

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

LIDJA NAYARA TAVARES ALVES

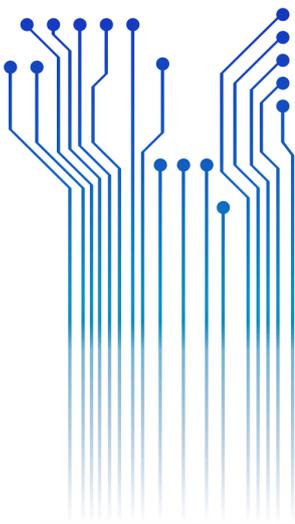


Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO
LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO - UFCG



Departamento de
Engenharia Elétrica



LIDJA NAYARA TAVARES ALVES

RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO NO LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

*Relatório de Estágio Supervisionado 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: Processamento de Energia

Orientador:

Professor Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.

Campina Grande
2016

LIDJA NAYARA TAVARES ALVES

RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO NO LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

*Relatório de Estágio Supervisionado 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: Processamento de Energia

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 aos meus pais,
Marcos Alves e Arizonete Tavares.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por cada etapa vencida para chegar até aqui, nas quais Ele sempre esteve ao meu lado. Agradeço a Nossa Senhora, minha mãezinha, por todas as vezes que me colocou em seu colo e intercedeu por mim.

Aos meus pais, Marcos Alves e Arizonete Tavares, por todo o esforço realizado na minha educação, pelos valores morais, pelo apoio e amor que sempre me dão. Simplesmente agradeço por ter pais incríveis.

Agradeço ao meu orientador, Professor Tarso Vilela, pela paciência e orientação.

Agradeço aos mestres e funcionários do DEE-UFCG, dos quais levarei lições para a vida inteira, não apenas enquanto profissional, mas também como ser humano.

Agradeço a todos os meus familiares, pelo carinho, estímulo e incentivo.

Agradeço a Antonio Neto por todo apoio, ensinamento, força e paciência na realização deste trabalho.

Aos técnicos do LAT por todo o suporte para a realização do estágio. Em especial a Higor Rocha, por toda a assistência e execução da bobinadeira.

Por fim, aos amigos que tanto compartilharam as diversas situações em minha vida ao longo da graduação.

*“Nas grandes batalhas da vida
o primeiro passo para a vitória
é o desejo de vencer.”*

Mahatma Gandhi

RESUMO

Neste relatório são descritas as atividades da graduanda Lidja Nayara Tavares Alves, desenvolvidas no estágio supervisionado creditado em 182 horas sem vínculo financeiro, junto ao Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Campina Grande. As atividades desenvolvidas e descritas neste trabalho visam automatizar a tarefa relativa à elaboração de um projeto e execução de transformador monofásico de alta tensão e baixa potência. Para obtenção de tal resultado desenvolveu-se uma planilha eletrônica no *Microsoft Excel*®, empregando métodos computacionais pertinentes ao projeto de um transformador. Além disso, elaborou-se a construção de uma bobinadeira, cujo principal objetivo é minimizar o tempo necessário para a realização da montagem de um transformador.

Palavras-chave: Alta Tensão, Bobinadeira, Potência, Projeto, Transformador.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Salão de alta tensão.....	11
Figura 2 – Disposições básicas de enrolamentos em um transformador monofásico: ...	15
Figura 3 - Transformador monofásico com chapas de Fe-Si.....	16
Figura 4 – Transformador tipo tanque.....	21
Figura 5 – Transformador tipo recinto isolado.....	21
Figura 6 - Transformadores de ensaio conectados em cascata.....	22
Figura 7 – Bobinadeira.....	23
Figura 8 – Pedal de controle de velocidade.....	24
Figura 9 – Diagrama de controle de velocidade.....	24
Figura 10 - Montagem do controle de velocidade:.....	25
Figura 11 - Dados informados.....	27
Figura 12 - Resultados técnicos e projeto para execução.....	27
Figura 13 – Dimensionamento das chapas UI.....	28
Figura 14 - Dados geométricos.....	28

SUMÁRIO

1	Introdução.....	10
1.1	Objetivos.....	10
1.2	Laboratório de Alta Tensão.....	10
1.2.1	Salão de Alta Tensão.....	11
1.2.2	Sala do Gerador de Impulso.....	12
1.2.3	Sala do <i>Kit</i> de Alta Tensão.....	12
1.3	Estrutura do Trabalho.....	13
2	Embasamento Teórico.....	14
2.1	Transformadores.....	14
2.1.1	Transformadores com Núcleo de Chapas.....	15
2.2	Projeto de Transformador Monofásico de Baixa Potência.....	16
2.3	Transformadores de Ensaios.....	20
3	Atividades Desenvolvidas.....	23
3.1	Bobinadeira para Transformador de ATBP.....	23
3.2	Planilha Eletrônica para Projeto de Transformador Monofásico.....	26
4	Conclusão.....	29
	Referências.....	30
	ANEXO A – Características dos Fios AWG para Realização de Compra.....	31

1 INTRODUÇÃO

Neste relatório serão apresentadas as atividades desenvolvidas por Lidja Nayara Tavares Alves durante seu Estágio Curricular Supervisionado, o qual é requisito para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O Estágio contou com uma carga horária de 180 horas que foram preenchidas em 40 horas semanais, tendo seu início 20 de Junho e término em 21 de Julho de 2016. O estágio foi realizado no Laboratório de Alta Tensão (LAT) da UFCG.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste relatório é descrever as atividades realizadas pela estagiária, a fim de, juntamente com sua defesa oral pública, comprovar a realização do mesmo junto à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da UFCG, tornando o estagiário parcialmente apto à colação de grau.

Como objetivos específicos, têm-se:

- Desenvolver uma planilha eletrônica para a execução de projetos de transformadores monofásicos de alta tensão e baixa potência;
- Desenvolver habilidades com a ferramenta *Microsoft Excel*® no sentido de viabilizar os projetos de transformadores supracitados;
- Acompanhar o projeto e execução de uma bobinadeira que permita a construção de enrolamentos para transformadores de alta tensão e baixa potência, aplicáveis a ensaios de laboratório.

