



Universidade Federal  
de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

MARIANA CAMURÇA DE AZEVEDO

INVESTIGAÇÃO DE VIBRAÇÕES EM  
TRANSFORMADORES DE BAIXA POTÊNCIA

Campina Grande, Paraíba.  
Maio de 2014

MARIANA CAMURÇA DE AZEVEDO

INVESTIGAÇÃO DE VIBRAÇÕES EM TRANSFORMADORES DE  
BAIXA POTÊNCIA

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

Área de Concentração: Diagnóstico de transformadores de potência

Orientador:

Professor Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba.  
Maio de 2014

MARIANA CAMURÇA DE AZEVEDO

# INVESTIGAÇÃO DE VIBRAÇÕES EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

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

Área de Concentração: Sistemas elétricos de potência

Aprovado em        /        /

**Professor Avaliador**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

**Professor Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho à minha família, amigos e todos que me ajudaram a chegar até aqui.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais, Fred e Silvana e aos meus irmãos Amanda e Fred que sempre se esforçaram para que eu pudesse ter oportunidades melhores.

Agradeço a meus amigos da época do Marista que sempre me apoiaram, mesmo com a distância. Também agradeço a meus amigos que conquistei no curso, Maurício, Regelii, Ilthon, F. Lucena, Lucas Omena, Maryana, F. Fideles que me ajudaram a passar por todos esses anos de curso, sempre tendo uma palavra de incentivo a oferecer.

Agradeço também a Jalberth e Tarso que me ajudaram neste trabalho, mesmo eu não estando presente tanto quanto gostaria de estar.

Agradeço a todos os educadores que de alguma forma contribuíram para a construção de quem sou hoje.

*“A conquista é um acaso que talvez dependa mais das falhas dos vencidos do que do gênio do vencedor”*

Madame de Staël.

## RESUMO

A presente pesquisa monográfica tem como objetivo correlacionar a vibração mecânica dos enrolamentos dos transformadores com a corrente elétrica e com a tensão. Para isso foi feita uma abordagem sobre a origem das forças que provocam vibrações nos transformadores e uma explanação sobre um desenvolvimento matemático realizado com o intuito de provar a relação linear que a vibração mecânica dos transformadores possui com o quadrado da corrente e com o quadrado da tensão. É exposta também uma abordagem experimental, onde os experimentos são realizados em dois transformadores monofásicos com potências de 1 kVA e 5kVA e com tensões de 220 V e 22 kV, respectivamente. Estes ensaios de curto-circuito e o a vazio são realizados com dois tipos de sensores: o sensor piezoelétrico e um acelerômetro com os quais se obtém resultados e esses são comparados entre eles e com o resultado esperado. Como conclusão do presente trabalho é feita uma discussão de forma a expor os resultados dos experimentos colaborando com estudos futuros no âmbito da manutenção preventiva em transformadores de potências.

**Palavras-chave:** Correlação da vibração com tensão e corrente, transformadores.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Dano causado pelas forças axiais [5].	11
Figura 2. Árvore de falha do núcleo [4]-[5].	14
Figura 3. Árvore de falha do tanque [4]-[5].	15
Figura 4. Árvore de falha da celulose [4]-[5].	15
Figura 5. Árvore de falha do óleo e do sistema de resfriamento [4]-[5].	16
Figura 6. Árvore de falha das buchas [4]-[5].	16
Figura 7. Árvore de falhas do comutador de derivação em carga [4]-[5].	17
Figura 8. Árvore de falha dos enrolamentos [4]-[5].	17
Figura 9. Desenho da seção do transformador mostrando as forças no núcleo [7].	19
Figura 10. Campos de dispersão e forças radiais e axiais [8].	19
Figura 11. Sentido das Forças axiais nos transformadores [5].	21
Figura 12. Sentido das forças radiais nos enrolamentos internos e externos do transformador [5].	21
Figura 13 - Distribuição de fluxo, campos e forças axiais e radiais agindo	23
Figura 14. Célula neutra e célula tensionada [12].	25
Figura 15. Sensor piezoelétrico	26
Figura 16. Transformador de 1 kVA.	27
Figura 17. Ensaio a vazio	28
Figura 18. Ensaio de curto-circuito	28
Figura 19. Transformador monofásico de 5 kVA, MRT, com núcleo de liga amorfa.	29
Figura 20. FFT do sinal do piezo para uma tensão de 35 V	30
Figura 21. Relação do quadrado da corrente com a amplitude da frequência de 120 Hz	32
Figura 22. FTT do sinal do sensor piezo para uma corrente de 1,76 A.	33
Figura 23. Relação entre o quadrado da corrente e a amplitude da frequência de 120 Hz.	34
Figura 24. FFT do sinal do sensor piezo.	35



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consequências e efeitos das forças radiais nos transformadores .....	22
Tabela 2 - Relação entre o quadrado da tensão e amplitude da frequência de 120 Hz.....	31
Tabela 3 - Relação entre o quadrado da corrente e amplitude da frequência de 120 Hz. ....	33

# SUMÁRIO

1	Introdução.....	11
2	Embasamento Teórico.....	13
2.1	Falhas em transformadores.....	13
2.2	Falha nos componentes do transformador.....	13
2.3	Falhas mecânicas.....	18
2.4	Relação entre aceleração mecânica com corrente e tensão.....	23
2.5	Sensores de Vibração.....	24
3	Metodologia.....	27
3.1	Experimentos no transformador de 1 kVA.....	27
3.2	Experimento no transformador de 5 kVA.....	29
4	Resultados.....	30
4.1	Ensaio a vazio no transformador de 1 kVA.....	30
4.2	Ensaio de curto-circuito no transformador de 1 kVA.....	32
4.3	Experimentos no transformador de 5 kVA.....	34
5	Conclusão.....	36
	Referências Bibliográficas.....	38

# 1 INTRODUÇÃO

O tempo de inatividade em sistemas elétricos de potência tem como consequência altas multas para a empresa prestadora do serviço, enquanto que para os consumidores o tempo sem energia é sinônimo de não produtividade.

A busca de alternativas para a diminuição do tempo gasto em manutenção de transformadores ocasiona uma preocupação em criar novas alternativas que visam diagnosticar previamente suas possíveis falhas. Com esse diagnóstico prévio é possível evitar falhas antes mesmo de elas ocorrerem, possibilitando agendar uma manutenção em um horário mais oportuno, evitando, dessa forma, falhas que poderiam por em risco a integridade das propriedades físicas e elétricas dos transformadores.

Altas correntes elétricas oriundas de curto-circuito podem causar deformações nos enrolamentos dos transformadores, alterar a indutância ou a capacitância nos enrolamentos [1], e isto corresponde a 12-15 % das causas de suas falhas [2]. Essas deformações nos enrolamentos são causadas pelas forças axiais e radiais oriundas da interação dos campos magnéticos produzidos no núcleo e nas bobinas. A Figura 1 ilustra o dano que as forças radiais podem causar nos transformadores.



Figura 1. Dano causado pelas forças axiais [5].

O método mais utilizado para detectar essas deformações é a resposta em frequência dos transformadores. A partir dessas medições é possível diagnosticar se estão ocorrendo movimentos nos enrolamentos ou não, se há movimentos pequenos e se o transformador pode continuar funcionando sob monitoramento constante ou se necessita de manutenção imediata.

O objetivo deste trabalho é investigar e comprovar experimentalmente a correlação entre a vibração mecânica com a tensão e a corrente elétrica em transformadores monofásicos.

Em termos organizacionais, o Capítulo 2 é fundamentado nas hipóteses sobre falhas ocorridas em transformadores, ressaltando os possíveis locais de falhas dando ênfase para as falhas mecânicas, pois estas são as que originam as vibrações que se busca investigar neste trabalho. O Capítulo 3 trata de a vibração mecânica, tensão e corrente, objetivando encontrar uma relação que venha a ser constatada mediante os ensaios de circuito aberto e de curto-circuito que serão feitos. O Capítulo 4 relata os experimentos feitos nos transformadores do laboratório de alta tensão (LAT) da Universidade Federal de Campina Grande, expondo uma análise e discussão dos resultados. O Capítulo 5 apresenta a conclusão dos resultados obtidos com o intuito de contribuir para estudos futuros.

