

## **ELABORAÇÃO DE ALGORITMO PARA MELHORIA DO RENDIMENTO DE TRANSFORMADOR COM BASE EM ELEMENTOS DE PROJETO**

William Rocha Tavares (UTFPR) E-mail: wtavares@alunos.utfpr.edu.br  
Jonatas Policarpo Américo (UTFPR) E-mail: jonatasamerico@utfpr.edu.br  
Jorge Luis Roel Ortiz (UTFPR) E-mail: jlortiz@utfpr.edu.br  
Stéfano Frizzo Stefenon (UTFPR) E-mail: stefanostefenon@gmail.com

**Resumo:** Este trabalho apresenta um algoritmo para um projeto de transformador de pequena potência (até 1,5 kVA), monofásico com um primário e um secundário, no qual permite-se analisar os resultados possíveis. Será discutida a equação do rendimento e seu estudo em função de parâmetros construtivos, como também a análise das perdas envolvidas no processo de transformação, ou seja, a partir das massas do cobre (dos enrolamentos) e do ferro (do núcleo). Serão demonstrados os passos a serem avançados para determinar os valores dos parâmetros construtivos, como por exemplo, a seção geométrica e magnética do núcleo, a área da janela do núcleo e a área ocupada pelos enrolamentos. Uma abordagem de um projeto base servirá para validação do algoritmo projetado; como também, será exposto os resultados do projeto a partir do algoritmo implementado com os mesmos dados de placa (tensão de entrada, tensão de saída, frequência e potência) utilizados no projeto base. Por fim, de posse dos resultados e discussões verificou-se a validade do algoritmo e a possibilidade de utilizar este trabalho para estudos futuros.

**Palavras-chave:** Algoritmo. Perdas no Cobre. Perdas Magnéticas. Projeto de Transformador. Rendimento.

### **PUT HERE AN ENGLISH VERSION OF THE TITLE OF YOUR ARTICLE**

**Abstract:** This work presents an approach an algorithm for a transformer project of a small power (up to 1.5 kVA), single-phase with one primary and one secondary, in which it is possible to analyze the possible results. It will be discussed the efficiency equation and its function of constructive parameters, as well as the analysis of the losses involved in the transformation process, i.e., generated by the masse of copper (windings) and iron (from the core). The steps to determine the values of the constructional parameters will be presented such as the geometric and magnetic section of the core, the core window area and the area filled by the windings. A base-case study will be utilized to validate the algorithm developed. Furthermore, the results of the project will be presented from the implemented algorithm using the same transformer nameplate data (input voltage, output voltage, frequency and power), used in the base project. Finally, with the results and discussions, verified the validity of the algorithm and the possibility of using this work for future studies.

**Keywords:** Algorithm. Copper Losses. Magnetic Losses. Transformer Project. Efficiency.

## **1. INTRODUÇÃO**

O transformador é referido como um equipamento sem partes móveis, que tem como objetivo transferir energia elétrica, por meio de ação indutiva eletromagnética, de um ou mais circuitos (primário) para outros circuitos (secundário, terciário), pode ou não alterar o valor da tensão e corrente em um determinado circuito de corrente alternada, ou modificar os valores de

impedância do circuito elétrico, de maneira a manter a mesma frequência. Os enrolamentos que determinam primário e secundário são conectados por fluxo magnético comum, sem conexão elétrica entre eles; o fluxo magnético pode circular pelo ar, quando não há um núcleo, porém, esta prática é pouco utilizada pois há grande dispersão do fluxo magnético, ou por um núcleo de material ferromagnético onde a concentração do fluxo magnético é maior, diminuindo assim a dispersão (CHAPMAN, 2013) (PAULINO, 2014).

O transformador possibilita a transmissão e distribuição de energia elétrica de forma simples e barata, pois permite elevar o nível da tensão até um valor que a corrente seja a menor possível de modo a reduzir as perdas no processo interconexão de sistemas. Em sistemas elétricos de potência o transformador, em geral, opera de duas maneiras: da geração para a transmissão opera em modo elevador de tensão, e da transmissão para distribuição opera em modo abaixador de tensão. Desta forma, é visto como necessária e indispensável a utilização de transformadores para conduzir energia elétrica até o consumidor final, de modo eficiente e econômico (MEHTA; PATEL, 2014).