1.2 LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO

O Laboratório de Alta Tensão (LAT) começou a ser implementado em 1974, devido a uma associação de recursos nacionais com os de algumas cooperações técnicas internacionais. O LAT possui equipamentos sofisticados e um corpo técnico formado

por docentes-pesquisadores, engenheiros e técnicos qualificados e experientes. Tal combinação permite o desenvolvimento de atividades de ensino, pesquisa e extensão relacionadas à ênfase de eletrotécnica (GSE, 2014).

Hoje, o LAT é composto pelos seguintes ambientes de laboratório: salão de Alta Tensão, sala do Gerador de Impulso de Corrente e sala do *Kit* de Alta Tensão.

1.2.1 SALÃO DE ALTA TENSÃO

O Salão de Alta Tensão é o principal ambiente utilizado para realização de ensaios do LAT. Nele são realizados os ensaios que requerem níveis de tensão mais elevados, o que é possível devido à disponibilidade de equipamentos como o gerador de impulsos de alta tensão, de até 700 kV e dos transformadores de potência ligados em cascata, que permitem gerar até 600 kV. O laboratório ainda conta com um transformador menor, o qual pode ser utilizado quando não se necessita de tensões tão elevadas, podendo fornecer até 120 kV. A cabine de medição existente também no salão de alta tensão é equipada com uma mesa de controle, capaz de operar o nível de tensão gerado pelo transformador em uso e realizar as medições necessárias. Na Figura 1 é mostrada uma fotografia da visão geral do Salão de Alta Tensão.

Figura 1 - Salão de alta tensão.



Fonte: Própria autora.

Os principais ensaios realizados neste salão são: ensaios de validação de modelos computacionais, ensaios de envelhecimento, ensaios de descargas e ensaios de rotina feitos em equipamentos de manutenção em instalações energizadas.

Além disso, também se encontra neste ambiente, uma câmara de névoa utilizada para ensaios com simulação de umidade ou névoa salina.

1.2.2 SALA DO GERADOR DE IMPULSO

O Gerador de Impulso de Corrente (GIC) é um equipamento de fabricação da *Haefely*. Basicamente, o GIC é um circuito capaz de gerar correntes impulsivas de elevadas magnitudes (até 100 kA) em um intervalo de tempo da ordem de microssegundos (μs). Seu funcionamento consiste no carregamento suave de capacitores de potência e descarregamento instantâneo, gerando uma corrente impulsiva. O objeto de teste, ao qual se deseja aplicar a alta corrente, é colocado na malha de descarregamento, de forma que toda a corrente de descarregamento dos capacitores passe pelo objeto de teste.

O GIC é um dos equipamentos mais importantes do LAT. Poucas instituições no Brasil dispõem desse equipamento. O mesmo tem sido utilizado para diversos objetivos, tais como: ensaios de equipamentos e pesquisas envolvendo aterramentos e para-raios.

1.2.3 SALA DO *KIT* DE ALTA TENSÃO

O *kit* de Alta Tensão é composto por: um transformador de 5 kVA com tensão de saída de até 100 kV, capacitores de alta tensão, resistores de alta tensão, espinterômetros, câmaras para descarga em gases e à vácuo, entre outros.

Possui uma mesa de comando pela qual se pode controlar o nível de tensão aplicada aos objetos de teste utilizando-se de comandos manuais, e também possui instrumentos de medição, voltímetros de pico para tensões alternada, contínua e impulsiva. Os medidores estão associados aos divisores de tensão, capacitivo, resistivo e capacitivo, respectivamente.

O *kit* de alta tensão geralmente é utilizado por alunos das disciplinas de Materiais Elétricos, Equipamentos Elétricos e Técnicas de Alta Tensão. Além dos alunos de pós-graduação, tanto durante as disciplinas como na montagem de seus experimentos.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este relatório está dividido em quatro capítulos. O Capítulo 1 compreende a presente introdução, em que são apresentados os objetivos deste relatório e a estrutura do Laboratório de Alta Tensão, local de realização do estágio. Uma breve fundamentação teórica sobre transformador será apresentada no Capítulo 2. No Capítulo 3 será feita a descrição das atividades desenvolvidas. Por fim, no Capítulo 4 estão apresentadas as conclusões e considerações finais.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1 TRANSFORMADORES

O transformador é um equipamento cujo princípio de funcionamento baseia-se na indução eletromagnética, decorrente do acoplamento entre duas ou mais bobinas (circuitos elétricos) através de um núcleo fechado; constituído, geralmente, de material ferromagnético (circuito magnético). De larga aplicação na eletroeletrônica, a função mais comum do transformador é transferir energia elétrica de um circuito de entrada para um circuito de saída, elevando ou baixando os valores de tensão e corrente, mantendo a frequência invariável. Na prática, entretanto, esta transferência de energia do primário para o secundário, através do circuito magnético, é acompanhada por perdas em ambos os circuitos: elétricos e magnético (LUCIANO, 1995).

O transformador básico é constituído de dois circuitos independentes, geralmente espiras de fio, sendo o primeiro circuito chamado de primário e o outro de secundário (FITZGERALD *et al.*, 1990). O circuito primário é atravessado por uma corrente alternada (variável). Então é gerado um campo magnético, que pode ou não ser variável, dependendo da forma como varia a corrente no circuito primário, mas, para que o transformador funcione, ele tem que ser variável (FITZGERALD *et al.*, 1990; CAPARÓ, 2005).