## 2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Neste Capítulo são apresentadas as teorias e os conceitos que embasam o trabalho. Inicialmente serão abordadas as falhas nos transformadores descrevendo-as separadamente para cada componente. Em seguida são expostas as falhas mecânicas, na sua componente axial e radial, pois estas são as que influenciam nas vibrações mecânicas. É feita uma abordagem matemática para correlacionar a vibração com tensão e corrente e por fim serão apresentados os sensores utilizados nos experimentos realizados no laboratório.

### 2.1 FALHAS EM TRANSFORMADORES

Falhas em transformadores acarretam em danos para a concessionária, como multas e perda no faturamento.

Fenômenos como descargas parciais, manobras de operação e curtos-circuitos podem levar os transformadores a falhas. O tempo de vida útil de um transformador é de 20 a 35 anos, mas com o passar do tempo as características de isolamento, dielétricas e mecânicas deste equipamento vão perdendo suas propriedades fazendo com que ocorra uma falha. Com uma boa prática de manutenção preditiva, é possível aumentar a vida útil de um transformador em até 60 anos [3].

A tendência atual é que exista um monitoramento constante deste tipo de equipamento com o intuito de prever uma falha. Neste trabalho é realizado um estudo em laboratório visando o monitoramento das vibrações do transformador, para futura correlação com possíveis falhas.

### 2.2 FALHA NOS COMPONENTES DO TRANSFORMADOR

Com o objetivo de resumir as causas e as falhas no transformador, são apresentados os subtópicos a seguir, enumerando as regiões onde tais falhas podem ocorrer.

### 2.2.1 NÚCLEO

A função do núcleo de material ferromagnético é a de aumentar e direcionar o campo magnético para uma dada corrente, de modo que quase todo fluxo magnético que passa pelo enrolamento primário passe pelo secundário. Uma falha no núcleo provoca a diminuição do rendimento do transformador, a qual é causada por uma falha mecânica ou por uma não conformidade no processo de fabricação [4]-[5].



Figura 2.Árvore de falha do núcleo [4]-[5].

### 2.2.2 TANQUE

O tanque é uma caixa de aço preenchida com óleo isolante onde ficam imersos os enrolamentos e o núcleo do transformador. Além de armazenar as partes ativas, tem como função suportar os excessos de estímulos externos vindos do meio ambiente como uma elevada umidade. A geração de arcos internos pode levar a um aumento da pressão interna podendo levar o tanque a romper [4]-[5].

### 2.2.3 ISOLAÇÃO SÓLIDA – CELULOSE

A isolação sólida dos transformadores, em sua maioria, é feita com celulose, matéria prima do papel e tem como função a isolação dielétrica e suporte mecânico para os enrolamentos [4]-[5].

### 2.2.4 ÓLEO E SISTEMA DE RESFRIAMENTO

A função do óleo e do sistema de resfriamento é isolar e refrigerar as partes ativas do transformador. A perda das propriedades do óleo pode levar a curtos circuitos

internos no transformador. Uma falha no sistema de resfriamento ocasiona um sobreaquecimento fazendo o óleo perder suas propriedades isolantes levando o equipamento a falhas [4]-[5].

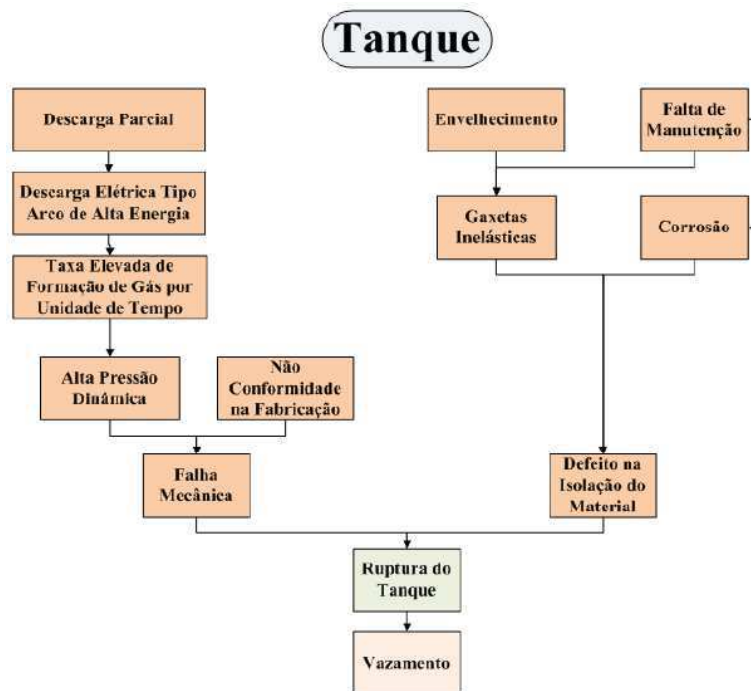


Figura 3. Árvore de falha do tanque [4]-[5].

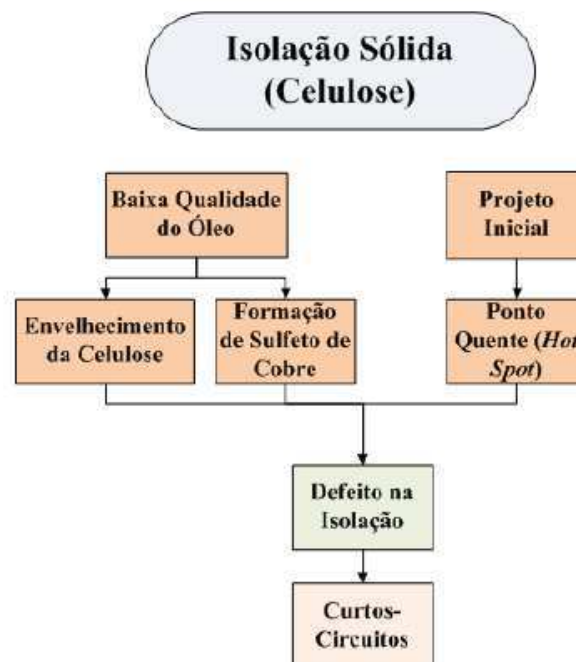


Figura 4. Árvore de falha da celulose [4]-[5].



Figura 5. Árvore de falha do óleo e do sistema de resfriamento [4]-[5].

### 2.2.5 BUCHAS

A função da bucha é isolar eletricamente as partes ativas do tanque dos enrolamentos e servir de suporte para as conexões do transformador com o sistema. Um dos motivos da ocorrência de um curto-circuito em uma bucha é devido à existência de bolhas no processo de fabricação que aumenta devido às descargas parciais ou a rachaduras provocadas por vandalismos [4]-[5].

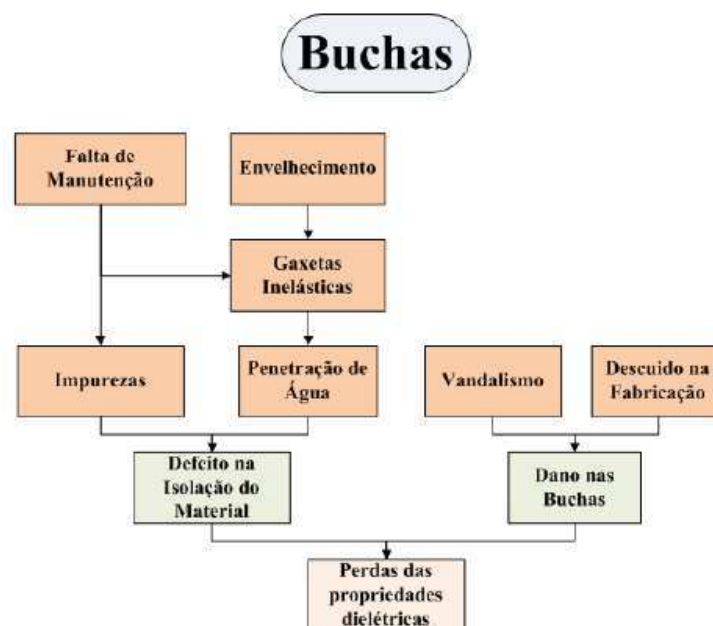


Figura 6. Árvore de falha das buchas [4]-[5].



