

DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO PARA DIMENSIONAMENTO DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS UTILIZANDO MATLAB

DEVELOPMENT OF AN APPLICATION FOR SIZING SINGLE-PHASE TRANSFORMERS USING MATLAB

Marco Antonio Ferreira Finocchio¹

Jeferson Gonçalves Ferreira²

Camila de Andrade Mangialardo³

Data de entrega dos originais à redação em: 20/07/2019
e recebido para diagramação em: 8/09/2020

Os transformadores possibilitam o uso da energia elétrica nos níveis de tensão mais adequados para os aparelhos. Os transformadores monofásicos de baixa potência têm a função de alimentar, isolar equipamentos e circuitos elétricos. O funcionamento adequado e os sistemas nos quais eles serão instalados está relacionado a um bom projeto. Assim, uma interface gráfica foi desenvolvida no software MATLAB para facilitar o cálculo do projeto destes transformadores. Com base na teoria sobre transformadores e seus aspectos construtivos, o algoritmo que comanda a interface gráfica requer apenas os valores de potência secundária, frequência, tensão primária e secundária para realizar os cálculos e exibir os dados dos enrolamentos e pernas do núcleo do transformador. O algoritmo apresentou resultados precisos e confiáveis, oferecendo a possibilidade de calcular e projetar transformadores mais rapidamente.

Palavras-chave: Transformadores Monofásicos. Projeto. Interface Gráfica.

The transformers allow the use of electric energy at the voltage levels most suitable for the devices. Single-phase low-power transformers have the function of feeding, isolating equipment and electrical circuits. The proper functioning and the systems in which they will be installed is related to a good project. Thus, a graphical interface was developed in MATLAB software to facilitate the calculation of the design of these transformers. Based on the theory of transformers and their constructive aspects, the algorithm that commands the graphical interface requires only the values of secondary power, frequency, primary and secondary voltage to perform the calculations and display the winding and leg data of the transformer core. The algorithm presented accurate and reliable results, offering the possibility to calculate and design transformers more quickly.

Keywords: Single-Phase transformers. Project. Graphical Interface.

1 INTRODUÇÃO

Entre a geração da energia elétrica e o consumidor final existem várias unidades transformadoras o que possibilita a transferência da energia em tensões mais econômicas, além de permitir a utilização da mesma na tensão mais adequada para sua utilização. Desta forma, os transformadores são utilizados não só em circuitos de alta tensão, mas também, nos de baixa, sendo alimentados por ondas monofásicas ou trifásicas (FITZGERALD, 2014).

A Norma Brasileira (NBR) 5356/07 o transformador é um equipamento elétrica estático, que por indução eletromagnética, transforma tensão e corrente alternada entre dois ou mais enrolamentos, sem mudança de frequência (ABNT, 2007).

Os transformadores são máquinas elétricas estáticas que têm a função de transmitir, mediante um campo eletromagnético alternado, a energia elétrica de um sistema, com determinada tensão, para outro sistema, com a tensão desejada, porém com capacidade e frequência inalteradas (KULKARNI, 2004; MILANESE, 2011; ANDRIOLLO, 2016).

Os transformadores monofásicos de baixa potência destinam-se a alimentação de circuitos

auxiliares de comando, sinalização e fazem a isolação elétrica entre circuitos.

Grande parte do custo de fabricação dos transformadores está relacionada à complexidade no desenvolvimento de seu projeto, que envolve muitas variáveis, como diferentes tipos de materiais, métodos e processos de fabricação (FINOCCHIO et al., 2016).

Tendo em vista suas aplicações, os transformadores devem ser projetados para garantir o bom funcionamento do sistema no qual serão instalados. Porém, nem sempre é simples verificar os parâmetros, fazer a aquisição de dados, assim como, os cálculos.

Para fins didáticos, visando à praticidade e aumento da confiabilidade dos cálculos, será apresentado um aplicativo de interface gráfica desenvolvida no **software Matrix Laboratory** (MATLAB), que auxiliará no projeto de transformadores monofásicos. Onde serão fornecidos dados como: dimensões do núcleo, número de espiras e bitola do condutor.

