

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**Gabriel Garcia Castelo Branco**

**Modelagem Caixa Cinza de Transformadores de Potência com o Emprego de  
Algoritmos de Otimização**

**Alegrete-RS**

**2020**

**Gabriel Garcia Castelo Branco**

**Modelagem Caixa Cinza de Transformadores de Potência com o Emprego de Algoritmos de Otimização**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Natalia Braun Chagas

Alegrete-RS  
2020

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

C349m Castelo Branco, Gabriel Garcia  
Modelagem Caixa Cinza de Transformadores de Potência com o  
Emprego de Algoritmos de Otimização / Gabriel Garcia Castelo  
Branco.

64 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade  
Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2020.

"Orientação: Natalia Braun Chagas".

1. Transformadores de Potência. 2. Sistema Elétrico de  
Potência. 3. Modelagem Matemática. 4. Caixa Cinza. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal do Pampa

**GABRIEL GARCIA CASTELO BRANCO**

**MODELAGEM CAIXA CINZA DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA COM O EMPREGO DE ALGORITMOS  
DE OTIMIZAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 01 de Dezembro de 2020.

Banca examinadora:

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Natalia Braun Chagas

Orientadora

UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Giovani Guarienti Pozzebon

UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Paulo César Comassetto de Aguirre  
UNIPAMPA



Documento assinado eletronicamente por **GIOVANI GUARIENTI POZZEBON, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/12/2020, às 16:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **PAULO CESAR COMASSETTO DE AGUIRRE, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/12/2020, às 16:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **NATALIA BRAUN CHAGAS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/12/2020, às 17:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0415824** e o código CRC **4E51B3DE**.

---

Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete  
Av. Tiarajú, 810 – Bairro: Ibirapuitã – Alegrete – RS CEP: 97.546-550  
Telefone: (55) 3422-8400



*Este trabalho é dedicado aos meus pais,  
Elisabete Fernandes Garcia e Francisco Gervasio Castelo Branco.*

## **AGRADECIMENTOS**

*Meus sinceros agradecimentos, primeiramente, aos meus pais, Elisabete Fernandes Garcia e Francisco Gervasio Castelo Branco, por todo apoio, suporte e compreensão a mim dedicados durante esta etapa de minha vida. Assim como minha irmã Nicole Garcia dos Santos, a qual sempre me motivou.*

*Agradeço a professora Natalia Braun Chagas pela sua orientação, amizade e por ter depositado a sua confiança em mim, acreditando na minha capacidade de realizar o presente trabalho. Também, a sua disponibilidade de auxílio quando necessário, sanando todas as dúvidas. E aos ensinamentos a mim transmitidos, acrescentando conhecimento profissional e pessoal, deste modo, me ajudando a ser uma pessoa melhor.*

*Ao professor Paulo César Comassetto de Aguirre que por meio de dicas e sugestões ajudou a melhorar este trabalho.*

*Ao corpo docente da UNIPAMPA por sua atenção e conhecimento compartilhado ao longo dos anos de graduação.*

*A todos os meus amigos que contribuíram de forma direta ou indireta, motivando e encorajando a produção deste trabalho.*

*Aos meus amigos e colegas do laboratório de processamento de energia e controle (LAPEC).*



*"Não importa quanto a vida possa ser ruim,  
sempre existe algo que você pode fazer, e triunfar.  
Enquanto há vida, há esperança."  
(Stephen Hawking)*

## RESUMO

O bom funcionamento do transformador de potência é essencial para a eficiência na entrega da energia elétrica aos consumidores. Visando o alto desempenho do transformador, estão sendo desenvolvidos estudos e análises sobre as avarias destes dispositivos que possam interferir no seu desempenho. Para auxiliar nesta compreensão, diferentes tipos de modelagem de transformadores de potência são utilizados: caixa branca, caixa preta e caixa cinza. As modelagens caixa branca e caixa preta possuem limitações, pois não são capazes de realizar uma análise detalhada sobre o comportamento no interior de um transformador que não fornece os seus dados geométricos. Assim, a modelagem caixa cinza tornou-se uma opção interessante para modelar o transformador e gerar um circuito detalhado aproximado. O presente trabalho emprega métodos de otimização para a obtenção dos valores dos parâmetros R-L-C do modelo caixa cinza de um enrolamento de transformador de potência. Implementou-se três métodos de otimização, são eles: algoritmo de otimização de Busca Cuco (CS), dos Lobos dos Cinzentos (GWO) e das Baleias (WOA). Também, realizou-se uma variação nos procedimentos de cálculo da função objetivo para aumentar a precisão da modelagem caixa cinza proposta. A modelagem proposta obteve baixos níveis de diferença entre a resposta em frequência simulada e a experimental do enrolamento, desta maneira, caracteriza-se como uma boa opção para modelar um enrolamento de transformador de potência.

**Palavras-chave:** Transformadores de Potência, Sistema Elétrico de Potência, Modelagem Matemática, Caixa Cinza.

## ABSTRACT

The proper functioning of the power transformer is essential for the efficient delivery of electricity to consumers. Aiming at the high performance of the transformer, studies and analyzes are being developed on the failures of these devices that can interfere with their performance. To assist in this understanding, different types of modeling of power transformers are used: white box, black box and gray box. The white box and black box models have limitations, as they are not able to carry out a detailed analysis of the behavior inside a transformer that does not offer its geometric data. Thus, gray box modeling has become an interesting option for modeling the transformer and generating an approximate detailed circuit. The present work employs optimization methods to obtain the values of the R-L-C parameters of the gray box model of a power transformer winding. Three optimization methods were implemented, namely: Cuckoo Search (CS), Gray Wolves (GWO) and Whales (WOA) optimization algorithms. Also, there was a variation in the calculation procedures of the objective function to increase the accuracy of the proposed gray box modeling. The proposed modeling low levels of difference between the simulated and experimental frequency response of the winding, thus, it stands out as a good option to model a power transformer winding.

**Keywords:** Power transformers, Electrical Power System, Mathematical Modeling, Gray Box.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Transformador utilizado em subestações de transmissão. . . . .	19
Figura 2.2 – Transformador no Sistema Elétrico de Potência. . . . .	20
Figura 2.3 – Experimento realizado para verificar a indução de campo magnético. . .	20
Figura 2.4 – Núcleo envolvente. . . . .	22
Figura 2.5 – Núcleo envolvido. . . . .	22
Figura 2.6 – Modelo esquemático de um transformador monofásico. . . . .	23
Figura 2.7 – Cabo transposto continuamente. . . . .	24
Figura 2.8 – Fabricação do enrolamento do tipo panqueca. . . . .	24
Figura 2.9 – Enrolamento intercalado. . . . .	25
Figura 2.10–Enrolamento do tipo camada. . . . .	25
Figura 2.11–Enrolamento helicoidal. . . . .	26
Figura 2.12–Enrolamento disco. . . . .	26
Figura 2.13–Corte transversal de um transformador, com os parâmetros que são avaliados. . . . .	27
Figura 2.14–Modelo detalhado de representação do enrolamento de transformador. .	28
Figura 2.15–Representação da modelagem caixa preta. . . . .	29
Figura 2.16–Modelo caixa cinza. . . . .	30
Figura 2.17–Figura bi-dimensional. . . . .	36
Figura 2.18–Conduta das baleias jubarte durante o ataque da presa. . . . .	39
Figura 2.19–Representação da exploração do espaço de busca seguindo a lógica das baleias. . . . .	40
Figura 2.20–Mecanismo de encolhimento das baleias. . . . .	41
Figura 3.1 – Resposta em frequência do enrolamento de transformador de potência. .	45
Figura 3.2 – Fluxograma do funcionamento do algoritmo de otimização. . . . .	47
Figura 3.3 – Fluxograma do funcionamento do procedimento 3. . . . .	50
Figura 4.1 – Conjunto de gráficos com as funções de transferência resultante de cada algoritmo de otimização aplicando o procedimento 1. . . . .	52
Figura 4.2 – Conjunto de gráficos com as funções de transferência resultante de cada algoritmo de otimização aplicando o procedimento 2. . . . .	54
Figura 4.3 – Conjunto de gráficos com as funções de transferência resultante de cada algoritmo de otimização aplicando o procedimento 3. . . . .	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Frequência ( $F_i$ ) e Amplitude ( $A_i$ ) dos pontos de ressonância da função de transferência medida e a simulada com diferentes algoritmos de otimização empregando o Procedimento 1. . . . .	53
Tabela 2 – Desvio percentual de frequência e amplitude apresentado pelos algoritmos de otimização quando utilizado o procedimento 1. . . . .	53
Tabela 3 – Frequência ( $F_i$ ) e Amplitude ( $A_i$ ) dos pontos de ressonância da função de transferência medida e a simulada com diferentes algoritmos de otimização empregando o Procedimento 2. . . . .	55
Tabela 4 – Desvio percentual de frequência e amplitude apresentado pelos algoritmos de otimização quando utilizado o procedimento 2. . . . .	55
Tabela 5 – Frequência ( $F_i$ ) e Amplitude ( $A_i$ ) dos pontos de ressonância da função de transferência medida e a simulada com diferentes algoritmos de otimização empregando o Procedimento 3. . . . .	57
Tabela 6 – Desvio percentual de frequência e amplitude apresentado pelos algoritmos de otimização quando utilizado o procedimento 3. . . . .	57
Tabela 7 – Valor da função objetivo para os procedimentos combinados com os algoritmos de otimização. . . . .	58
Tabela 8 – Tempo total de simulação das iterações com os respectivos procedimentos e algoritmos de otimização. . . . .	58
Tabela 9 – Valor dos parâmetros do modelo caixa cinza. . . . .	58