É inegável a importância de transformadores quando abordado em níveis de tensão, pois este equipamento está presente desde sistemas elétricos de potência, nos quais são utilizados transformadores de grande porte (na ordem de MVA), como também, em sistemas elétricos e eletrônicos, podendo citar os transformadores para comando e transformadores para fontes de alimentação de equipamentos eletrônicos, os quais possuem baixas potências (até 5 kVA) (DELGADO, 2010) (SIEMENS, 2017).

O uso generalizado do transformador é evidenciado no reflexo econômico acentuado da sociedade, desta forma, busca-se critérios cada vez mais avançados de dimensionamento e construção, de forma a conciliar a redução de custos e aumento na segurança operacional; ou ainda, verifica-se que o projeto de transformadores é considerado um problema de otimização, determinada em geral, por minimizar custos de material, produção, e perdas, de forma a maximizar rendimento, em que técnicas de otimização são usadas para determinar a configuração ótima dos parâmetros de geometria do transformador (ESEOSA, 2015) (MEHTA; PATEL, 2014) (RIES, 2007).

Neste contexto, estudos detalhados são realizados para elevar a eficiência dos transformadores, como também, analisar as propriedades físicas dos componentes, técnicas construtivas (sob a responsabilidade de atender requisitos legais de legislação e normas técnicas), e outros possíveis fatores relacionados com a execução do projeto. Verifica-se também, que realizar o projeto de transformadores envolve o processo de otimização, em que se faz necessário analisar um conjunto de informações e cálculos, tornando-se, uma fonte para uma gama de resultados, os quais, é possível obter o ótimo com base em seu propósito de utilização, pois o resultado ótimo, depende das variáveis que são consideradas importantes em uma determinada aplicação.

Para o presente trabalho será abordado o estudo para o projeto de transformadores, com único primário e único secundário, de baixa potência (até 1,5 kVA), potência elevadas abrangem mais fatores e detalhes em seus cálculos que não serão abordados.

## **1.1 Justificativa**

De acordo com Ries (2007), o projeto de transformadores é, em sua essência, um processo fortemente iterativo, pois é necessário atender as mais diversas especificações que visam obter um equipamento de menor custo total e que atenda às especificações. No presente

trabalho, o projeto envolverá transformadores de baixa potência (até 1,5 kVA), monofásico, com um primário e um secundário.

Porém, pode-se considerar outros fatores que não seja o menor custo, como por exemplo a maior eficiência, as menores dimensões, a menor massa, ou ainda, uma combinação de exigências. Desta forma, a elaboração de um algoritmo para projetar transformadores que traga como resultados uma gama de possibilidades de projetos, possibilita a escolha de acordo com a determina exigência imposta.

## 1.2 Objetivos

Elaborar um algoritmo para o projeto de um transformador em que o rendimento esteja em função de parâmetros construtivos. Para que o objetivo possa ser alcançado, será revisado o modelo matemático do transformador, analisado os parâmetros de projeto e de construção de um transformador além de elaborado um algoritmo para o processo iterativo.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A validação do algoritmo a ser projetado é possível de ser realizada de algumas maneiras, entre elas, a utilização de um transformador o qual seja possível extrair todas informações relevantes, tais como, número de espiras dos enrolamentos, número de lâminas, características físicas e magnéticas das lâminas, perdas envolvidas e dados nominais. Com isso, o transformador a ser estudado deve ser passível de ser desmontado e analisado de forma minuciosa. Para implementação da técnica e dimensionamento de transformadores alguns autores se destacam, como Dasgupta (2009), Kulkarni e Khaparde (2004), Landgraf (2002), Kosow (2005) e Américo et al. (2017), estes foram utilizados como fundamentação teórica para o desenvolvimento do projeto.

Na impossibilidade de utilizar um transformador, uma alternativa, é a comparação com um projeto base de mesmas características nominais, desta forma, nesta seção será abordado um projeto base como forma de demonstrar aspectos de construção de um transformador e extrair resultados para comparação futura.

### 2.1 Projeto – Caso Base

Como meio de validar o algoritmo projetado, será utilizado o algoritmo proposto no livro “Transformadores” do autor Alfonso Martignoni (1991). Será exposto o algoritmo em conjunto com os cálculos necessários para elaboração de um projeto de um transformador monofásico com as seguintes características: potência de saída 750 VA, frequência 60 Hz, tensão de entrada 127 V e tensão de saída 220 V.