O transformador monofásico tem dois enrolamentos sobre um núcleo magnético com relutância baixa, que concentra o fluxo alternado com alta permeabilidade, por consequência, entreferros

1 - Laboratório de Segurança Iluminação e Eficiência Energética (LABSIEE) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procopio. <mafinocchio@utfpr.edu.br>
2 - Laboratório de Segurança Iluminação e Eficiência Energética (LABSIEE) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procopio. <jefersongf_07@hotmail.com>
3 - Laboratório de Segurança Iluminação e Eficiência Energética (LABSIEE) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procopio.

muito reduzidos entre as lâminas que o compõem, sendo isoladas entre si.

Ao aplicar uma tensão alternada V_1 em um dos enrolamentos gera-se, no outro, uma tensão V_2 , cujo valor depende do número de espiras. Denomina-se enrolamento de alta tensão (A.T) o que tem maior número de voltas, e o de baixa tensão (B.T) tem menos espiras.

O princípio de funcionamento do transformador pode ser compreendido quando analisado em termos ideais, ou seja, desprezando suas perdas.

Um dos casos a ser considerado é quando o secundário está aberto, isto é, o transformador está operando a vazio. O outro é quando o enrolamento secundário é efetivamente utilizado para alimentar um circuito (CHAPMAN, 2012).

O transformador atua como elevador de tensão quando se alimenta o enrolamento B.T e como abaixador, quando a A.T estiver recebendo a tensão de entrada (AMBROSINI, 2012).

Considera-se que uma tensão alternada V_1 é aplicada aos terminais do primário, que contém N_1 espiras, e que o circuito secundário está aberto. Então, não é percorrido por nenhuma corrente, ficando inativo. Existindo uma pequena corrente no primário, chamada de corrente de excitação. A mesma estabelece um fluxo alternado induzindo uma força eletromotriz (fem), expressa pela Equação 1, em Volts.

$$e_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

λ_1 : Fluxo concatenado do enrolamento primário
 ϕ : Fluxo no núcleo enlaçando os dois enrolamentos

A queda de tensão na resistência do primário é muito baixa, então a fem tem um valor próximo da tensão V_1 . As formas de onda da tensão e do fluxo são senoidais, o que facilita a análise [9]. Segundo a Equação 2, o fluxo instantâneo é:

$$\phi = \phi_{m\acute{a}x} \text{sen}(\omega t) \quad (2)$$

A tensão induzida será:

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} = \omega N_1 \phi_{m\acute{a}x} \text{cos}(\omega t) \quad (3)$$

A Equação 3, $\phi_{m\acute{a}x}$ representa o fluxo máximo e ω a frequência angular (rad/s). A fem está adiantada 90° do fluxo, com valor eficaz dado pela Equação 4 (AMBROSINI, 2012).

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_1 \phi_{m\acute{a}x} = \sqrt{2} \pi f N_1 \phi_{m\acute{a}x} \quad (4)$$

Desprezando a queda de tensão na resistência, conforme (TAPONNECCO, 2012) a força contra-eletromotriz (f_{cem}) será igual a tensão aplicada. Então, quando uma tensão senoidal é aplicada, um fluxo também senoidal é estabelecido com um valor $\phi_{m\acute{a}x}$, satisfazendo a condição de que E_1 é igual a V_1 . Assim, o mesmo é dado pela Equação 5.

$$\phi_{m\acute{a}x} = \frac{V_1}{\sqrt{2} \pi f N_1} \quad (5)$$

A corrente de excitação se ajusta de modo que a força magnetomotriz (f_{mm}) necessária é produzida estabelecendo, um fluxo máximo.

No transformador ideal, assume-se que a fem E_2 é igual à tensão nos terminais do secundário em aberto. A relação entre espiras pode ser representada pela Equação 6:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (6)$$

A relação de transformação pode ser obtida fixando a relação de espiras N_1/N_2 que coincide com E_1/E_2 . O parâmetro representa a razão entre os enrolamentos ou razão entre as tensões do transformador (GEORGILAKIS, 2009; JR. WINDERS, 2002).