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO . . . . .	15
2	OBJETIVOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA . . . . .	17
2.1	PROBLEMATIZAÇÃO . . . . .	17
2.2	OBJETIVOS . . . . .	18
2.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA . . . . .	18
2.3.1	Transformador de potência . . . . .	18
2.3.2	Princípio de funcionamento do transformador de potência . . . . .	19
2.3.3	Aspectos construtivos do transformador de potência . . . . .	21
2.3.3.1	Núcleo . . . . .	21
2.3.3.2	Enrolamentos . . . . .	22
2.3.4	Modelo para um transformador de potência . . . . .	27
2.3.5	Modelagens aplicadas a transformadores de potência . . . . .	27
2.3.5.1	Modelagem caixa branca . . . . .	28
2.3.5.2	Modelagem caixa preta . . . . .	29
2.3.5.3	Modelagem caixa cinza . . . . .	29
2.3.6	Métodos De Otimização . . . . .	31
2.3.6.1	Classificação dos algoritmos meta-heurísticos . . . . .	31
2.3.7	Algoritmo de otimização por busca de Cuco (CS) . . . . .	32
2.3.7.1	Voos de Lévy . . . . .	32
2.3.7.2	Implementação do algoritmo de otimização por busca de Cuco . . . . .	33
2.3.8	Algoritmo de otimização por Lobos Cinzentos . . . . .	34
2.3.8.1	Cercamento da presa . . . . .	35
2.3.8.2	Modelagem matemática da caça dos lobos cinzentos . . . . .	36
2.3.8.3	Ataque dos lobos cinzentos . . . . .	37
2.3.8.4	Exploração do espaço de busca . . . . .	37
2.3.9	Algoritmo de otimização por baleias . . . . .	37
2.3.9.1	Cercamento da presa . . . . .	39
2.3.9.2	Rede de bolhas (exploração do espaço de busca) . . . . .	40
2.3.9.3	Busca aleatória pela presa . . . . .	41
3	METODOLOGIA . . . . .	44
3.1	Estudo de caso . . . . .	45
3.2	Função objetivo . . . . .	45
3.3	Funcionamento do algoritmo de otimização . . . . .	46
3.4	Procedimentos realizados para o desenvolvimento da modelagem caixa cinza . . . . .	46
3.4.1	Procedimento 1 . . . . .	49

3.4.2	Procedimento 2 . . . . .	49
3.4.3	Procedimento 3 . . . . .	50
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO . . . . .</b>	<b>51</b>
4.1	Resultado dos Algoritmos de Otimização . . . . .	51
5	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .</b>	<b>59</b>
5.1	Continuidade dos estudos . . . . .	59
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>60</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O sistema elétrico de potência é responsável por gerar, transmitir e distribuir a energia elétrica aos consumidores. A eficiência no despacho da energia é diretamente proporcional a confiabilidade e robustez do sistema. Problemas que atinjam o sistema elétrico de potência e que tenham a capacidade de danificar as estruturas de transmissão, ocasionando interrupções no abastecimento de energia elétrica a casas, fábricas e até mesmo cidades inteiras por um longo período de tempo, devem ser resolvidos, pois tornaram-se intoleráveis no mundo atual (LUO et al., 2001).

Uma falha no sistema de energia ocorrida no dia 3 de novembro de 2020 no estado do Amapá deixou 13 dos seus 16 municípios sem energia elétrica. A origem do evento foi um incêndio na subestação, onde um dos três transformadores foi seriamente danificado, e outro parcialmente, acarretando indisponibilidade dos seus serviços. Além disso, o terceiro transformador estava em manutenção desde dezembro de 2019. O início da retomada da energia elétrica foi feita de forma gradual, onde primeiramente foi adotado um sistema de rodízio, disponibilizando energia elétrica por 6 horas, no entanto para serviços essenciais o fornecimento foi de 24 horas. No dia 24 de novembro de 2020 a energia elétrica foi completamente reestabelecida. Contudo, durante o período do apagão ocorreu o adiamento das eleições em Macapá. Ademais, bares, restaurantes, abastecimento de água, internet, bancos e supermercados foram afetados pela falta de energia elétrica (WIKIPÉDIA, 2020).

Diversos equipamentos compõem o sistema elétrico de potência, contudo o transformador de potência é um dispositivo fundamental e de alto custo financeiro para este sistema. Desta forma é essencial manter os transformadores operando normalmente, visto que eles tornam a transmissão de energia elétrica mais segura, confiável e ajudam a minimizar as perdas nas linhas de transmissão. No entanto, caso o transformador venha a falhar, oriundo de defeitos que não foram apercebidos, o mesmo poderá trazer enormes gastos para a empresa que é responsável pelo fornecimento de energia e também aos usuários, prejudicando a saúde econômica de ambas as partes (LI; HUANG, 2008). Medidas tem sido tomadas para elucidar e prevenir os transformadores de potência de possíveis falhas que venham a acometê-los.

Os parâmetros característicos dos transformadores viraram alvo de pesquisas, dado que esses podem refletir a condição interna do transformador de potência (AHMAD et al., 2017). A idade média dos transformadores no mundo como um todo está aumentando, isto é resultado de pesquisas feitas com o objetivo de maximizar a sua longevidade, pois isto é um fator de alta prioridade para as indústrias (MULLEROVA et al., 2015). Dessa forma para que isto seja possível, a condição do transformador deve ser monitorada regularmente para o agendamento correto das manutenções preventivas apropriadas.

Uma importante ferramenta para o estudo, diagnóstico de falhas e defeitos, nos transformadores de potência, é a obtenção de um modelo elétrico que seja capaz descrever o comportamento do transformador. Algumas das áreas onde esse modelo pode



ser introduzido são: análise do nível de tensão do enrolamento do transformador de potência (MCNUTT; BLALOCK; HINTON, 1974), estudo dos transitórios da rede (GREENWOOD, 1991) e identificação da deformação do enrolamento (MITCHELL; WELSH, 2011).

Os tipos de modelagem de transformadores de potência que têm sido amplamente utilizadas para objeto de estudo e investigações sobre o comportamento destes dispositivos, podem ser classificados em modelo caixa preta, caixa branca e caixa cinza. A modelagem caixa preta usufrui de metodologias de identificação do sistema no domínio do tempo ou frequência, dados que são armazenados e conseguem descrever a conduta do transformador. Esse tipo de abordagem fornece grande benefício no que diz respeito a simulação do comportamento visto dos terminais do transformador, porém não fornece informações sobre o seu interior (GUSTAVSEN; BREDE; TANDE, 2011). A modelagem caixa branca, recria um circuito elétrico composto por resistências, indutâncias e capacitâncias, que é capaz de representar o transformador, porém é necessário possuir os dados geométricos e físicos do transformador para estabelecê-la (LOPEZ-FERNANDEZ; ALVAREZ-MARINO, 2009). O modelo caixa cinza, é um modelo intermediário entre caixa branca e caixa preta, pois esse utiliza recursos de ambos os modelos para constituir-se e obter os dados aproximados do transformador de potência (MITCHELL; WELSH, 2011).

O principal objetivo deste trabalho, é implementar uma modelagem do tipo caixa cinza para um enrolamento do transformador de potência, fornecendo assim os parâmetros aproximados que possam caracterizar o enrolamento. Para isto, são analisadas diversas metodologias já existentes. Ademais é feito um estudo sobre o estado da arte na elaboração de modelagens caixa cinza.

O trabalho foi estruturado em cinco capítulos. No primeiro capítulo está a introdução geral sobre o assunto do trabalho. O segundo capítulo é composto pelo objetivo do trabalho e a revisão bibliográfica do tema, com o intuito de demonstrar a importância do assunto escolhido. O terceiro capítulo apresenta a metodologia que será utilizada para alcançar os objetivos. Os resultados obtidos são apresentados no Capítulo 4. Por fim, no quinto capítulo estão as considerações finais do trabalho.