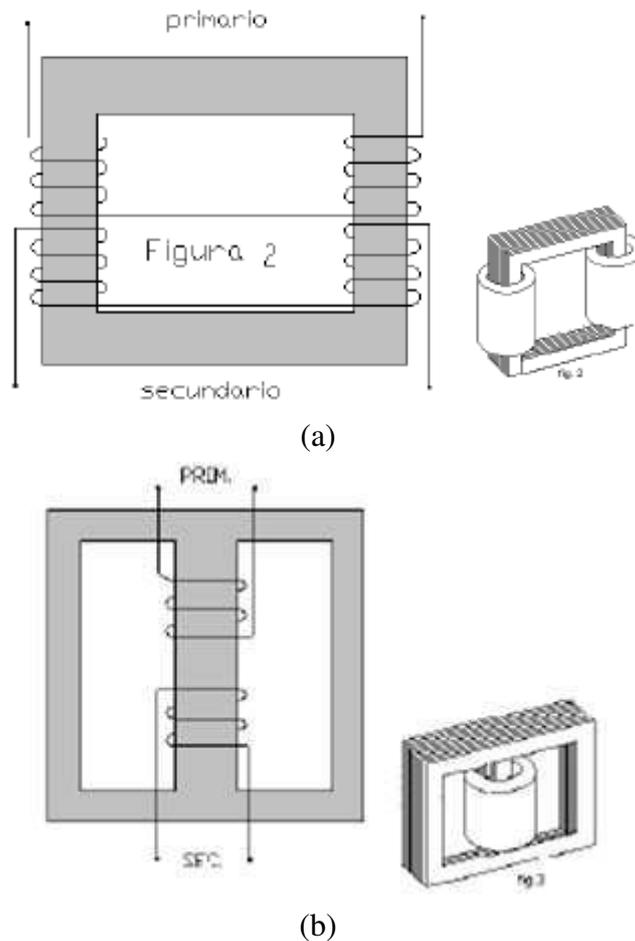
O circuito secundário é atravessado pelo campo magnético variável gerado no circuito primário, então é produzida no circuito secundário uma corrente, que tem a mesma forma da corrente que atravessa o circuito primário, mas com tensão alterada, para mais ou para menos, de acordo com um fator de proporcionalidade: a relação no número de espiras dos circuitos ($N1/N2$). A tensão no circuito secundário (tensão de saída) é igual a tensão no circuito primário (tensão de entrada) multiplicado pela fração $N2/N1$, sendo $N2$ o número de espiras do circuito secundário e $N1$ o número de espiras do circuito primário (FITZGERALD *et al.*, 1990).

Se o meio através do qual se dá a transferência do campo magnético das espiras do primário para o secundário for o ar, as perdas envolvidas serão elevadas. Para minimizar estas perdas são utilizados materiais ferrosos (ferromagnetites) que ajudam a transmitir o campo magnético. Mesmo nestes materiais ocorrem perdas, sendo as

principais, as perdas por histerese e as correntes de Foucault. Estas causam uma perda de cerca de 10% na tensão induzida no secundário (FITZGERALD *et al.*, 2006).

De uma forma genérica, em termos de configurações, os transformadores monofásicos podem ser construídos com uma das duas formas: com os enrolamentos envolvidos em torno dos dois lados de um núcleo retangular, ou com os enrolamentos envolvendo uma coluna central de um núcleo constituído de três colunas, conforme a Figura 2.

Figura 2 – Disposições básicas de enrolamentos em um transformador monofásico:
 (a) Núcleo com enrolamentos envolvidos em torno dos dois lados do núcleo;
 (b) Núcleo com enrolamentos envolvendo uma coluna central.



Fonte: (CALIL & SILVA, 2008).

2.1.1 TRANSFORMADORES COM NÚCLEO DE CHAPAS

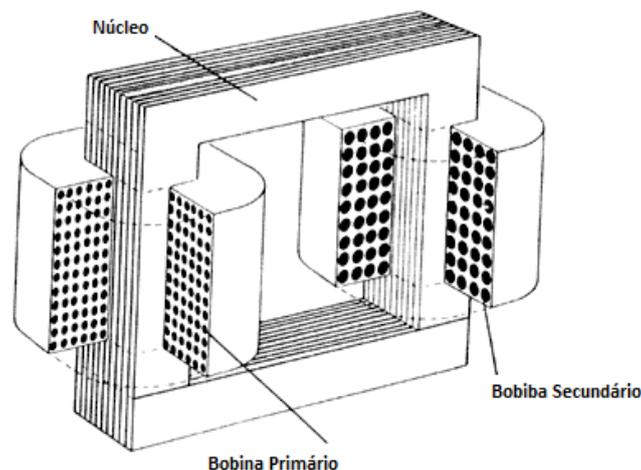
Os transformadores convencionais possuem seus núcleos construídos com chapas de Fe-Si de grãos orientados, recortadas em formatos que possam receber os enrolamentos. Estes núcleos são dimensionados em função do tipo e da potência do transformador e tem a função de criar um circuito magnético para que haja a circulação

do fluxo. As chapas são fabricadas em espessuras variadas e de acordo com padrões internacionais. Podem ser dispostos de diversas formas. E-I, E-E U-I, que indicam o tipo de lamina que será usado (FERREIRA, 2011).

As chapas de ferro-silício são laminadas a frio, seguidas de um tratamento térmico adequado, que permite que os grãos magnéticos sejam orientados no sentido da laminação. São cobertas por uma fina camada de material isolante (elétrico) e fabricadas dentro de limites máximos de perdas eletromagnéticas (CALIL & SILVA, 2008).

Na Figura 3 pode ser observado um transformador monofásico básico com um circuito magnético, construído com chapas metálicas e duas bobinas.

Figura 3 - Transformador monofásico com chapas de Fe-Si.



Fonte: (CALIL & SILVA., 2008).

2.2 PROJETO DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE BAIXA POTÊNCIA

No projeto de um transformador um item de grande importância é a escolha do núcleo magnético além do conhecimento dos parâmetros geométricos de um núcleo, pois são eles que estão diretamente relacionados ao tamanho das espiras, ao caminho que o fluxo magnético percorre e também, à área disponível para passagem de fluxo magnético.