## 2.2.6 COMUTADOR DE DERIVAÇÃO EM CARGA (CDC)

A função do comutador de derivações em carga (CDC) é controlar o nível de tensão mediante o acréscimo ou subtração de espiras do enrolamento do transformador. As falhas no CDC ocorrem geralmente por falta de manutenção, danos mecânicos, perda da propriedade do óleo próprio do CDC. Tais falhas podem levar a ocorrência de curtos-circuitos e a não modificação do nível de tensão do transformador [4]-[5].

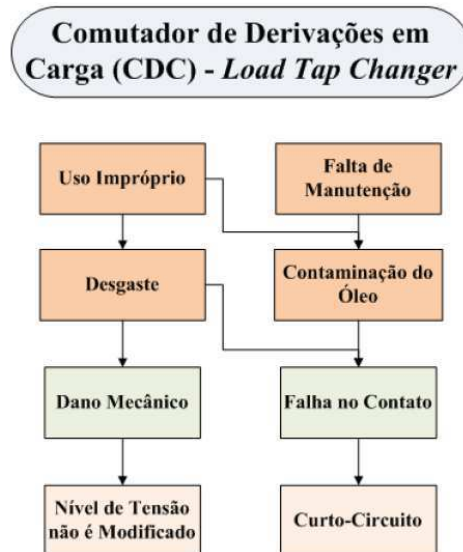


Figura 7. Árvore de falhas do comutador de derivação em carga [4]-[5].

## 2.2.7 ENROLAMENTOS

Além de prover a passagem de corrente, os enrolamentos devem suportar os esforços mecânicos, térmicos e dielétricos causados por correntes de curto-circuito ou de energização do transformador [4]-[5].

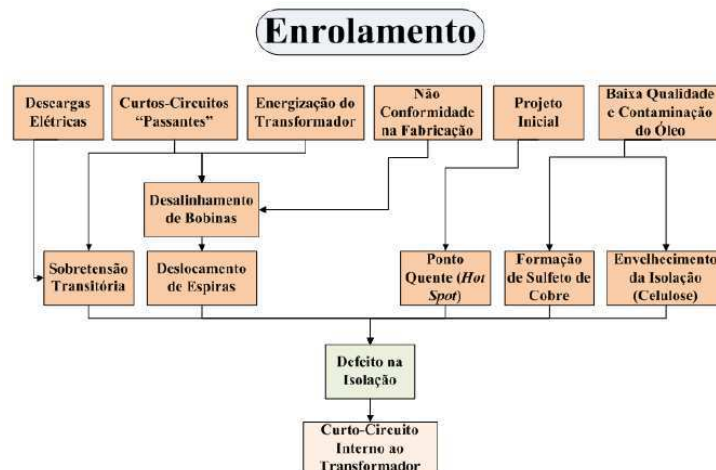


Figura 8. Árvore de falha dos enrolamentos [4]-[5].

## 2.3 FALHAS MECÂNICAS

Os defeitos mecânicos podem ser provocados pelas interações dos campos eletromagnéticos (e suas consequências físicas, como o calor) produzidos no núcleo e nas bobinas, por defeitos internos e externos, ou ainda por uma ação externa, como vandalismo. Estes esforços afetam diretamente os enrolamentos dos transformadores podendo deformá-los ou deslocá-los.

Altas correntes elétricas oriundas de curtos-circuitos podem causar deformações nos enrolamentos dos transformadores, alterar a indutância ou a capacitância nos enrolamentos, diminuindo a suportabilidade mecânica da isolação dos enrolamentos [1], isto é uma das maiores causas de defeitos mecânicos internos nos transformadores.

As forças produzidas pela magnetostricção do núcleo e pela magnetização das bobinas fazem o transformador vibrar. A magnetostricção é uma propriedade intrínseca dos materiais ferromagnéticos os quais se deformam na presença de um campo magnético externo [2]. O campo magnético externo faz com que os dipolos magnéticos do núcleo tentem se alinhar com o campo magnético externo produzido pelas bobinas, fazendo com que ocorra uma expansão do núcleo. A expansão ocorre quando as bobinas do transformador estão excitadas com corrente positivas, caso contrário ocorre a compressão do núcleo. A cada meio ciclo de onda o núcleo se comprime ou se expande, a depender da polaridade. Como aqui no Brasil utiliza-se corrente alternada na frequência de 60 Hz para excitar o transformador e o mesmo vibra com o dobro da frequência da rede elétrica, as vibrações tem frequência de 120 Hz.

As forças produzidas pela magnetostricção e pela magnetização das bobinas são responsáveis pela geração de ruído e vibração no transformador [6]. As vibrações produzidas no núcleo são transmitidas para o tanque do transformador através do óleo e das partes estruturais que suporta o núcleo [7]. As forças axiais ( $F_a$ ) e forças radiais ( $F_r$ ) produzidas no núcleo e suas propagações estão representadas na Figura 9.

A expressão que rege a interação entre as componentes da densidade do fluxo de dispersão e a corrente que circula nos enrolamentos de um transformador é dada pela lei básica de Lorentz:

$$\vec{f} = \vec{j} \times \vec{B}, \quad (1)$$

Em que  $\vec{f}$  representa a densidade volumétrica de força magnética ( $N/m^3$ ),  $\vec{j}$  representa a densidade superficial de corrente ( $A/m^2$ ) e  $\vec{B}$  representa a densidade de fluxo magnético de dispersão (T).

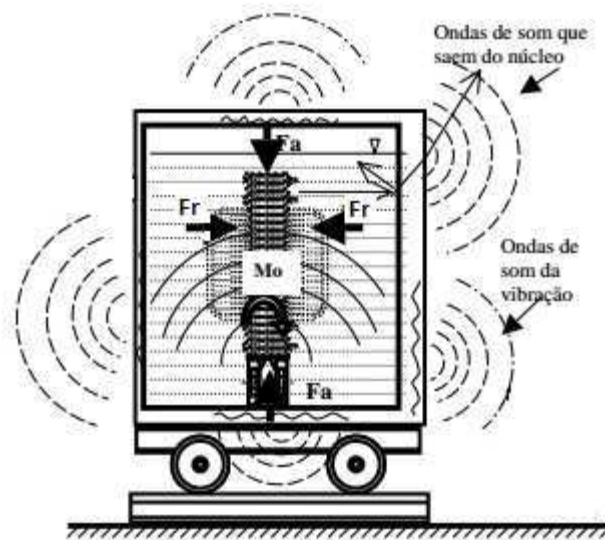


Figura 9. Desenho da seção do transformador mostrando as forças no núcleo [7].

A interação da densidade de fluxo magnético de dispersão axial ( $B_a$ ) com a corrente que passa pelo enrolamento, origina uma força radial ( $F_r$ ). Já a interação entre o campo de dispersão radial com a corrente, origina uma força axial ( $F_a$ ) [8].

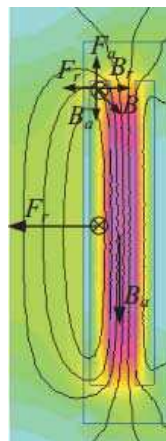


Figura 10. Campos de dispersão e forças radiais e axiais [8].

Na Figura 9 são apresentadas as forças radiais e axiais nas bobinas ea distribuição de fluxo axial numa seção do transformador. A densidade de fluxo magnético de dispersão no ponto médio entre os enrolamentos pode ser determinada por (2).

$$B_a = \frac{\sqrt{2} \cdot 4\pi \cdot n I_n}{10^7 \cdot h} = \frac{\sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot n I_n}{h}, \quad (2)$$

na qual  $B_a$  é a densidade de fluxo de dispersão axial (T),  $n$  o número de espiras do enrolamento,  $I_n$  a corrente nominal do enrolamento (A),  $h$  a altura do enrolamento (m) e  $\mu_0$  a permeabilidade do vácuo.

Como a força magnetomotriz total,  $nI_n$ , de cada enrolamento encontra-se imersa em uma densidade de fluxo médio ( $1/2 B_a$ ), assim é possível determinar as forças radiais mediante a expressão 3:

$$F_r = \frac{2\pi^2 \cdot (nI_n)^2 \cdot D_m}{h} \cdot 10^{-7} [N], \quad (3)$$

na qual  $F_r$  a força radial total no enrolamento (N) e  $D_m$  o diâmetro médio do enrolamento (m).