## 2 OBJETIVOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 PROBLEMATIZAÇÃO

A demanda por energia elétrica têm aumentando continuamente ao longo do tempo (HAMDANI et al., 2019). Deste modo, observando a tendência mundial de consumo da energia elétrica, notou-se uma necessidade do setor elétrico modernizar-se para acompanhar este crescimento e evitar problemas no despacho da energia elétrica. Para que o sistema elétrico de potência suporte as solicitações que são feitas a ele, e opere corretamente, algumas condições devem ser atendidas pelos órgãos que o administram, entre essas estão a confiabilidade, robustez, eficiência, minimização de perdas e qualidade na energia despachada. O comprometimento do sistema elétrico potência com estas exigências impulsionou pesquisas direcionadas a conservação do funcionamento correto dos equipamentos que o compõem (RAHIMPOUR; RASHTCHI; AGHMASHEH, 2017). A segurança e funcionamento correto do transformador de potência são fatores que têm sido priorizados (FOROUHARI; ABU-SIADA, 2018).

Sobretensões ocasionadas por raios são um problema que atinge as linhas de transmissão, alastram-se por meio delas e podem desta forma atingir os transformadores de potência. A severidade dos danos que as sobretensões podem causar aos transformadores depende do tempo e frequência que esse dispositivo fica exposto ao problema e a configuração em que se encontra o sistema (POPOV et al., 2007). Usualmente, a transferência de sobretensões a transformadores provoca avarias no isolamento dos seus enrolamentos, podendo chegar finalmente, em um colapso do dielétrico, ocasionando curtos-circuitos internos (FILIPOVIC-GRCIC; FILIPOVIC-GRCIC; UGLESIC, 2015). Portanto, o estudo dos transformadores de potência submetidos a fenômenos transitórios e em condições de falha, é um fator importante para fazer com que esses dispositivos suportem diferentes níveis de tensão e sejam monitorados frequentemente afim de evitar falhas destrutivas (RAHIMPOUR; BIGDELI, 2009).

A estimativa de um modelo elétrico composto por resistências, capacitâncias e indutâncias, é uma ferramenta que tem sido muito útil na análise e estudo sobre os níveis de tensão no interior do transformador de potência durante ou após a sua exposição a um fenômenos transitório (KULKARNI, 2013). O modelo também ajuda no projeto do isolamento presente nos enrolamentos do transformador, pois caso o isolamento seja sub dimensionado, falhas futuras poderão ocorrer (RIES, 2007). Desta forma, é importante conhecer a distribuição de tensão e as correntes elétricas presentes nos enrolamentos do transformador durante os testes, visto que isto irá auxiliar o projetista a definir o isolamento necessário.

## 2.2 OBJETIVOS

O presente trabalho têm como objetivo principal desenvolver uma modelagem caixa cinza, empregando diferentes algoritmos de otimização, e os combinando com sugestões de calculo da função objetivo, afim de aprimorar a modelagem. O circuito elétrico estimado através da modelagem proposta deverá ser capaz de reproduzir o comportamento de um enrolamento de transformador de potência, de forma que a sua resposta seja similar a da medida nos terminais do enrolamento. As informações sobre a geometria do enrolamento não foram utilizadas para estabelecer a modelagem caixa cinza do enrolamento, uma vez que o algoritmo de otimização é encarregado de determinar o valor das capacitâncias, indutâncias e resistências que irão compor o circuito da modelagem caixa cinza. Para atingir o objetivo principal deste trabalho, alguns objetivos secundários foram predefinidos:

- Realizar uma interface entre Matlab e Ltspice;
- Determinar as inequações da modelagem caixa cinza;
- Determinar o impacto de diferentes funções objetivo aplicada ao algoritmo de otimização.

## 2.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.3.1 TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

O transformador de potência é um dispositivo estático capaz de converter a energia elétrica de uma certa frequência e nível de tensão, em uma energia elétrica com a mesma frequência, porém com um outro nível de tensão, ou seja, o mesmo altera os níveis de tensão e corrente sem afetar a potência elétrica real fornecida (CHAPMAN, 2013).

No cenário da transmissão de energia elétrica o transformador de potência possui um papel fundamental, dado que este equipamento participa do envio de energia elétrica à longas distâncias, pois este dispositivo é capaz elevar o nível de tensão durante a transmissão, reduzindo significativamente as perdas na linha. Desta forma, foi factível alcançar lugares que antes estavam sem acesso a energia elétrica (KOSOW, 1995). A Figura 2.1 replica a imagem de um transformador utilizado na transmissão de energia elétrica, onde é possível notar o seu volumoso tamanho.

No sistema elétrico de potência os transformadores são equipamentos que tem uma enorme importância, como é demonstrado pelo esquema da Figura 2.2, onde este dispositivo está presente na geração e transmissão, localizado em subestações elevadoras. No momento da distribuição da energia elétrica aos consumidores finais, ele está alocado em subestações abaixadoras e postes de luz. Com isso, nota-se a vultuosa função que o transformador de potência possui, visto que se o mesmo operar de forma incorreta ou apresentar uma falha, a transmissão de energia elétrica poderá ser reduzida ou totalmente

**Figura 2.1** – Transformador utilizado em subestações de transmissão.

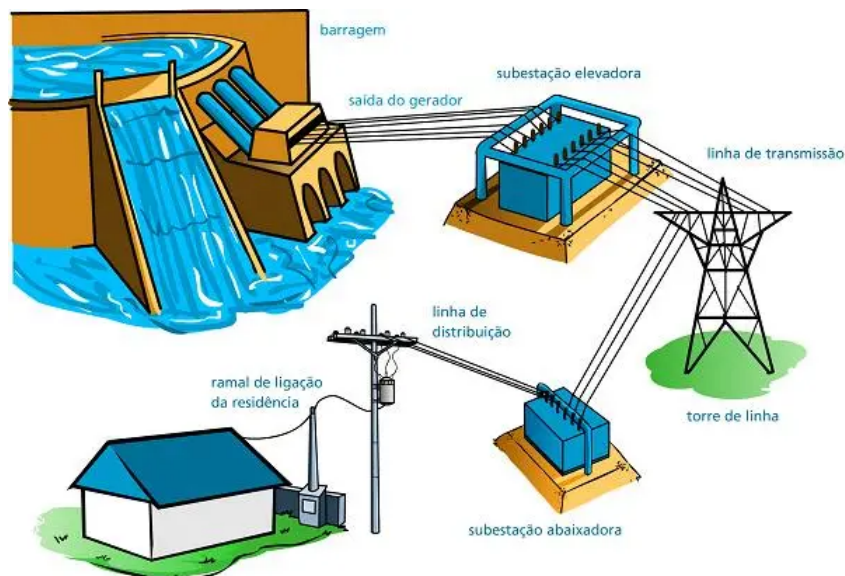
Fonte: (WEG, 2008-2019).

interrompida, até que o problema no transformador seja solucionado. Ademais, ele é um dos dispositivos mais caros do sistema elétrico de potência, com isso surge uma atenção redobrada para que a sua vida útil seja prolongada (WANG, 2012).

Com o intuito de saber os danos que o transformador de potência sofre quando exposto a fenômenos elétricos transitórios, se faz necessário estimar um modelo de representação deste equipamento para que seja plausível realizar estudos e análises. Além disso, esse modelo também auxilia em projetos para prolongar a vida útil do transformador, mantendo assim o seu funcionamento adequado ao longo do tempo. Portanto, para melhorar o desempenho do transformador de potência e deixá-lo mais confiável, modelagens matemáticas podem ser aplicadas para o estudo do seu comportamento durante ou depois de estar exposto a sobretensões provenientes de operação de comutação, descargas elétricas, curto-circuito, falhas e panes (GUSTAVSEN, 2010). Existem basicamente três tipos de modelagens que estão sendo amplamente utilizadas, são elas: a modelagem caixa branca, caixa preta e cinza (AGHMASHEH; RASHTCHI; RAHIMPOUR, 2018).

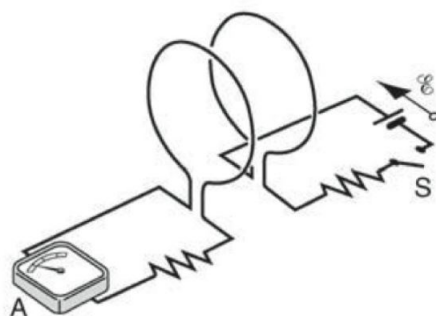
### 2.3.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

O transformador de potência opera mediante a Lei de Indução de Faraday. Essa fala a respeito da capacidade de induzir uma força eletromotriz e uma corrente em uma espira, quando o campo magnético que atravessa a espira é variante no tempo (HALLIDAY, 2012).