Os cálculos serão apresentados de acordo com a sequência encontrada no algoritmo:

a) O cálculo da corrente de saída é dado pela Equação (1),

$$Corrente\_saída = \frac{Potência\_saída}{Tensão\_saída} \quad (1)$$

a qual retorna o valor de 3,41 A;

c) O valor da potência de entrada é acrescido por 10% do valor da potência de saída, esse valor é justificado para suprir as perdas totais no processo de transformação, com isso o valor da potência de entrada será de 825 W;

d) O valor da corrente de entrada é calculado de acordo com a Equação (2),

$$Corrente\_entrada = \frac{Potência\_entrada}{Tensão\_entrada} \quad (2)$$

a qual retorna o valor de 6,5 A;

e) De acordo com a Tabela 1, a densidade de corrente é avaliada e utilizada para determinar a seção dos condutores conforme a Equação (3).

Tabela 1 - Relação de densidade de corrente por potência.

Potência (VA)	Densidade de Corrente (A/mm <sup>2</sup> )
500	3
500 até 1000	2,5
1000 até 3000	2

Fonte: (MARTIGNONI, 1991).

$$Seção\_condutor = \frac{Corrente}{Densidade\_corrente} \quad (3)$$

Desta forma, o valor para a seção do condutor de entrada é 2,6 mm<sup>2</sup>, do condutor de saída 1,36 mm<sup>2</sup>, e para valores comerciais têm-se AWG n° 13 e AWG n° 15 respectivamente, e a densidade média de corrente é calculada de acordo com a Equação (4),

$$Densidade\_média = \frac{\frac{Corrente\_1}{Seção\_condutor\_1} + \frac{Corrente\_2}{Seção\_condutor\_2}}{2} \quad (4)$$

desta forma a densidade média de corrente é de 2,27 A/mm<sup>2</sup>;

f) A seção magnética de um transformador com um primário e um secundário utilizando lâminas padronizadas, é descrita de acordo com a Equação (5)

$$Seção\_magnética = 7,5 \cdot \sqrt{\frac{Potência\_saída}{Frequência}} \quad (5)$$

e o valor é de 26,52 cm<sup>2</sup>;

g) Para escolha das dimensões do núcleo, é necessário conhecer a seção geométrica, esta seção é a que efetivamente é constituída de ferro, e para que seja considerado o espaçamento entre uma lâmina e outra, o valor desta seção é obtido de acordo com a Equação (6)

$$Seção\_geométrica = 1,1 \cdot Seção\_magnética \quad (6)$$

e assim, tem-se 29 cm<sup>2</sup>;

h) De maneira a aproximar o núcleo da forma mais quadrada possível, a partir da seção geométrica, e com base na Tabela 2, escolhe-se então a lâmina padronizada, que para o seguinte projeto resulta na lâmina número 6, e desta forma as dimensões do núcleo serão 5 x 6 cm, e as novas seção geométrica e magnética serão, respectivamente de 30 cm<sup>2</sup> e 27,27 cm<sup>2</sup>;

Tabela 2 - Lâminas padronizadas.

Lâminas Padronizadas			
Nº	Perna central (cm)	Seção da janela (mm <sup>2</sup> )	Peso do núcleo (kg/cm)
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

Fonte: (MARTIGNONI, 1991).

i) Para o cálculo do número de espiras considera-se a Equação (7)

$$Número\_espira\_1 = \frac{Tensão\_1}{Seção\_magnética} \cdot \frac{10^8}{4,44 \cdot Indução\_máxima \cdot Frequência} \quad (7)$$

em que, segundo Martignoni (1991) o valor da indução máxima para lâminas de boa qualidade é de 11300 Gauss, e com isso o número de espiras do primário e do secundário serão, respectivamente, 160 e 278 espiras, a fim de superar perdas, será acrescido 10% nos valores, o que retorna, 176 para o primário e 306 para o secundário;

j) De forma a garantir que seja possível executar o projeto do transformador, primeiramente se faz necessário determinar a seção do cobre enrolado, como verificado na Equação (8).

$$Seção_{cobre\_enrolado} = (N_{espira\_1} \cdot Seção_{condutor\_1}) + (N_{espira2} \cdot Seção_{condutor\_2}) \quad (8)$$

O valor da seção do cobre enrolado é 873,76 mm<sup>2</sup>. Para que a bobina dos enrolamentos possa se ajustar na janela do núcleo, a razão entre a Seção da janela e a Seção do cobre enrolado deve ser maior ou igual a 3, com verificado na Equação (9).