Admitindo-se que a distribuição das forças magnetomotrizes nos enrolamentos é uniforme, as forças axiais ocorrem devido aos campos radiais nas extremidades das bobinas sendo dirigidas para o ponto médio dos enrolamentos. Essas forças são resultados do fluxo produzido pelos próprios condutores em paralelo que transportam corrente na mesma direção [8]. Nessa condição pode-se obter a soma das compressões axiais próximo ao ponto médio para ambos os enrolamentos. O resultado desta soma é dado pela expressão:

$$F_a = \frac{2\pi^2 \cdot (nI_{max})^2 \cdot D_m}{10^7 \cdot h^2} \cdot [D_0 \frac{D_1 + D_2}{3}] [N], \quad (4)$$

### 2.3.1 FALHAS DEVIDO ÀS FORÇAS AXIAIS

Quando os enrolamentos dos transformadores não estão firmemente enrolados e sobre eles incidem uma força axial, procedente da componente axial do fluxo magnético, a consequência desta ação pode levar a danificação da isolação e futuramente a um curto-circuito entre as espiras. Destacar-se que o desalinhamento axial dos enrolamentos e o uso de derivações (tapes) contribuem consideravelmente para o aumento das forças axiais nas bobinas.

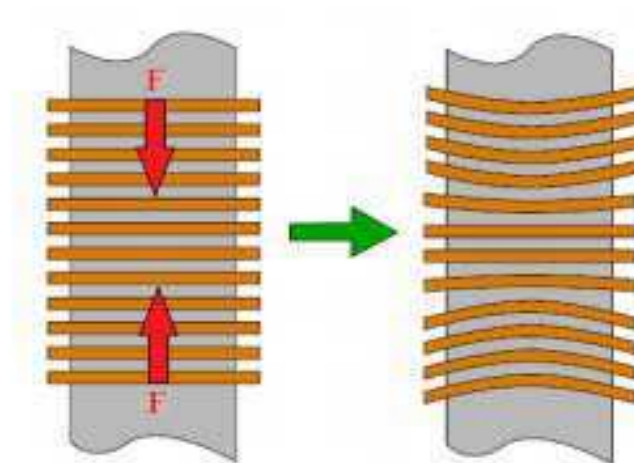


Figura 11. Sentido das Forças axiais nos transformadores [5].

### 2.3.2 FALHAS DEVIDO ÀS FORÇAS RADIAIS

As forças radiais produzem efeitos contrários nos enrolamentos interno e externos dos transformadores, os enrolamentos internos quando exposto a esforços eletrodinâmicos tendem a comprimir enquanto os enrolamentos externos tendem a se expandir. Elas são procedentes da componente radial do fluxo magnético.

O suporte mecânico oferecido aos enrolamentos internos de um transformador de núcleo envolvido decorre das estruturas que oferecem suporte aos condutores, já no enrolamento externo, a suportabilidade mecânica depende das características de mecânicas dos condutores [9].

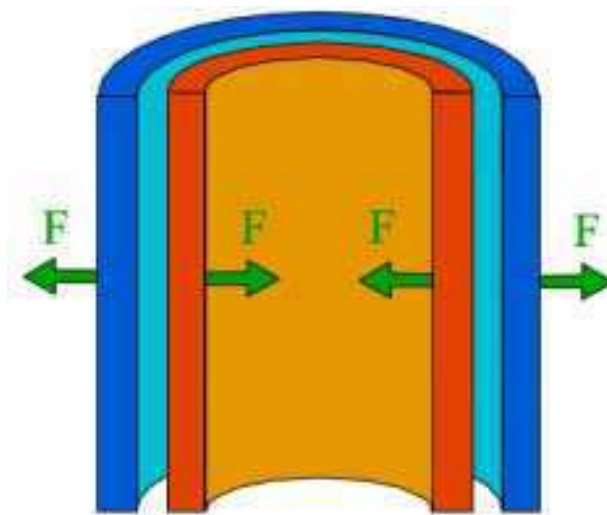


Figura 12. Sentido das forças radiais nos enrolamentos internos e externos do transformador [5].

As consequências devido às forças radiais estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Consequências e efeitos das forças radiais nos transformadores

<b>Consequências</b>	<b>Efeitos</b>
<b>Alongamento do isolante que reveste os condutores dos enrolamentos.</b>	Degrada o material isolante, reduzindo a vida útil do transformador.
<b>Diminuição das distâncias de isolamento entre o enrolamento interno e o núcleo.</b>	Reduz a capacidade do transformador de suportar surtos de tensão e modifica a distribuição do campo elétrico ao longo do enrolamento, deixando parte do enrolamento com uma maior concentração de campo elétrico.
<b>Afrouxamento das amarrações dos enrolamentos.</b>	Permite mobilidade dos condutores, o que provoca vibrações e, em longo prazo, a fadiga do material isolante e das conexões. Reduz a robustez do transformador frente a correntes de curto-circuito.

## 2.4 RELAÇÃO ENTRE ACELERAÇÃO MECÂNICA COM CORRENTE E TENSÃO

Conforme comentado, a vibração estrutural dos transformadores é causada por um fenômeno chamado magnetostricção. Esse fenômeno que acontece no núcleo fazendo-o vibrar é positivo quando na presença de um campo magnético o material se expande e negativo quando na presença de um campo magnético o material ferromagnético se comprime. Como o transformador é excitado por corrente alternada, a cada meio ciclo de onda seu núcleo se expande e se comprime, fazendo com que o transformador vibre com o dobro da frequência de rede com que é alimentado. Como a força exercida pelo campo é diretamente proporcional à frequência de vibração, pode-se relacionar a força magnética com a corrente e a tensão.

Na Figura 12 é apresentada a distribuição das forças magnéticas, dos fluxos magnéticos e dos campos em um transformador de núcleo envolvente. Será apresentada uma demonstração generalista que correlaciona a força magnética com o quadrado da corrente e da tensão.

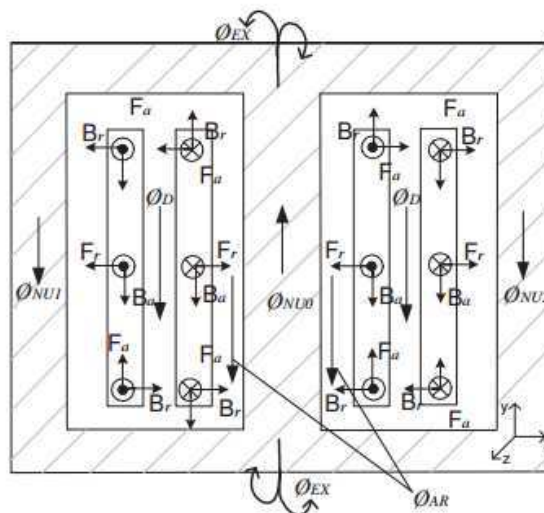


Figura 13 - Distribuição de fluxo, campos e forças axiais e radiais agindo nos enrolamentos concêntricos do transformador [10].

Sabe-se que a força magnética exercida pelos enrolamentos do transformador é dada por (5).

$$dF = B \cdot I_S \cdot dl \sin\theta, \quad (5)$$

em que  $F$  representa a força magnética;  $B$  a densidade de fluxo magnético;  $I_S$  a corrente que percorre o enrolamento;  $L$  o comprimento das espiras e  $\theta$  o ângulo entre a força e a corrente.

Integrando a equação 1 para  $\theta$  igual a  $90^\circ$ , encontramos a seguinte equação:

$$F = n \cdot B \cdot I_S \cdot l, \quad (6)$$

em que  $n$  é o número de espiras.

A densidade de fluxo magnético ( $B$ ) é dada por:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot n \cdot I_S}{h}, \quad (7)$$

em que  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética e  $h$  a altura do enrolamento.

Como todos os enrolamentos estão envolvidos com o valor médio da densidade de fluxo magnético e substituindo a equação 7 na equação 6 :

$$F = n \cdot \frac{\mu_0 \cdot n \cdot I_S}{h} \cdot I_S \cdot l = \frac{\mu_0 \cdot l \cdot (n I_S)^2}{2h}, \quad (8)$$

Como na equação 4 a permeabilidade magnética, a altura do enrolamento, o comprimento das espiras e a quantidade de espiras são fixos, então:

$$F \propto \text{constante} \cdot I_S^2, \quad (8)$$

Desta forma é esperado que no teste de curto-circuito, a frequência de vibração seja proporcional ao quadrado da corrente no secundário do transformador.

