RESSONÂNCIA EM TPC	58
5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 – Transformador de potencial grupo 1	18
FIGURA 02 – Transformador de potencial grupos 2 e 3	18
FIGURA 03 – Transformador de potencial capacitivo	19
FIGURA 04 – Circuito supressor de ferro-ressonância ativo.....	25
FIGURA 05 – Circuito supressor de ferro-ressonância passivo	25
FIGURA 06 – Manobra envolvendo transformador	30
FIGURA 07 – Curva de saturação de transformador	31
FIGURA 08 – Energização de transformador com fluxo remanescente nulo	32
FIGURA 09 – Desenho esquemático de disjuntor.....	33
FIGURA 10 – Circuito RLC paralelo com dispositivo de manobra	34
FIGURA 11 – Forma de onda de tensão transitória no instante da manobra.....	34
FIGURA 12 – Manobra envolvendo capacitâncias.....	36
FIGURA 13 – Capacitor sendo desconectado do circuito	37
FIGURA 14 – Fluxo e corrente de magnetização de um transformador.....	38
FIGURA 15 – Curva de histerese e curva de magnetização	38
FIGURA 16 – Oscilograma corrente de <i>inrush</i> transformador 1000 kVA 13,8 kV	40
FIGURA 17 – Exemplo de ferro-ressonância em transformador de potencial	41
FIGURA 18 – Circuito ressonante série	42
FIGURA 19 –Compensação de tensões em circuito ressonante	43
FIGURA 20 – Resposta em frequência de circuito RLC linear e não linear	45
FIGURA 21 – Circuito RLC ferro-ressonante e curva de magnetização da indutância	46
FIGURA 22 – Oscilações livres de um circuito série ferro-ressonante.....	48
FIGURA 23 – Circuito série ferro-ressonante.....	49
FIGURA 24 – Tensão VL em função da tensão E da fonte	50

FIGURA 25 – Modo ferro-ressonante fundamental	51
FIGURA 26 – Modo ferro-ressonante sub-harmônico	52
FIGURA 27 – Espectro harmônico	52
FIGURA 28 – Modo ferro-ressonante quase periódico	53
FIGURA 29 – Modo ferro-ressonante caótico	53
FIGURA 30 – Dispositivo de proteção contra ferro-ressonância	56
FIGURA 31 – Arranjo de ensaio de ferro-ressonância em TPC	60
FIGURA 32 – Arranjo de ensaio de ferro-ressonância em TPC	62
FIGURA 33 – Conexões em osciloscópio	63
FIGURA 34 - Formas de onda registrada para o ensaio de ferro-ressonância	64
FIGURA 35 – Caso de reprovação de ferro-ressonância	66

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 – Requisitos para sistemas de neutro efetivamente aterrado.....	59
TABELA 02 – Requisitos para sistemas de neutro isolado	59

LISTA DE SIGLAS

TPI – Transformador de potencial indutivo

TPC – Transformador de potencial capacitivo

TC – Transformador de corrente

PLC – *Power Line Carrier*

CSF – Circuito supressor de ferro-ressonância

FCR – Fator de correção de relação

RTP_r – Relação de transformação real

FCR_r – Fator de correção de relação real

RTP – Relação de transformação de potencial nominal

FCT_p – Fator de correção de transformação

FCR_p – Fator de correção de relação de transformação

TP – Transformador de potencial

μs – Microssegundos

NBR – Norma Brasileira

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

IEC – *International Electrotechnical Commission*

V – Volts

Wb/m² – Weber por metro quadrado

1. INTRODUÇÃO

O sistema de potência pode ser dividido em três classes: geração, transmissão e distribuição de energia. No Brasil, a transmissão de energia é caracterizada entre os níveis de tensão de 138 kV a 800 kV, onde a mesma engloba desde o último ponto da unidade geradora até as subestações de distribuição de energia.

Com valores tão elevados de tensão e corrente, surge-se a necessidade de fazer medições para garantir a confiabilidade do sistema e também para poder mensurar a quantidade de energia que está sendo utilizada. Para essa tarefa, são utilizados os transformadores de instrumentos.

Esses transformadores são construídos para abaixar o nível da variável medida a certo ponto que não se tenha a necessidade de fabricar um medidor com classe de isolamento para esses valores elevados de tensão e corrente. Os transformadores utilizados para medir corrente são os transformadores de corrente e os transformadores para medir tensão são os chamados transformadores de potencial, sendo esse dividido ainda em transformador de potencial indutivo e capacitivo.

Por padrão, geralmente se encontra nos secundários desses transformadores um mesmo valor de corrente e tensão. Nos transformadores de corrente normalmente esse valor é de 5 ampères e nos transformadores de potencial, 115 ou $115/\sqrt{3}$ volts.

Assim como qualquer componente que faz parte de uma subestação, esses transformadores estão sujeitos a vários fenômenos transitórios e surtos, que os levam a condição de falha temporária ou até, em casos mais graves a um dano permanente no equipamento. Um exemplo desses transitórios é a ferro-ressonância.

Para análise do comportamento da ferro-ressonância em transformador de potencial capacitivo, é realizado um ensaio elétrico com a finalidade de verificar o efeito das oscilações de ferro-ressonância nesse equipamento.

1.1 Motivação

Diante do exposto, a motivação do presente estudo deve-se ao fato de que foi apresentada uma demanda da realização do ensaio de ferro-ressonância em transformador de potencial capacitivo no CEPEL. Como esse ensaio não era

realizado há certo tempo, houve o interesse em realizar essa pesquisa visando buscar conhecimentos técnicos para executar o ensaio de forma adequada.

Esse estudo contribuiu para que o ensaio de ferro-ressonância em transformador de potencial capacitivo possa fazer parte do escopo de atividades do laboratório de alta tensão, AT1, do CEPEL.

1.2 Justificativa

Sabendo da carência de material nacional que trata do fenômeno da ferro-ressonância em transformador de potencial capacitivo, este trabalho buscou disseminar essa área do conhecimento para facilitar a vida de pessoas que trabalham na área de elétrica de potência e também buscou uma ampliação do conhecimento nesse segmento.

1.3 Objetivos

Sabendo da importância de se ter um conhecimento mais aprofundado sobre o funcionamento do transformador de potencial capacitivo e o que acontece com ele durante o instante de ferro-ressonância, os objetivos deste trabalho são:

- Explicar o funcionamento interno do transformador de potencial capacitivo, assim como sua função no sistema elétrico de potência;
- Apresentar o fenômeno de ferro-ressonância, suas causas e métodos de atenuação;
- Mostrar como é realizado o ensaio de ferro-ressonância em transformador de potencial capacitivo e fazer todo o levantamento necessário de instrumentação, normas e padrões necessários para executar o procedimento.
- Mostrar os requisitos necessários para aprovação do transformador de potencial capacitivo a ser ensaiado.

2. TRANSFORMADOR DE POTENCIAL

Os transformadores de potencial têm como principais funções abaixar a tensão da rede para um nível menor para enviar essa informação para medidores de energia e dispositivos de proteção. Sua característica construtiva permite que os instrumentos que são ligados no secundário não necessitem de serem fabricados com um nível de isolamento elevado. Esses transformadores geralmente alimentam equipamentos de elevada impedância, tais como voltímetros, relés de tensão e medidores de energia (MAMEDE FILHO, 2013).

Os transformadores de potencial possuem duas classificações de acordo com nível de tensão em que foi fabricado. Normalmente para tensões abaixo de 138 kV são utilizados os transformadores de potencial indutivo, e acima desse valor são utilizados os transformadores de potencial capacitivo. Ambos em sua forma construtiva mais simples, encontra-se em seus terminais secundários tensões padronizadas, geralmente de 115 V e $115/\sqrt{3}$ V, podendo ser um valor ou outro, ou ainda existir terminais secundários com derivação, onde será encontrado os dois valores simultaneamente.

O que faz ser utilizado os transformadores de potencial capacitivo a partir da classe de 138 kV, é basicamente o custo de fabricação. A fabricação do transformador de potencial indutivo a partir desse valor não compensa, devido ao aumento do número de espiras para manter a densidade de campo magnética desejada, geralmente em torno de $1,6 \text{ Wb/m}^2$, e também com o aumento do valor de tensão a espessura dos fios diminui e aumenta a espessura dos isolamentos, o que aumenta o risco de rompimento dos fios durante o processo de bobinamento.

2.1 Transformador de Potencial Indutivo (TPI)

Os transformadores de potencial indutivo geralmente são utilizados abaixo da tensão de 138 kV. O seu princípio de funcionamento é através da conversão eletromagnética, aplicando uma tensão no terminal primário, de acordo com sua relação de transformação, se obtém uma tensão reduzida no secundário (MAMEDE FILHO, 2013). Um exemplo é se tivermos uma tensão de 138 kV aplicada no primário e a relação de transformação for 1200, fazendo o cálculo de $138000/1200$, obtemos no terminal secundário do TPI a tensão de 115 V.

Os TPIs são divididos em três grupos, de acordo com a NBR 6855, que são os grupos 1, 2 e 3. Os TPIs do grupo 1 são previstos sua utilização para ligação entre fases e são mais comumente utilizados até a classe de 34,5 kV. Já os do grupo 2 e 3 são utilizados para ligação entre fase e terra para sistemas solidamente aterrados e para sistemas onde não se possa garantir o aterramento, respectivamente (MAMEDE FILHO, 2013).

As figuras 1 e 2 mostram um esquema representativo dos transformadores de potencial indutivo dos grupos 1, 2 e 3 respectivamente.

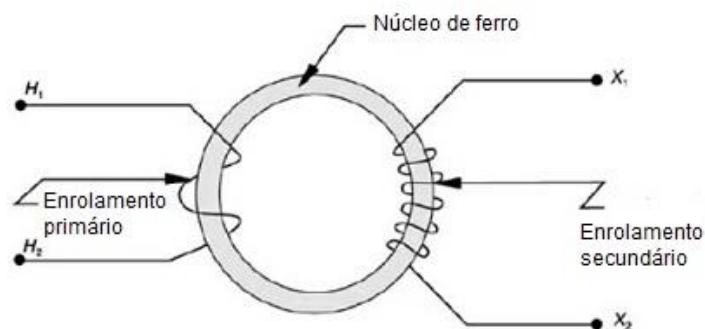


Figura 1–Transformador de potencial grupo 1
Fonte: Mamede Filho (2013).

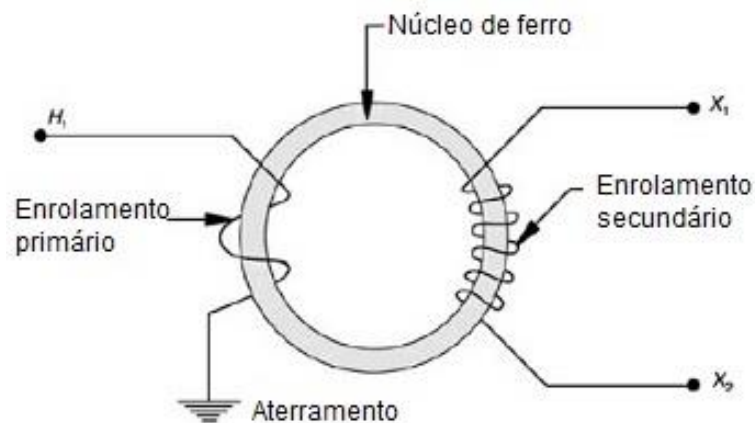


Figura 2–Transformador de potencial grupos 2 e 3
Fonte: Mamede Filho (2013).

2.2 Transformador de Potencial Capacitivo

Os transformadores de potencial capacitivo tem sua construção baseada basicamente na junção de uma associação de capacitores em série formando o

divisor capacitivo, que tem a função de reduzir a tensão a certo nível pré-determinado para alimentar a unidade eletromagnética e também para utilização do sistema PLC (*Power Line Carrier*). A unidade eletromagnética ou parte ativa é onde se encontra o transformador de potencial indutivo e outros elementos ativos, como o reator de compensação e o circuito supressor de ferro-ressonância, a figura 3 ilustra bem o equipamento.

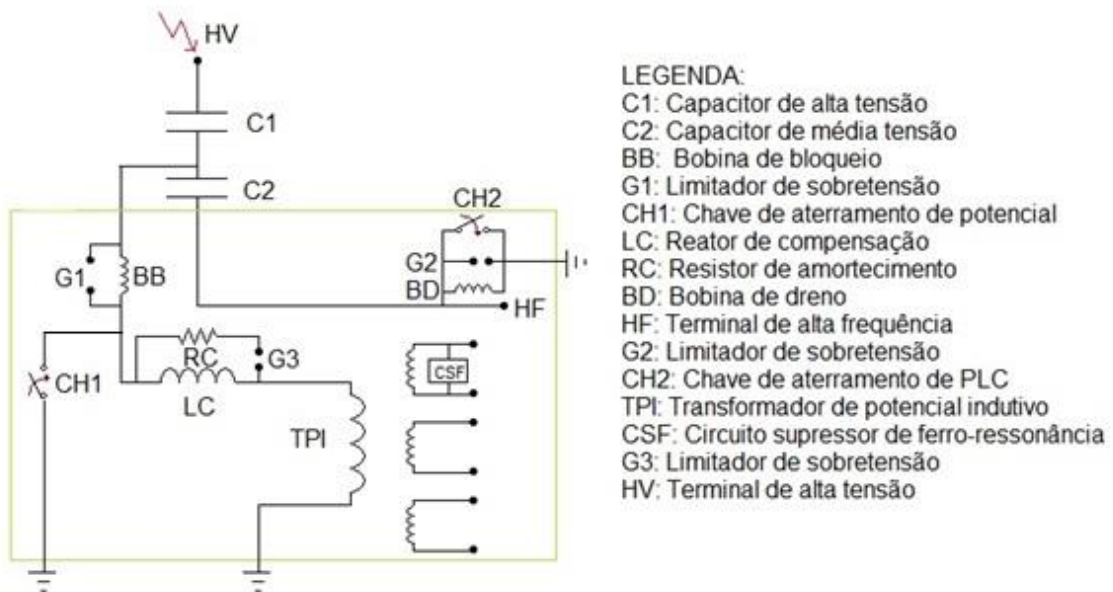


Figura 3 – Transformador de potencial capacitivo

Fonte: Autor.

Como pode ser visualizado na figura 3, o divisor capacitivo tem sua ligação realizada entre fase-terra. No ponto intermediário entre C1 e C2 sai a alimentação para a unidade eletromagnética, nela alimenta-se o transformador de potencial indutivo, que o referido terá nos seus terminais secundários a tensão final no valor de 115 V ou $115/\sqrt{3}$ V. Em série com o transformador de potencial indutivo se encontra o reator de compensação, que tem a função de compensar a defasagem do ângulo da tensão entre o secundário e o primário do TPC.