**Figura 2.2** – Transformador no Sistema Elétrico de Potência.

Fonte: (MUNDO DA ELÉTRICA, 2014).

A Figura 2.3, consiste de duas espiras iguais e próximas uma da outra, a uma delas está conectada uma fonte de tensão alternada, e na outra espira um amperímetro é fixado nos seus terminais. Por um certo instante de tempo a chave (S) mantém-se aberta, não havendo a circulação de corrente alternada, deste modo não existirá o campo magnético variante no tempo, e por seguinte não haverá indução na outra bobina. Porém, quando a chave é fechada, a corrente elétrica começa a circular pela espira, surgindo assim um campo magnético variante no tempo, desta forma, a indução na outra bobina passa a existir, fazendo com que o amperímetro fixado, registre um valor de corrente elétrica.

**Figura 2.3** – Experimento realizado para verificar a indução de campo magnético.

Fonte: (HALLIDAY, 2012).

Do ponto de vista matemático a lei de Faraday pode ser descrita pela Equação 2.1,

onde  $\varepsilon$  é força eletromotriz induzida,  $\Delta\phi$  a variação do fluxo magnético e  $\Delta t$  a variação de tempo.

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (2.1)$$

Para uma bobina com  $N$  espiras, a força eletromotriz total é a soma das forças eletromotrizes, resultando na Equação 2.2:

$$\varepsilon = -N\frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (2.2)$$

O transformador é composto por dois ou mais enrolamentos que são acoplados mediante a um fluxo magnético comum. Desta maneira, quando o primário do transformador for conectado a uma fonte de tensão alternada, um fluxo magnético alternado irá surgir no enrolamento, onde a sua amplitude irá depender do nível de tensão e frequência da fonte, atrelada também ao número de espiras utilizadas. Certa parcela desse fluxo irá ser repassado ao secundário do transformador, denominando-se fluxo mútuo, esse irá introduzir uma tensão ao secundário, o nível desta tensão irá ser diretamente proporcional ao número de espiras presentes no secundário, a magnitude do fluxo mútuo e a frequência. Sendo assim, o funcionamento de um transformador de potência têm como fundamento a existência de um fluxo mútuo, variante no tempo, enlendo dois enrolamentos. Afim de tornar o acoplamento magnético entre os enrolamentos mais eficiente e reduzindo as perdas, utiliza-se um núcleo de material ferromagnético, visto que graças a sua característica é possível concatenar a maior parte do fluxo magnético (FITZGERALD, 2014).

### 2.3.3 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

O transformador de potência é composto por inúmeras peças, contudo as mais importantes são as suas bobinas e o seu núcleo, uma vez que desempenham papéis importantíssimos para o seu bom funcionamento (RIES, 2007). Deste modo, caso o núcleo ou as bobinas não estejam dimensionados corretamente, o transformador poderá apresentar falhas durante a sua operação, e se as mesmas não forem elucidadas, defeitos irreversíveis poderão ocorrer, ocasionando assim uma diminuição da vida útil do transformador. Portanto, demonstra-se relevante projetar corretamente o núcleo e bobinas de um transformador. Ademais, o isolamento é outro fator ligado a durabilidade do transformador e deve estar corretamente projetado.

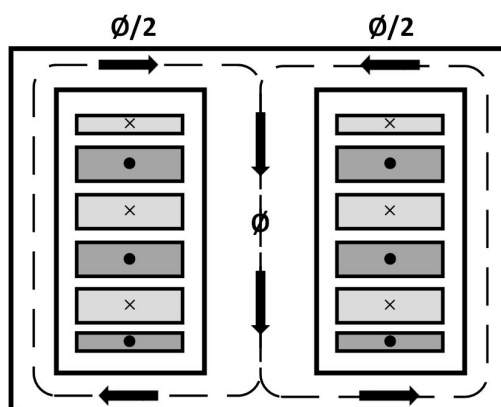
#### 2.3.3.1 NÚCLEO

O núcleo de um transformador é composto por material ferromagnético, já que este material contém uma alta permeabilidade magnética, e graças a esta característica, não é necessário produzir uma grande força magnetomotriz para fazer circular um fluxo mútuo. As principais perdas que o núcleo apresenta com a passagem de fluxo magnético é por histerese e corrente de Foucault. Com o objetivo diminuir a perda por corrente de

Foucault o núcleo é constituído por chapas finas, laminadas a frio e revestidas por um isolante elétrico inorgânico (SIMONE, 2010).

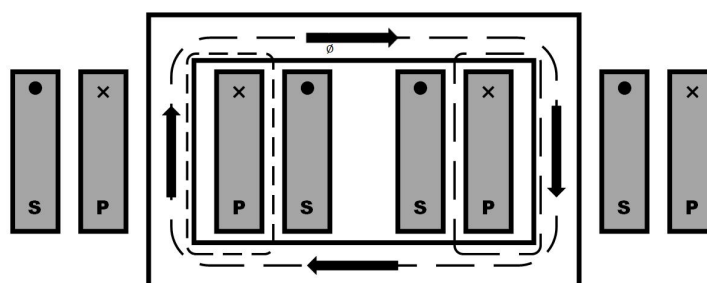
Existem basicamente dois tipos de configuração para o núcleo de um transformador de potência, ele pode ser do tipo núcleo envolvente ou núcleo envolvido, retratados respectivamente pelas Figuras 2.4 e 2.5.

**Figura 2.4** – Núcleo envolvente.



Fonte: Adaptado de (RIES, 2007).

**Figura 2.5** – Núcleo envolvido.



Fonte: Adaptado de (RIES, 2007).

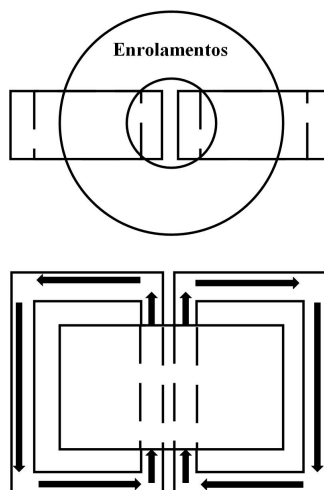
### 2.3.3.2 ENROLAMENTOS

Os enrolamentos de um transformador são peças fundamentais, uma vez que esses realizam a condução da corrente elétrica que circula pelo transformador. Para que o enrolamento tenha uma boa segurança contra possíveis agentes externos que venham a danificá-los, os mesmos devem ter um isolamento projetado corretamente para que esse seja capaz de suportar os *stress* elétricos e mecânicos. Também, necessitam de um resfriamento correto, pois caso aconteça um sobreaquecimento, danos irreversíveis ao enrolamento poderão ocorrer. Ademais, dependendo do nível do problema que o enrolamento apresente, esse poderá deteriorar o núcleo do transformador. Sendo assim, no

projeto dos enrolamentos de um transformador deve-se ter uma atenção redobrada para que esses funcionem corretamente (TORO, 1995).

Na Figura 2.6 podemos observar uma configuração de um transformador monofásico e como os enrolamentos estão dispostos.

**Figura 2.6** – Modelo esquemático de um transformador monofásico.



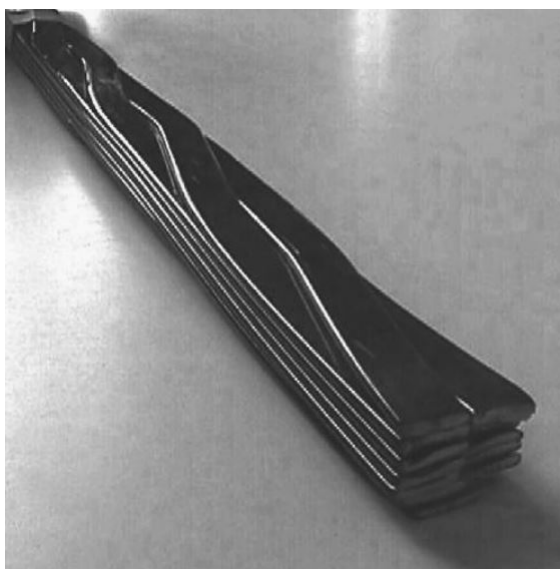
Fonte: Adaptado de (H.HARLOW, 2007).