De acordo com a lei de Ohm, a tensão é proporcional à corrente, logo se a vibração é proporcional ao quadrado da corrente, ela também será proporcional ao quadrado da tensão.

## 2.5 SENSORES DE VIBRAÇÃO

A vibração mecânica ocorre quando um corpo descreve um movimento oscilatório em relação a uma referência. O número de ciclos de movimento em um



segundo é chamado de frequência (Hz). O movimento pode ter uma única frequência ou possuir várias componentes em distintas frequências.

Para analisar essas diversas componentes de frequência, utilizamos a técnica de análise de frequência, que cria um histograma que relaciona a amplitude do sinal com sua respectiva frequência.

Quando se analisa as vibrações de um sistema, diversas frequências periódicas são encontradas, elas estão diretamente relacionadas a movimentos de diversos componentes do sistema. Dessa forma é possível descobrir a causa de uma vibração indesejada.

Para a captação da vibração mecânica, diversos sensores são utilizados, entre eles estão os sensores de velocidade, os sensores de deslocamento, os sensores de pressão, e o mais utilizado, o sensor de aceleração [11].

O acelerômetro baseia-se nos cristais piezoelétricos, estes ao serem deformados por uma força faz com que suas células que antes estavam neutras, apresentem polaridades fazendo surgir uma diferença de potencial nas suas extremidades, criando um campo elétrico [12], assim como está representado na Figura 13.

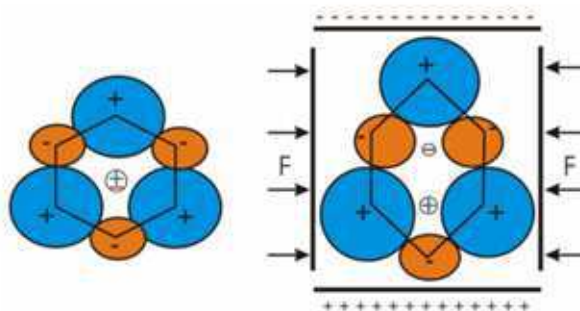


Figura 14. Célula neutra e célula tensionada [12].

Por isso podemos afirmar que o efeito piezoelétrico é a transformação da energia mecânica em energia elétrica e vice e versa. Sendo assim, cada frequência produz uma determinada deformação no cristal piezo, com isto a oscilação da deformação mecânica no tempo é transmitida para o sinal elétrico.

O sensor utilizado nos ensaios foi o sensor piezoelétrico, Figura 14, esse apresenta as mesmas características descritas anteriormente, mas ou invés de apresentar uma resposta em termos de aceleração, ele apresenta uma resposta em termos de pressão. A unidade medida pelo sensor piezoelétrico é a *PSI*(libra força por polegada

quadrada)[16]. A relação de *PSI* com  $\text{N/m}^2$  é de: um Newton/metro<sup>2</sup>  $[\text{N/m}^2] = 0,00014503773773$  psi.

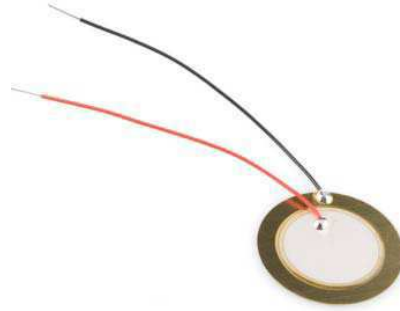


Figura 15. Sensor piezoelétrico

### 3 METODOLOGIA

Inicialmente foi realizado um ensaio de curto-circuito e um ensaio a vazio em dois transformadores monofásicos com o objetivo de verificar a correlação entre a vibração com a corrente e com a tensão.

Nos dois ensaios foi utilizado um sensor piezoelétrico, Figura 14, para medir a vibração do núcleo do transformador. Esse sensor foi fixado na parte inferior do transformador porque segundo os experimentos realizados por García [13] [14], esta é a parte do transformador onde as vibrações do núcleo se apresentam de forma mais intensa.

#### 3.1 EXPERIMENTOS NO TRANSFORMADOR DE 1 kVA

Nestes experimentos foram realizados no transformador monofásico de núcleo envolvente de 1 kVA, Figura 15, com tensão primária de 220 V e tensão secundária de 110 V. O sensor piezoelétrico foi fixado no próprio núcleo do transformador.



Figura 16. Transformador de 1 kVA.

### 3.1.1 ENSAIO A VAZIO

Os experimentos foram realizados no laboratório de alta tensão (LAT) da Universidade Federal de Campina Grande.

Para realizar o ensaio a vazio, segundo a NBR 5380, o lado de alta tensão foi deixado em aberto e as medições foram realizadas no lado de baixa tensão.

Foi aplicada uma tensão de 10 V no início, esta tensão foi acrescida de 5 V em cada medição até atingir 230 V. Os dados obtidos foram salvos em um *pen-drive* para serem tratados no *Matlab*.

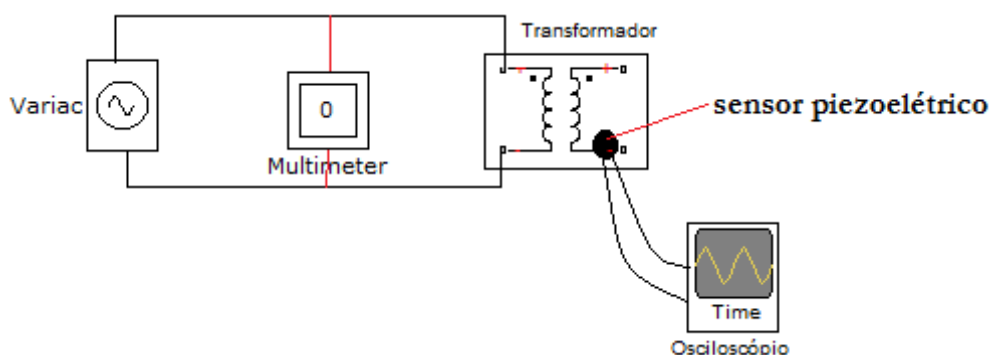


Figura 17. Ensaio a vazio

### 3.1.2 ENSAIO A CURTO-CIRCUITO

Para realizar o ensaio de curto-circuito, o lado de baixa tensão foi curto-circuitado e as medições foram feitas no lado de baixa tensão [16]. Foi aplicada uma corrente de 4,5 A (corrente nominal) e foi medido o máximo de pontos possíveis diminuindo está corrente. Os dados obtidos foram salvos em uma memória portátil para serem tratados no *Matlab*.

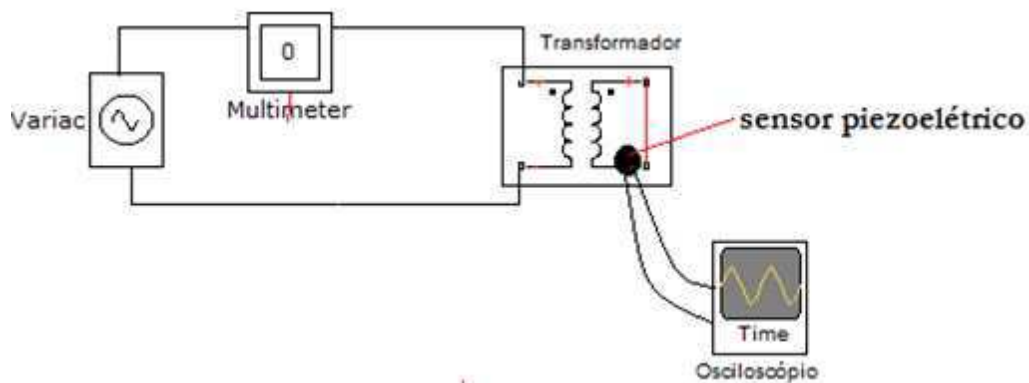


Figura 18. Ensaio de curto-circuito

Depois de realizar os ensaios com o sensor piezoelétrico, foi proposto fazer novamente os testes com um acelerômetro. O acelerômetro escolhido foi o ADXL345, este foi fixado na parte inferior do transformador. Os dados captados foram enviados para o microcontrolador onde esses eram lidos e reenviados para o *Matlab*. Ao fim do experimento, apesar de o sistema microcontrolador-PC-Matlab funcionar perfeitamente, foi constatado que o acelerômetro não foi sensível o suficiente para captar as vibrações oriundas do transformador.