Ainda na unidade eletromagnética se encontra o terminal de alta frequência que serve de ponto de acoplamento para o sistema PLC (*Power Line Carrier*) e também o circuito supressor de ferro-ressonância que é alimentado por um dos terminais secundários do TPC, em alguns casos existe terminal exclusivo para alimentar o CSF ou pode ser alimentado por um mesmo secundário que alimenta alguma carga.

A não ser pela classe de exatidão, os transformadores de potencial são diferenciados apenas pelo tipo de serviço que são utilizados, que podem ser medição ou proteção (MAMEDE FILHO, 2013).

2.2.1 Características elétricas

O transformador de potencial capacitivo possui algumas particularidades sobre suas características elétricas. Podem-se citar dois erros particulares que ocorrem no equipamento ao reproduzir a tensão do circuito primário no secundário, que são os erros de relação de transformação e o erro de ângulo de fase.

O erro de relação de transformação é registrado quando ocorre medição de tensão com o TP. Acontece que o valor de tensão secundário multiplicado pelo fator de relação de transformação não reproduz exatamente o valor de tensão do primário. Para corrigir esse erro, utiliza-se o fator de correção de relação (FCR). Para se encontrar a relação de transformação real (RTP_r), multiplica-se o fator de correção de relação real (FCR_r) com a relação de transformação de potencial nominal (RTP) (MAMEDE FILHO, 2013).

$$FCR_r = \frac{RTP_r}{RTP} \quad (1)$$

O erro de ângulo de fase é o ângulo γ que mensura a defasagem entre a tensão vetorial primária e a tensão vetorial secundária de um transformador de potencial (MAMEDE FILHO, 2013). Esse cálculo é representado pela equação 2 abaixo.

$$\gamma = 26 \times (FCT_p - FCR_p) \quad (2)$$

Onde FCT_p é o fator de correção de transformação e o FCR_p é o fator de correção de relação de transformação.

2.2.2 Classes de exatidão

Segundo a NBR 6855, os transformadores de potencial podem apresentar as classes de exatidão 0,1; 0,3; 0,6 e 1,2. Para a classe de exatidão 0,1, os

transformadores de potencial são utilizados em laboratórios ou em algum outro ambiente que necessite de precisão elevada. Os transformadores de classe de exatidão 0,3 são utilizados para o serviço de faturamento, já para a classe 0,6 os transformadores são utilizados para fornecer informações a equipamentos de proteção, e, finalmente para a classe de exatidão 1,2 os TPs são utilizados na medição indicativa de tensão.

2.2.3 Resposta transitória

A norma IEC 61869-5 (2011, p. 10) cita a resposta transitória de um TPC como sendo a fidelidade medida da forma de onda da tensão do circuito secundário, comparada com a forma de onda de tensão no terminal de alta tensão durante condições transitórias.

2.2.4 Divisor capacitivo

O divisor capacitivo de um transformador de potencial capacitivo serve para gerar uma queda de tensão entre os capacitores C1 e C2, onde em seu terminal intermediário de tensão sairá a alimentação para a unidade eletromagnética do equipamento. A principal justificativa de se utilizar o divisor capacitivo é que o mesmo não dissipa potência ativa. Para essa função caso fosse utilizado um divisor resistivo, os resistores utilizados para essa função deveriam ter um alto fator de dissipação de potência ativa, o que geraria bastantes perdas no circuito por aquecimento.

O capacitor C1 é onde ocorre a maior queda de tensão do divisor capacitivo, de acordo com a IEC 61869-5 (2011, p. 11) C1 é o capacitor de alta tensão que é conectado entre o terminal de alta tensão e o terminal intermediário do divisor.

O capacitor C2 é conectado entre o terminal de tensão intermediária e o terminal de baixa tensão. Através desse capacitor que é retirada a tensão que alimenta a unidade eletromagnética do TPC.

Através dos valores de C1 e C2 e o valor de tensão aplicada no terminal de alta tensão do TPC é possível saber qual valor de tensão que é aplicada a unidade

eletromagnética. O cálculo para encontrar a queda de tensão no capacitor C2 é dado pela seguinte equação.

$$V2 = \frac{C2 + C1}{C1} \times V1 \quad (3)$$

Onde:

V2 = Valor de tensão no capacitor C2;

V1 = Tensão aplicada ao terminal de alta tensão do TPC;

C2 = Capacitor de tensão intermediária;

C1 = Capacitor de alta tensão.

É possível perceber através da equação que, se V1 for transferido para o outro lado da equação, a referida terá agora a seguinte forma.

$$\frac{V2}{V1} = \frac{C2 + C1}{C1} \quad (4)$$

Onde, agora é possível obter a relação de tensão do divisor capacitivo.

2.2.5 Unidade eletromagnética do TPC

A IEC 61869-5 (2011, p. 13) se refere à unidade eletromagnética como um componente do transformador de potencial capacitivo conectado entre o terminal de tensão intermediária do divisor capacitivo e terra.

Os componentes principais da unidade eletromagnética são o transformador de potencial indutivo que reduzirá o valor de tensão intermediária ao valor de tensão requerido nos terminais secundários, 115 V ou $115/\sqrt{3}$, e o reator de compensação de fase LC.

2.2.6 Reator de compensação de fase

A indutância ou reator de compensação de fase, como o próprio nome já diz serve para reduzir ao máximo a diferença fasorial entre os ângulos da tensão

aplicada ao terminal de alta tensão do TPC e o ângulo da tensão secundária. Essa indutância geralmente é encontrada entre o terminal de tensão intermediária e o terminal primário do TPI, ou também pode estar conectado entre o terminal do enrolamento primário do TPI que seria conectado a terra, e o terminal de terra da unidade eletromagnética.

A IEC 61869-5 (2011, p. 13) diz que a reatância da indutância de compensação deve ser aproximadamente igual a reatância capacitiva, em frequência nominal, dos dois capacitores C1 e C2 do divisor capacitivo conectados em paralelo. O valor do indutor de compensação pode ser calculado através da equação 5.

$$L = \frac{1}{(C1 + C2)(2\pi fr)^2} \quad (5)$$

Onde:

L = Valor da indutância de compensação;

C1 = Capacitância do capacitor de alta tensão;

C2 = Capacitância do capacitor de tensão intermediária;

fr = Frequência nominal do equipamento.

2.2.7 Tensões nominais

Os transformadores de potencial para sua fabricação devem atender alguns requisitos normativos. Para os requisitos de tensão, os TPs devem suportar 10% acima de seu valor nominal, em regime contínuo e sem sofrer nenhum prejuízo no que diz respeito a integridade do equipamento (MAMEDE FILHO, 2013). Para valores de tensão do circuito secundário, por padrão adotam-se os valores de 115 V e $115/\sqrt{3}$, sendo que esses valores podem ser encontrados separados ou simultaneamente no caso em que o terminal secundário possua derivação.

2.2.8 Ensaio para recebimento

Os equipamentos do sistema de potência são submetidos a ensaios para garantir o seu funcionamento adequado em diversas condições que possam vir a ocorrer e também para garantir que as suas características de fabricação estão de acordo com a norma em que foram fabricadas.

Na norma IEC 61869-5 que rege sobre requisitos adicionais para transformadores de potencial capacitivo, é possível encontrar três tipos de ensaios: ensaios de rotina, ensaios de tipo e ensaios especiais.

Os ensaios de rotina são realizados para garantir a qualidade da mão-de-obra e materiais utilizados na construção do equipamento. Alguns exemplos desses ensaios retirados da norma IEC 61869-5 são:

- Tensão suportável a frequência industrial nos terminais primários;
- Medição de descargas parciais;
- Ensaio de precisão;
- Ensaio de rotina para os acessórios de frequência *carrier*.

Os ensaios de tipo são realizados para verificar se o TP é capaz de operar satisfatoriamente nas condições estabelecida por norma (MAMEDE FILHO, 2013). Alguns exemplos de ensaio de tipo são:

- Ensaio de aumento de temperatura;
- Tensão suportável de impulso de manobra;
- Tensão suportável de impulso atmosférico;
- Medição de capacitância e de tangente delta (δ);
- Ensaio de ferro-ressonância;
- Ensaio de resposta ao transitório.

Os ensaios especiais são aqueles realizados para TPs com classe de tensão superior a 138 kV. São exemplos desses ensaios:

- Ensaio de tensão de radio interferência;
- Ensaio de estanqueidade a frio.

2.2.9 O circuito supressor de ferro-ressonância

O circuito supressor de ferro-ressonância tem como única função extinguir o fenômeno conhecido como ferro-ressonância em tempo suficiente que não danifique o próprio TPC e também equipamentos que estão conectados no seu secundário. São conhecidos dois tipos de circuito supressor de ferro-ressonância, o circuito supressor ativo e o circuito supressor passivo.

O circuito supressor de ferro-ressonância ativo, figura 4, é um filtro RLC com associação de um capacitor em paralelo com um indutor e ambos em série com um resistor.

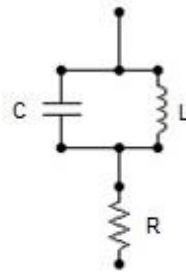


Figura 4 – Circuito supressor de ferro-ressonância ativo
Fonte: Autor.

O circuito supressor de ferro-ressonância passivo consiste em um resistor com um indutor saturável em série R_s e L_s , ambos conectados a um resistor em paralelo R_p , conforme figura 5.

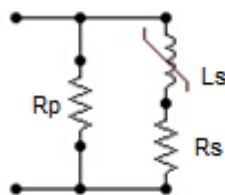


Figura 5 – Circuito supressor de ferro-ressonância passivo
Fonte: Autor

O circuito supressor ativo é mais eficiente na extinção da ferro-ressonância do que o circuito supressor passivo, porém o referido circuito causa uma interferência maior na resposta transitória do TPC (VALVERDE, MAZÓN, *et al*, 2012). Em catálogos de fabricantes como Siemens e General Electric é possível verificar a maior utilização de circuitos supressores passivos.

A alimentação desses circuitos é feita por um dos terminais secundários do TPC, sendo possível ainda a alimentação de uma carga no mesmo terminal, porém projetos mais recentes vêm com um terminal secundário a mais, exclusivo para alimentar o circuito supressor de ferro-ressonância.

2.2.10 O Sistema *Power Line Carrier*

O sistema *power line carrier* é aquele que permite simultaneamente a transmissão de energia elétrica e de dados pelos cabos condutores de energia. Esse sistema consiste na injeção de dados de alta frequência na rede elétrica. Tem ampla utilização para comunicação de voz, transmissão de dados dentro das subestações e o transformador de potencial capacitivo através do seu terminal de alta frequência serve como ponto de acoplamento para utilização desse sistema (SOARES, 2010).

3. DISTÚRBIOS NO SISTEMA DE POTÊNCIA

O sistema de potência necessita de muito estudo para um projeto adequado, como análise de curto-circuito, fluxo de carga e análise de transitórios eletromagnéticos (ARAÚJO; NEVES, 2004).

Apesar de sua operação em regime permanente, em determinados instantes pode haver solicitações de operação em regime de solicitação extrema de tensão ou corrente, são as conhecidas sobretensões e sobrecorrentes.

As sobretensões podem ser geradas internamente ou externamente ao sistema. Um exemplo de sobretensão por ocasião externa é a sobretensão de descarga atmosférica, que é quando um raio atinge a linha de transmissão ou algum outro equipamento dentro da subestação, e uma sobretensão de causa interna que pode ser citada como exemplo é a manobra de uma chave seccionadora ou disjuntor dentro de subestações.

Os sistemas de potência devem estar aptos a suportar distúrbios causados pela abertura ou fechamento de chaves em situações como:

- Alimentação ou desligamento de linhas;
- Ocorrência ou eliminação de faltas;
- Ferro-ressonância.

As sobrecorrentes são causadas internamente no sistema de potência e estão relacionadas com as sobretensões. Os efeitos das sobrecorrentes podem ser tão prejudiciais quanto os da sobretensões (ARAÚJO; NEVES, 2004).

3.1 Sobretensões

As sobretensões tem como definição serem tensões transitórias que possuem como seu valor máximo de crista, um valor superior ao valor normal de operação com o sistema e são variáveis com o tempo.

O principal critério de diferenciação das sobretensões é a origem das mesmas. Elas podem ser classificadas, como dito em 3, de sobretensões de origem externa e sobretensões de origem interna. Para as de origem externa, pode-se citar a principal causa, as descargas atmosféricas, e para as sobretensões internas

podem-se citar ocasiões como manobra de disjuntores e curtos-circuitos em equipamentos.

De acordo com o grau de amortecimento e o seu tempo de duração, pode haver duas classificações para as sobretensões, que são elas as sobretensões impulsivas ou sobretensões oscilatórias (ARAÚJO; NEVES, 2004).

As sobretensões ainda podem ser classificadas também em outras três diferentes categorias:

- Sobretensão atmosférica;
- Sobretensão de manobra;
- Sobretensão temporária.

O conhecimento de cada tipo de sobretensão é extremamente necessário para a especificação de equipamentos e fornece subsídios para as empresas de energia, o que impacta diretamente na qualidade da energia transmitida.

3.1.1 Sobretensão atmosférica

As sobretensões atmosféricas podem ser sobretensões fase/terra ou fase/fase, possuem em sua forma de onda, um tempo bem rápido de propagação, em torno dos μs para o tempo de subida e algumas dezenas de μs para o tempo de descida.

Segundo Araújo e Neves (2004, p. 43) as sobretensões desse tipo, são na sua grande maioria, suficientes para causar falhas em isolamentos em equipamentos e linhas de transmissão, o que pode ter como consequência uma descontinuidade no atendimento a clientes.

Esse tipo de sobretensão possui dois tipos de interação com o sistema de potência, pois são causados por descargas atmosféricas que podem ser dos tipos diretas ou indiretas. As descargas do tipo diretas ocorrem quando os raios atingem as linhas de transmissão, para-raios ou algum outro equipamento, já as descargas indiretas ocorrem quando o raio atinge locais próximos a torres de transmissão ou subestações, por exemplo. Nesse tipo de descarga indireta, as sobretensões aparecem principalmente pelo efeito da indução.

Essas descargas atmosféricas devem ser analisadas com bastante cautela, pois as mesmas podem causar além de interrupção na transmissão de energia, que podem ser temporárias ou definitivas, danos em equipamentos de alta tensão e também podem danificar equipamentos de baixa tensão, com alimentação de 380, 220 ou 127 V, ainda mais atualmente que cada vez mais dentro das residências encontram-se equipamentos eletroeletrônicos sensíveis a esses fenômenos.

3.1.2 Sobretensão de manobra

De acordo com Araújo e Neves (2004, p. 59), as sobretensões de manobra acontecem sempre que há a necessidade de alguma mudança de topologia no sistema de potência. Essas manobras são realizadas por chaves seccionadoras ou disjuntores.

Quando a manobra é realizada por uma chave seccionadora, pode estar ocorrendo alguma mudança na topologia do sistema de transmissão ou uma simples energização ou desligamento de alguma carga. Quando ocorre alguma sobretensão de manobra envolvendo disjuntor pode ser devido a algum curto-circuito que ocorreu onde houve a necessidade da atuação do sistema de proteção.