Dentre os materiais que constituem os enrolamentos de um transformador de potência o alumínio e cobre são os mais utilizados, pois apresentam vantagens em relação a condução da corrente elétrica, porém, o emprego de cada um desses depende da utilização do transformador e também do seu tamanho. O alumínio é um condutor mais leve e mais barato que o cobre, geralmente, porém uma maior seção deste deve ser empregada para transportar uma corrente com o mesmo desempenho do cobre, já que esse apresenta uma maior resistividade. Além disso, o cobre apresenta uma maior resistência mecânica. Os condutores utilizados nos transformadores de potência são normalmente do tipo trançados com uma seção transversal retangular, mas também podem ser condutores folha ou chapa. Múltiplos fios podem ser enrolados em paralelo e unidos nas extremidades do enrolamento, no entanto nesta configuração deve ser realizada a transposição de condutores em vários pontos do enrolamento, com o objetivo de impossibilitar a circulação de correntes ao redor dos laços criados pela união dos fios nas extremidades. Os fios individuais que compõem o enrolamento, podem estar expostos a diferenças do fluxo do campo, isto é ocasionado pela posição que esses ocupam dentro do enrolamento, criando diferenças de tensão entre os fios (RIES, 2007).

A transposição correta dos fios pode cancelar essas diferenças de tensão, também elimina ou reduz drasticamente as correntes circulantes. A Figura 2.7 mostra um cabo transposto continuamente.

Existem vários tipos de enrolamentos que são empregados nos transformadores de



**Figura 2.7** – Cabo transposto continuamente.

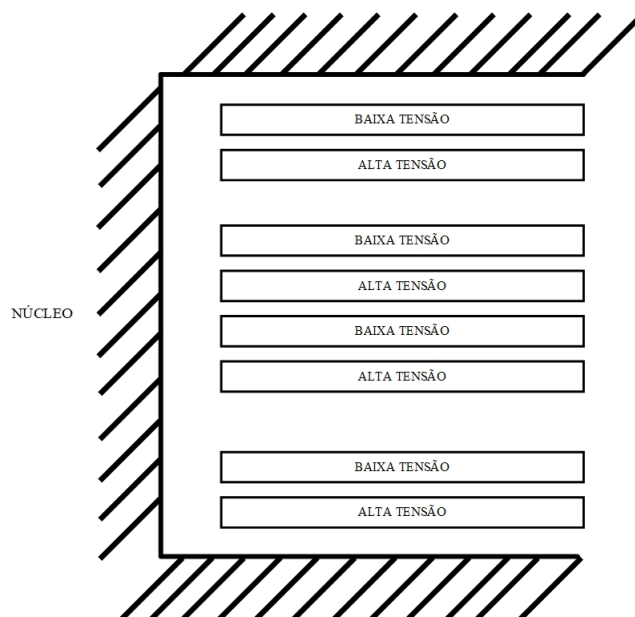
Fonte: (H.HARLOW, 2007).

potência, o que rege a escolha desses é a classificação do transformador e a construção do núcleo.

O enrolamento do tipo panqueca é um dos mais utilizados nos transformadores de potência, este nome é dado porque o arranjo dos condutores são feitos em discos. Na fabricação deste tipo de enrolamento, os condutores são em uma forma retangular, onde a face mais larga do condutor é orientada verticalmente ou horizontalmente (RIES, 2007). A Figura 2.8 demonstra como é produzido esse tipo de bobina e na Figura 2.9 podemos observar o arranjo intercalado.

**Figura 2.8** – Fabricação do enrolamento do tipo panqueca.

Fonte: (H.HARLOW, 2007).

**Figura 2.9** – Enrolamento intercalado.

Fonte: Adaptado de (H.HARLOW, 2007).

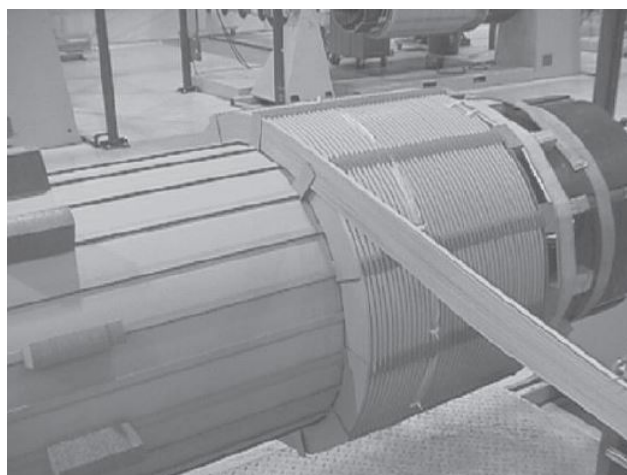
O enrolamento do tipo camada é um dos mais simples que pode ser colocado nos transformadores de potência, essa vantagem ocorre através dos condutores isolados que podem ser enrolados ao lado do cilindro e espaçadores. Ademais, as camadas podem ser enroladas uma em cima da outra, sendo separadas por um isolamento sólido, dutos ou uma mescla desses (H.HARLOW, 2007). A Figura 2.10 ilustra este tipo de enrolamento, no processo de fabricação.

**Figura 2.10** – Enrolamento do tipo camada.

Fonte: (H.HARLOW, 2007).

Os enrolamentos helicoidais são composto por mais de 100 fios isolados, que são enrolados em paralelo ao longo do comprimento do núcleo, espaçadores são colocados entre as voltas adjacentes ou discos, a transposição neste tipo de enrolamento é necessária, já que essa diminui as correntes que circulam entre os fios em paralelo (H.HARLOW, 2007), a Figura 2.11 demonstra um enrolamento helicoidal.

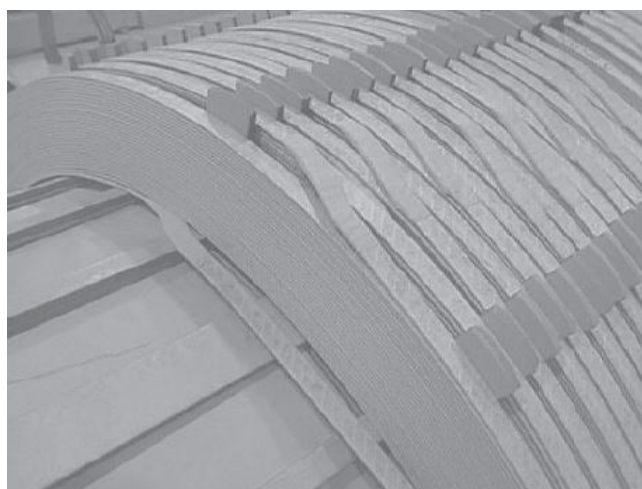
**Figura 2.11** – Enrolamento helicoidal.



Fonte: (H.HARLOW, 2007).

No enrolamento tipo disco existe a possibilidade de envolver um único fio ou vários fios condutores isolados, esses são enrolados em discos paralelos com uma orientação horizontal. Os discos abrangem várias voltas enroladas em outras voltas (H.HARLOW, 2007). A Figura 2.12 demonstra o enrolamento resultante deste processo.

**Figura 2.12** – Enrolamento disco.

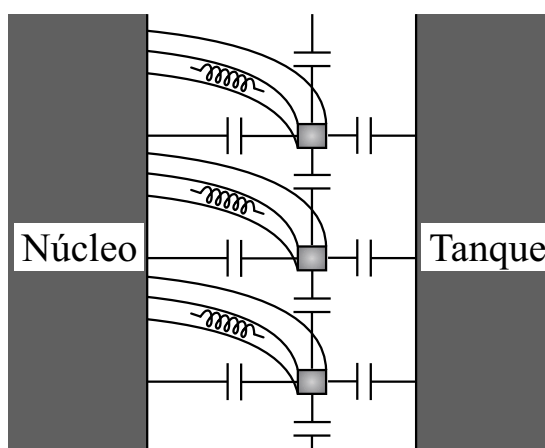


Fonte: (H.HARLOW, 2007).

### 2.3.4 MODELO PARA UM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

Em Kulkarni (2013), os autores descrevem os modelos para a representação de transformadores de potência. Nessas metodologias a geometria do transformador de potência é extremamente relevante, pois os parâmetros que irão descrever o transformador são estimados por meio destes dados. A Figura 2.13 demonstra um transformador e os parâmetros que o descrevem, são eles: indutância mútua, indutância própria, capacitâncias entre espira e núcleo, capacitância entre espiras. Contudo, as perdas relacionadas a capacitância e o fator de perda, não estão representados, mas também são levados em consideração.

**Figura 2.13** – Corte transversal de um transformador, com os parâmetros que são avaliados.



Fonte: Adaptado de (CHAGAS, 2018).