### 3.2 EXPERIMENTO NO TRANSFORMADOR DE 5 kVA

O experimento consistiu em fazer o teste a vazio e de curto-circuito no transformador monofásico de 5 kVA (tipo MRT) com o *tap* ajustado para uma tensão primária de 22 kV e tensão secundária de 220 volts. O sensor piezoelétrico foi fixado novamente na parte inferior do transformador, diferente do caso anterior em que fixamos o sensor no núcleo, esse foi fixado no tanque.



Figura 19. Transformador monofásico de 5 kVA, MRT, com núcleo de liga amorfa.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 ENSAIO A VAZIO NO TRANSFORMADOR DE 1 KVA

O sensor piezoelétrico foi fixado no próprio núcleo do transformador. Os dados salvos foram utilizados para obter a FFT (*Fast Fourier Transform*) de cada sinal para uma determinada tensão. Podemos observar na Figura 20 que a frequência dominante é a de 120 Hz, o dobro da frequência da rede, devido ao fenômeno de magnetostricção.

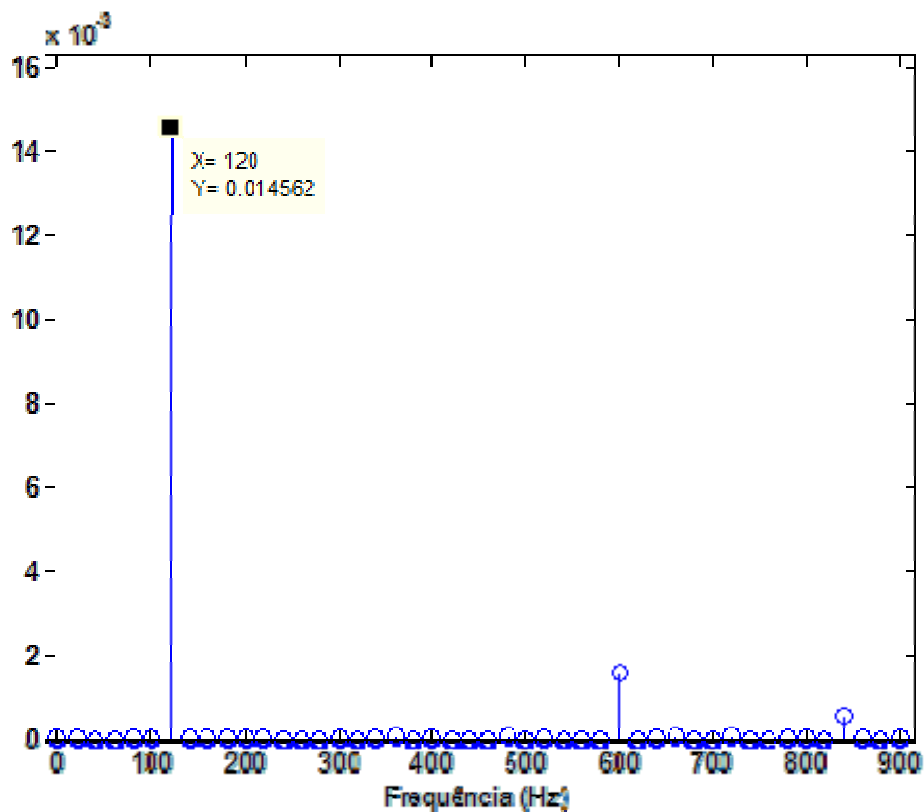


Figura 20. FFT do sinal do piezo para uma tensão de 35 V

Foi construída uma tabela na frequência de 120 Hz para verificar a relação da amplitude da vibração com a tensão. Utilizou-se, também, um gráfico do quadrado da tensão em função da amplitude da vibração. Com esses elementos, pode-se observar que o gráfico representado com a frequência de 120 Hz, Figura 21, apresentou uma forma linear, com coeficiente de  $5,16 \times 10^{-7}$ , assim provado na expressão 8.

Tabela 2 - Relação entre o quadrado da tensão e amplitude da frequência de 120 Hz

<b>Tensão ao quadrado</b>	<b>Amplitude da frequência de 120 Hz</b>
100	0,011768
225	0,01896
400	0,012506
625	0,01179
900	0,013584
1225	0,014562
1600	0,015093
2025	0,01478
2500	0,016167
3025	0,016986
3600	0,018395
4225	0,018947
4900	0,019578
5625	0,019712
6400	0,020961
7225	0,021566
8100	0,022167
9025	0,022535
10000	0,022459
11025	0,024035
12100	0,024008
13225	0,025122
14400	0,019578
15625	0,019712
16900	0,025759
18225	0,02644
19600	0,02702
21025	0,028019
22500	0,028548
24025	0,029333
25600	0,029981
27225	0,030567
28900	0,031229
30625	0,031907
32400	0,031366
34225	0,032558
36100	3,33E-02
38025	0,032623
40000	0,032982
42025	0,033605
44100	0,034805
46225	0,036886
48400	0,037843
50625	0,037837

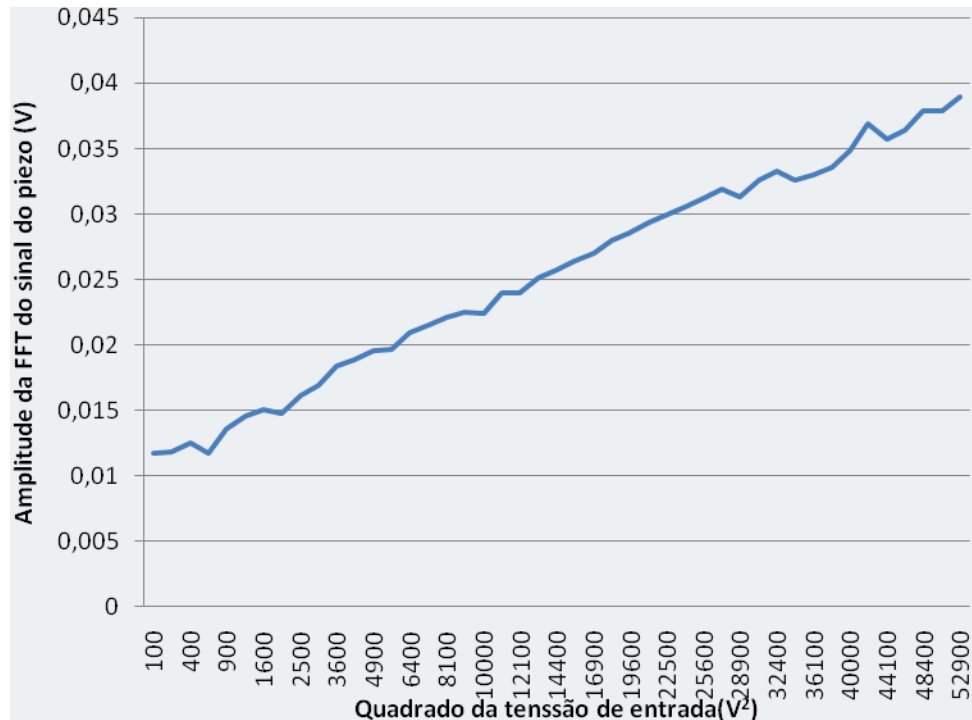


Figura 21. Relação do quadrado da corrente com a amplitude da frequência de 120 Hz

## 4.2 ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO NO TRANSFORMADOR DE 1 KVA

Os dados salvos foram utilizados para obter a FFT de cada sinal para uma determinada corrente. Podemos observar que a frequência dominante é a de 120 Hz, dobro da frequência da rede, devido ao fenômeno de magnetostricção.

Foi construída uma tabela na frequência de 120 Hz para verificar a relação da amplitude da vibração com a corrente. Utilizou-se também, um gráfico do quadrado da corrente em função da amplitude da vibração. Com esses elementos, pode-se observar que o gráfico representado com a frequência de 120 Hz, Figura 23, apresentou uma forma linear (com coeficiente linear de  $16,015 \times 10^{-5}$ ), assim como foi apresentado por García [13] [14] e provado na expressão 8. Outra observação importante são que as frequências das harmônicas múltiplas de 60 Hz (180 Hz e 300 Hz) apresentaram uma amplitude significativa em relação às demais harmônicas.