O carretel sobre o qual são enroladas as bobinas é constituído por cartolina isolante, fibra ou *teflon*. O enrolamento das bobinas sobre o carretel se processa colocando-se uma folha de papel isolante intercalando uma camada e outra de

condutores. A separação entre a bobina primária e a bobina secundária deve ser feita com várias camadas de papel *kraft*. Ao se executar o enrolamento das bobinas é aconselhável enrolar primeiro a bobina de tensão mais elevada, pois esta sendo de fio mais fino, se molda mais às curvas apertadas nos vértices do carretel (FRAGOSO, 2010).

Em geral o núcleo dos transformadores de baixa tensão é feito com lâminas padronizadas, chamadas de “E” e “I”, em virtude do seu formato especial. Os transformadores de alta tensão utilizam núcleo do tipo U e U-I, devido à possibilidade de alocar-se cada enrolamento numa das pernas, facilitando a isolação, à custa de um maior fluxo disperso. As lâminas padronizadas para transformadores monofásicos são classificadas por números (FRAGOSO, 2010). Na Tabela 1 pode ser visto as características das lâminas de 0 a 6.

Tabela 1 – Lâminas padronizadas e compridas.

Nº	a (cm)	Seção da janela (mm ²)	Massa do núcleo (kg)
Lâminas padronizadas			
0	1,5	168	0,095
1	2	300	0,170
2	2,5	468	0,273
3	3	675	0,380
4	3,5	900	0,516
5	4	1200	0,674
6	5	1880	1,053
Lâminas compridas			
5	4	2400	1,00
6	5	3750	1,58

Fonte: (FRAGOSO, 2010).

Ao iniciar-se o projeto de um transformador monofásico de baixa potência a partir de um núcleo pré-existente, precisa-se determinar qual a potência máxima que poderá ser considerada. Para tanto é necessário o fornecimento dos valores da potência secundária, tensão primária, tensão secundária e frequência. Alguns fabricantes preferem fornecer a corrente secundária ao invés da potência secundária.

A potência primária é calculada acrescentando-se à potência secundária 10% do seu valor, a fim de compensar as perdas, conforme dado por (1):

$$W1 = W2 * 1,1 \quad (1)$$

em que $W1$ é a potência aparente da entrada [VA] e $W2$ é a potência aparente da saída [VA].

Para calcular a seção transversal dos condutores, é necessário definir a densidade de corrente para o transformador em questão. Resultados práticos satisfatórios alcançados por projetistas orientam seguir os dados vistos na Tabela 2, na escolha da densidade de corrente em função da potência projetada.

Tabela 2 – Relação entre potência e densidade de corrente.

Potência (VA)	Densidade de corrente (A/mm ²)
até 500	3
entre 500 e 1000	2,5
entre 1000 e 3000	2

Fonte: (FRAGOSO, 2010).

Em geral, com o aumento do transformador, aumentam as dificuldades de irradiação de calor; por esta razão, é preciso diminuir a densidade da corrente nos condutores ao aumentar a potência do transformador (BERTINI, 2003).

A partir da densidade de corrente pode-se calcular a seção dos condutores, conforme as expressões (2) e (3):

$$S1 = I1 / d \quad (2)$$

$$S2 = I2 / d \quad (3)$$

em que $S1$ é a seção do condutor primário [mm²]; $S2$ é a seção do condutor secundário [mm²]; $I1$ é a corrente primária [A]; $I2$ é a corrente secundária [A] e d é a densidade de corrente [A/mm²].

Estes valores raramente coincidem com os encontrados à venda no mercado. Deve-se consultar a tabela de fios esmaltados, constante no ANEXO A, caso não seja encontrado o valor exato da seção calculada, deverá ser escolhido o valor imediatamente superior, o que representa um menor aquecimento, menos perda e menor queda de tensão para o enrolamento (BERTINI, 2003).

Em um circuito elétrico enrolado sobre ferro existe uma relação de dependência entre a seção do núcleo magnético e o número de espiras dos enrolamentos, isto é, aumentando-se o núcleo, diminui-se o número de espiras e vice-versa. Para o emprego de poucas espiras, é necessária a escolha de um núcleo muito grande, o que traria

inconveniência no uso do transformador, já que este ocuparia grande espaço físico. Por outro lado, se for escolhido o núcleo pequeno, trará o emprego de muitas espiras, o que provavelmente não caberá na janela do transformador. O núcleo bem escolhido é aquele que permite o emprego de bobinas que entram justas na janela (FRAGOSO, 2010). A seção magnética dos transformadores de um primário e um secundário é calculada pelas expressões (4) e (5), respectivamente, se forem compostas por lâminas padronizadas e lâminas compridas.

$$Sm = 7,5\sqrt{W2/f} \quad (4)$$

$$Sm = 6\sqrt{W2/f} \quad (5)$$

em que Sm é a seção magnética [cm^2]; $W2$ é a potência aparente da saída [VA] e f é a frequência [Hz].

A partir da seção magnética pode-se obter o número de espiras específicas, ou seja, o número de espiras por volt para a confecção dos enrolamentos primário e secundário. A determinação do número de espiras/volt para o primário é dada por (6):

$$N1 = V1 \frac{10^8}{4,44BfSm} \quad (6)$$

em que $N1$ é o número de espiras do primário; $V1$ é a tensão no primário; Sm é a seção magnética [cm^2]; B é a indução magnética [G] e f é a frequência [Hz].

A seção magnética corresponde apenas à seção do ferro que constitui a perna central do núcleo. Como as lâminas possuem isolamento (verniz, etc.) e podem apresentar deformações, para efeitos práticos é feita uma redução em torno de 10% na área total da perna central para conhecermos a área efetiva da ferragem (FRAGOSO, 2010).