### 2.3.5 MODELAGENS APLICADAS A TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

As modelagens matemáticas aplicadas a transformadores de potência podem ser divididas em três grupos: modelagem caixa branca, caixa cinza e caixa preta. O primeiro grupo de modelagem, a caixa branca, não requer medições nos terminais do transformador para ser estabelecida, porém é necessário ter uma descrição detalhada da geometria e das propriedades dos materiais empregados na construção do transformador. Por fim, após realizar a modelagem caixa branca, é possível reproduzir a tensão no interior do transformador com precisão. No entanto devido as restrições de propriedade estabelecidas pelo fabricante, há uma dificuldade de acesso aos parâmetros necessários para desenvolver este tipo de modelo (GUSTAVSEN; PORTILLO, 2014b). A modelagem caixa preta consegue estimar a impedância de entrada do transformadores de potência, para isto, esse método não requer de dados do fabricante, porém se faz necessário realizar medições nos terminais do transformador, onde será analisada e estudada a sua resposta. Logo após, chega-se na impedância que representa o transformador de potência (TRAN et al., 2016b) (TRAN et al., 2016a). A modelagem caixa cinza realiza uma mescla entre as modelagens

caixa branca e caixa preta. Esta modelagem, é capaz de estimar um circuito composto por resistências, capacitâncias e indutâncias, denominado modelo detalhado aproximado, similar ao caixa branca, mas a base para encontrar esses parâmetros que vão constituir o modelo caixa cinza é proveniente da análise da resposta em frequência (FRA), ferramenta advinda do modelo caixa preta (MITCHELL; WELSH, 2013).

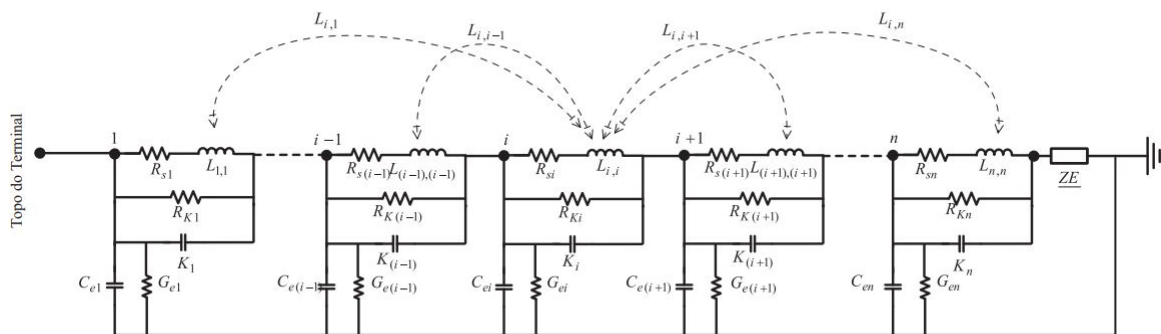
### 2.3.5.1 MODELAGEM CAIXA BRANCA

Ao longo dos anos, a modelagem de transformadores de potência surgiu como uma importante ferramenta que auxilia na compreensão do comportamento interno deste dispositivo. Ademais, ajuda a diagnosticar falhas existentes em seu interior e também auxilia no estudo do comportamento do transformador mediante a interação com fenômenos transitórios vindos da rede elétrica (MUKHERJEE; SATISH, 2012).

O modelo caixa branca é um tipo de modelagem capaz de replicar o comportamento interno do transformador. Deste modo, para que isso seja factível, o modelo caixa branca constitui  $n$  circuitos elétricos agrupados, formados por resistências série ( $R_{si}$ ), resistências paralelo ( $G_{ei}$ ), indutâncias próprias ( $L_{i,i}$ ), indutâncias mutuas ( $L_{i,n}$ ), capacitâncias série ( $K_i$ ) e capacitâncias paralelo ( $C_{ei}$ ). A Figura 2.14 demonstra o modelo final.

A implementação da modelagem caixa branca é feita através da extração dos dados geométricos do transformador, como por exemplo: comprimento do enrolamento, distância axial entre enrolamentos e altura do enrolamento. Sendo assim, os parâmetros geométricos do transformador mostram-se essenciais, uma vez que essa modelagem usufrui de equações analíticas para gerar o circuito agrupado equivalente do transformador (LOPEZ-FERNANDEZ; ALVAREZ-MARINO, 2009).

**Figura 2.14** – Modelo detalhado de representação do enrolamento de transformador.



Fonte: (AGHMASHEH; RASHTCHI; RAHIMPOUR, 2017)

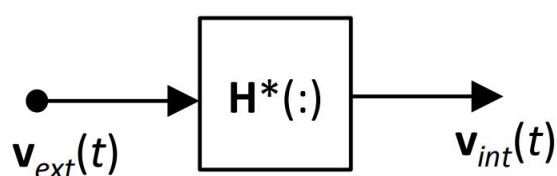
Contudo, uma desvantagem que a modelagem caixa branca apresenta é a necessidade de possuir os dados geométricos do transformador, esse que muitas vezes fica restrito

ao fabricante e dependendo do tempo que o transformador se encontra em funcionamento pode tornar-se um empecilho também, pois caso o transformador esteja operando por vários anos, os documentos referentes ao seu design podem estar mau conservados e de difícil acesso (RASHTCHI; RAHIMPOUR; FOTOOHABADI, 2011).

### 2.3.5.2 MODELAGEM CAIXA PRETA

Ao contrário da modelagem caixa branca, a modelagem caixa preta não requer o conhecimento dos dados geométricos do transformador, dado que essa modelagem utiliza uma metodologia que baseia-se em medições nos terminais do transformador, adquirindo a resposta deste dispositivo no domínio do tempo e frequência. Logo após, é feita a estimativa de uma impedância que descreve o comportamento visto a partir dos terminais do transformador (GUSTAVSEN; BREDE; TANDE, 2011). A modelagem caixa preta é capaz auxiliar na compreensão sobre o comportamento externo do transformador, por intermédio da impedância de entrada do mesmo. No entanto, essa modelagem não é capaz de providenciar informações sobre a distribuição de tensão e correntes que circulam no interior do transformador (GHAREHPETIAN; MOHSENI; MOLLER, 1998). A Figura 2.15 ilustra a modelagem caixa preta, onde é aplicado uma tensão externa ( $V_{ext}(t)$ ), por seguinte é verificada a tensão interna desse transformador ( $V_{int}(t)$ ), que é obtida a partir da convolução entre ( $V_{ext}(t)$ ) e a resposta do impulso ( $H^*(:)$ ).

**Figura 2.15** – Representação da modelagem caixa preta.



Fonte: (GUSTAVSEN; PORTILLO, 2014a).

A modelagem caixa preta apresenta uma boa resposta para o estudo da interação entre o transformador de potência e fenômenos elétricos de alta frequência. Assim, esse modelo é apropriado para a obtenção de formas de ondas de tensão e corrente nos terminais do transformador (HOSSEINI; VAKILIAN; GHAREHPETIAN, 2008).

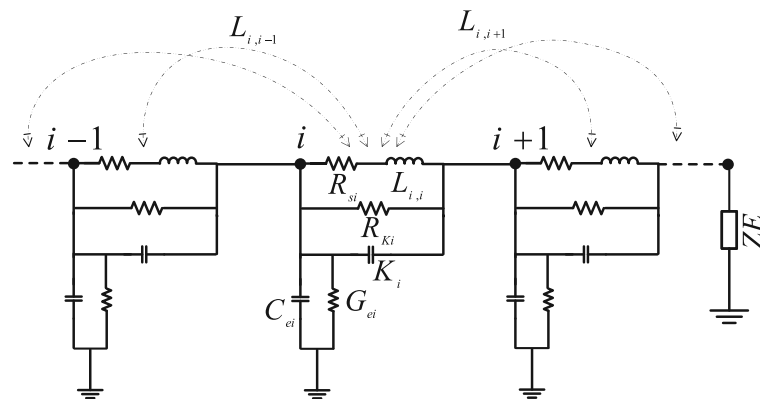
### 2.3.5.3 MODELAGEM CAIXA CINZA

A modelagem caixa cinza consegue estabelecer um circuito elétrico aproximado bem como o modelo caixa branca. Além disto, tem um resultado eficiente ao descrever a resposta do transformador, com isso ela tornou-se uma opção interessante entre as metodologias

de modelagens voltadas a transformadores de potência (AGHMASHEH; RASHTCHI; RAHIMPOUR, 2018). Logo, a modelagem caixa cinza mostra-se uma ferramenta que pode ser utilizada no estudo e na compreensão do comportamento dos transformadores de potência após serem submetidos a fenômenos transientes.