$$\frac{Seção\_janela}{Seção\_cobre\_enrolado} \geq 3 \quad (9)$$

Para este projeto, o valor da razão é de 2,15; caso o projeto tivesse como intuito o de realizar a montagem do transformador, seria necessário escolher outro tipo de lâmina com janela maior;

k) Para o cálculo da massa do ferro, será utilizado os dados referentes a massa da lâmina, presente na Tabela 2, e a Equação (10),

$$Massa\_ferro = Massa\_núcleo \cdot Comprimento\_núcleo \quad (10)$$

e assim, para o comprimento de 6 cm do núcleo, a massa do ferro do núcleo será de 6,32 kg;

l) A Equação (11) pode ser utilizada para determinar o comprimento da espira média,

$$Comprimento\_médio\_espira = Perna\_central \cdot (2 + 0,5\pi) + 2 \cdot Comp\_núcleo \quad (11)$$

e assim, o valor do comprimento da espira média será de 29,85 cm;

m) Para determinar a massa do cobre utilizado nos enrolamentos será utilizada a Equação (12),

$$Massa\_cobre = \frac{Seção_{condutor\_total}}{100} \cdot \rho_{cobre} \cdot Comprimento\_espira\_média \quad (12)$$

em que  $\rho_{cobre}$  é a densidade do cobre, e considerada em 8,9 g/cm<sup>3</sup>, desta forma, a massa do cobre será 2566,9 g;

n) Para determinar as perdas no ferro, considerando lâminas normais,  $\omega_{fe} = 4,22$  W/kg, e aplicando a Equação (13),

$$Perda\_ferro = 1,15 \cdot \omega_{fe} \cdot Massa\_ferro \quad (13)$$

em que,  $\omega_{fe}$  representa a perda específica do ferro, e o valor 1,15 é utilizado para correção do valor das perdas devido ao processo de usinagem das lâminas, com isso o valor da perda no ferro é de 30,66 W;

o) É possível determinar as perdas no cobre utilizando a Equação (14),

$$Perda\_cobre = Massa\_cobre \cdot (Densidade\_media^2) \cdot \frac{\rho_{cu}}{\zeta_{cu}} \cdot 10^3 \quad (14)$$

em que,  $\rho_{cu}$  é a resistividade do cobre e seu valor é de 0,0216  $\Omega/m/mm^2$ ,  $\zeta_{cu}$  é a massa específica do cobre e seu valor é de 8,9 g/cm<sup>3</sup>, o fator 10<sup>3</sup> é para adequação do valor das grandezas, desta forma, a perda no cobre é de 32,05 W;

p) Ao final, o rendimento pode ser obtido de acordo com a Equação (15),

$$Rendimento = \frac{Potência\_saída}{Potência\_saída + Perda\_ferro + Perda\_cobre} \quad (15)$$

desta forma, o rendimento para este projeto será de 92,28%.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os valores obtidos após a implementação do algoritmo; a princípio os resultados para validação do projeto, e em seguida um conjunto de resultados para explicar as possibilidades de aplicações.

#### 3.1 Validação do Algoritmo

De modo a possibilitar comparação de valores, os valores nominais foram os utilizados no item 2.1, Potência de saída 750 VA, Frequência de 60 Hz, Tensão de entrada 127 V e tensão de saída 220 V.

Serão apresentados dados obtidos considerando dois tipos de lâminas: a de grão orientado, com sete subtipos diferentes; e a de grão não-orientado com vinte e sete subtipos diferentes. Os subtipos estão relacionados com perdas típicas.

A Tabela 3 apresenta as dimensões físicas do núcleo, percebe-se que os valores ficaram bem próximos, devido ao fato das dimensões das lâminas serem definidas com base

nos valores das dimensões do carretel. Ressalta-se que a seção geométrica, é obrigatoriamente menor ou igual a área do carretel.

Tabela 3 - Dimensões da geometria do núcleo.

	<b>Grão Orientado</b>	<b>Grão Não-Orientado</b>
Coluna Central (cm)	5	5
Espessura (cm)	6	6
Seção Geométrica (cm <sup>2</sup> )	29,90	29,84

Fonte: Autoria própria.

Para uma mesma espessura do núcleo, a quantidade de lâminas irá variar de acordo com a espessura da própria lâmina, ou seja, quanto menor a espessura do núcleo, maior será a quantidade de lâminas, como observado na Tabela 4.