Para as espiras secundárias, emprega-se a expressão dada por (7), em que, comparativamente à expressão (6), substitui-se $V1$ por $V2$ e acrescenta-se 10% ao resultado, para compensar alguma perda na tensão secundária (BERTINI, 2003).

$$N2 = V2 \frac{10^8}{4,44BfSm} 1,1 \quad (7)$$

em que N_2 é o número de espiras do secundário; V_2 é a tensão no secundário; S_m é a seção magnética [cm^2]; B é a indução magnética [G] e f é a frequência [Hz].

Para que as bobinas possam entrar na janela e a montagem do transformador seja possível, é preciso que se verifique a expressão dada por (8):

$$\frac{\text{Seção da janela}}{\text{Seção do cobre}} = \frac{S_j}{S_{Cu}} \geq 3 \quad (8)$$

Se esta relação for menor que 3 é preciso recalcular o transformador com um núcleo maior ou formato diferente (lâmina comprida).

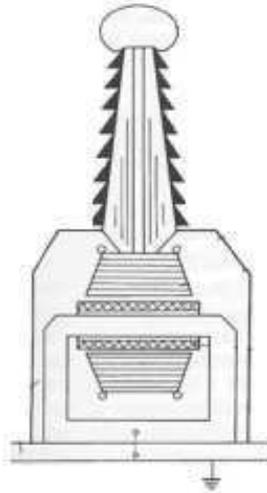
2.3 TRANSFORMADORES DE ENSAIOS

Transformadores de teste utilizados para geração de alta tensão alternada têm consideravelmente baixa potência e uma relação de transformação maior do que transformadores de potência. Para alta tensão, o enrolamento é concebido de tal forma que ele possa suportar os ensaios de rotina que ocorrem na amostra. A corrente primária é normalmente fornecido através dos transformadores alimentados a partir da rede elétrica ou, em casos especiais, por geradores síncronos.

Os transformadores de baixa potência são semelhantes em construção aos transformadores de alta tensão. Para tensões de até cerca de 100 kV isolamento de resina epóxi é amplamente utilizado; papel impregnado de óleo ou de óleo com barreiras isolantes e espaçadores são usados em tensões mais altas. Em alta potência, o arrefecimento dos enrolamentos se torna importante, e as características de construção se assemelham aos de transformadores de potência. Óleo com barreiras e de papel impregnado de óleo predominam como isolamento (KIND & FESER, 2001).

Existem inúmeros desenhos para transformadores de ensaio com isolamento a óleo. Na construção do tipo tanque, as partes ativas (núcleo) e enrolamentos são colocados num recipiente de metal à superfície da qual fornece auto arrefecimento útil. No entanto, em altas tensões a exigência de espaço e de custo elevado da bucha é uma desvantagem. Na Figura 4 pode ser observado o transformador tipo tanque.

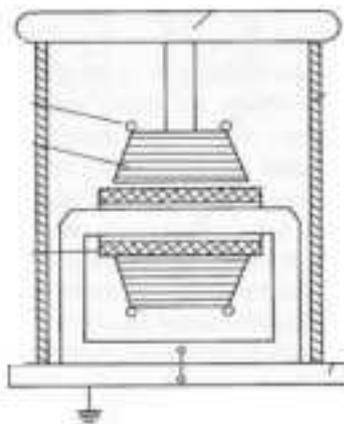
Figura 4 – Transformador tipo tanque.



Fonte: (KIND & FESER, 2001).

Em um transformador do tipo recinto isolado, as partes ativas estão rodeadas por um cilindro de isolamento. Em geral, os transformadores deste tipo contêm uma quantidade relativamente grande de óleo e por isso tem grande constante de tempo térmica no caso de sobrecarga. A dissipação de calor através do recinto isolado é muito pequena; conseqüentemente, circuito fechado de arrefecimento por meio de permutadores de calor externos é necessário (KIND & FESER, 2001). Na Figura 5 pode ser visto o transformador tipo recinto isolado.

Figura 5 – Transformador tipo recinto isolado.

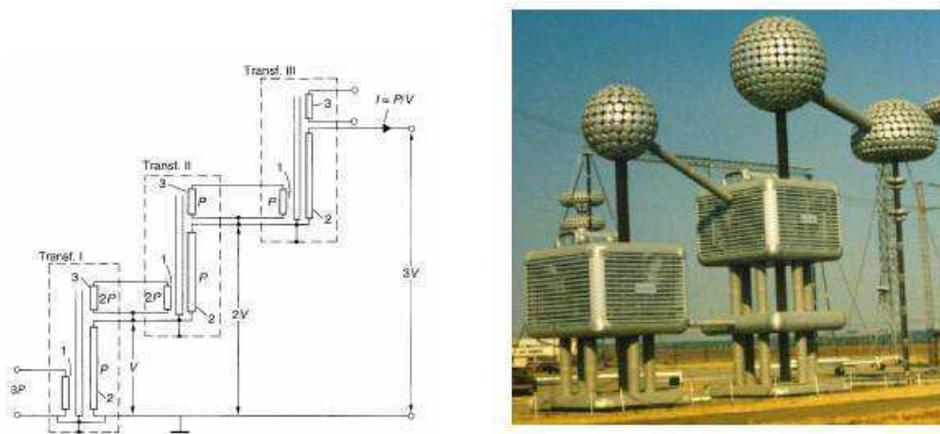


Fonte: (KIND & FESER, 2001).

Os transformadores de ensaio devem ser submetidos a condições de tensões normalmente encontradas no sistema de potência. Estas tensões incluem as tensões CA ou CC de sistemas e de comutação e tensões de impulso atmosférico.

Transformador de ensaio pode ser utilizado em ligações em cascata onde cada unidade tem 3 enrolamentos: um primário (baixa tensão), um secundário (alta tensão) e terciário (baixa tensão) enrolamento. O enrolamento terciário (enrolamento de excitação) da primeira fase tem o mesmo número de espiras do enrolamento primário, no entanto, ele é isolado em alta tensão. O enrolamento terciário é utilizado para alimentar o primário da unidade seguinte. O tanque do transformador-I é ligado à terra. Os tanques dos transformadores II e III têm potenciais de V e $2V$, respectivamente, acima da terra e, portanto, estes devem ser isolados da terra com isolamento sólido adequado. Na figura 6 pode ser observado as ligações em cascata (HOLTZHAUSEN & VOSLOO, 2011).