A modelagem caixa cinza é um modelo híbrido, composto por detalhes da modelagem caixa branca e caixa preta, este tipo de modelagem surgiu com o propósito de contornar as barreiras apresentadas pela modelagem caixa branca em relação às dificuldades de implementação, uma vez que são essenciais os dados do projeto interno do transformador (AGHMASHEH; RASHTCHI; RAHIMPOUR, 2017). Para a modelagem caixa cinza estimar um circuito elétrico que esteja apto a representar o transformador de potência é necessário utilizar os dados de tensão e corrente medidos nos terminais do transformador, mais precisamente, a resposta em frequência da impedância do transformador. Assim, observando a modelagem caixa branca e a modelagem caixa cinza, nota-se a semelhança de que ambas modelagens possuem circuitos elétricos compostos por resistências, indutâncias próprias e mútuas, capacitâncias série e paralelo, com o objetivo de retratar o comportamento do transformador (KAZEMI et al., 2018). Desta forma, a modelagem caixa cinza torna-se satisfatória para estudos e análises do comportamento interno do transformador (AGHMASHEH; RASHTCHI; RAHIMPOUR, 2017). A Figura 2.16 demonstra uma modelo caixa cinza resultante.

**Figura 2.16** – Modelo caixa cinza.



Fonte: Adaptado de (AGHMASHEH; RASHTCHI; RAHIMPOUR, 2018).

Uma metodologia de modelagem caixa cinza para a extração dos parâmetros de um enrolamento de transformador de potência é apresentada em (AGHMASHEH; RASHTCHI; RAHIMPOUR, 2017), onde o seu objetivo principal foi a identificação dos parâmetros do modelo. Em (RASHTCHI; RAHIMPOUR; REZAPOUR, 2006) e (RASHTCHI; RAHIMPOUR; FOTOHABADI, 2011), os parâmetros do circuito elétrico foram obtidos através da implementação de algoritmos de otimização, genético e caos.

### 2.3.6 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

Os métodos de otimização tem como objetivo principal a melhoria de algo já existente. Deste modo, basicamente, os métodos de otimização procuram a máxima eficiência e o menor custo a um determinado processo, mas sem ter que testar todas as possíveis soluções, diminuindo assim o tempo de trabalho (FILHO, 2018). Em contrapartida, os métodos de otimização possuem algumas deficiências, como por exemplo: quando a complexidade do problema aumenta, o tempo e custo computacional também aumentam significativamente, a presença de algumas funções que possuem mínimos locais ou apresentam descontinuidade, também são fatores que prejudicam no desempenho dos métodos de otimização (ARROYO, 2002).

Problemas relacionados a otimização são cada vez mais frequentes nas mais amplas áreas de conhecimento da engenharia e em indústrias. No âmbito de contornar estes problemas de otimização, tem surgido vários algoritmos meta-heurísticos bio-inspirados, esses estão sendo muito utilizados, cada vez mais. Desta forma, os algoritmos meta-heurísticos caracterizaram-se como uma ferramenta poderosa e de grande valia para a solução de problemas de otimização, visto que esses algoritmos possuem diversas qualidades, tais como: simples implementação para determinados problemas, flexibilidade para ser aplicado a diversos problemas e grande capacidade para encontrar a melhor solução de uma dada função objetivo (YANG; DEB, 2009).

O teorema apresentado em (WOLPERT; MACREADY, 1997) afirma que na literatura atual não há nenhum algoritmo meta-heurístico bio-inspirado ótimo que seja capaz de solucionar todos os problemas de otimização. Sendo assim, um algoritmo meta-heurístico aplicado a um determinado problema poderá trazer excelentes resultados. No entanto, este mesmo algoritmo, quando for aplicado a um outro problema, talvez não seja capaz de fornecer bons resultados.

#### 2.3.6.1 CLASSIFICAÇÃO DOS ALGORITMOS META-HEURÍSTICOS

Os algoritmos meta-heurísticos são divididos em dois grupos. O primeiro grupo é composto por algoritmos que baseiam-se em apenas uma única solução. Neste grupo o processo de busca começa através de um chute inicial, esse mesmo chute irá aprimorar-se ao decorrer das iterações. O segundo grupo é formado pelos algoritmos meta-heurísticos que utilizam uma população inicial (conjunto de diversas soluções), esta população é melhorada ao longo das iterações. Algoritmos que fazem o uso da meta-heurística fundamentada em populações apresentam melhores resultados em relação aos algoritmos de apenas uma única solução, isto ocorre devido as inúmeras vantagens que os algoritmos de população possuem, como por exemplo: as múltiplas hipóteses de solução que os algoritmos baseados em populações possuem, essas possíveis soluções compartilham entre si informações sobre



o espaço de busca, promovendo assim grandes saltos em direção a solução final, auxiliando assim o algoritmo de otimização a atingir o seu ótimo global. Portanto, os algoritmos que contam com a meta-heurística embasada em populações usualmente possuem uma maior capacidade de exploração em relação a algoritmos de meta-heurística fundamentada em uma única solução (MIRJALILI; MIRJALILI; LEWIS, 2014).

### 2.3.7 ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO POR BUSCA DE CUCO (CS)

O algoritmo de otimização por busca de Cuco foi formulado observando o comportamento parasita de algumas espécies de pássaro Cuco, esses depositam seus ovos em ninhos de pássaros hospedeiros, e também conseguem remover os ovos do respectivo hospedeiro para aumentar a probabilidade fecundação dos seus ovos, configurando assim, uma técnica de reprodução agressiva (PAYNE, 2005). Vale destacar que alguns pássaros hospedeiros podem entrar em conflito com os Cucos intrusos. Desta forma, caso um pássaro hospedeiro compreenda que os ovos não são seus, ele os joga fora ou abandona o ninho e constrói um novo em outro lugar (YANG; DEB, 2009). Ademais, algumas fêmeas do pássaro Cuco possuem a capacidade de reproduzir a cor e padrão do ovo da espécie hospedeira, reduzindo a expectativa de abandono por parte do pássaro hospedeiro (JOSHI et al., 2017). Uma característica dos ovos do pássaro Cuco é que, quase sempre, eles eclodem primeiro que o ovo do pássaro hospedeiro. Deste modo, após o nascimento, o filhote de pássaro Cuco retira os ovos do pássaro hospedeiro, movendo-os para fora do ninho. Sendo assim, esta ação contribui para a melhor alimentação do filhote de pássaro Cuco, visto que o filhote terá um melhor acesso a alimentação proporcionada pelo pássaro hospedeiro (PAYNE, 2005). Portanto, o comportamento de reprodução do pássaro Cuco pode ser aplicado a uma vasta lista de problemas relacionados a otimização. Além disto, a técnica de Voos de Lévy auxilia a melhorar a busca do pássaro Cuco por novos ninhos (YANG; DEB, 2009).

#### 2.3.7.1 VOOS DE LÉVY

Na natureza os animais caçam o seu alimento de forma aleatória ou parcialmente aleatória. De outra forma, diversos estudos têm demonstrado que a estratégia de voo de muitos animais e insetos, compartilham a mesma característica do voo de Lévy (BROWN; LIEBOVITCH; GLENDON, 2007), (REYNOLDS; FRYE, 2007) e (PAVLYUKEVICH, 2007). Um voo de Lévy é uma exploração aleatória, constituído de caminhadas retas com curvas repentinas de noventa graus, tendendo a se estabilizar depois de um grande número de etapas (BARTHELEMY; BERTOLOTI; WIERSMA, 2008).

### 2.3.7.2 IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO POR BUSCA DE CUCO

O algoritmo de otimização por busca de Cuco funciona imitando a reprodução do pássaro Cuco, onde o ovo do pássaro Cuco é uma possível solução. Primordialmente, cada pássaro Cuco põe um ovo, esse é depositado em um ninho. Em seguida, os ninhos que possuírem os melhores ovos serão mantidos para as próximas gerações. Logo após, o número de ninhos disponíveis para serem hospedeiros é concertado, porém o ovo do pássaro Cuco pode ser descoberto pela ave hospedeira com a probabilidade  $p_a \in [0, 1]$ . Diante disso, o pássaro hospedeiro pode jogar fora o ovo do pássaro cuco ou deixa o seu próprio ninho e constrói um totalmente novo. Afim de modelar esta ação do pássaro hospedeiro, pode-se assumir  $p_a$  como a taxa de descoberta dos ovos do pássaro Cuco e  $n$  para novos ninhos a fim de substituir os anteriores (YANG; DEB, 2009).

Em um problema de maximização a adequação de uma solução pode ser simplesmente equivalente ao valor da função objetivo. Diferentes formas de aptidão podem ser estabelecidas em um modelo parecido com a função de adequação do algoritmo genético. O algoritmo de busca Cuco utiliza a configuração onde cada ovo em um ninho representa uma possível solução, e o ovo do pássaro Cuco é uma nova solução, o intuito disso é manter as melhores soluções e as soluções que forem desconsideradas irão ser substituídas por soluções potencialmente melhores (ovo do Cuco) (JOSHI et al., 2017). Este algoritmo pode ser estendido para problemas mais complexos, onde cada ninho tem múltiplos ovos que representam um conjunto de soluções. No entanto, para o desenvolvimento do presente trabalho será adotado uma configuração mais simples, onde cada ninho possui apenas um único ovo, ou seja apenas uma possível solução. O Algoritmo 1 demonstra o pseudo-código do algoritmo de busca Cusco.