Um exemplo bem descritivo de como ocorre uma sobretensão de manobra segundo Araújo e Neves (2004, p. 60) é, quando devido a um nível de poluição excessivo em um isolamento de um equipamento ou por uma descarga atmosférica ocorre uma disrupção e conseqüentemente o disjuntor atua no desligamento e automaticamente ele religa, primeira ocorrência de sobretensão de manobra, se não ocorrer mais nenhum problema, o sistema volta a operar normalmente, mas se durante o religamento ocorrer um curto-circuito o disjuntor irá desligar novamente, porém de forma definitiva agora. Nesse caso citado em cima pode-se verificar sobretensão de manobra devido à falta original, no religamento automático do disjuntor e em caso de um novo curto-circuito após o religamento automático.

3.1.2.1 Manobra envolvendo transformadores

No processo de manobra envolvendo transformadores, mesmo com o circuito totalmente desconectado, alguma corrente ainda flui no equipamento. Essa corrente também passa pelas capacitâncias do enrolamento do equipamento, o que leva ao

equipamento o fenômeno da ressonância e conseqüentemente ao aparecimento de sobretensão nos terminais do equipamento. A figura 6 ilustra o caso.

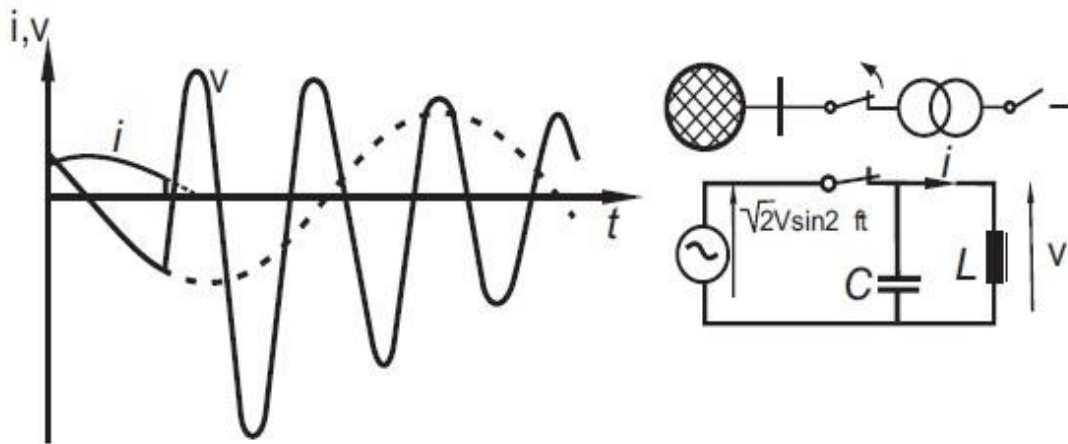


Figura 6 – Manobra envolvendo transformador
Fonte: Araújo e Neves (2004).

Na figura 6 é possível observar o que ocorre claramente. Acontece que, segundo Araújo e Neves (2004, p. 65), no momento da manobra, a energia magnética remanescente na indutância do transformador é transferida para a capacitância do equipamento como energia elétrica e no momento do religamento essa energia descarrega no circuito, o que leva ao equipamento atingir sua frequência de ressonância, que normalmente é bem próxima a sua frequência de operação, e ao aparecimento de sobretensão. Essas sobretensões podem danificar o equipamento. Como medida de proteção pode ser utilizado para-raios para limitar esse valor de sobretensão.

3.1.3 Sobretensão temporária

Pode-se definir como sobretensão temporária, a sobretensão que ocorre entre fase/terra ou fase/fase, que possui uma duração relativamente longa e é oscilatória (ARAÚJO; NEVES, 2004).

Outra característica importante desse tipo de sobretensão é que elas são fracamente ou quase não amortecidas. Como exemplo de sobretensão temporária, pode-se citar:

- Manobras;

- Curto-circuito monofásico;
- Fenômenos não lineares (Ferro-ressonância).

Outras características desse tipo de sobretensão são amplitude, geralmente menor do que outros tipos de sobretensão, frequência de oscilação e o seu tempo de duração, que fica em torno dos milissegundos.

3.2 Sobrecorrente

Durante o processo de energização de transformadores, a corrente de magnetização pode passar por um processo transitório de sobrecorrente que pode atingir valores bem altos, cerca de 20 vezes o valor da corrente nominal do equipamento. Esse processo, devido essas sobrecorrentes possuírem alto nível de harmônicos, ao encontrarem circuitos ressonantes como dos transformadores, podem gerar valores elevados de tensão e também podem levar a atuação de relés de proteção, situação que é indesejada. (ARAÚJO; NEVES, 2004).

A figura 7 mostra a curva de saturação de certo transformador. Segundo Araújo e Neves (2004, p. 85), por razões econômicas os transformadores trabalham próximo ao joelho da curva de saturação.

Observando a curva de saturação da figura 7, é possível notar que, embora o fluxo máximo possa atingir valores de até duas vezes o fluxo normal de operação, os primeiros picos de corrente no instante da energização podem atingir valores bastante elevados, e situação pior pode ocorrer se houver fluxo remanescente no núcleo do transformador, aí o fluxo máximo pode chegar a atingir valores superiores a duas vezes o fluxo normal de operação. (ARAÚJO; NEVES, 2004).



Figura 7– Curva de saturação de transformador
Fonte: Araújo e Neves (2004).

Para entender melhor esse valor de pico inicial de corrente elevada, a figura 8 exemplifica bem o que ocorre com a forma de onda de corrente durante o processo de energização de um transformador com fluxo remanescente nulo. Ao analisar a figura, é possível verificar que no instante da energização o valor da corrente pode chegar a aproximadamente duas vezes o valor normal da corrente de operação do equipamento.

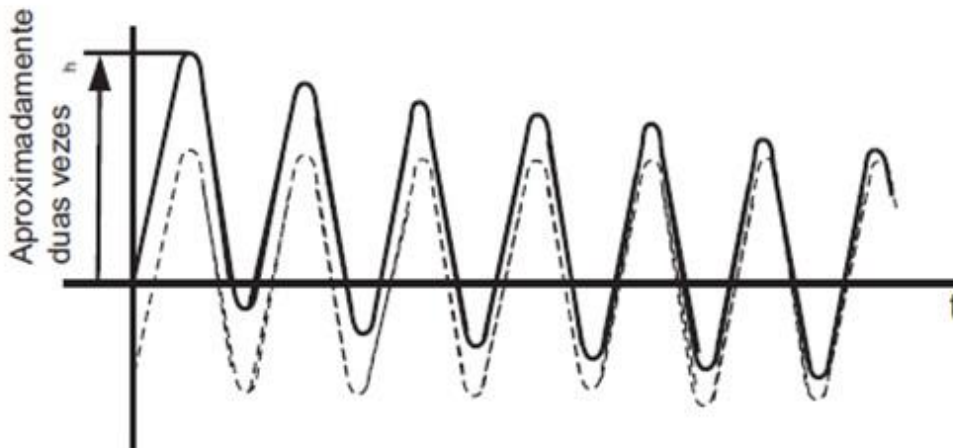


Figura 8– Energização de transformador com fluxo remanescente nulo
Fonte: Araújo e Neves (2004).

3.3 Amortecimento

Elementos capacitivos e indutivos, considerando que os mesmos sejam ideais, por si só não dissipam potência ativa, conseqüentemente para haver uma dissipação de energia é necessário analisar elementos resistivos do circuito.

Ao analisar os circuitos de forma prática, se verifica que os referidos circuitos possuem perdas. Essas perdas nesses circuitos são advindas principalmente da resistência do circuito e de perdas no ferro nos equipamentos. Sejam perdas ou cargas, a dissipação de energia ocorrerá sempre pela inclusão de uma resistência no circuito, o que levará a sempre amortecer as frequências naturais do circuito (GREENWOOD, 1991).

Como exemplo para verificar a função dos resistores no amortecimento de tensões transitórias indesejadas, pode-se verificar a ampla utilização desse elemento em disjuntores de alta tensão e também nos circuitos supressores de ferro-ressonância em transformador de potencial capacitivo.

3.3.1 Utilização de resistores para manobra

Para instantes de manobras em subestações, os disjuntores de potência utilizam no momento da alimentação de cargas os resistores de pré-inserção para amortecer as sobretensões transitórias que ocorrem nesses momentos.

A sua utilização primária em disjuntores modernos é para reduzir as tensões transitórias no instante do fechamento. No passado, eles eram utilizados originalmente durante a abertura. Esses resistores podem servir para cada uma das seguintes situações, em disjuntores de abertura múltipla eles auxiliam na melhor distribuição da tensão de recuperação transitória em cada ponto de abertura do disjuntor, e em outro caso, seu propósito é reduzir a gravidade da tensão transitória no instante da interrupção através da inserção de amortecimento na oscilação que ocorre (GREENWOOD, 1991).

A figura 9 apresenta um desenho esquemático exemplificando como ocorre a inserção do resistor no instante de manobra do disjuntor.

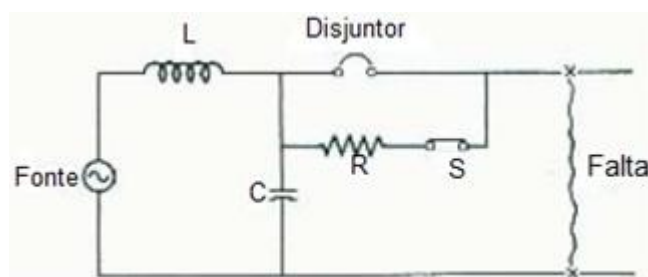


Figura 9 – Desenho esquemático de disjuntor
Fonte: Greenwood (1991).

Segundo Greenwood (1991, p. 80), o elemento L representa a indutância do sistema, o C representa as capacitâncias parasitas que derivam o caminho do disjuntor, e o R representa o resistor de pré-inserção.

Quando ocorre uma falta, após a corrente de falta ter sido propriamente manobrada, o disjuntor terá seus contatos abertos, porém uma corrente residual permanecerá passando pelo resistor R, para ocorrer a interrupção por completo, a chave auxiliar S deve ser aberta. Ocorre caso semelhante durante processo de alimentação de alguma carga, o resistor R entra em paralelo com o disjuntor através da chave auxiliar S para reduzir tensões transitórias que possam vir a ocorrer, e uma

vez que a manobra estiver completa, a chave auxiliar S é aberta, mantendo fechado somente os contatos principais do disjuntor.

3.3.2 Manobra de cargas

Para realizar a manobra de cargas, são utilizados dispositivos de manobra, tais como disjuntor ou chaves seccionadoras, por exemplo.

A função mais frequente desses dispositivos é de alimentar ou desligar cargas, que podem ser representadas de forma geral por um circuito paralelo RL. Cargas com baixo fator de potência possuem características indutivas, e cargas com alto fator de potência são predominantemente resistivas. Quando uma carga indutiva é desligada, a capacitância da carga se torna importante na análise da forma de onda transitória gerada no circuito (GREENWOOD, 1991).

A figura 10 ilustra de forma clara como ocorre uma manobra de uma carga RLC paralelo e a figura 11 mostra a forma de onda de tensão transitória gerada por esse instante de manobra.

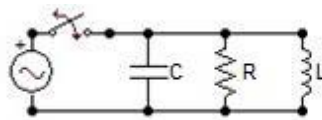


Figura10–Circuito RLC paralelo com dispositivo de manobra
Fonte: Autor.

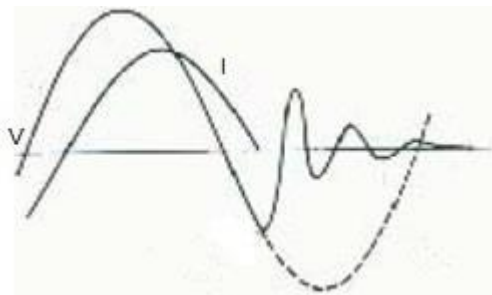


Figura 11– Forma de onda de tensão transitória no instante da manobra
Fonte: Greenwood (1991).

Por meio da figura 10 é possível tirar as seguintes conclusões, quando a chave estiver fechada, o capacitor se carregará até o seu valor de tensão, quando a chave se abrir o mesmo descarregará através do indutor e do resistor gerando a

forma de onda de tensão da figura 11. Segundo Greenwood (1991, p. 85), a figura 11 é descrita como uma forma de onda oscilatória amortecida, e é de fato uma onda cosseno amortecida.

Outra propriedade importante de ser observada é a importância do fator de potência das cargas. Quanto mais próximo do fator de potência unitário, mais a corrente estará em fase com a tensão. No fator de potência unitário, se a tensão for zero, então o valor da corrente também será zero, então nesse caso não haverá transitórios (GREENWOOD, 1991).

3.4 Transitórios de manobra normais e anormais

Situações como manobra em circuitos monofásicos, alimentação de capacitores descarregados e correntes em frequência industrial atingindo até duas vezes o seu valor dependendo do instante da alimentação do circuito são chamados transitórios normais de manobra.

Segundo Greenwood (1991, p. 93), durante a abertura de uma chave em circuitos monofásicos, a tensão de recuperação transitória pode atingir o valor de duas vezes o pico da tensão do sistema. Um capacitor inicialmente desenergizado pode atingir uma tensão similar se energizado no pico do ciclo de tensão do sistema e a corrente de um circuito operando a frequência industrial, pode atingir duas vezes o seu valor rms máximo dependendo do instante em que o circuito for energizado. Esses eventos são considerados por definição transitórios normais de manobra. Já para outras circunstâncias onde há uma energia armazenada no circuito e onde ocorre sua descarga subsequentemente, aí se pode dizer que há um transítório anormal.

3.4.1 Supressão de corrente

Conforme visto no capítulo 3.1.2, referente à sobretensão de manobra, já é de conhecimento que durante esses acontecimentos de mudança de topologia do sistema ou o disjuntor atuando por proteção, o valor da tensão nesse instante pode atingir valores de até duas vezes o valor de operação normal do circuito.

No mesmo instante de manobra, a corrente que passa pelos contatos de um disjuntor, durante a abertura dos mesmos essa corrente não deixa de fluir imediatamente. Segundo Greenwood (1991, p. 93), quando os contatos se separam a corrente continua a circular através de um arco até que ela atinja seu valor zero no período. Os dispositivos de supressão dos disjuntores forçam a corrente a chegar ao seu valor zero de forma mais abrupta e repentina, esse fenômeno é conhecido como corte de corrente ou também pode ser chamado de supressão de corrente. Esse fenômeno pode gerar o que é conhecido como tensão anormal como consequência da liberação da energia magnética associada com a corrente.

3.4.2 Manobra de capacitâncias

A manobra de banco de capacitores é algo frequente em subestações. Operações desse tipo requerem uma atenção especial, pois podem gerar condições perigosas para o circuito. Durante esse processo, caso haja a reignição da tensão durante a abertura, os problemas só tendem a aumentar.