Ao conectar uma carga, surgirá uma corrente e uma força magnetomotriz (f_{mm}) no secundário. Leva-se em conta que a permeabilidade do núcleo é alta e que o fluxo é produzido pela tensão aplicada ao primário. Portanto, o fluxo do núcleo não se altera na presença da carga. Uma f_{mm} de compensação irá surgir no primário para cancelar a do secundário, assim:

$$N_1 i_1 = N_2 i_2 \quad (7)$$

A f_{mm} no núcleo é zero, pela corrente de excitação de transformador ideal ser nula (FITZGERALD, 2014). Da Equação 7, tem-se a relação das correntes e o número de espiras Equação 8.

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (8)$$

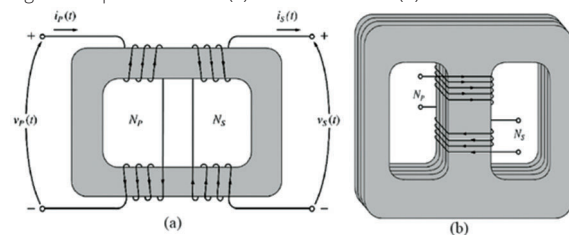
Os materiais magnéticos podem ser utilizados para restringir e direcionar os campos magnéticos em caminhos bem definidos, em transformadores os materiais magnéticos são utilizados para maximizar o acoplamento entre os enrolamentos bem como para diminuir a corrente de excitação necessária para a operação do transformador (GEORGILAKIS, 2009).

2 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO TRANSFORMADOR

Existem dois tipos básicos de núcleo para transformadores: o núcleo envolvido e o envolvente. O núcleo envolvido, como o nome diz, é envolvido pelo enrolamento. No envolvente, o enrolamento está na perna central e é envolvido pelo circuito magnético.

A Fig. 1 representa os dois tipos de núcleo. Onde $V_p(t)$, $i_p(t)$ e N_p representam os dados de tensão, corrente e espiras do primário. Os do secundário são $V_s(t)$, $i_s(t)$ e N_s .

Figura 1 -Tipos de núcleo. (a) núcleo envolvido (b) núcleo envolvente



Fonte: Adaptado de Chapman (2012).

O núcleo é constituído por chapas laminadas de ferro silício com a percentagem de silício variando entre 1,5 a 3% e espessura entre 0,3 a 0,5mm (MILANESI, 2011).

Para simplificar a construção, fazem-se os enrolamentos separadamente, segundo a configuração, para depois colocá-los sobre o núcleo. Deste modo, é preciso construir o núcleo em peças para compô-las após a montagem dos enrolamentos.

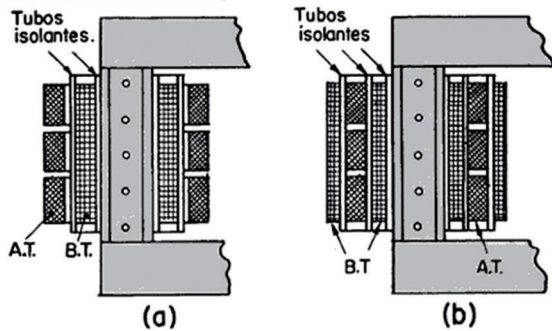
As chapas são formadas por travessas e colunas que são dispostas mediante juntas frontais ou encaixadas. Nas juntas frontais, as lâminas e colunas são unidas por parafusos. Para reduzir as perdas no ferro, coloca-se uma folha de papel isolante.

Há dois tipos de enrolamentos, o tubular e de disco, ambos são constituídos pelos enrolamentos de alta e baixa tensão. O tubular é construído dispondo sobre cada coluna os enrolamentos de A.T e B.T, concêntricos, separados entre si por um material isolante (MARTIGNONI, 2007).

O enrolamento B.T tem forma de um solenoide contínuo que é colocado próximo da coluna, por segurança. Já o de A.T é dividido em várias bobinas sobrepostas. Com a finalidade de diminuir a dispersão, o enrolamento B.T pode ser dividido em dois solenoides, um próximo a coluna e o outro externo ao enrolamento A.T.

As configurações do enrolamento tubular são apresentadas na Fig. 2. O enrolamento de disco, os enrolamentos de A.T. e B.T. são divididos em bobinas sobrepostas de comprimento pequeno (discos) isolado entre si por coroas isolantes. Para facilitar o isolamento, as bobinas são divididas de modo que as extremas sejam do enrolamento B.T. Esta configuração é utilizada em núcleos envoltivos Fig. 3.