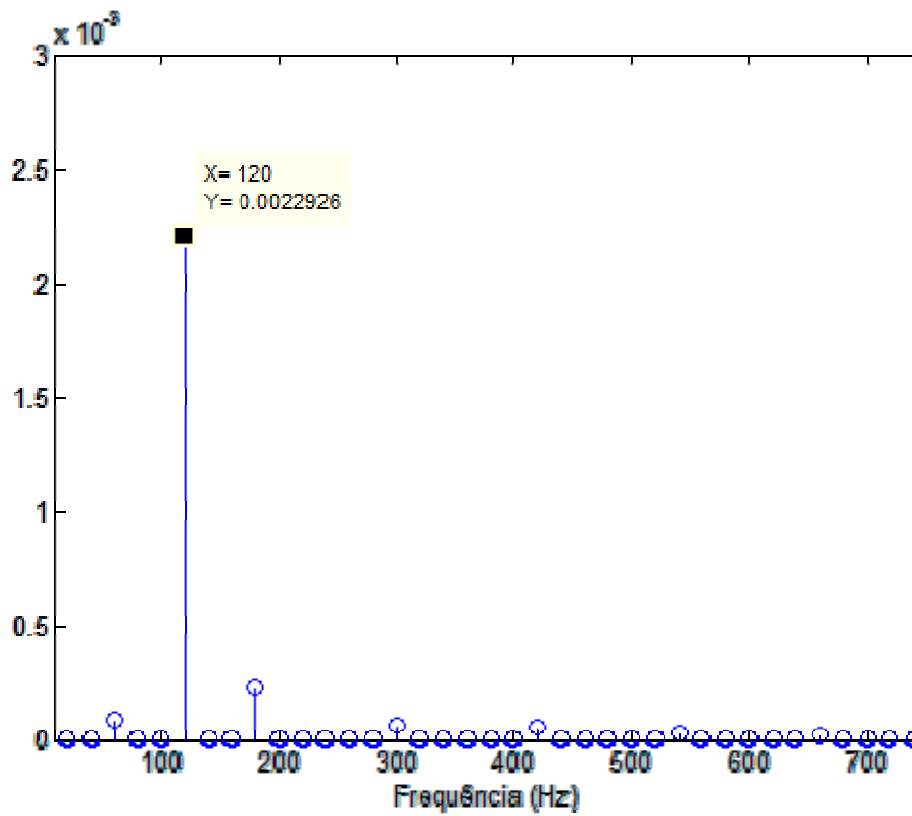


Figura 22. FTT do sinal do sensor piezo para uma corrente de 1,76 A.

Tabela 3 - Relação entre o quadrado da corrente e amplitude da frequência de 120 Hz.

Corrente ao quadrado	Amplitude da frequência na frequência de 120 Hz
0,3136	0,00126
1,3689	0,001564
3,2761	0,001931
4,2849	0,002293
7,0225	0,002523
8,9401	0,00297
11,0889	0,00341
14,8225	0,003875
17,4724	0,004153
20,7936	0,00454

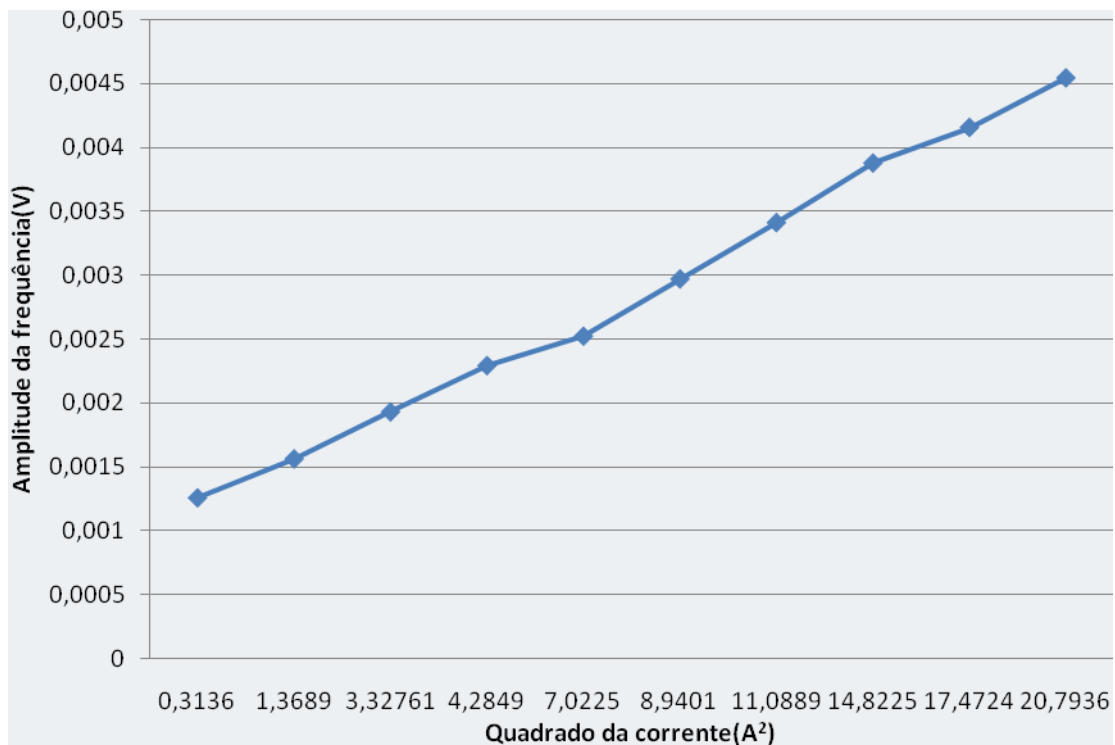


Figura 23. Relação entre o quadrado da corrente e a amplitude da frequência de 120 Hz.

### 4.3 EXPERIMENTOS NO TRANSFORMADOR DE 5 kVA

No ensaio em vazio só foram medidos pontos até uma tensão de entrada de 130 V (0,59 PU), devido a uma pequena descarga (audível) na bucha de alta tensão, quando averiguamos essa bucha foi descoberto que a mesma continha uma pequena folga, este defeito foi corrigido para a realização do ensaio de curto-circuito. No decorrer do ensaio foi percebido que o sensor piezoelétrico não estava vibrando na frequência de 120 Hz e sim na frequência da rede (60 Hz). Foi feita a FFT do sinal no *Matlab* e confirmamos que o sensor não estava lendo a frequência de vibração esperada.

Foi concluído que o sensor não foi sensível o suficiente para captar as vibrações vinda do núcleo do transformador. Uma hipótese de solução seria conectar o sensor diretamente ao núcleo ferromagnético, para tanto teria que abrir a tampa do transformador e inserir o sensor em meio ao óleo, contudo tal procedimento não foi realizado devido aos riscos envolvidos, dado que o sensor não garantia isolamento elétrico.

Observa-se pela FFT da Figura 24 que o sensor não foi capaz de mensurar a frequência de vibração do núcleo, a frequência medida foi a da rede 60 Hz.