A chance da ocorrência de reignição durante o processo de manobra é bem pouca, porém não deve ser ignorada já que esse tipo de manobra é bem frequente (GREENWOOD, 1991).

A figura 12 mostra um circuito equivalente de como pode ocorrer uma manobra envolvendo capacitâncias, onde o indutor representa a indutância do sistema e o capacitor a capacitância equivalente do circuito.

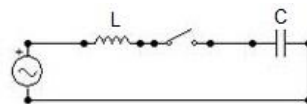


Figura 12– Manobra envolvendo capacitâncias

Fonte: Autor.

Neste caso a corrente está em avanço em relação à tensão em um ângulo de 90° , e considerando que a abertura da chave ocorra no instante em que o valor da corrente seja zero, logo a tensão estará no seu valor de pico e então o capacitor irá reter sua carga. Como consequência disso, a tensão através dos terminais da chave agora será duas vezes o valor da tensão da fonte, o que é perigoso. O que ocorre

que em um sistema onde há capacitor conectado, a corrente que ele demanda, que passa através da indutância do sistema faz com que a tensão do capacitor seja algo maior do que a tensão de circuito aberto do circuito, algo que é referido algumas vezes como efeito Ferranti (GREENWOOD, 1991).

Quando o capacitor é desconectado do circuito, o potencial do lado da fonte do disjuntor reduzirá seu valor, e isso ocorre através de uma oscilação que envolve a indutância do sistema e as capacitâncias parasitas adjacentes ao disjuntor do lado da fonte. A figura 13 mostra a forma de onda quando ocorre essa oscilação.

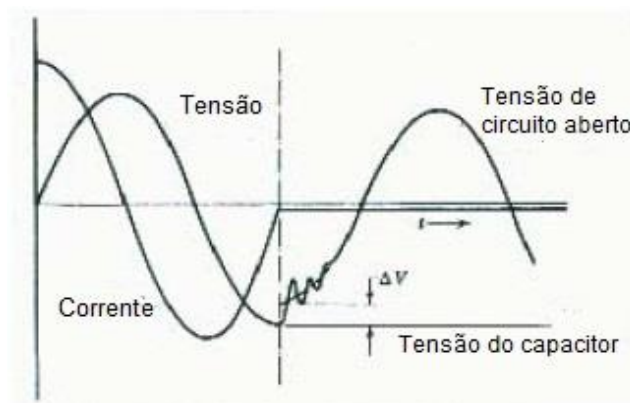


Figura 13—Capacitor sendo desconectado do circuito
Fonte: Greenwood (1991).

3.4.3 Corrente de magnetização *inrush* de transformadores

Já se sabe que o transformador possui características não lineares na sua composição, como por exemplo, sua indutância saturável. Essas propriedades não lineares no circuito são causadores de possíveis anormalidades no equipamento.

A corrente de *inrush* ou corrente de magnetização dos transformadores é um exemplo dessas anormalidades. Em ocasiões normais, essa corrente equivale de 0,5 a 2% da corrente nominal do transformador. Devido aos efeitos de saturação no ferro, essa corrente não possui uma forma senoidal. A distorção causada varia de acordo com a quantidade de fluxo no qual o núcleo é submetido (GREENWOOD, 1991).

Na figura 14 são ilustradas condições de estado-estacionário onde a corrente varia entre +/- I_m de acordo com a variação senoidal do fluxo entre +/- Φ_m e também a curva de histerese gerada nessa ocasião.

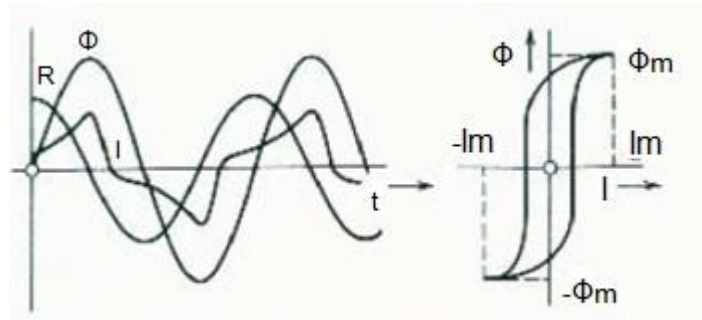


Figura 14 – Fluxo e corrente de magnetização de um transformador
Fonte: Greenwood (1991).

Na figura 15, a curva de histerese é redesenhada e é adicionada ainda a curva de magnetização. Nessa figura são mostrados os vértices da curva de histerese retirados de vários valores de tensão aplicados em estado estacionário.

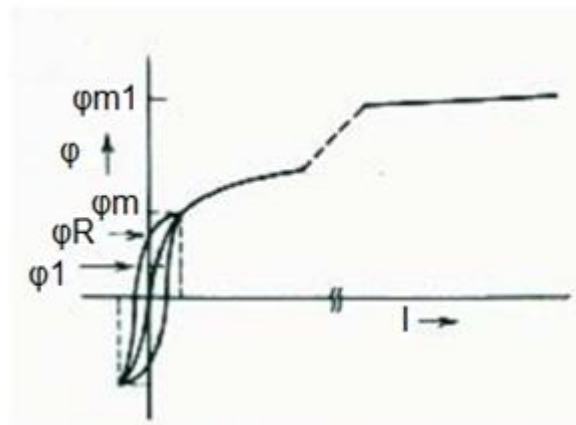


Figura 15 – Curva de histerese e curva de magnetização
Fonte: Greenwood (1991).

É possível verificar na figura 15, uma descontinuidade na escala da corrente. Isto ocorre para mostrar de uma melhor forma condições em que um fluxo muito elevado é necessário.

Segundo Greenwood (1991, p. 114), fica evidente que, de acordo com o aumento da tensão e mais fluxo é demandado do núcleo, a corrente de pico aumenta bruscamente, e isso ocorre devido à saturação no núcleo.

Para analisar o transitório que ocorre quando a tensão é aplicada ao enrolamento do transformador, deve-se retornar ao último instante em que o transformador estava alimentado, mais precisamente ao instante em que ele foi desligado. Na figura 15, é possível notar que, no instante em que a corrente passa

pelo seu valor zero, há um fluxo remanescente $\pm \varphi_R$ no núcleo, que é removido apenas por uma corrente reversa.

De acordo com Greenwood (1991, p. 115), é esperado que um transformador após ser desligado, retenha um fluxo remanescente em seu núcleo, e esse fluxo é normalmente menor que φ_R , porque uma corrente transitória passará pelo enrolamento depois que a corrente cessar no dispositivo seccionador, como consequência do transformador estar descarregando sua própria capacitância.

Supondo que quando o transformador for energizado novamente, a polaridade da tensão seja tal que leve o fluxo a aumentar positivamente. Se, além do que, a onda de tensão aplicada estiver passando pelo zero e aumentando de forma positiva, o fluxo terá que crescer através de um incremento $+\varphi_m$ antes que a tensão de pico seja atingida e novamente φ_m antes que a tensão retorne a zero novamente. Desde que o fluxo começou com um valor inicial $+\varphi_1$, ele terá que atingir φ_{m1} , antes de se inverter. Através da figura 15, é possível verificar que, devido à saturação magnética, uma corrente muito elevada será retirada da fonte.

Durante o próximo semiciclo o fluxo retornará para φ_1 , quando a corrente, apesar de negativa, será menor que o pico normal. Considerando a pior condição para se alimentar um transformador, estatisticamente, condições iguais ou próximas a essa citada acima, tem a mesma chance de ocorrer. Quando essas condições ocorrem, não é incomum que o pico da corrente de *inrush*, atinja várias vezes o valor da corrente nominal de carga no instante da alimentação.

A figura 16 mostra um caso prático, onde um transformador trifásico de 1000 kVA, 13,8 kV, que tem uma corrente de magnetização normal em cerca de 2 A e uma corrente nominal de carga de 42 A, no instante da energização alcance uma corrente de magnetização de cerca de 150 A. A escala do oscilograma mostrado está em 80 A para uma divisão.

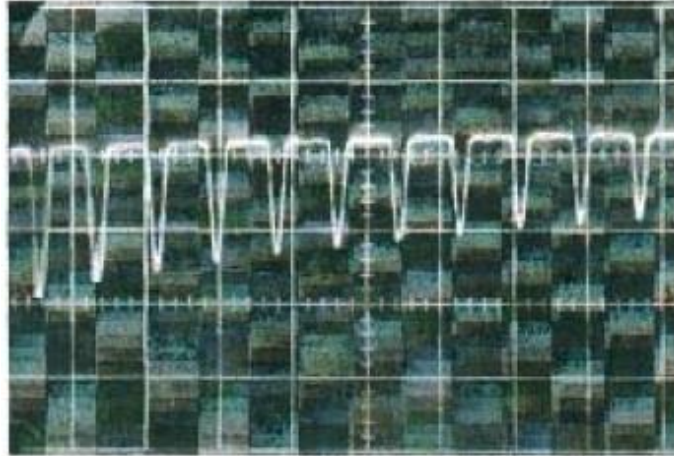


Figura 16– Oscilograma corrente de *inrush* transformador 1000 kVA 13,8 kV
Fonte: Greenwood (1991).

3.5 Ferro-ressonância

A ferro-ressonância pode ser descrita como um fenômeno ressonante não linear que tem a capacidade de afetar os sistemas de potência em geral. Esse termo foi descrito pela primeira vez nas literaturas no ano de 1920 e até hoje apesar de não entendido por completo, ainda desperta curiosidade de pesquisadores da área.

Esse fenômeno possui relações anormais de harmônicos e transitórios ou sobretensões e sobrecorrentes em estado estacionário, que são uma causa frequente de perigo para equipamentos elétricos. Para ser possível a ocorrência da ferro-ressonância deve-se considerar um circuito contendo pelo menos uma indutância não linear (ferromagnética e saturável), um capacitor, uma fonte de tensão (usualmente senoidal) e baixas perdas (FERRACCI, 1998).

Nos sistemas de potência, é possível encontrar uma grande variedade de capacitâncias e indutâncias saturáveis que constituem um circuito com risco de ocorrência de ferro-ressonância. As capacitâncias podem ser atribuídas a capacitâncias de linhas longas, em disjuntores onde existem os capacitores equalizadores de potencial e em transformadores de potencial capacitivo, onde existe a associação de um divisor capacitivo com um transformador de potencial indutivo. As indutâncias não lineares e saturáveis são atribuídas a transformadores de potência, transformadores de potencial indutivo, reatores de derivação entre outros.

No estudo desse fenômeno, segundo Ferracci(1998, p. 4) é possível encontrar mais de uma resposta em estado estacionário para uma mesma configuração de parâmetros do sistema. As principais causas relacionadas ao surgimento da ferro-ressonância são sobretensões atmosféricas, energização e desenergização de transformadores, ocorrência ou remoção de faltas e rejeição de cargas.

Nas operações de energização de transformadores e rejeição de cargas, por exemplo, ocorre a saturação dos transformadores em condição de regime permanente, nesse caso a componente fundamental da tensão cria um fluxo que satura o núcleo do transformador. Essa saturação gera formas de onda com distorções harmônicas que são introduzidas na rede. Esse aumento de tensão que pode ocorrer é mais provável em rejeições de carga do que em energização de transformadores (ZANETTA JÚNIOR, 2003).

Outro exemplo prático de circuito que configura a possível aparição de ferro-ressonância é a abertura de um disjuntor que esta inicialmente alimentando um transformador de potencial. Neste caso, após a abertura dos contatos principais do disjuntor, o transformador de potencial continua alimentado pelos capacitores equalizadores de potencial pertencentes ao disjuntor. Isto pode levar o valor de tensão no terminal do transformador de potencial a zero, ou em caso oposto, pode ocorrer uma tensão altamente distorcida com amplitude bem acima do normal, este exemplo é ilustrado na figura 17.

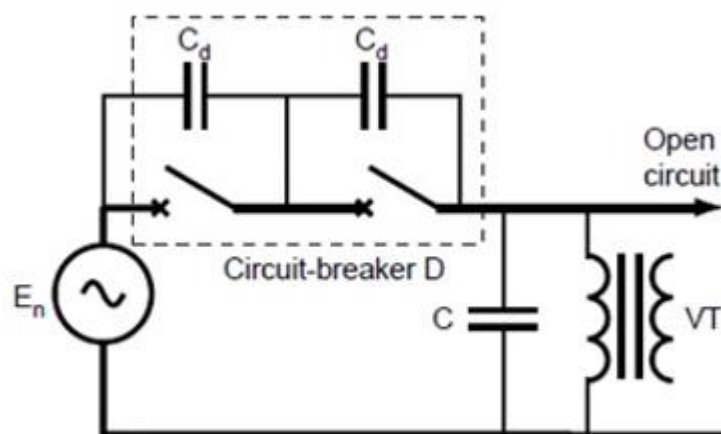


Figura 17–Exemplo de ferro-ressonância em transformador de potencial
Fonte: Ferracci (1998).

Como o sistema elétrico de potência possui bastantes peculiaridades, é necessário bastante atenção na análise de fenômenos que ocorrem nele. O

fenômeno da ferro-ressonância é bem complexo de ser analisado e pode levar a consequências catastróficas (atuação inoportuna de dispositivos de proteção, destruição de equipamentos elétricos como transformadores, entre outros). Com isso se faz necessário a prevenção do fenômeno, e somente através do entendimento, prevenção e identificação do referido, é possível reduzir e eliminar as consequências causadas por ele.

De acordo com Ferracci (1998, p. 5), a ressonância é um fenômeno encontrado nos sistemas de potência em diversas classes de tensões. Esse fenômeno ocorre, citando um circuito prático, em sistemas ressonantes aterrados, que são utilizados para minimizar as correntes de falta para terra em sistemas monofásicos de média tensão. Nesse caso, a ressonância é a principal causadora por destruição térmica ou dielétrica e até de envelhecimento precoce de equipamentos elétricos causados por sobretensões e sobrecorrentes.

A respeito da ressonância, devem ser feitas algumas considerações. Para uma ressonância série em condições senoidais se tem a seguinte equação.

$$U = E \cos(\omega t) \quad (6)$$

A figura 18 mostra um circuito ressonante série com as respectivas tensões dos componentes do circuito.

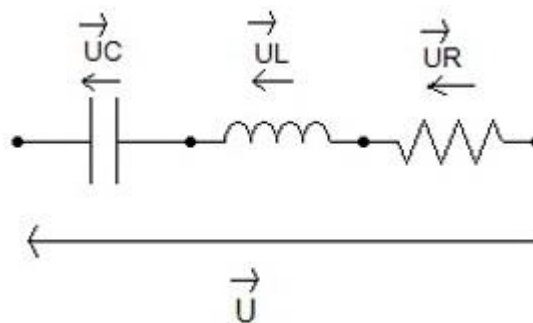


Figura 18– Circuito ressonante série

Fonte: Autor.