Tabela 4 - Quantidade de lâminas para o núcleo.

<b>Espessura da Lâmina</b>	<b>Grão Orientado</b>	<b>Grão Não-Orientado</b>
0,23 mm	246	
0,27 mm	211	
0,3 mm	190	
0,35 mm	164	162
0,5 mm		116
0,54 mm		107
0,65 mm		89
1 mm		58

Fonte: Autoria própria.

A partir deste ponto, a título de comparação, serão considerados apenas os valores para as lâminas com espessura de 0,35 mm, tanto para grão orientado, como para grão não orientado. Os valores mín (mínimo) e máx (máximo) doravante utilizados, relaciona-se aos valores de indução magnética mínima e máxima.

O número de espiras, para cada tipo de lâmina, pode ser verificado na Tabela 5.

Tabela 5 - Número de espiras – primário e secundário.

	<b>Grão Orientado</b>	<b>Grão Não-Orientado</b>
N Espiras Primário (mín)	120	178
N Espiras Primário (máx)	106	120
N Espiras Secundário (mín)	206	308
N Espiras Secundário (máx)	182	206

Fonte: Autoria própria.

Os valores correspondentes ao volume e massa total do núcleo são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Dados físicos do núcleo.

	<b>grão Orientado</b>	<b>Grão Não-Orientado</b>
Volume (cm <sup>3</sup> )	883,07	881,48
Massa (g)	6887,9	6875,6

Fonte: Autoria própria.

A massa do cobre, considerando os dois enrolamentos, é apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores de massa do cobre.

	<b>Grão Orientado</b>	<b>Grão Não-Orientado</b>
Massa Mín (g)	1737,3	2585,7
Massa Máx (g)	1534,7	1736,0

Fonte: Autoria própria.

É possível verificar a massa do transformador referindo-se ao núcleo e aos enrolamentos, ressaltando que é desconsiderado parafusos, suportes e bornes. Desta forma, a massa do transformador pode ser verificada de acordo com a Tabela 8.

Tabela 8 - Massa do transformador.

	<b>Grão Orientado</b>	<b>Grão Não-Orientado</b>
Massa Mín (kg)	8,62	9,46
Massa Máx (kg)	8,42	8,61

Fonte: Autoria própria.

Neste ponto é possível verificar a possibilidade de execução. Na Tabela 9 é apresentado os valores das razões que indicam a viabilidade, ou não, da execução.

Tabela 9 - Possibilidade de execução.

	<b>Grão Orientado</b>	<b>Grão Não-Orientado</b>
Razão mín	2,86	1,92
Razão máx	3,24	2,86

Fonte: Autoria própria.

Desta forma, verifica-se que apenas para o caso da indução magnética máxima e lâminas de grão orientado, o projeto é possível de ser executado, pois este apresentou o valor da razão entre a área de janela e a área do cobre enrolado, maior ou igual que 3. As perdas magnéticas e perdas no cobre são: 13,57 W e 19,18 W respectivamente. Sendo assim, a potência de entrada para o transformador projetado é de 782,75 W.

Como a potência de entrada efetiva (782,75 W) ficou abaixo da potência de entrada estipulada inicialmente (825 W), verifica-se que o condutor de entrada calculado no projeto está corretamente dimensionado, não havendo a necessidade de recalcula-lo, nesta análise o rendimento para o transformador projetado é de 95,82%.

### 3.2 Comparação de valores

Nesta subseção serão comparados alguns valores obtidos do projeto caso base com os valores obtidos do algoritmo projetado.

É possível verificar que o algoritmo projetado retorna os valores próximos ao projeto caso base, porém é verificada melhoria com relação a quantidade de materiais, menor massa total, menos perdas e melhor rendimento, como pode ser verificado no Quadro 1.

Quadro 1 - Comparação dos valores obtidos no projeto caso base e no algoritmo projetado.

Variável	Projeto base	Algoritmo	Variação
Potência de saída	750 VA	750 VA	-
Número de espiras primário	176	106	70
Número de espiras secundário	306	182	124
Massa do ferro	6,32 kg	6,89 kg	-0,57 kg
Massa do cobre	2,57 kg	1,53 kg	1,04 kg
Massa total	8,89 kg	8,42 kg	0,47 kg
Perdas magnéticas	30,66 W	13,57 W	17,09 W
Perdas no cobre	32,05 W	19,18 W	12,87 W
Potência de entrada (calculada)	825 VA	782,75 VA	42,25 W
Rendimento	92,28%	95,82%	3,54%

Fonte: Autoria própria.