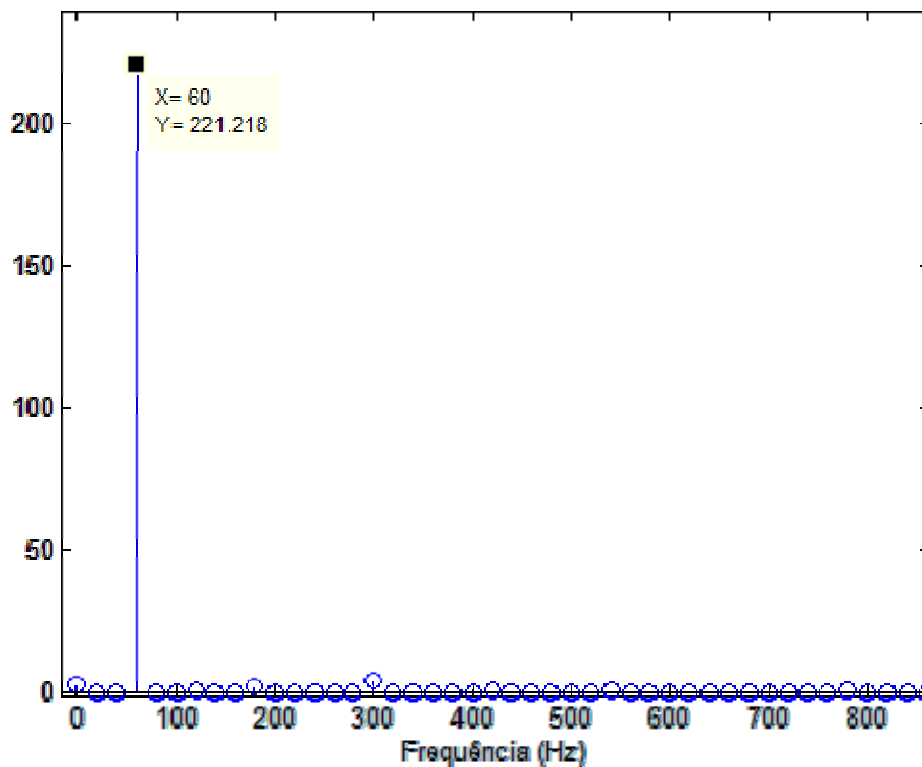


Figura 24. FFT do sinal do sensor piezo.

Foi observado no experimento que ao aumentar a tensão de entrada do transformador a amplitude do sinal do piezo também aumentava o que indica indução no sensor. A amplitude do sinal de vibração no transformador de 5 kVA deveria ser menor do que a amplitude do sinal do transformador de 1 kVA, visto que o sensor não conseguiu captar as vibrações vindas do núcleo. Comparando as Figuras 20 e 24, é possível verificar que a amplitude do sinal no transformador de 5 kVA é maior. Isso significa que a frequência lida foi a da indução da rede (60 Hz). A ocorrência dessa falha foi provavelmente devido a um erro de aterramento, neste caso o sensor ficou flutuando.

## 5 CONCLUSÃO

Pesquisas realizadas com transformadores, equipamento fundamental de uma subestação, têm evitado falhas no funcionamento desses equipamentos, minimizando desta forma os prejuízos causados por uma manutenção feita de emergência ou por uma substituição de equipamento danificado, evitando conseqüentemente um alto custo financeiro. Essas pesquisas têm crescido nos últimos anos e elas, geralmente, utilizam os seguintes estudos: detecção através da temperatura dos enrolamentos, detecção através dos gases presente no óleo e detecção através da vibração dos enrolamentos dos transformadores, sendo este último o objeto de estudo deste trabalho.

O presente trabalho investigou a detecção de falhas em transformadores através da vibração presente nos enrolamentos, pois essas falhas representam 27% dos defeitos encontrados nos transformadores das subestações [8]. Outro motivo para a escolha dessa investigação é que o diagnóstico através do FFT do sinal de vibração dos enrolamentos é um estudo novo, podendo ter um futuro promissor na área da manutenção preventiva, pois o monitoramento é de forma contínua, sem ter necessidade de o transformador estar parado para o recolhimento de amostras ou dados.

Esse trabalho correlacionou a vibração mecânica do transformador com a corrente e com a tensão, provou que as relações da vibração com o quadrados da tensão e com o quadrado da corrente eram lineares. Foi proposto inicialmente fazer os ensaios nos dois transformadores monofásicos com o sensor piezoelétrico e depois refazer os mesmos com um acelerômetro e comparar os resultados. O primeiro teste feito foi no transformador de 1 kVA e com o sensor piezoelétrico, com o qual obtivemos os resultados esperados, conseguiu-se provar que tanto o quadrado da corrente quanto o quadrado da tensão possuem uma relação linear com a vibração mecânica. Foi constatado também que a frequência de vibração do transformador foi de 120 Hz, o dobro da frequência da rede, devido ao fenômeno de magnetostricção. O segundo teste feito no transformador de 5 kVA e com o sensor piezoelétrico, com este, não foram obtidos os resultados esperados, a frequência lida foi a frequência da rede. Neste tipo de transformador (MRT), o aterramento é feito através da carcaça e pela mesma também é feito o retorno do neutro, isso dificultou na realização do teste. Outra dificuldade

encontrada neste ensaio foi a realização da medição em transformadores de tanque, visto que o óleo dificulta a transmissão da vibração para o tanque.

De modo geral obteve-se um resultado positivo dos ensaios realizados, visto que foi possível conseguir a relação linear da vibração mecânica com a corrente e com a tensão no transformador de 1 kVA. Os estudos devem prosseguir para que os ensaios sejam feitos com acelerômetros ou com sensores mais específicos para captação da frequência. Depois desta primeira etapa concluída, sugere-se que estudos sejam feitos de forma que, falhas sejam inseridas em um transformador teste para que seja possível identificar a frequência que cada uma delas inseridas provoca. Assim, no futuro poderia ser possível criar um protótipo capaz de detectar essas falhas ajudando na manutenção preventiva deste tipo de equipamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. V. ANTIPOV, V. Y. GORSHUNOV, V. N. MALINOVSKII, A. P. SKLYAROV, and N. N. KHUBLAROV, "**System for diagnosing the mechanical condition of the windings of high-power double-wound transformers**", Meas. Techn., vol. 39, no. 9, pp. 93–97, 1996.
- [2] B. SOKOLOV and B. VANIN, "**Experience with detection and identification of winding buckling in power transformers**", in Proc. 68th Annu. Int. Conf. Doble Clients, 2001.
- [3] WANG, M.; VANDEMAAR, A. J.; SRIVASTAVA, K. D. **Transformer Winding Movement Monitoring in Service - Key Factors Affecting FRA Measurements**. IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 20, n. 5, p. 5–12, Sept. /Oct. 2004.
- [4] FRANZEN, A., KARLSSON, S., **Failure Modes and Effects Analysis of Transformers**. Royal Institute of Technology, KTH, School of Electrical Engineering, Stockholm, January 2007.
- [5] ROSENTINO, A., J., P., **Estimativa dos esforços eletromecânicos em transformadores submetidos a um curto-circuito trifásico**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2010.
- [6] MEDINA P., M. C., **Falhas em transformadores de Potência: Uma contribuição para Análises, Definições, Causas e Soluções**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2003.
- [7] YUYING S., ZHUSHI R., ZHIJIAN J., **Online State Diagnosis of Transformer Windings Based on Time-frequency Analysis**. WSEAS TRANSACTIONS on CIRCUITS and SYSTEMS Issue 2, Volume 8, February 2009.
- [8] AZEVEDO, A., C., **Estresse Eletromecânico em Transformadores causado por Curtos-Circuitos “Passantes” e correntes de energização**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2007.
- [9] AGUIAR, E. R., **Análise de Resposta em Frequência Aplicada em Transformadores de Potência**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, 2007.
- [10] AZEVEDO, A., C., REZENDE, I., DELAIBA, A., C., OLIVEIRA, J., C., CARVALHO, B., C., BRONZEADO, H., S., **Forças Eletromagnéticas em Transformadores Causadas por Curtos-Circuitos Externos: Investigação Utilizando FEM**, The 8th Latin-American Congresso on Electricity Generation and Transmission, GLAGTEE 2009.
- [11] SEQUEIRA, C., **Sensores para Medições de Vibrações Mecânica-Acelerómetros**, Revista Manutenção, Lisboa, 2006.
- [12] RUBIO, M., G., **Curso de Introdução a instrumentação em Engenharia Módulo Básico**, IPT – Instituto de Pesquisa de São Paulo, 2000.

- [13] GARCÍA, B., BURGOS J. C., AND ALONSO, A. M., **Transformer Tank Vibration Modeling as a Method of Detecting Winding Deformations – Part I: Theoretical Foundation**. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 21, NO. 1, JANUARY 2006.
- [14] GARCÍA, B., BURGOS J. C., AND ALONSO, A. M., **Transformer Tank Vibration Modeling as a Method of Detecting Winding Deformations – Part II: Experimental Verification**. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 21, NO. 1, JANUARY 2006.
- [15] OLIVEIRA, J., C., R., **Instrumentação Medição de Nível de Água com Sensor Piezoresistivo amplificado**. Laboratório de Controle e automação I, Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5380: **Transformador de Potência**, Rio de Janeiro, 1993.