Figura 2 - (a) um de baixa tensão (b) dois de baixa tensão



Fonte: Adaptado de Martignoni (2007).

A construção do enrolamento A.T é diferente do B.T, porque o problema está no isolamento. Enquanto, a B.T a dificuldade de execução se dá quando o fio tem seção grande.

Para uma seção transversal de até 10 mm² emprega-se fios redondos, para seções maiores, utiliza-se um fio com seção retangular. Os condutores devem possuir isolamento próprio, proporcional à tensão induzida em cada espira. Os fios com seção circular usa isolamento de esmalte ou algodão em duas camadas. Para os condutores em barra, utiliza-se algodão em duas ou três camadas e papel (MILANESI, 2011). Os condutores de grande seção são enrolados nus, intercalam-se entre as espiras adjacentes diafragmas de papel ou prespann.

3 METODOLOGIA DE TRABALHO

Considera-se para o projeto de transformadores monofásicos de pequena potência, condutores de

cobre com bitola até 10 AWG. Caso o enrolamento for impossibilitado devido à grande seção, substitui-se por dois condutores agrupados em paralelo (CARBONE, 1966).

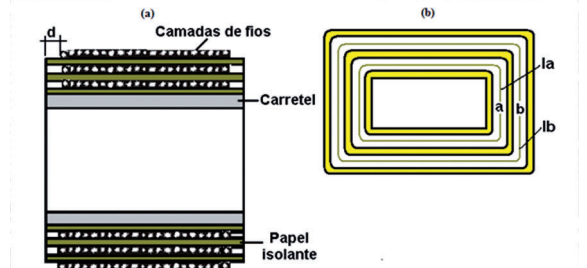
O isolamento pode ser feito com esmalte ou algodão. Sendo que as características do esmalte devem manter a isolamento quando o fio é dobrado a pequenas curvaturas e resistir a temperaturas próximas a 80° C (MILANESI, 2011). Isto para ocupar menos espaço.

Utiliza-se um molde de madeira retangular para dar a forma ao carretel onde é feito o enrolamento, o mesmo é composto por cartolina isolante ou prespann colados em camadas até a espessura desejada. Tal colagem é feita mediante calor, com ferro de soldar, desde que um dos lados da cartolina esteja recoberta em goma arábica.

Os enrolamentos de alta e baixa tensão são isolados com camadas de cartolina com espessura proporcional à tensão do enrolamento de A.T.

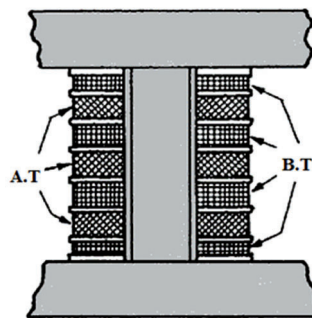
Nota-se na Fig. 4 (a), para garantir o isolamento entre uma camada de fio e outra há uma folha de papel isolante, e, os mesmos são enrolados até uma distância (b) da extremidade do carretel que varia conforme a dimensão do transformador.

Figura 4 - Bobinas do transformador. (a) isolamento (b) disposição das bobinas



Fonte: Adaptado de Martignoni (2007).

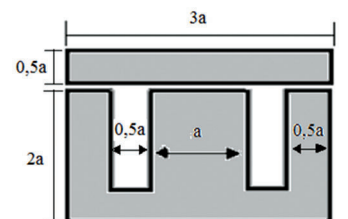
Figura 3 - Enrolamento de disco



Fonte: Adaptado de Martignoni (2007).

formato proporciona que o fluxo magnético Φ na perna central se divida igualmente nas pernas laterais. Portanto, a espessura das mesmas corresponde à metade do núcleo central, assim como, as travessas superior e inferior. A Fig. 5 demonstra estas dimensões.

Figura 5 - Dimensões do núcleo com lâmina padronizada



Fonte: Adaptado de Martignoni (2007).

O dimensionamento padrão das lâminas aproveita ao máximo as chapas brutas, para evitar a perda de material. A janela, representada pela parte hachurada da Fig. 6, é o espaço entre as pernas do núcleo. O cálculo da sua área é importante, pois o número de espiras e a seção dos condutores que irão constituir a bobina dependem disso.