Ressalta-se que no caso do número de espiras, a variação torna-se mais evidente, pois no algoritmo há opção de utilizar vários dados de diversos fabricantes, e como verificado o cálculo do número de espiras depende (também) da indução magnética, logo, com o valor da indução magnética mais elevado, o número de espiras diminui, e conseqüentemente a massa de cobre também é reduzida.

Outra verificação importante a ser realizada é que no caso do cálculo do algoritmo, a utilização do carretel, o qual é um dos fatores que determinam as dimensões do núcleo, em conjunto com variedade de espessuras das lâminas implica em maior massa de ferro.

## 5.2 Diversidade de Aplicações (Projeto Secundário)

De modo a explicar o algoritmo e os resultados que podem ser analisados, serão apresentados resultados de projeto secundário, considerando os seguintes dados: Tensão entrada em 127 V, Tensão de saída em 24 V, Frequência de operação de 60 Hz, e potência de 700 VA.

O Quadro 2 apresenta os resultados para o projeto citado, porém é possível fazer uma busca refinada considerando apenas parâmetros de interesse, como por exemplo o rendimento ou número de espiras.

Quadro 2 – Resultados para o projeto secundário.

Referência	Aperam	(mm)	Quantidade de lâminas	Perda magnética mín (W)	Perda magnética máx (W)	Massa mín (kg)	Massa máx (kg)	Rendimento (mín)	Rendimento (máx)
<b>Grão Não-Orientado</b>									
P800-100A	E233	1	58,00	-	68,18	-	8,32	-	0,88
P450-65A	E233	0,65	89,00	-	37,10	-	8,38	-	0,92
M600-65A	E230		89,00	-	52,90	-	8,38	-	0,90
M470-65A	E185	0,65	89,00	-	41,22	-	8,38	-	0,92
M450-65A	E170		89,00	-	37,10	-	8,38	-	0,92
M400-65A	E157	0,54	89,00	-	34,35	-	8,38	-	0,92
M530-54A	E230		89,00	-	45,76	-	8,38	-	0,91
P400-50A	E233	0,5	89,00	-	32,02	-	8,38	-	0,93
M530-50A	E230		107,00	-	45,70	-	8,37	-	0,91
M470-50A	E185		116,00	-	35,75	-	8,40	-	0,92
M400-50A	E170		116,00	-	32,10	-	8,40	-	0,93
M370-50A	E157		116,00	-	29,83	-	8,40	-	0,93
M350-50A	E145		116,00	-	29,07	-	8,40	-	0,93
M330-50A	E137		116,00	-	27,41	-	8,40	-	0,93
M310-50A	E125		116,00	-	26,52	-	8,40	-	0,93
M290-50A	E115		116,00	-	25,14	-	8,40	-	0,93
M270-50A	E110		116,00	-	23,76	-	8,40	-	0,94
M250-50A	E105	116,00	-	22,04	-	8,40	-	0,94	
M230-50A	E100	116,00	-	20,32	-	8,40	-	0,94	
M330-35A	E170	0,35	162,00	-	28,33	-	8,38	-	0,93
M300-35A	E157		162,00	-	25,71	-	8,38	-	0,93
M290-35A	E145		162,00	-	24,06	-	8,38	-	0,94
M270-35A	E137		162,00	-	23,10	-	8,38	-	0,94
M250-35A	E125		162,00	-	21,59	-	8,38	-	0,94
M235-35A	E115		162,00	-	19,94	-	8,38	-	0,94
M210-35A	E110		162,00	-	18,22	-	8,38	-	0,94
M195-35A	E100		162,00	-	17,88	-	8,38	-	0,94
<b>Grão Orientado</b>									
M108-23	E003-9	0,23	246,00	6,55	9,66	8,39	8,20	0,96	0,96
M117-23	E003-9		246,00	6,83	10,62	8,39	8,20	0,96	0,96
M112-27	E004-7	0,27	211,00	7,25	10,09	8,40	8,19	0,96	0,96
M125-27	E004-7		211,00	7,74	11,26	8,40	8,19	0,96	0,96
M130-30	E005-4	0,3	190,00	7,91	11,76	8,38	8,17	0,96	0,96
M140-30	E005-4		190,00	8,32	12,58	8,38	8,17	0,96	0,96
M150-35	E006-2	0,35	164,00	9,51	13,57	8,40	8,19	0,95	0,95

Fonte: Autoria própria.