Figura 6 - Transformadores de ensaio conectados em cascata.



Fonte: (HOLTZHAUSEN & VOSLOO, 2011).

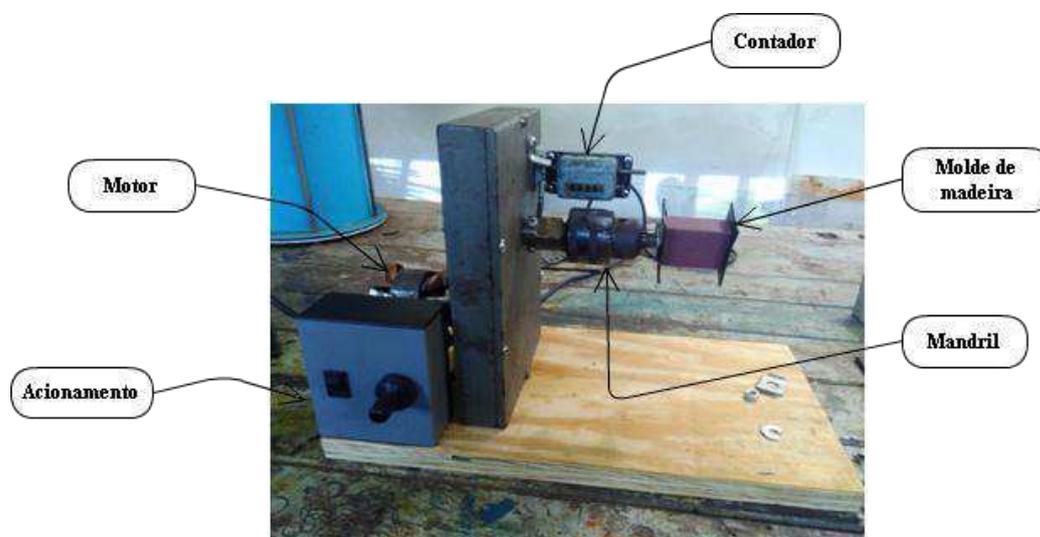
3 ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

3.1 BOBINADEIRA PARA TRANSFORMADOR DE ATBP

A principal dificuldade prática encontradas pelos técnicos que desejam construir bobinas para transformadores é o trabalho cansativo e tedioso de enrolar milhares de voltas de fio em um carretel. Para agilizar e facilitar o trabalho destes técnicos existem máquinas como a bobinadeira, que além de proporcionar um movimento seguro do carretel, possibilitando assim a obtenção de bobinas sem encavalamento de fios, ainda tem como recurso adicional um contador mecânico de voltas. Durante a realização do estágio supervisionado foi acompanhada a construção de uma bobinadeira com capacidade de enrolar um carretel do núcleo de um transformador de baixa potência.

O protótipo consiste de uma base confeccionada em madeira, um motor de corrente contínua e um mandril com parafuso longo para que fosse possível introduzir um eixo no qual o carretel será fixado com auxílio de um molde em madeira e arruelas. No eixo foi utilizada uma porca para fixar uma haste contra a parte posterior do mandril. A finalidade de tal haste consiste em acionar o contador mecânico de espiras. O protótipo da bobinadeira pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 – Bobinadeira.



Fonte: Própria autora.

O acionamento da bobinadeira consiste em um botão para energizar os componentes e para que a forma da bobinadeira comece a girar, é necessário acionar o pedal de controle de velocidade. Na Figura 8 pode ser observado o pedal utilizado para o acionamento da bobinadeira.

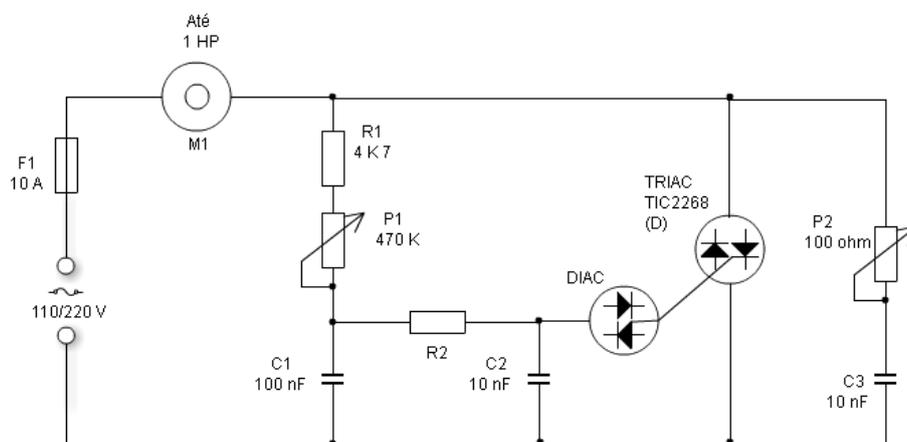
Figura 8 – Pedal de controle de velocidade.



Fonte: Própria autora.

O circuito de acionamento implementado, faz uso de um TRIAC; DIAC; resistores de 4,7 k Ω e 12 k Ω ; potenciômetros de 470 k Ω e 100 Ω ; capacitores de 100 nF e 10 nF e um fusível de 10 A. O diagrama de controle de velocidade e a montagem podem ser vistos, respectivamente, nas Figuras 9 e 10.

Figura 9 – Diagrama de controle de velocidade.



Fonte: Própria autora.

Figura 10 - Montagem do controle de velocidade:
(a) Carcaça com circuito integrado;
(b) Carcaça com comando de acionamento.



(a)



(b)

Fonte: Própria autora.