A área da janela (S_j) das lâminas padronizadas Figura 6, em cm^2 , é dada pela Equação 9:

$$S_j = 0,5a * 1,5a = 0,75a^2 \quad (9)$$

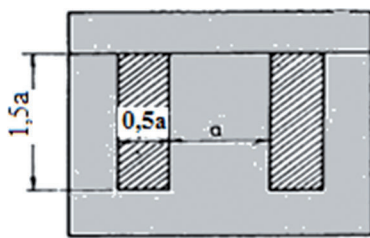
Onde, a representa a dimensão mostrada na figura abaixo.

As lâminas padronizadas são utilizadas em transformadores de até 800VA. Para potências superiores são usadas lâminas compridas obtidas pela mesma matriz das padronizadas, mas cortadas conforme a Figura 7.

Assim, a área da janela (S_j) de lâminas compridas, em cm^2 , é obtida pela Equação 10.

$$S_j = 0,5a * 3a = 1,5a^2 \quad (10)$$

Figura 6 - Dimensão da janela



A Tabela 1 exibe a classificação dos tipos de lâminas que depende do tamanho da perna central ou seção da janela (IFECT, 2010).

Tabela 1 - Classificação das Lâminas

Nº de ordem	A[cm²]	Seção da Janela [mm²]
Lâminas Padronizadas		
0	1,5	168
1	2	300
2	2,5	468
3	3	675
4	3,5	900
5	4	1200
6	5	1800
Lâminas Compridas		
5	4	2400
6	5	1880

Os valores fornecidos para o cálculo de transformador são: (W_2) potência de saída em VA; (V_2) tensão de saída em V; (V_1) tensão de entrada em V e (f) frequência em Hz.

O cálculo das correntes primárias e secundárias. A corrente no secundário I_2 , em Amperes, é obtida pela Equação 11:

$$I_2 = \frac{W_2}{V_2} \quad (11)$$

A corrente do primário é calculada pela análise da potência de entrada acrescentando 10% à potência do secundário, devido às perdas. Portanto, $W_1 = 1,1W_2$. Então, a corrente I_1 é dada pela Equação 12:

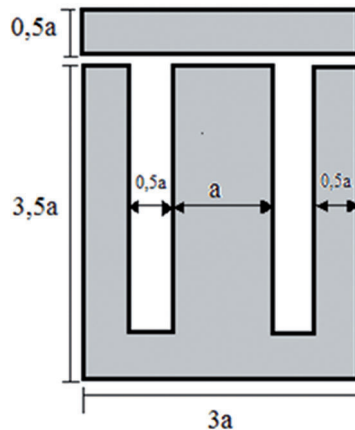
$$I_1 = \frac{W_1}{V_1} \quad (12)$$

Para o cálculo da seção dos condutores considera-se a densidade de corrente (d), uma vez que a mesma deve diminuir ao aumentar a potência do transformador. Porque em uma máquina de maior volume a irradiação de calor é dificultada. A densidade de corrente deve respeitar os valores da Tabela 2 (MILANESI, 2011; CARBONE, 1966).

Tabela 2 - Valores de densidade de corrente

Potência [VA]	Densidade de corrente [A/mm²]
$P \leq 500$	3
$500 < P \leq 1000$	2,5
$1000 < P \leq 3000$	2

Figura 7 - Dimensões da lâmina comprida



A seção (S) dos condutores primários e secundários, em mm^2 , é dada pela Equação 13. Onde, I é a corrente respectiva ao enrolamento na qual está presente.

$$S = \frac{I}{d} \quad (13)$$

Para calcular a seção magnética (S_m), do núcleo em cm^2 , considera-se o tipo de lâmina. O tipo de lâmina é importante, porque o número de ordem da lâmina comprida possui a janela com o dobro da superfície da lâmina padronizada, admitindo maior quantidade de espiras (MARTIGNONI, 2007; MILANESI, 2011). Assim, a seção magnética para lâminas padronizadas é obtida pela Equação 14 e lâminas compridas pela Equação 15.

$$S_m = 7,5 \sqrt{\frac{W_2}{f}} \quad (14)$$

$$S_m = 6 \sqrt{\frac{W_2}{f}} \quad (15)$$

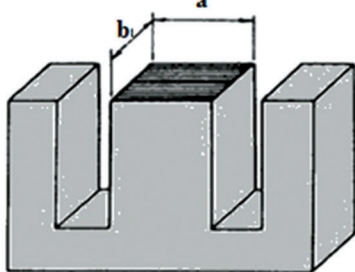
Onde, f é a frequência e W_2 a potência secundária.