De maneira a refinar a busca, serão considerados rendimentos de 94% a 95% perante ao universo de resultados apresentados no Quadro 2. Desta forma, os selecionados podem ser verificados no Quadro 3.

Quadro 3 - Primeiro refinamento do projeto secundário.

Referência	Aperam	(mm)	Quantidade de lâminas	Perda magnética mín (W)	Perda magnética máx (W)	Massa mín (kg)	Massa máx (kg)	Rendimento (mín)	Rendimento (máx)
<b>Grão Não-Orientado</b>									
M270-50A	E110	0,5	116,00	-	23,76	-	8,40	-	0,94
M250-50A	E105		116,00	-	22,04	-	8,40	-	0,94
M230-50A	E100		116,00	-	20,32	-	8,40	-	0,94
M290-35A	E145	0,35	162,00	-	24,06	-	8,38	-	0,94
M270-35A	E137		162,00	-	23,10	-	8,38	-	0,94
M250-35A	E125		162,00	-	21,59	-	8,38	-	0,94
M235-35A	E115		162,00	-	19,94	-	8,38	-	0,94
M210-35A	E110		162,00	-	18,22	-	8,38	-	0,94
M195-35A	E100		162,00	-	17,88	-	8,38	-	0,94
<b>Grão Orientado</b>									
M150-35	E006-2	0,35	164,00	9,51	13,57	8,40	8,19	0,95	0,95

Fonte: Autoria própria.

E ainda, como forma de fazer um segundo refinamento, é possível, por exemplo, considerar apenas opções com *Perda magnética* com valores entre 9 W até 22 W. Assim, o resultado final pode ser verificado no Quadro 4.

Quadro 4 - Segundo refinamento do projeto secundário.

Referência	Aperam	(mm)	Quantidade de lâminas	Perda magnética mín (W)	Perda magnética máx (W)	Massa mín (kg)	Massa máx (kg)	Rendimento (mín)	Rendimento (máx)
<b>Grão Não-Orientado</b>									
M230-50A	E100	0,5	116,00	-	20,32	-	8,40	-	0,94
M250-35A	E125		162,00	-	21,59	-	8,38	-	0,94
M235-35A	E115	0,35	162,00	-	19,94	-	8,38	-	0,94
M210-35A	E110		162,00	-	18,22	-	8,38	-	0,94
M195-35A	E100		162,00	-	17,88	-	8,38	-	0,94
<b>Grão Orientado</b>									
M150-35	E006-2	0,35	164,00	9,51	13,57	8,40	8,19	0,95	0,95

Fonte: Autoria própria.

Por fim, é possível fazer um último refinamento, considerar a menor massa, e desta forma, a projeto escolhido pode ser observado no Quadro 5.

Quadro 5 - Última considerando do projeto secundário.

Referência	Aperam	(mm)	Quantidade de lâminas	Perda magnética mín (W)	Perda magnética máx (W)	Massa mín (kg)	Massa máx (kg)	Rendimento (mín)	Rendimento (máx)
<b>Grão Orientado</b>									
M150-35	E006-2	0,35	164,00	-	13,57	-	8,19	-	0,95

Fonte: Autoria própria.

#### 4. CONCLUSÕES

A princípio, o objetivo deste trabalho foi o de realizar um estudo acerca da teoria de transformadores, analisar os parâmetros de projeto e de construção de um transformador, buscando analisar a influência dos parâmetros construtivos no rendimento, possibilitando assim, a elaboração do algoritmo para o processo iterativo de projeto de transformadores.

Pode-se verificar que a partir de explanação da teoria do modelo matemático de um transformador, foi possível determinar a equação do rendimento em função de variáveis de parâmetros construtivos, pois esta, ficou em função da massa dos elementos (enrolamentos e núcleo), e a massa é obtida a partir do volume e densidade dos materiais. Foi verificada também a possibilidade de execução do projeto, haja vista que esta é diretamente relacionada com a razão entre a área da seção da janela do núcleo, com a área ocupada pelos enrolamentos.

Para validar o algoritmo, os resultados obtidos a partir do algoritmo projeto demonstraram-se satisfatórios e condizentes com os resultados obtidos a partir do projeto caso base (ambos com os mesmos dados, 750 VA, 127/220 V). Ressalta-se que todos os resultados obtidos são dependentes da metodologia do cálculo como também dos dados de materiais fornecido pelos fabricantes.