Analisando a figura 18, consegue-se verificar que para um circuito ressonante série, existe a seguinte soma vetorial das tensões:

$$\vec{U} = \vec{U}_C + \vec{U}_L + \vec{U}_R \quad (7)$$

Para o caso específico da ressonância, as tensões nos terminais do capacitor e da indutância são compensadas, e então o circuito é dito estar em condição de ressonância (FERRACCI, 1998).

A figura 19 descreve como ocorre essa compensação.

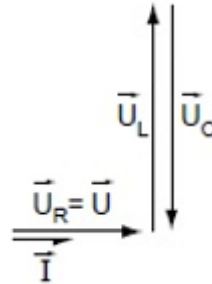


Figura 19– Compensação de tensões em circuito ressonante
Fonte: Ferracci (1998).

A referida ressonância ocorre em uma frequência ωn de acordo com a equação 8:

$$LC\omega n^2 = 1 \quad (8)$$

Para obter o valor de amplitude da corrente no circuito, se utiliza a fórmula da equação 9:

$$I = \frac{E}{R} \quad (9)$$

Para condições ressonantes, a amplitude dessa corrente pode ser bem elevada. A amplitude de tensão nos terminais do capacitor (e da indutância) é igual a $k.E$. Onde k , que é o fator de qualidade, é expresso seguindo a equação 10:

$$k = \frac{L\omega n}{R} = \frac{1}{RC\omega n} \quad (10)$$

Dependendo do valor calculado de k , a amplitude da tensão $U_L (=U_C)$ pode ser menor ou maior que a amplitude E da tensão de excitação U .

A ressonância harmônica acontece quando para determinada condição, a frequência de oscilação ωn coincide com uma frequência de oscilação harmônica $n\omega_0$, onde ω_0 é a frequência do sistema. Essa frequência de oscilação harmônica usualmente é gerada por determinadas máquinas como drives de velocidade

variável, retificadoras estáticas entre outras. Essa ressonância harmônica, se não tratada pode causar danos a equipamentos elétricos (FERRACCI, 1998).

Apesar de possuírem características parecidas, a ferro-ressonância não pode ser confundida com a ressonância propriamente dita, pois certas definições e condições de ocorrência as diferenciam. A seguir serão citadas as principais diferenças entre a ressonância linear e a ferro-ressonância.

3.5.1 Principais diferenças entre ferro-ressonância e ressonância linear

Para a ferro-ressonância, podem-se citar as seguintes características que a diferencia da ressonância linear:

- Possibilidade de ocorrência para uma grande faixa de valores de capacitância (C);
- Frequência das ondas de tensão e corrente pode ser diferente da senoidal da fonte de tensão;
- A existência de várias respostas em estado estacionário para uma dada configuração de circuito e valores dos parâmetros do mesmo. Destacando que entre esses vários estados, um é o estado normal, que é esperado, e os outros estados ditos anormais são os estados que oferecem risco de danificar equipamentos elétricos. Ferracci (1998, p. 5) cita que os fatores determinantes para definir em qual resposta em estado estacionário o circuito vai estar são, condições iniciais do sistema (carga inicial nos capacitores, fluxo remanescente em núcleo de transformadores, momentos de manobra, entre outros.

Através da análise gráfica da resposta em frequência, é possível verificar uma característica bem distinta entre ressonância linear e a ferro-ressonância. A figura 20 mostra os gráficos de fluxo em relação a corrente (φ, i) e corrente em relação a frequência ($I(\omega), \omega$).

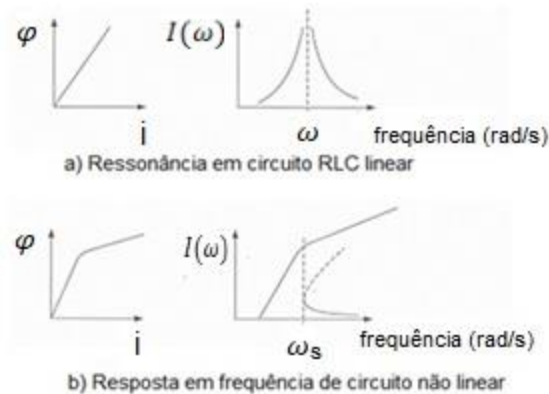


Figura 20–Resposta em frequência de circuito RLC linear e não linear
 Fonte: Zanetta Júnior (2003).

De acordo com Zanetta Júnior (2003, p. 395), a resposta em frequência do circuito com indutor linear, figura 20 letra a, é bem definida. Para a resposta do circuito não linear, apesar de ser possível admitir rigorosamente a resposta em frequência apenas de circuitos lineares, através de uma análise simplificada é verificado que o eixo da frequência é separado em duas regiões através de uma frequência ω_s , que é a chamada frequência de salto.

Para $\omega < \omega_s$, existe apenas um ponto de operação do sistema, e quando ω se torna maior que ω_s , existe mais de um ponto operativo, e assim sendo, pode ocorrer uma mudança substancial no comportamento do circuito, com um salto de um ponto operativo para outro.

A análise desse fenômeno é bem complexa, porém através de uma abordagem física, fica mais bem explicado o que ocorre e posteriormente são descritos os vários modos existentes de ferro-ressonância.

3.5.2 Abordagem física do fenômeno

Uma análise de um circuito RLC não linear, juntamente com a curva de histerese e análise das formas de onda de tensão, corrente e fluxo em função do tempo possibilita aumentar o entendimento de como ocorre o fenômeno da ferro-ressonância.

Segundo Ferracci (1998, p. 6), a análise das oscilações do circuito da figura 21 juntamente com sua respectiva curva de magnetização, ilustra o comportamento específico de ferro-ressonância. Inicialmente as perdas são consideradas

desprezíveis. A curva de magnetização da figura 21 representa a curva de magnetização simplificada de uma bobina com núcleo de ferro. Mesmo considerando essas simplificações feitas, as formas de ondas geradas são típicas de uma ferro-ressonância periódica.

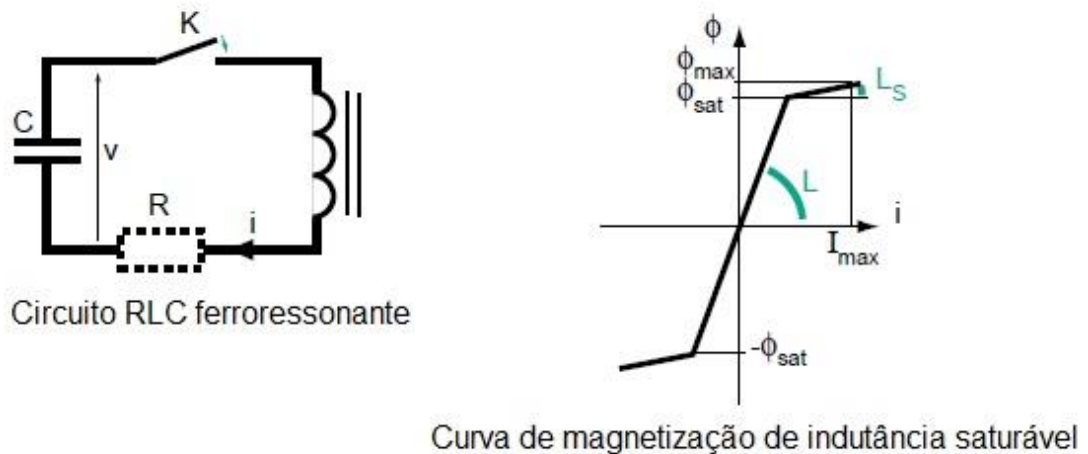


Figura 21 – Circuito RLC ferro-ressonante e curva de magnetização da indutância
Fonte: Ferracci (1998) adaptado pelo autor.

Analisando a curva de magnetização da figura 21, é possível notar que a indutância referida do circuito RLC ferro-ressonante possui dois comportamentos, quando está na região marcada por L o comportamento é do indutor não saturado e quando está em L_s possui um comportamento de um indutor saturado.

Inicialmente considera-se a tensão nos terminais do capacitor igual a V_0 . O circuito é descrito em várias fases seguindo as formas de onda da figura 22. No instante em que a chave k se fecha, é gerada uma corrente percorrendo o circuito oscilando na frequência $\omega_1 = 1/\sqrt{LC}$. O fluxo na bobina e a tensão dos capacitores são expressos de acordo com as seguintes equações:

$$\varphi = \left(\frac{V_0}{V_1}\right) \text{sen}(\omega_1 t); \quad v = V_0 \cos(\omega_1 t) \quad (11)$$

De acordo com Ferracci (1998, p. 6), são feitas as seguintes considerações sobre a análise das formas de onda da figura 22.

- Se $V_0/V_1 > \varphi_{sat}$, no final do instante t_1 , o fluxo φ entra em estado de saturação descrito como φ_{sat} . A tensão v é igual a V_1 e a indutância atinge o

estado saturado L_s . Como L_s é muito menor que L , o capacitor repentinamente se descarrega através da indutância na forma de uma oscilação de uma frequência $\omega_2 = 1/\sqrt{L_s C}$.

- No instante t_2 , o valor do fluxo retorna de φ_{sat} , a indutância reassume o valor L e, já que as perdas foram ignoradas, a tensão v , a qual agora inverte o lado da forma de onda de tensão, assume o valor de $-V_1$.
- No instante t_3 , o fluxo alcança $-\varphi_{sat}$ e a tensão tem o seu valor igual a $-V_2$. Como na prática ω_1 tem seu valor muito pequeno, é considerado que $V_1 \approx V_2 \approx V_0$. Com isso conclui-se que o período T da oscilação é considerado entre $2\pi\sqrt{LC}$ para o período não saturado, e $2\pi\sqrt{L_s C} + 2(t_3 - t_2)$ para o período de saturação. Logo a frequência assume a seguinte faixa de valores:

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} < f < \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C}} \quad (12)$$

Em prática, devido às perdas por resistência R_i^2 (principalmente em cada reversão da tensão), a amplitude da tensão V se reduz ($V_2 < V_1 < V_0$). Desde que a variação de fluxo $\Delta\varphi$ durante o período não saturado ($t_3 - t_2$) é tal que $\Delta\varphi = 2\varphi_{sat} = \int_{t_2}^{t_3} v dt$, a redução de v resulta em uma redução na frequência.

Se as perdas de energia (efeito joule, perdas no ferro, entre outras) são supridas pela fonte de tensão do sistema, a frequência das oscilações, como ela diminui, ela pode se estabelecer na frequência industrial (se a frequência inicial for maior que a frequência do sistema), ou até em um submúltiplo da frequência da fonte (se a frequência inicial for menor do que a frequência da fonte). Essa descrição prova que, diferentemente da ressonância linear, a ferro-ressonância pode ocorrer para uma grande faixa de valores de capacitância, e não apenas para um valor específico de capacitância.

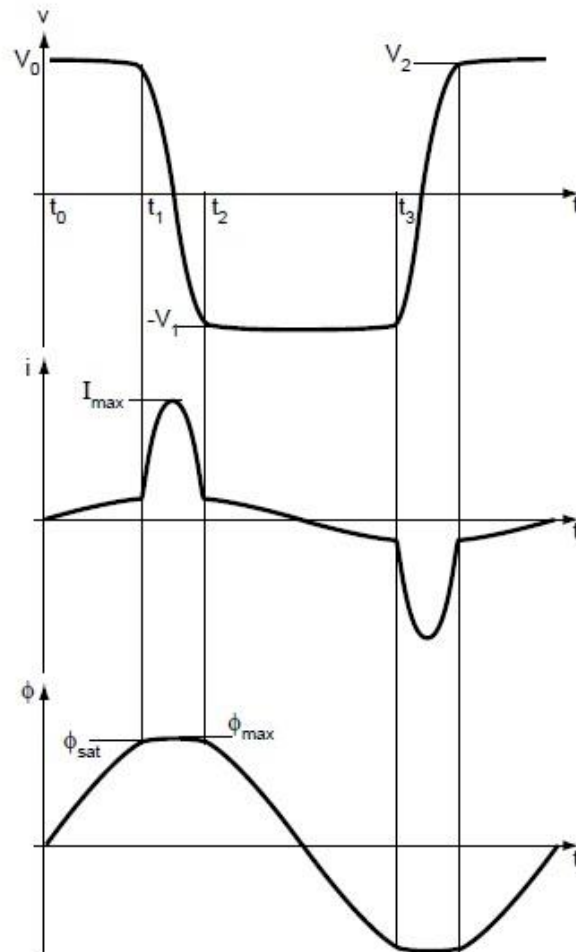


Figura 22– Oscilações livres de um circuito série ferro-ressonante
 Fonte: Ferracci (1998).

3.5.3 Principais Características

Para ampliar o entendimento da análise do fenômeno da ferro-ressonância e conhecer as diferentes respostas em estado estacionário que ela possui, segundo Ferracci (1998, p. 7) através da análise do circuito ferro-ressonante da figura 23 e métodos apropriados de análise, são geradas duas curvas descrevendo mais detalhadamente a frequência de salto e a sensibilidade aos valores de parâmetros do sistema.

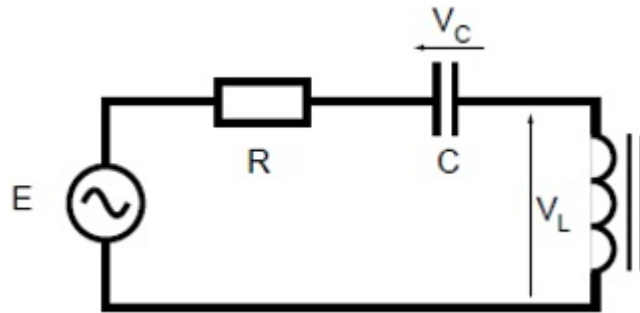


Figura 23–Circuito série ferro-ressonante
Fonte: Ferracci (1998).

A curva gerada na figura 24 descreve a tensão de pico V_L nos terminais da indutância não linear como uma função da amplitude de pico da tensão E da fonte senoidal de tensão. É possível observar analisando a curva que, de acordo com que a tensão E tem seu valor elevado gradualmente, pode-se obter até três tipos de comportamento dependendo do valor de E , assim como também é possível observar de uma maneira mais detalhada a ocorrência da frequência de salto.

Para o primeiro valor de $E=E_1$, é obtida apenas uma solução $M1n$. Essa solução além de ser única, ela é considerada uma solução normal correspondente ao comportamento linear da indutância. Elevando o valor de E , chegando até E_2 , são observadas três soluções, que são $M2n$, $M2i$ e $M2f$. A primeira solução deste ponto E_2 , $M2n$ é considerado o estado normal de operação, já o $M2f$ é associado ao estado ferro-ressonante. Ambos os estados $M2n$ e $M2f$ são estáveis, já para a solução $M2i$, na parte pontilhada da curva corresponde a uma resposta instável e não pode ser obtida na prática.