O produto entre as dimensões a e b da Fig. 8 fornece a seção geométrica do núcleo em cm^2 ($S_g = ab$). Entretanto, conforme (MARTIGNONI, 2007), não representa a seção verdadeira do ferro (seção magnética). Porque, entre as lâminas o isolante não afeta o fluxo.

Então, a seção geométrica (S_g), em cm^2 , é calculada acrescentando-se 10% na seção magnética (S_m) Equação 16:

$$S_g = 1,1 * S_m \quad (16)$$

Figura 8 - Seção geométrica



Por aspectos construtivos é vantajoso que a forma do núcleo seja próxima a quadrada. Por isso, a largura da perna central, em cm, é dada pela Equação 17:

$$a = \sim \sqrt{S_g} \quad (17)$$

Assim, é possível escolher o número de ordem da lâmina do núcleo.

Para encontrar o número de espiras primárias e secundárias têm-se duas adaptações para Equação 18. A Equação 19 é para a frequência de 50Hz e a Equação 20 para 60Hz.

$$N = \frac{V \cdot 10^8}{4,44 \cdot f \cdot S_m \cdot B_m} \quad (18)$$

$$N = \frac{40 \cdot V}{S_m} \quad (19)$$

$$N = \frac{33,5 \cdot V}{S_m} \quad (20)$$

Onde: (N) é o número de espiras primárias ou secundárias; (V) a tensão primária ou secundária; (f) frequência; (S_m) Seção magnética em cm^2 e (B_m) Indução máxima no ferro.

O valor de B_m para lâminas de ferro silício com resfriamento natural é igual a 11300 Gauss. No cálculo das espiras secundárias acrescenta-se 10% ao resultado para compensar a queda de tensão (MILANESI, 2011).

4 ALGORITMO E TESTES

O algoritmo do aplicativo desenvolvido no MATLAB, para configurar a interface gráfica não será apresentado neste artigo. Porém, a Fig. 9 apresenta o diagrama de blocos de funcionamento do aplicativo. A Fig. 10 apresenta a metodologia de cálculos para o projeto.

Figura 9 - Diagrama de blocos de funcionamento do algoritmo

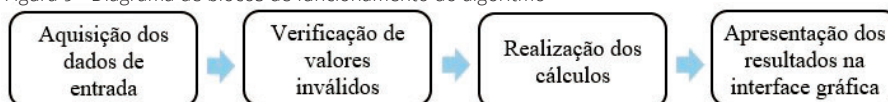
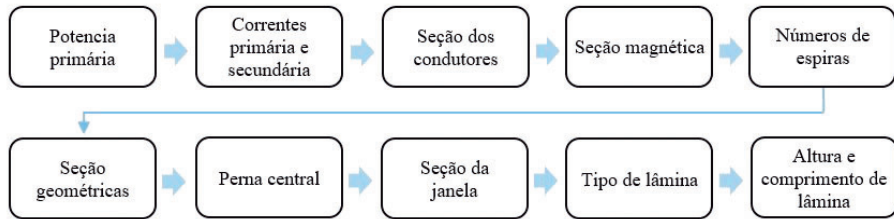