O ângulo de condução do TRIAC, que é diretamente proporcional à parcela da energia da rede que ele pode transferir ao motor, depende da constante de tempo do circuito formado por $R1$, PI e $C1$, além da constante de tempo formada por $R2$ e $C2$. Conforme a posição do ajuste de PI , o DIAC dispara no início ou no fim dos semiciclos da tensão alternada da rede de energia, determinando assim os momentos em que o TRIAC conduz.

A grande vantagem deste tipo de circuito é que há potência dissipada mínima nos intervalos de tempo em que não ocorre a condução, o que não ocorre com os controles resistivos que, por isso, dissipam uma grande quantidade de energia na forma de calor, aquecendo muito e provocando desperdícios.

3.2 PLANILHA ELETRÔNICA PARA PROJETO DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

A ferramenta utilizada para o desenvolvimento da planilha foi o *software Microsoft Excel®*, devido à agilidade com que os dados são processados e a disponibilidade do programa. Além disso, o modo como foi programada a planilha eletrônica permitiu o estudo iterativo do procedimento para o desenvolvimento do transformador ATBP com núcleo em formado U-I.

Para o projeto do transformador se faz necessário que o usuário acesse inicialmente a planilha referente aos “Dados Informados”. Nela o usuário deve inserir os dados referentes às seguintes variáveis:

- Tensão do primário;
- Tensão do secundário;
- Potência do secundário;
- Frequência;
- Densidade de corrente;
- Indução magnética.

Na Figura 11 observa-se a planilha “Dados Informados”. A título de exemplificação optou-se por desenvolver um transformador monofásico de baixa potência com as seguintes especificações:

- Tensão no primário de 220 V;
- Tensão no secundário de 15000 V;
- Potência no secundário de 750 VA;
- Indução magnética de 11300 G;
- Densidade de corrente de 2,5 A/mm².

Figura 11 - Dados informados.

	C	I	J
1	Projeto de Transformador Monofásico		
2			
3	Dados Informados		
4	Descrição	Valor	
5	Potência aparente de saída (VA)	750	
6	Tensão nominal no primário (V)	220	
7	Tensão nominal no secundário (V)	15000	
8	Frequência (Hz)	60	
9	Densidade de corrente (A/mm ²)	2,5	
10	Indução magnética máxima (G)	11300	
11			

Fonte: Própria autora.

Ao preencher os dados técnicos na planilha, o usuário poderá visualizar os valores calculados das demais variáveis por meio das planilhas “Resultados Técnicos” e “Projeto para Execução”. Nestas planilhas são dispostas todas as variáveis necessárias para o cálculo do número de espiras e seção do fio esmaltado para o primário e o secundário, assim como, o dimensionamento do carretel do núcleo e das chapas do tipo U-I. Na figura 12 podem ser vistas as planilhas, assim como os resultados para o transformador desejado.

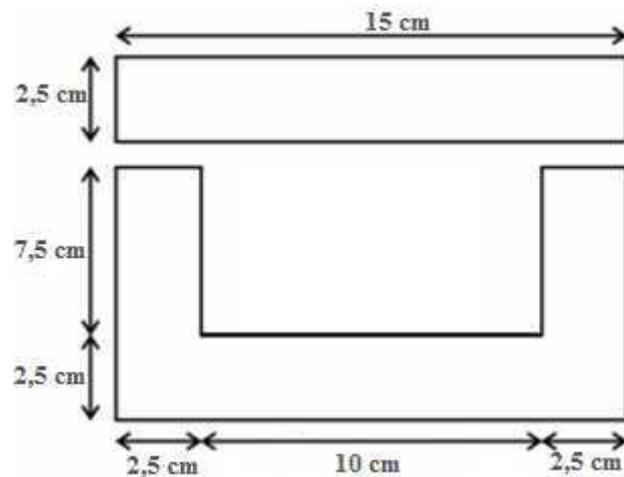
Figura 12 - Resultados técnicos e projeto para execução.

	C	I	J
12			
13	Projeto de Transformador Monofásico		
14	Resultados Técnicos		
15	Variável	Descrição	Cálculos
16	W1	Potência aparente de entrada (VA)	$W1 = W2 * 1.1$
17	I1	Corrente no primário (A)	$I1 = W1 / V1$
18	I2	Corrente no secundário (A)	$I2 = W2 / V2$
19	Sm	Seção magnética (cm ²)	$Sm = 7.5 \sqrt{W2 / f}$
20	Sg	Seção geométrica (cm ²)	$Sg = Sm * 1.1$
21			
22			
23			
24	Projeto para Execução		
25	Variável	Descrição	Fórmulas
26	N1	Número de espiras do primário	$N1 = V1 * 10^8 / (4,44 * Sm * Bm * f)$
27	N2	Número de espiras do secundário	$N2 = V2 * (10^8 / (4,44 * Sm * Bm * f)) * 1,1$
28	S1	Bitola do fio de cobre do enrolamento primário (mm ²)	$S1 = I1 / d$
29	S2	Bitola do fio de cobre do enrolamento secundário (mm ²)	$S2 = I2 / d$
30	4a	Altura da lâmina (cm)	$3 * a$
31	h	Profundidade do núcleo (cm)	$h = Sg / a$
32	a	Largura da coluna central (cm)	$a = \sqrt{Sg}$
33	0,5a	Largura das demais colunas e janelas (cm)	$0,5 * a$
34			

Fonte: Própria autora.

A partir dos dados obtidos na planilha “Projeto para Execução” houve o desenvolvimento das chapas do tipo U-I para o transformador requerido. Na figura 13, pode ser observado o desenho dimensional das chapas U-I.

Figura 13 – Dimensionamento das chapas UI.



Fonte: Própria autora.

Na planilha “Dados Geométricos” o usuário deve verificar na tabela de fios da AWG, a seção apropriada e inserir no campo “Bitola do fio (AWG)” posteriormente são exibidos os dados referentes à disposição dos fios no carretel, comprimento de fio necessário para execução do transformador, quantidade de espiras por camada, bem como o número de camadas para o primário e o secundário do transformador. A planilha “Dados Geométricos” pode ser observada na Figura 14, contendo informações do transformador requerido.