Quando se chega ao valor de E_2 , a solução do estado normal chega em seu limite e é onde ocorre o salto repentino da tensão V_L do ponto $M2$ para o ponto $M'2$, neste caso esta caracterizado o fenômeno da frequência de salto, onde o ponto $M2$ também é conhecido como ponto limite. Para o último valor analisado $E=E_3$, só há uma solução possível e em estado ferro-ressonante que é a solução $M3f$. Ao se reduzir a tensão a partir de E_3 , a solução se move repentinamente do ponto $M1$ (segundo ponto limite) para $M'1$. A ocorrência da frequência de salto, característica da ferro-ressonância, também pode ser obtida a partir da análise de outros parâmetros do sistema como a resistência ou capacitância (FERRACCI, 1998).

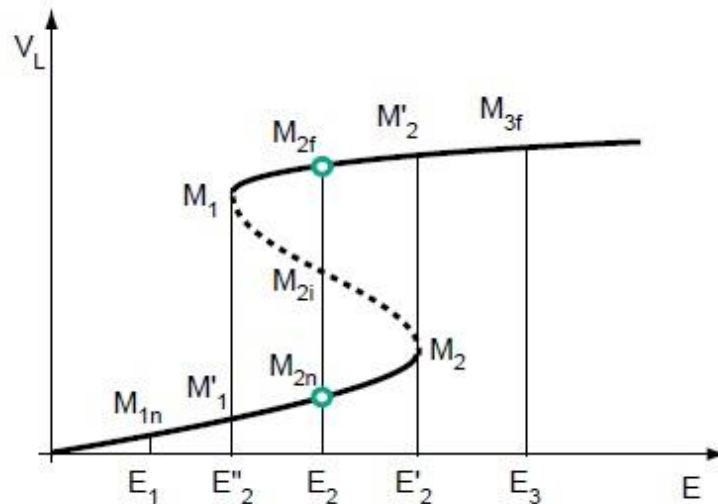


Figura 24–Tensão V_L em função da tensão E da fonte
Fonte: Ferracci (1998).

A partir da análise feita através da curva da figura 24 é possível verificar que pequenas variações em parâmetros do sistema ou ocorrência de transitórios podem levar o circuito a se modificar rapidamente de seu estado normal de operação para o estado ferro-ressonante, condição que é indesejada no sistema de potência.

3.5.4 Modos de ferro-ressonância

Dependendo da condição inicial que o circuito com risco de ferro-ressonância estiver sujeito, existe a possibilidade de diferentes respostas ferro-ressonantes que podem ocorrer. A classificação é baseada na condição de estado estacionário em que o circuito se estabelece.

Segundo Zanetta Júnior (2003, p. 397), enquanto os sistemas lineares possuem regiões de estabilidades bem definidas, os sistemas não lineares possuem um comportamento muito mais diversificado e de análise bem mais complexa, com diversos pontos de equilíbrio, trajetórias fechadas com diferentes regiões de atração. Essas regiões de atração são analisadas através da denominação de atratores.

Existem quatro classificações diferentes para os modos existentes possíveis de ferro-ressonância que são as seguintes:

- Modo fundamental;

- Modo sub-harmônico;
- Modo quase periódico;
- Modo caótico.

A identificação desses modos é feita através da análise de espectro de tensão ou de corrente ou também pode ser realizado através de imagem estroboscópica obtida através da medição da corrente i e da tensão v e plotada no plano v,i os valores instantâneos separados por um período do sistema.

De acordo com Ferracci (1998, p. 9) as classificações dos modos de ferro-ressonância e suas principais características são as descritas em seguida.

O primeiro modo é conhecido como modo fundamental. Nessa categoria a tensão e a corrente ocorrem periodicamente com um período T igual da fonte e possuem uma variada taxa de harmônicos. Observando a figura 25 letra b, é possível verificar a ocorrência da frequência fundamental f_0 advinda da fonte e de seus harmônicos ($2f_0, 3f_0, \dots$). A imagem estroboscópica da figura 25 letra c, é reduzida a um ponto distante removido do ponto representando o estado normal.

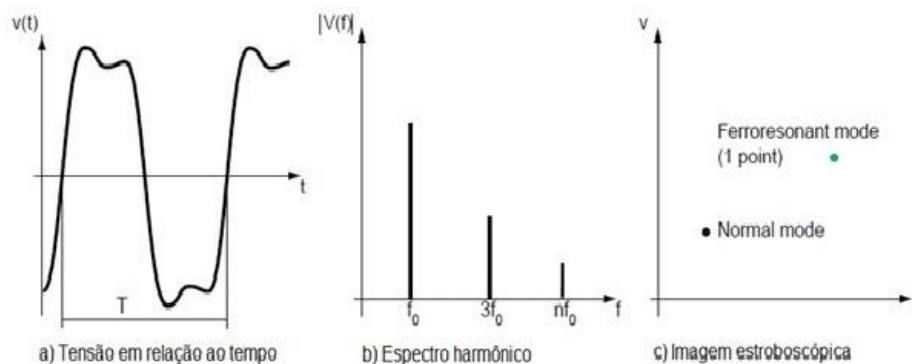


Figura 25– Modo ferro-ressonante fundamental

Fonte: Ferracci (1998) adaptado pelo autor.

O próximo modo a ser analisado é o modo sub-harmônico, visualizado na figura 26. Ferracci (1998, p. 9) cita que o modo sub-harmônico é periódico com um período igual nT , que no caso é um sub múltiplo do período da fonte. Esse modo também é conhecido como estado sub-harmônico n ou sub-harmônico $1/n$. Esse estado ferro-ressonante é usualmente de ordem ímpar e o seu espectro harmônico na figura 27 mostra uma frequência fundamental igual a f_0/n , onde f_0 é a frequência

da fonte e n é um integrador, e seus harmônicos. Uma linha estroboscópica gerada revela n pontos.

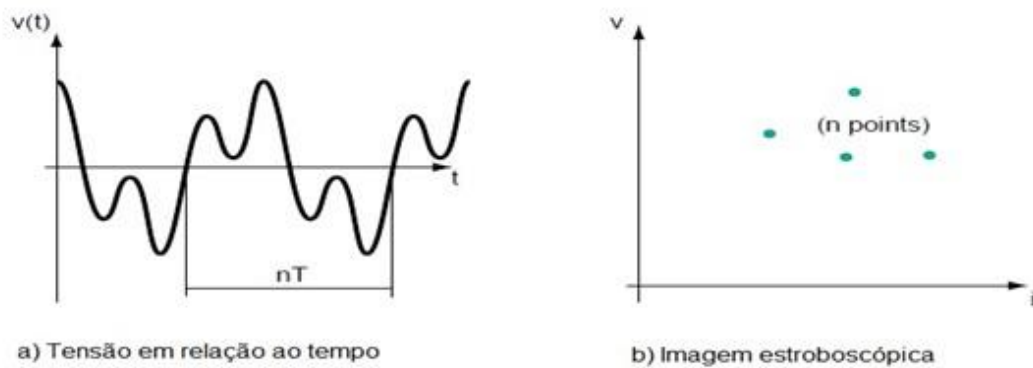


Figura 26 – Modo ferro-ressonante sub-harmônico

Fonte: Ferracci (1998) adaptado pelo autor.

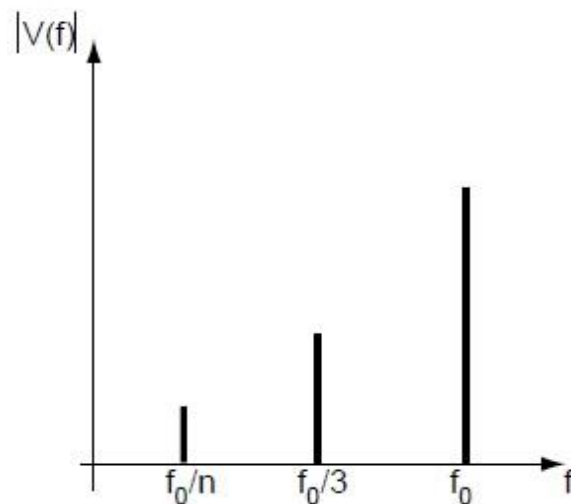


Figura 27– Espectro harmônico

Fonte: Ferracci (1998).

O próximo modo ferro-ressonante analisado é o modo quase periódico. Ele é referido como um estado de ferro-ressonância não periódico e possui um espectro descontínuo, cujas frequências são expressas na forma nf_1+mf_2 (onde n e m são integradores e f_1/f_2 um número real irracional). A imagem estroboscópica gerada mostra uma curva fechada. Essas imagens são mostradas na figura 28.

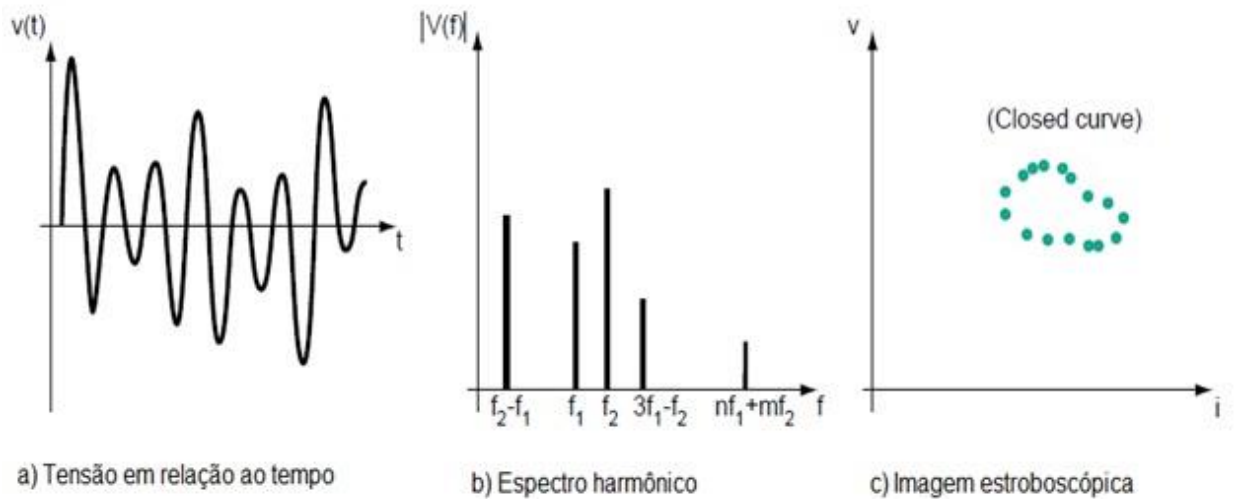


Figura 28 – Modo ferro-ressonante quase periódico

Fonte: Ferracci (1998) adaptado pelo autor.

O último modo de ferro-ressonância definido por Ferracci (1998, p. 9) é o modo caótico, cujo possui um espectro contínuo e onde o mesmo não é cancelado por nenhuma frequência. A imagem estroboscópica gerada é constituída completamente de diversos pontos ocupando uma área no plano v,i , essa área também é definida como atrator estranho. A figura 29 representa o modo caótico.

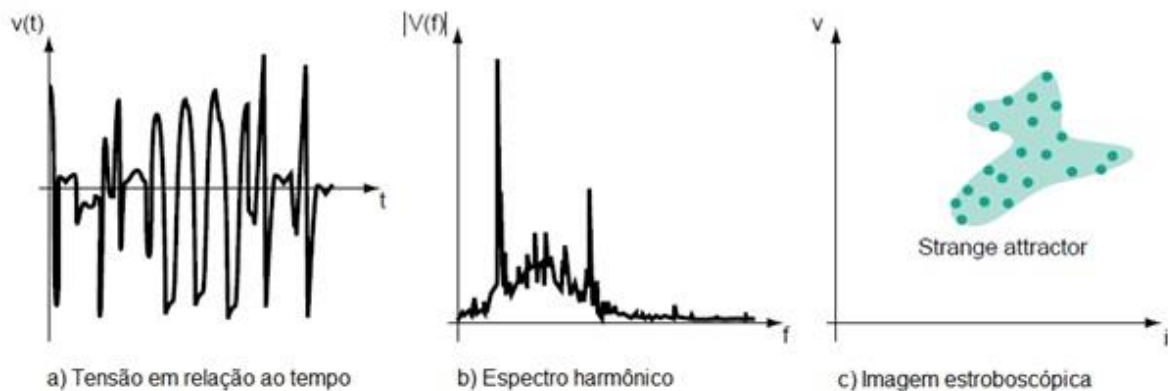


Figura 29 – Modo ferro-ressonante caótico

Fonte: Ferracci (1998) adaptado pelo autor.

Através da análise feita referente aos modos possíveis de ferro-ressonância é possível concluir que esse fenômeno possui uma variada taxa de harmônicos, existem diversas condições de estado estacionário para uma dada configuração, possui também uma sensibilidade a parâmetros e condições iniciais do sistema.

Essas taxas de harmônicos, sobretensões ou sobrecorrentes, incluindo oscilações estáveis ou transitórias causadas pelo fenômeno da ferro-ressonância representam um grande perigo aos equipamentos elétricos.

3.5.5 Métodos de diagnóstico

Para evitar ao máximo os danos causados pela ferro-ressonância, deve-se atentar para a correta identificação do fenômeno. Para isso se faz necessário a identificação dos sintomas mais comuns atribuídas a ele. Os sintomas mais comuns atribuídos a esse fenômeno são:

- Sobretensões permanentes de modo diferencial (fase-fase) ou de modo comum (fase-terra);
- Sobrecorrentes permanentes;
- Aquecimento de transformadores (em operação a vazio);
- Barulho excessivo em transformadores e reatores;
- Deslocamento de neutro;
- Danos a equipamentos elétricos devido a efeito térmico ou rompimento de dielétrico, equipamentos como transformadores de potência, transformadores de potencial entre outros.

Alguns desses sintomas não são atribuídos exclusivamente ao fenômeno de ferro-ressonância. Deste modo deve-se atentar para a configuração do circuito onde está ocorrendo o fenômeno para ver se o referido circuito possui as condições adequadas para a existência do fenômeno.

As principais características de um circuito ferro-ressonante são os citados no tópico 3.5 que é a existência de uma capacitância associada a uma indutância não linear e saturável alimentada por uma fonte senoidal e baixas perdas no circuito.

Outras condições que podem favorecer o surgimento do fenômeno de acordo com Ferracci (1998, p. 10) são a existência no sistema de pelo menos um ponto onde o potencial não está fixo, como exemplo neutro isolado, abertura de fusível em um polo e manobras monofásicas, também equipamentos levemente carregados (transformadores de potência a vazio ou transformadores de potencial) ou fontes com baixa capacidade de curto-circuito.

Analisando esse conjunto de elementos e verificando a inexistência de algumas delas, é bem improvável que o problema ocorrido seja devido a ferro-ressonância.

3.5.6 Soluções Práticas

Existem diversas soluções práticas para evitar o fenômeno de ferro-ressonância e suas consequências que podem ser catastróficas. Dentro dessas soluções diversas serão citados três exemplos que possuem uma grande utilização prática.