Figura 10 - Diagrama de blocos da realização de cálculos



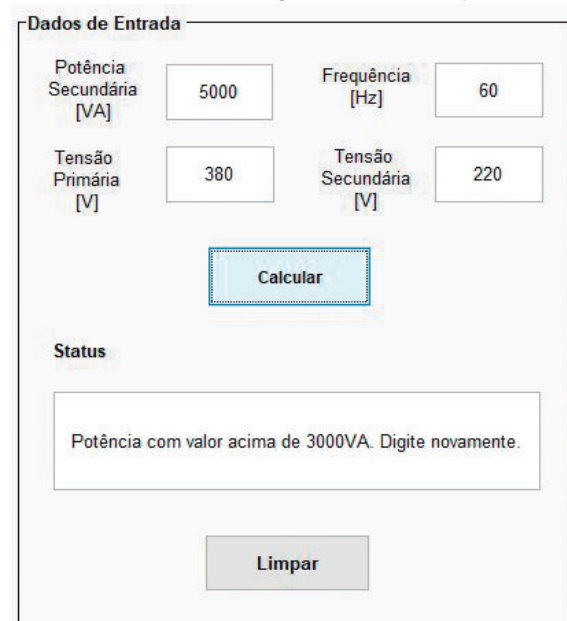
O usuário precisa digitar na interface, dada pela Fig. 11. Os dados de entrada que são: a potência secundária [VA], a frequência [Hz] e as tensões primária e secundária [V]. Assim, obtém-se o número de espiras, a seção dos fios, e as dimensões do núcleo. Ao clicar no botão "Calcular" o algoritmo verifica se foram inseridos dados inválidos como frequência diferente de 50 ou 60Hz, potência acima de 3kVA ou outro valor nulo. Se sim, digite novamente. Se não, o terceiro passo será executado, realizando os cálculos para exibir os resultados.

A interface possui o botão "Limpar" para que não seja necessário fechá-la caso deseje fazer novo projeto. Exibindo, uma imagem do núcleo com suas variáveis e valores na tela.

Para facilitar a visualização, as figuras dos exemplos a seguir contêm apenas a parte de aquisição de dados de entrada. A interface gráfica completa está apresentada na Figura 13.

A seguir são simulados em que o usuário insere dados que impedem o funcionamento do programa. Para a Fig. 11, é inserido uma potência superior a 3kVA impossibilitando os cálculos. Uma vez que, de acordo com a Figura 8, o código não funciona com uma potência diferente da especificada pelos limites da densidade de corrente.

Figura 11 - Potência superior a 3kVA



Como o sistema mundial opera com frequências de 50 ou 60Hz, o programa não aceita valores diferentes. O cálculo da seção magnética do núcleo, o número de espiras primárias e secundárias depende diretamente da frequência.

5 RESULTADOS

Como já citado, se não houver valores inválidos serão realizados os cálculos e exibidos os números de espiras, as seções dos condutores e as especificações do núcleo.

Para facilitar a visualização dos projetos a interface gráfica foi dividida em duas imagens: a primeira com os dados de entrada e a segunda com os resultados.

Segundo a Fig. 7 o tamanho do núcleo é pré-estabelecido pela seção da janela.

Portanto, será mostrado no Status se a dimensão está dentro dos valores estabelecidos como observado na Fig. 12. Pode-se notar, pela Fig. 13, que para estas especificações o núcleo deve ser composto por lâminas padronizadas número 6.

Para exibir estes valores o programa seguiu a rotina de cálculos da Fig. 10, sendo que para este projeto obteve-se: potência primária de 330VA; corrente primária de 2,75A; corrente secundária de 1,36A e densidade de corrente de 3A/mm².

As dimensões de núcleo tabeladas não atendem transformadores monofásicos com potência superior a 1kVA como mostra a Fig. 14. Assim, o projeto fica

inexecutável por não ter lâminas padronizadas. Por isso, as suas dimensões são mostradas na interface da Fig. 15.

Para exibir os valores o programa adotou a rotina de cálculos da Fig. 10, tendo que para este projeto obteve-se: potência primária de 3300VA; corrente primária de 8,68A; corrente secundária de 13,63A e densidade de corrente de 2 A/mm².

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho estudou-se o funcionamento, construção e projeto dos transformadores. Desenvolver uma plataforma simples para seu cálculo e dimensionamento. Através da configuração de uma interface. O projeto de transformadores monofásicos de baixa potência com a interface gráfica reduz consideravelmente o tempo de projeto. Onde se insere apenas quatro dados de entrada, obtendo todos os parâmetros construtivos do transformador. O que tornando o resultado preciso e confiável.

REFERÊNCIAS

ANDRIOLLO, M.; MARTINELLI, G.; MORINI, Augusto; TORTELLA, Andrea. **I trasformatori**: teoria ed esercizi. Esculapio; 1ª edizione. Italia, 2016.