O algoritmo projetado realiza iterações e fornece uma gama de resultados, e estes resultados dependem diretamente de dados fornecidos pelos fabricantes dos elementos (carreais, fios de cobre, lâminas) do transformador. A partir dos resultados fornecidos pelo algoritmo, é possível realizar uma busca de modo que, com as opções disponíveis os requisitos subsequentes possam ser atendidos.

Como exemplo de busca de resultados, o cálculo de um transformador de 700 VA 127/24 V (projeto secundário), fornece as 34 possibilidades, porém um refinamento com base no rendimento, perda magnética e massa, a possibilidade é reduzida a um único projeto; verificando-se que o refinamento (ou filtro de busca), é aplicado de maneira a suprir diversas necessidades aplicação.

Outra forma de busca, é a partir do algoritmo projetado, alterar a restrição, por exemplo, fixar um número de espiras, e verificar as possibilidades de projeto, bem como realizar a busca da menor massa total possível.

O algoritmo projetado permite o projeto de transformadores com diversos tipos de materiais, por exemplo, a inclusão de lâminas de material amorfo; observando que para os cálculos, são necessárias informações mínimas, fornecida por fabricantes, utilizadas no decorrer do projeto.

O presente trabalho possibilita a iniciativa para elaboração de estudos futuros, aplicando a abordagem para outros tipos de transformadores, outros parâmetros de análise e buscas em torno do universo de resultados obtidos, como por exemplo, realizar busca do resultado ótimo a partir de inteligência artificial.

## REFERÊNCIAS

**AMÉRICO, J. P.; CABRAL, S. H. L.; STEFENON, S. F.** *Study of Partial Discharge Measurement in Power Transformers*. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2017.

**CHAPMAN, Stephen J.** *Fundamentos de Máquinas Elétricas*. 5ª. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. 65-141 p.

**DASGUPTA, Indrajit.** *Power Transformers Quality Assurance*. Greater Noida: New Age International, 2009. 14-29 p.

**DELGADO, Rodrigo D. S.** *Estudo dos requisitos essenciais a especificação de transformadores de potência em condições normais de operação*. Escola Politécnica da

Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: UFRJ, 2010. 121 p. Disponível em: <<http://migre.me/tuUfm>>. Acesso em: Março 2016.

**ESEOSA, Omorogiuwa.** *Application of Non-Linear Programming Optimization Technique in Power Transformer Design.* *Applied Research Journal*, v. I, n. 2, p. 71-79, Abril 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/JXfmzK>>. Acesso em: Maio 2017.

**KOSOW, Irwing L.** *Máquinas Elétricas e Transformadores.* 15<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Globo, 2005.

**KULKARNI, S V.; KHAPARDE, S A.** *Transformer Enginnering Design and Practice.* Mumbai: Marcel Dekker, 2004. 36-71 p.

**LANDGRAF, Fernando J. G.** *Propriedades Magnéticas de Aços para fins Elétricos. Aços: perspectivas para os próximos 10 anos,* Rio de Janeiro, p. 109-128, 2002. Disponível em: <<https://goo.gl/Pr0X5q>>. Acesso em: Janeiro 2017.

**MARTIGNONI, Alfonso.** *Transformadores.* 8<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Globo, 1991. ISBN 85-250-0223-2.

**MEHTA, H. D.; PATEL, Rajesh M.** *A Review on Transformer Desing Optimization and Performace Analysis Using Artificial Intelligence Techniques.* *International Journal of Science and Research*, v. III, n. 9, p. 726-733. Disponível em: <<https://www.ijsr.net/archive/v3i9/U0VQMTQxOTg=.pdf>>. Acesso em: Maio 2017.

**PAULINO, Marcelo E. D. C.** *Princípios básicos de transformadores de potência. O Setor Elétrico,* Santa Cecília, n. 96, p. 52-61, Janeiro 2014.

**RIES, Walter.** *Transformadores, Fundamentos para o Projeto e Cálculo.* 1<sup>a</sup>. ed. Porto Alegre: Edipucrs, 2007.

**SIEMENS.** *Controle e Distribuição em Baixa Tensão, Transformadores de Baixa Tensão, Monofásicos e Trifásicos.* Disponível em: <<https://goo.gl/5djxB>>. Acesso em: Março 2017.