De acordo com Ferracci (1998, p. 16) a situação mais favorável de ocorrência de ferro-ressonância é onde ocorre a ligação de transformador de potencial entre fase-terra em sistemas de neutro isolado. Nesta ocasião pode ocorrer uma falta fase-terra no equipamento, o que leva a níveis elevados de sobretensão. Para este caso se fazem necessárias medidas de proteção contra o fenômeno.

Uma das soluções práticas que podem ser tomadas, por exemplo, em caso de utilização de conexão em estrela dos primários com neutro aterrado em um sistema de neutro isolado é usar medidas de projeto para garantir que o núcleo magnético trabalhe em baixo valor de indução, deste modo as sobretensões estarão incapacitadas de iniciar a ferro-ressonância, com pelo menos uma relação de 2 entre a tensão da curva de saturação e tensão nominal.

Outra medida que tem ampla utilização na prática é a inclusão de perdas através de uma ou mais resistências de carga cujo valor é suficientemente baixo para efetivamente amortecer a ferro-ressonância, enquanto que garanta que o consumo total de potência esteja dentro da faixa requerida de acordo com as condições de precisão.

O método a seguir descrito por Ferracci (1998, p. 17) pode ser usado para calcular os valores das resistências de cargas para o caso de um transformador de potencial com um enrolamento secundário.

Um resistor de amortecimento é conectado ao secundário de cada transformador de potencial, se o consumo a jusante do TP não for suficiente. Neste caso os resistores absorvem potência continuamente logo que o TP for energizado. Os valores mínimos para a resistência R de carga e a potência P_r do resistor são:

$$R = \frac{U_s^2}{k P_t - P_m}, \quad P_r = \frac{U_s^2}{R} \quad (13)$$

Onde:

U_s = Tensão secundária nominal;

k = Fator entre 0,25 e 1 tal que as condições de erro e serviço se mantenham dentro dos limites especificados por norma;

P_t = Saída nominal do TP (VA);

P_m = Potência requerida para medição (VA).

A figura 30 mostra um desenho esquemático da resistência de amortecimento conectada ao secundário do transformador de potencial.

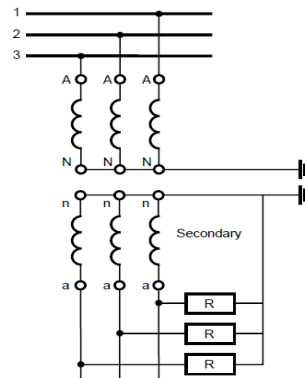


Figura 30 – Dispositivo de proteção contra ferro-ressonância

Fonte: Ferracci (1998).

O último exemplo a ser citado é para o caso de transformadores energizados acidentalmente em uma ou duas fases. As soluções práticas são diferentes do caso de ferro-ressonância em transformador de potencial. Para o caso de energização acidental as soluções consistem na diminuição da capacitância existente entre o disjuntor e o transformador, através da aproximação desses dois equipamentos. Essa aproximação pode ser feita, por exemplo, mudando a localização do cubículo do disjuntor para uma localização a montante do transformador a ser alimentado. Outra medida além da aproximação do cubículo é garantir o fechamento do disjuntor somente quando for certificado que as três fases alimentadoras do transformador estão em operação.

Outros métodos de solucionar o problema de ferro-ressonância para transformadores de potência consistem em evitar a utilização do referido quando ele

estiver entregando uma potência ativa menor que 10% do seu valor de potência nominal aparente, evitar energização a vazio, aterramento sólido do neutro (caso que pode ocorrer permanentemente ou apenas em operações de energização e desenergização para ligações em estrela, que possui neutro disponível).

4. ESTUDO DE CASO - O ENSAIO DE FERRO-RESSONÂNCIA EM TPC

O ensaio de ferro-ressonância em transformador de potencial capacitivo é realizado em laboratórios com capacidade de alimentar o equipamento em sua tensão nominal e em até 1,9 vezes o valor da tensão nominal do equipamento. O objetivo desse ensaio é garantir que o circuito supressor de ferro-ressonância, CSF, esteja apto a extinguir o fenômeno dentro dos tempos estabelecidos por norma. O estudo de caso foi realizado utilizando parâmetros da norma IEC 61869-5.

Através do estudo realizado é possível verificar os equipamentos utilizados para a realização do ensaio, o arranjo de ensaio, as conexões elétricas que devem ser feitas e os resultados esperados e como analisar os oscilogramas gerados.

A IEC 61869-5 (2011, p. 27) define a oscilação transitória de ferro-ressonância pela seguinte fórmula:

$$\hat{\varepsilon} = \frac{\hat{U}_{S(t=TF)} - \frac{\sqrt{2}xU_p}{kr}}{\frac{\sqrt{2}xU_p}{kr}} = \frac{krx\hat{U}_{S(t=TF)} - \sqrt{2}xU_p}{\sqrt{2}xU_p} \quad (14)$$

Essa equação define o erro instantâneo máximo $\hat{\varepsilon}$ após duração de tempo TF .

Onde:

$\hat{\varepsilon}$ é o erro instantâneo máximo;

\hat{U}_s é a tensão secundária (pico);

U_p é a tensão primária (r.m.s.);

U_{pr} é a tensão primária nominal;

kr é a relação de transformação;

TF é a duração de ferro-ressonância.

A norma IEC 61869-5 diz que para qualquer valor abaixo de $FvxU_{pr}$, onde Fv é o fator de tensão nominal e U_{pr} é a tensão nominal primária, e em qualquer carga entre 0 e a carga nominal, após a interceptação de ferro-ressonância no TPC por operações de manobra ou transitórios nos terminais primários ou secundários, as oscilações de ferro-ressonância não devem ser mantidas. O erro instantâneo máximo $\hat{\varepsilon}$ após a duração do tempo TF é dado nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Requisitos para sistemas de neutro efetivamente aterrado

Tensão primária U_p (r.m.s.)	Duração TF da oscilação de ferro-ressonância s	Erro ε após duração do tempo TF %
$0,8.U_{pr}$	$\leq 0,5$	≤ 10
$1,0.U_{pr}$	$\leq 0,5$	≤ 10
$1,2.U_{pr}$	$\leq 0,5$	≤ 10
$1,5.U_{pr}$	≤ 2	≤ 10

Fonte: IEC 61869-5 (2011) adaptado pelo autor.

A tabela 1 descreve os requisitos de ferro-ressonância para sistemas de neutro efetivamente aterrado e a tabela 2 descreve os requisitos para sistemas de neutro não efetivamente aterrado ou sistemas de neutro isolado.

Tabela 2 – Requisitos para sistemas de neutro isolado

Tensão primária U_p (r.m.s.)	Duração TF da oscilação de ferro-ressonância s	Erro ε após duração do tempo TF %
$0,8.U_{pr}$	$\leq 0,5$	≤ 10
$1,0.U_{pr}$	$\leq 0,5$	≤ 10
$1,2.U_{pr}$	$\leq 0,5$	≤ 10
$1,9.U_{pr}$	≤ 2	≤ 10

Fonte: IEC 61869-5 (2011) adaptado pelo autor.

A seguir é apresentado o procedimento de ensaio segundo a *International Electrotechnical Commission*. A IEC 61869-5 (2011, p. 39) cita que o ensaio de ferro-ressonância deve ser feito em um transformador de potencial capacitivo completo ou em seu circuito equivalente. Para a realização do circuito equivalente, o capacitor atual ou capacitores devem ser utilizados.

O ensaio para ser realizado deve ser feito um curto-circuito nos terminais secundários do equipamento por pelo menos 0,1s. O curto-circuito será aberto por um dispositivo de proteção (por exemplo, um disjuntor ou fusível) escolhido para esse propósito em um acordo entre fabricante e cliente. Caso não seja realizado nenhum acordo, o dispositivo de abertura do curto-circuito fica a critério do fabricante.

Se for utilizado um fusível como dispositivo de proteção, o tempo de duração do curto-circuito pode ser menor que 0,1s.

A carga do TPC após a realização do curto-circuito deve ser somente a imposta pelo equipamento de aquisição de dados e não deve exceder 1VA. A tensão da fonte, a tensão nos terminais secundários e a corrente durante o curto-circuito devem ser gravadas. A gravação deve fazer parte do relatório de ensaio.

Durante a realização do ensaio, a tensão da fonte alimentadora não deve diferir mais que 10% do seu valor de tensão antes da ocorrência do curto-circuito e deve se manter com forma de onda substancialmente senoidal. A queda de tensão no laço de curto-circuito (resistência de contato do contator incluída), medida diretamente nos terminais secundários do TPC, deve ser menor que 10% da tensão nos mesmos terminais antes do curto-circuito.

Para a realização do ensaio para sistemas de neutro efetivamente aterrado, deve ser realizado o curto-circuito dez vezes para cada valor de tensão primária de acordo com a tabela 1.

Para a realização do ensaio para sistemas de neutro não efetivamente aterrado ou de neutro isolado, o curto-circuito deve ser realizado dez vezes para cada valor de tensão primária de acordo com a tabela 2.

A figura 31 ilustra como deve ser montado o arranjo do ensaio com todos equipamentos necessários para aplicação de tensão, aplicação de curto-circuito e aquisição de dados.

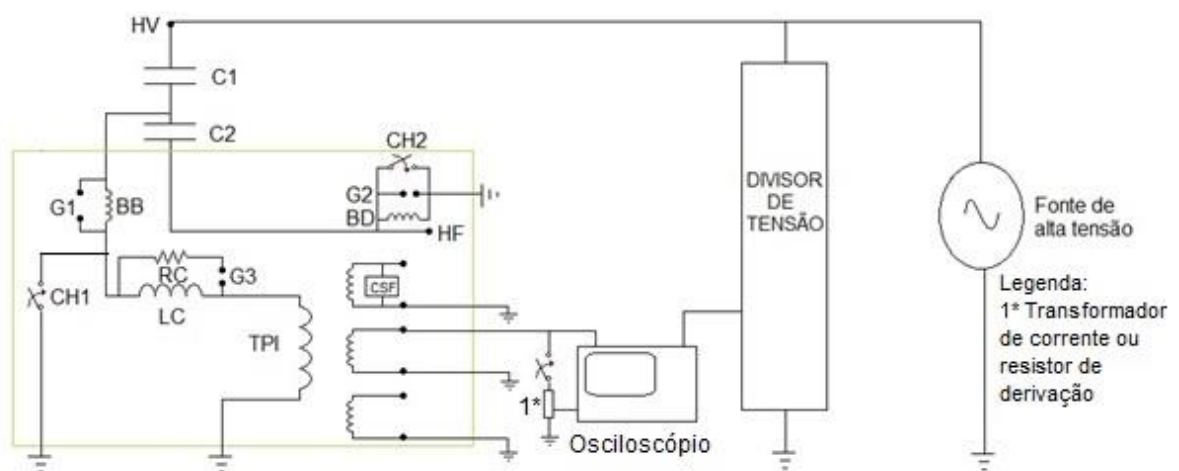


Figura 31– Arranjo de ensaio de ferro-ressonância em TPC

Fonte: Autor.

Analisando a figura 31 é feita a seguinte descrição. O transformador de potencial capacitivo sob ensaio é ligado entre a fonte de alta tensão e terra, posteriormente deve ser realizada a conexão do objeto sob ensaio e o divisor de tensão. Deve-se atentar que a fonte, o objeto sob ensaio e o divisor de tensão devem estar aterrados.

As conexões no TPC são feitas da seguinte maneira, todos os enrolamentos secundários devem ter um de seus terminais conectados em um ponto de aterramento. Após isso, deve ser escolhido um enrolamento secundário no qual será realizado o curto-circuito entre fase-terra de acordo com procedimento de ensaio, esse terminal será conectado a um terminal do dispositivo utilizado para realizar o curto-circuito e, o outro lado do dispositivo deverá ser conectado ao ponto de aterramento.

A aquisição de dados deve ser feita da seguinte forma. A saída do divisor de tensão é conectada a um dos canais do osciloscópio para aquisição de forma de onda de alta tensão, deve ser conectada uma ponta de prova no terminal secundário escolhido para realização do curto-circuito e em seguida conectar essa ponta de prova em um canal do osciloscópio para aquisição da forma de onda de baixa tensão antes e depois da ocorrência do curto-circuito. A aquisição da forma de onda de corrente no instante do curto-circuito pode ser feita através da utilização de um TC tipo janela, ou de um resistor de derivação, a conexão é feita no cabo que estiver conectado na saída do dispositivo de curto-circuito e terra, deve ser observado que a saída do transformador de corrente ou do resistor de derivação deve ser conectada ao osciloscópio.

Após a montagem do arranjo de ensaio e configuração do osciloscópio para aquisição das formas de onda, deve-se elevar o nível de tensão da fonte de acordo com os valores das tabelas 1 ou 2, dependendo do sistema e, após chegar no valor desejado deve ser realizadas as aplicações do curto-circuito.

Ao aplicar o curto-circuito, deve ser realizada a medição do erro da forma de onda de alta tensão e da queda de tensão no dispositivo de curto-circuito para verificar se os valores estão de acordo com exigência da IEC 61869-5, caso estejam dentro dos valores exigidos o ensaio prossegue. Após a aplicação do curto-circuito deve ser realizada medição do tempo de duração de ferro-ressonância na forma de onda dos terminais secundários e verificar se estão de acordo com os valores das tabelas 1 e 2.

Após a realização do ensaio, deve ser realizado relatório contendo todas as informações pertinentes e contendo informação se o item ensaiado obteve ou não bom desempenho no ensaio.

A figura 32 ilustra de forma generalizada a montagem do arranjo de ensaio, onde é possível ser observada as conexões entre fonte de tensão, divisor de tensão e o transformador de potencial em ensaio. Essa foto foi tirada em um treinamento do ensaio de ferro-ressonância em TPC no CEPEL na unidade Fundão.



Figura 32– Arranjo de ensaio de ferro-ressonância em TPC

Fonte: Autor.

A figura 33 mostra como é feita as conexões no osciloscópio para ser possível a aquisição das formas de onda da fonte de alta tensão, da onda de baixa tensão antes e após o curto-circuito e da forma de onda de corrente no instante do curto-circuito.