Figura 14 - Dados geométricos.

	M	N	O	P	Q	R
21						
22	Projeto de Transformador Monofásico					
23						
24	Dados geométricos					
25		Bitola do fio (AWG) (mm ²)	Comprimento do fio (m)	Nº de camadas	Nº de espiras por camadas	Área do núcleo (mm ²)
26	Primário	1,65	93,95	7,0	52	681,02
27	Secundário	0,0201	778,35	52,0	469	622,74
28						

Fonte: Própria autora.

4 CONCLUSÃO

A partir das atividades desenvolvidas no período de Estágio Supervisionado foi possível aprender e acompanhar procedimentos técnicos, adquirir experiência no âmbito profissional e colocar em prática os conhecimentos teóricos adquiridos ao longo do curso de graduação.

O acompanhamento da construção da bobinadeira foi extremamente relevante para o desenvolvimento do conhecimento prático. Foi possível desenvolver uma máquina com baixo custo, empregando peças encontradas na oficina do próprio laboratório. Com a construção desta máquina é possível agilizar o processo de enrolamento do núcleo de transformadores ATBP, contribuindo, portanto, para a construção destes equipamentos, especialmente no laboratório de realização do Estágio Supervisionado.

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento de uma planilha eletrônica para estimar parâmetros de um projeto executivo de transformadores de baixa tensão, de grande aplicabilidade no processo construtivo de transformadores. Além disso, foram aperfeiçoadas as habilidades na ferramenta *Microsoft Excel*®.

Por fim, a planilha eletrônica juntamente com a bobinadeira possibilita a celeridade e aprimoramento da execução de transformadores de baixa potência, tanto no laboratório em que se deu o Estágio Supervisionado como em outros ambientes.

REFERÊNCIAS

BERTINI, L. A. **Apostila Prática Sobre Transformadores de Núcleo de Ferro**. São Paulo: ELTEC, 2003.

CALIL, W. V.; SILVA, V. C. **Determinação de Fator de Ajuste de Perdas Magnéticas em Núcleo de Transformadores de Potência pelo Método de Elementos Finitos**. In: MOMAG. Anais... Florianópolis: [S.l.], 2008.

CAPARÓ, J. L. C. **Modelagem de Transformadores de Distribuição para Aplicação em Algoritmos de Fluxo de Potência Trifásico**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, 2005.

FRAGOSO, C. M. **Transformadores Teoria e Projeto**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia. João Pessoa, 2010.

FERREIRA, C. A. **Desenvolvimento de Núcleos para Transformadores Monofásicos de Baixa Potência pela Metalurgia do Pó**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR, C.; UMANS, S. D. **Electric Machinery**. New York: McGraw-Hill Inc, 1990.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JUNIOR, Charles; UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas: com introdução à eletrônica de potência**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006.

HOLTZHAUSEN, J. P.; VOSLOO, W. L. **Hight Voltage Engineering Praticce e Theory**. ISBN: 978-0-620-3767-7. Stellenbosch. 2011.

KIND, D; FESER, K. **Hight-Voltage Test Techniques**. 2nd. Newnes. 2001.

LUCIANO, B. A. **Estudo de Aplicações da Liga Fe₇₈B₁₃Si₉ Amorfa em Núcleos de Transformadores de Baixa Potência**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 1995.

ANEXO A – CARACTERÍSTICAS DOS FIOS AWG

PARA REALIZAÇÃO DE COMPRA

Tabela A.1 – Bitolas dos fios esmaltados AWG.

Número AWG	Diâmetro (mm)	Secção (mm ²)	Número de espiras por cm	Kg por Km	Resistência (ohms/Km)	Capacidade (A)
0000	11,86	107,2			0,158	319
000	10,40	85,3			0,197	240
00	9,226	67,43			0,252	190
0	8,252	53,48			0,317	150
1	7,348	42,41		375	1,40	120
2	6,544	33,63		295	1,50	96
3	5,827	26,67		237	1,63	78
4	5,189	21,15		188	0,80	60
5	4,621	16,77		149	1,01	48
6	4,115	13,30		118	1,27	38
7	3,665	10,55		94	1,70	30
8	3,264	8,36		74	2,03	24
9	2,906	6,63		58,9	2,56	19
10	2,588	5,26		46,8	3,23	15
11	2,305	4,17		32,1	4,07	12
12	2,053	3,31		29,4	5,13	9,5
13	1,828	2,63		23,3	6,49	7,5
14	1,628	2,08	5,6	18,5	8,17	6,0
15	1,450	1,65	6,4	14,7	10,3	4,8
16	1,291	1,31	7,2	11,6	12,9	3,7
17	1,150	1,04	8,4	9,26	16,34	3,2
18	1,024	0,82	9,2	7,3	20,73	2,5
19	0,9116	0,65	10,2	5,79	26,15	2,0
20	0,8118	0,52	11,6	4,61	32,69	1,6
21	0,7230	0,41	12,8	3,64	41,46	1,2
22	0,6438	0,33	14,4	2,89	51,5	0,92
23	0,5733	0,26	16,0	2,29	56,4	0,73
24	0,5106	0,20	18,0	1,82	85,0	0,58
25	0,4547	0,16	20,0	1,44	106,2	0,46
26	0,4049	0,13	22,8	1,14	130,7	0,37
27	0,3606	0,10	25,6	0,91	170,0	0,29
28	0,3211	0,08	28,4	0,72	212,5	0,23
29	0,2859	0,064	32,4	0,57	265,6	0,18
30	0,2546	0,051	35,6	0,45	333,3	0,15
31	0,2268	0,040	39,8	0,36	425,0	0,11
32	0,2019	0,032	44,5	0,28	531,2	0,09
33	0,1798	0,0254	56,0	0,23	669,3	0,072