AMBROSINI, E.; SPANDARO, F. **Elettrotecnica ed elettronica**. RCS Libri S.p.A. Milano, Italia, 2012.

Figura 12 - Núcleo com dimensões dentro do padrão

Dados de Entrada			
Potência Secundária [VA]	300	Frequência [Hz]	50
Tensão Primária [V]	120	Tensão Secundária [V]	220
<input type="button" value="Calcular"/>			
Status			
As dimensões do núcleo estão dentro dos padrões.			
<input type="button" value="Limpar"/>			

Figura 13 - Resultado com núcleo com dimensões dentro do padrão

Resultados		
Enrolamento Primário	Enrolamento Secundário	Tipo de Lâmina
Número de Espiras: 261	Número de Espiras: 527	Padronizada: 6
Seção [mm ²]: 0.91667	Seção [mm ²]: 0.45455	Comprida: -
Área da Janela - S _j [mm ²]: 1516		
Lâminas E	Lâminas I	
Perna Central - a [cm]: 4.4954	Altura [cm]: 2.2477	
Altura [cm]: 8.9907	Comprimento [cm]: 13.4861	
Comprimento [cm]: 13.4861		

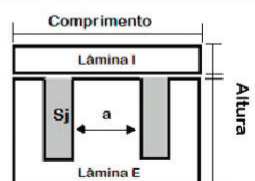
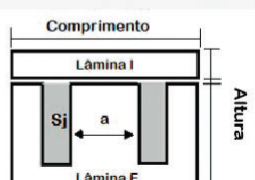


Figura 14 - Núcleo com dimensões fora dos padrões

Dados de Entrada			
Potência Secundária [VA]	3000	Frequência [Hz]	60
Tensão Primária [V]	380	Tensão Secundária [V]	220
<input type="button" value="Calcular"/>			
Status			
As dimensões do núcleo estão fora do padrão.			
<input type="button" value="Limpar"/>			

Figura 15 - Resultado com núcleo com dimensões fora do padrão

Resultados		
Enrolamento Primário	Enrolamento Secundário	Tipo de Lâmina
Número de Espiras: 300	Número de Espiras: 191	Padronizada: -
Seção [mm ²]: 4.3421	Seção [mm ²]: 6.8182	Comprida: -
Área da Janela - S _j [mm ²]: 7000		
Lâminas E	Lâminas I	
Perna Central - a [cm]: 6.8315	Altura [cm]: 3.4157	
Altura [cm]: 23.9102	Comprimento [cm]: 20.4944	
Comprimento [cm]: 20.4944		



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5356: Transformadores de potência – Especificação.** Rio de Janeiro, 2007.

CARBONE, E. **La costruzione e il calcolo dei piccoli trasformatori.** Editoriale Delfino: Milano, 1966.

CHAPMAN, Stephen J. **Electric Machinery Fundamentals.** 5ª ed. Nova York: McGraw-Hill, 2012.

FINOCCHIO, M. A. F., LOPES, J. J., DE FRANÇA, J. A., PIAI, J. C., and MANGILI, J. F., Jr (2016). **Neural networks applied to the design of dry-type transformers: an example for analysis of winding temperature and increase in thermal quality.** Int. Trans. Electr. Energ. Syst., doi: 10.1002/etep.2257.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles; UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas: com introdução à eletrônica de potência.** 7ª ed. Editora Bookman. Porto Alegre, 2014.

GEORGILAKIS, P. **Spotlight on Modern Transformer Design.** London: Springer-Verlag, 2009.

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA (IFECT). **Transformadores: teoria e projeto.** João Pessoa, 2010.

JR. WINDERS, John J. **Power transformers principles and applications.** Marcel Dekker, Inc. New York, 2002.

KULKARNI, S. V.; KHAPARDE, S. A. **Transformer Engineering Design and Practice.** Marcel Dekker, INC. New York, 2004.

MILANESI, Fabio. **Trasformatori elettrici: Teoria calcolo costruzione collaudo.** Italia, 2011.

MARTIGNONI, Alfonso. **Transformadores.** 8ª edição. Editora Globo: São Paulo, 2007.

TAPONECCO, Lucio. **Appunti: elettrotecnica e macchine elettriche.** Università di Pisa: Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazione. Pisa, Italia, 2010.