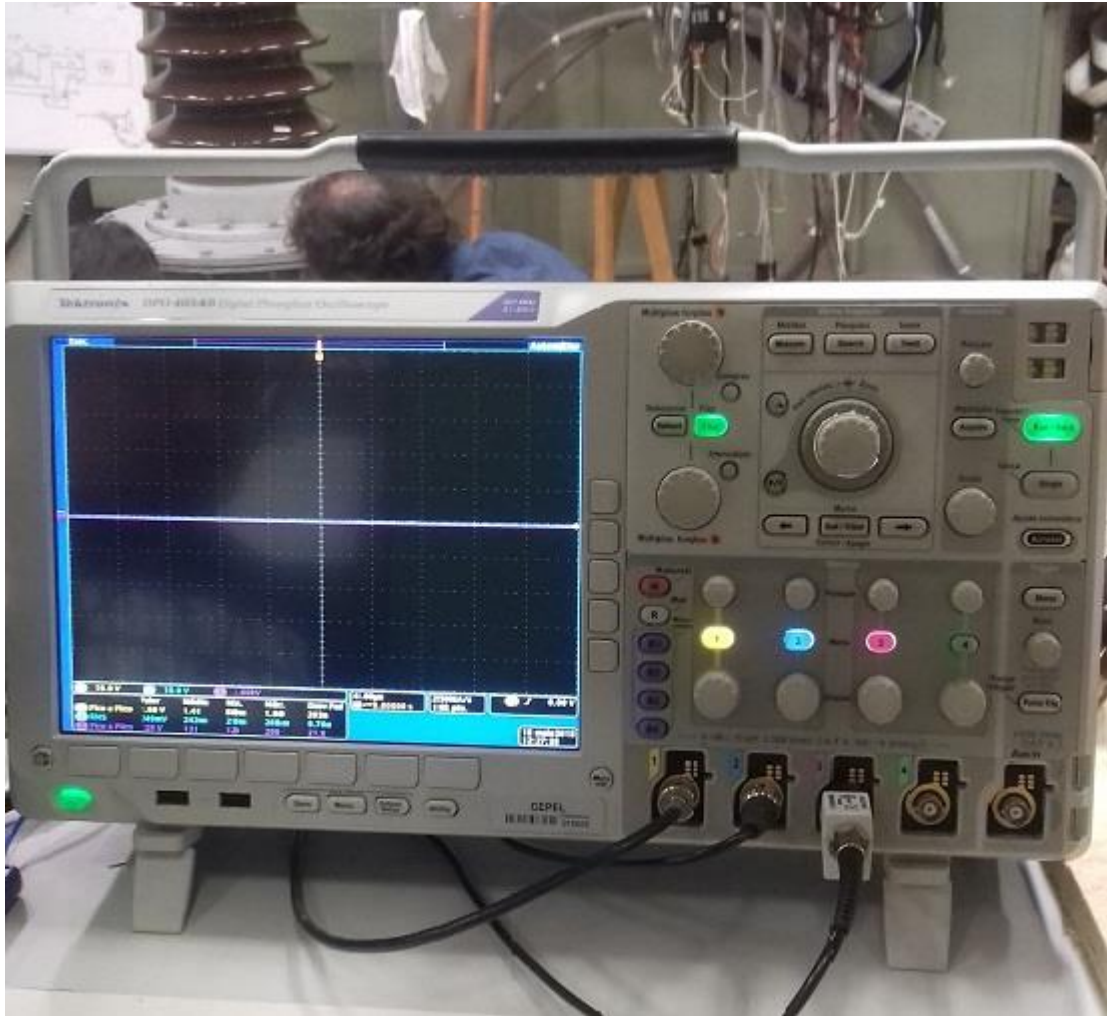


Figura 33– Conexões em osciloscópio
Fonte: Autor.

Para realizar a medição do tempo de duração da ferro-ressonância, a forma de onda deve ser registrada de forma a ficar estática na tela do osciloscópio, após a aquisição, com os cursores do osciloscópio é possível realizar a medição entre o final do curto-circuito até a forma de onda se estabelecer novamente em sua forma fundamental.

A figura 34 mostra a forma de onda registrada para um caso de aprovação seguindo os critérios da IEC. É possível verificar que a primeira forma de onda é a forma de onda de tensão nos terminais secundários antes e após o curto-circuito, a segunda forma de onda é a corrente no instante do curto-circuito e a última forma de onda é a forma de onda de alta tensão aplicada no TPC sob ensaio.

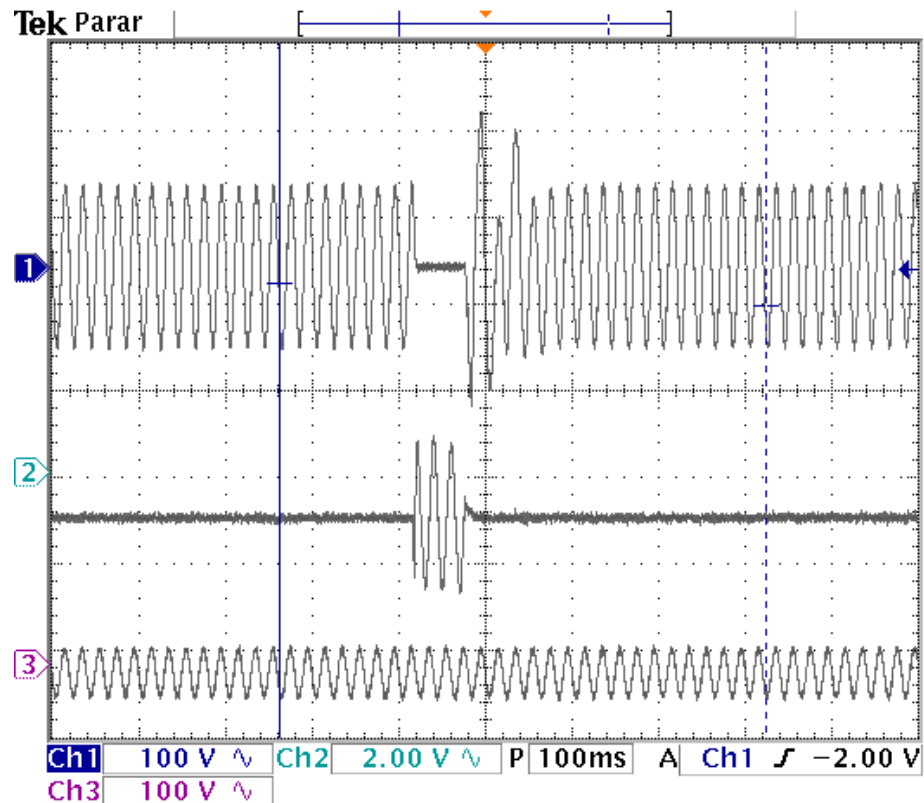


Figura 34 – Formas de onda registrada para o ensaio de ferro-ressonância
Fonte: Autor.

Para um caso de reprovação no ensaio, é possível notar uma diferença bem clara no que ocorre na forma de onda da figura 35 em relação à figura 34. Após o curto-circuito, verifica-se que a forma de onda ferro-ressonante se mantém, ocasião indesejada no sistema de potência, pois pode levar a consequências de gravidade elevada, como aquecimento do equipamento, atuação inesperada de relés de proteção por exemplo.

Quando a ferro-ressonância se mantém, se faz necessária a verificação do circuito supressor para fazer com que o referido esteja apto a extinguir o fenômeno no tempo adequado. Normalmente é feito um ajuste no reator saturável em caso do circuito supressor passivo.

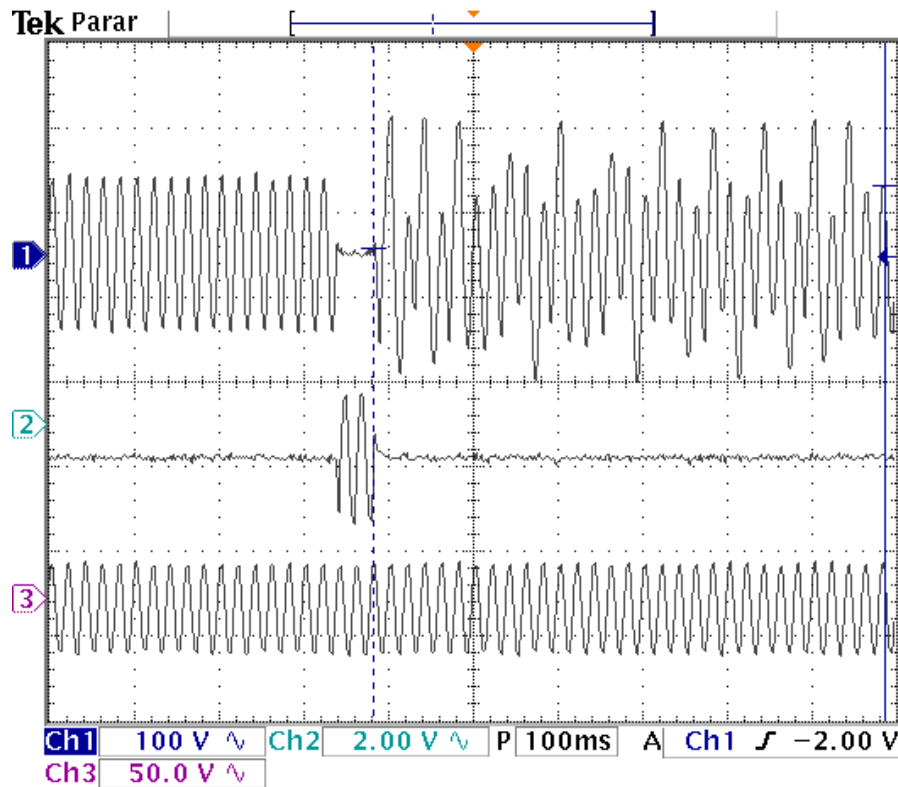


Figura 35– Caso de reprovação de ferro-ressonância

Fonte: Autor.

Para o ensaio descrito, foi utilizado um contator como dispositivo de fechamento do curto-circuito, cujo mesmo atende as necessidades do ensaio. Para obter um controle maior sobre o fechamento do curto-circuito é possível a utilização de uma chave síncrona. Através da chave síncrona é possível controlar em que ponto da senóide é desejado a aplicação do curto-circuito, a duração do curto-circuito e verificar esses dados através do display da chave síncrona.

Para a medição de corrente no instante do curto-circuito foi utilizado um transformador de corrente tipo janela. Para a utilização de transformadores de corrente deve-se atentar para a faixa de frequência que é possível a leitura em corrente alternada do equipamento.

Durante o desenvolvimento deste trabalho foi realizado uma visita técnica na fábrica de equipamentos elétricos de alta tensão da General Electric na cidade de Itajubá – MG, onde junto com o corpo técnico da fábrica, foi possível assistir ao ensaio de ferro-ressonância em um transformador de potencial de 550 kV. Durante a visita foi possível visualizar todas as etapas de fabricação de um TPC e durante o

ensaio foi possível ver a montagem do arranjo de ensaio, a etapa de aquisição de dados e as aplicações de curto-circuito nos terminais secundários do TPC.

Foram feitas duas tentativas de realizar o ensaio no CEPEL, a primeira tentativa na Unidade Fundão na Cidade Universitária do Rio de Janeiro e a segunda tentativa no laboratório de Alta Tensão-AT1 na Unidade de Adrianópolis na cidade de Nova Iguaçu-RJ. Como os TPC's que foram utilizados no CEPEL eram equipamentos retirados de subestação, os referidos não apresentaram condições para realizar o ensaio devido a riscos elétricos e por fatores de segurança.

5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O tema ferro-ressonância é bem complexo de ser estudado, e mesmo após anos de estudo nessa área ainda não se tem total domínio do fenômeno. Pesquisadores ainda vêm despertando curiosidade sobre o assunto, para que dessa maneira possa haver uma melhor compreensão e possam ser desenvolvidos novos métodos de diagnóstico e de mitigação do fenômeno durante sua ocorrência.

O ensaio de ferro-ressonância em TPC é de extrema importância para garantir o funcionamento adequado do equipamento durante sua vida útil. No desenvolvimento do trabalho foi verificado que não são todos os laboratórios que realizam o ensaio proposto nesse estudo de caso, alguns por falta de conhecimento da realização do ensaio e outros por falta de viabilidade técnica e econômica. Apesar da impossibilidade da realização do ensaio no laboratório de alta tensão, AT1, do CEPEL, com os dados fornecidos por esse trabalho é possível verificar pontos importantes da prática necessária da realização do ensaio. Deste modo, caso haja necessidade, este material se torna uma importante fonte de consulta para auxiliar na parte prática da realização do ensaio.

A adequada supressão do fenômeno de ferro-ressonância influencia na continuidade do fornecimento de energia elétrica e garante uma maior vida útil não somente do TPC, mas também de outros equipamentos que estão conectados no sistema de potência. Sendo assim, verifica-se a importância da realização do ensaio de ferro-ressonância em TPC.

Os ensaios elétricos de alta tensão são bem complexos, sendo assim se faz necessário conhecimento técnico especializado e cautela durante a realização destes. Seguir as normas internacionais e nacionais para ensaios elétricos é essencial para certificar que os procedimentos estão sendo feitos de maneira correta para garantir a qualidade.

Sugestão de trabalhos futuros:

- Realizar o ensaio de ferro-ressonância;
- Simulação computacional do ensaio por meio de parâmetros elétricos do TPC e comparar os resultados simulados com a prática.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, A.; NEVES W. **Cálculos de Transitórios Eletromagnéticos em sistemas de energias**. Belo Horizonte. UFMG. 2004

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Transformadores de potencial indutivos**: NBR 6855. Rio de Janeiro, 2009.

FERRACCI, P. Ferroresonance. Groupe Schneider: Cahier technique n° 190, pp. 1-28, March 1998. Disponível em: <<https://www.schneider-electric.com/en/download/document/ECT190/>>. Acesso em: 13 Março 2018.

GREENWOOD, A. **Electrical Transients in Power Systems**. 2. ed. New York: John Wiley and Sons LTD, 1991.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION. IEC 61869-1 - **Instruments transformers** - General requirements. Genebra. 2007.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION. IEC 61869-5: **Additional requirements for voltage transformers**. Genebra. 2011.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 4ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

SOARES, P. H. A. **Análise de soluções tecnológicas para comunicações Power Line Carrier**. Universidade de Porto. Porto. 2010.

VALVERDE, V. *et al.* **Ferroresonance Supression in Voltage Transformers**. University of the Basque Country. Bilbao. 2012.

ZANETTA JÚNIOR, L. C. **Transitórios Eletromagnéticos Em Sistemas de Potência**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.

Eu, ALEXANDRE NEVES DA SILVA Chefe do Departamento de Laboratórios de Adrianópolis – DLA do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL, matrícula 0476, venho por meio deste, autorizar o aluno Paulo Henrique Barbosa de Souza Pinheiro a utilizar em citações e descrições, os métodos e processos utilizados nesta empresa, que estejam vinculados ao tema a ser abordado em sua Monografia sobre “ENSAIO DE FERRO-RESSONÂNCIA EM TRANSFORMADOR DE POTENCIAL CAPACITIVO” desde que o aluno, assegure ao final da pesquisa, encaminhar um volume do trabalho com as abordagens e conclusões do referido Trabalho Acadêmico.



ALEXANDRE NEVES DA SILVA - 0476

Alexandre Neves da Silva
Chefe do Departamento de
Laboratórios de Adrianópolis
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL
Telefones: 5530212696-6273 / 2666-6000
neves@cepel.br