Segundo Yang e Deb (2009), no momento de gerar novas soluções  $x^{(t+1)}$ , ou seja, um pássaro cuco  $i$ , um voo de Lévy é utilizado. Esse comportamento é modelado pela Equação 2.3, onde  $\alpha > 0$  é o tamanho do passo utilizado, esse deve estar de acordo com as dimensões do problema. No entanto, normalmente adota-se  $\alpha = 1$ . O produto  $\oplus$  é referente as multiplicações de entrada. Outrossim, este produto é similar ao que é utilizado na otimização por enxame de partículas (PSO), no entanto na busca Cuco o passeio aleatório é feito através de voos de Lévy, um procedimento mais eficiente na exploração do espaço de busca.

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + \alpha \oplus Lévy(\lambda) \quad (2.3)$$

O voo de Lévy é um procedimento que fornece um passeio completamente aleatório, onde o comprimento do seu passo é formulado através da distribuição de Lévy, tendo uma variação infinita com média infinita. As etapas do voo de Lévy formam um processo de caminhada aleatória com uma lei de potência para a distribuição da largura do passo, com uma cauda pesada, demonstrado na Equação 2.4. Algumas soluções devem ser geradas

---

**Algoritmo 1: Pseudo-código do CS**


---

```

1  início
2  | Definir a função objetivo;
3  | Definir número de ninhos ( $n$ ) e probabilidade de descobrimento ( $p_a$ );
4  | Gerar as populações iniciais;
5  | repete
6  | | Pega um Cuco aleatoriamente por voo de Lévy;
7  | | Avalia a aptidão  $F_i$ ;
8  | | Escolhe um ninho entre  $n$  ninhos aleatoriamente;
9  | | se ( $F_i > F_j$ )
10 | | | Substitui  $j$  pela nova solução;
11 | | fim
12 | | A pior parcela ( $p_a$ ) de ninhos é abandonada e novos são construídos;
13 | | Mantém os melhores ninhos (melhores soluções);
14 | | Classifica as soluções e encontra a melhor atual;
15 | até o critério de parada ser atingido ou o número máximo de iterações;
16 | Apresenta o melhor resultado encontrado;
17 fim

```

Fonte: Adaptado de (YANG; DEB, 2009)

pelo voo de Lévy ao redor das melhores soluções obtidas até o presente momento, isso vai otimizar a busca local. Contudo, algumas soluções devem ser geradas randomicamente longe da melhor solução atual, garantindo que o sistema não fique fixo a apenas um ótimo local (PAYNE, 2005).

$$Lévy \sim u = t^{-\lambda}, \quad (1 < \lambda \leq 3), \quad (2.4)$$

### 2.3.8 ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO POR LOBOS CINZENTOS

Os lobos cinzentos são mamíferos carnívoros que fazem parte da família dos *Canidae*, eles estão no topo da cadeia alimentar e vivem normalmente em matilhas. O tamanho de suas matilhas pode variar de 5 a 12 membros em média. Um ponto interessante sobre os lobos cinzentos tem relação a sua hierarquia social dominante, que tem como característica ser muito rígida (MIRJALILI; MIRJALILI; LEWIS, 2014).

Na hierarquia dos lobos cinzentos, os seus respectivos líderes são um macho e uma fêmea, denominados alfa. O lobo alfa é o principal responsável nas tomadas de decisões que o bando deverá seguir, eles coordenam a caça, a escolha do lugar para os demais lobos dormirem, hora acordar e outros tipos de decisões. Entretanto, já foi visto resquícios de um comportamento democrático, onde o alfa segue o restante dos lobos da matilha. O segundo nível da hierarquia dos lobos cinzentos é ocupada pelo betas. Os lobos betas durante as tomadas de decisões são subordinado apenas ao líder, o alfa, porém eles podem comandar os demais. Além disso, o lobo beta é o melhor candidato para substituir o lobo alfa caso esse venha a falecer ou fique sem condições de liderar a matilha. O lobo beta também é

um auxiliar de extrema importância ao lobo alfa, visto que ele reforça os comandos do líder para a matilha e repassa os pareceres ao alfa. O ômega é classificação mais baixa dos lobos cinzentos. Este lobo deve se submeter a todos os outros lobos dominantes e também deve ser o último a comer. Desta forma, o ômega parece ser um indivíduo indiferente a organização da matilha. Todavia, foi observado que em caso de perda do ômega a matilha enfrenta problemas e lutas internas, uma vez que ocorre a demonstração da frustração e violência pela ausência do ômega. Caso um lobo não seja alfa, beta ou ômega, ele será denominado subordinado ou delta. Os lobos deltas devem obedecer ao alfa e beta, mas o ômega é comandado por eles. Sentinelas, anciões, caçadores, batedores e zeladores compõem a classe dos deltas (MECH, 1999).

A tática de caça dos lobos cinzentos é um comportamento extremamente interessante. Segundo (MURO et al., 2011) a caça dos lobos cinzentos é dividida em: rastreamento, perseguição e abordagem da presa, a partir disto ocorre o cercamento e incômodo da mesma até que ela pare de se movimentar, por fim o ataque contra a presa.

Com o intuito de modelar matematicamente a hierarquia dos lobos cinzentos ao projetar o algoritmo de Otimização dos Lobos Cinzentos (GWO), Mirjalili, Mirjalili e Lewis (2014), considerou como melhor solução o alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ) e delta ( $\delta$ ) são denominadas segunda e terceira melhor solução. O restante das soluções candidatas são classificadas como ômega ( $\omega$ ).

### 2.3.8.1 CERCAMENTO DA PRESA

Os lobos cinzentos quando encontram suas presas realizam um cercamento. Com o objetivo de modelar este comportamento dos lobos cinzentos Mirjalili, Mirjalili e Lewis (2014) propõe as seguintes equações:

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (2.5)$$

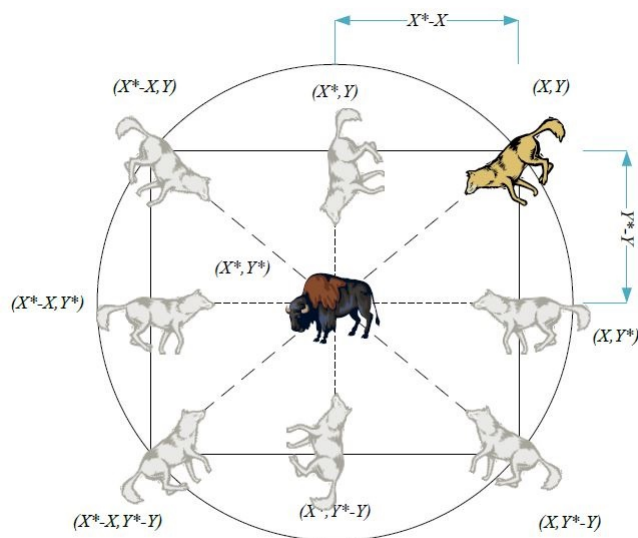
$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p - \vec{X}(t)| \quad (2.6)$$

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (2.7)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (2.8)$$

A representação da atual iteração em que encontra-se o algoritmo de otimização é dada por  $t$ ,  $\vec{A}$  e  $\vec{C}$  são vetores que influenciam nas Equações (2.5) e (2.6),  $\vec{X}_p$  faz referência a posição do vetor presa e  $\vec{X}$  aponta a posição do vetor lobo cinzento. A variável  $\vec{a}$  decresce linearmente de 2 a 0 ao decorrer da iterações, já os parâmetros  $r_1$  e  $r_2$  são vetores randômicos entre 0 e 1.

Figura 2.17 – Figura bi-dimensional.



Fonte: Adaptada de (MIRJALILI; MIRJALILI; LEWIS, 2014)

Para demonstrar os efeitos das Equações (2.5) e (2.6), a Figura (2.17) bi-dimensional é proposta por Mirjalili, Mirjalili e Lewis (2014), nesta está a possível posição da presa e do lobo com os seus respectivos vizinhos e soluções candidatas. Ao observar a Figura (2.17), fica compreendido que o lobo da posição  $(X, Y)$  desloca-se de acordo com a posição da presa  $(X^*, Y^*)$ . Para alcançar lugares mais próximos da presa durante as iterações, os vetores  $\vec{A}$  e  $\vec{C}$  vão sofrendo ajustes. Além do mais, através dos vetores  $r_1$  e  $r_2$  os lobos podem se posicionar aleatoriamente dentro do espaço ao redor da presa. O conceito descrito acima pode ser usado também para um espaço de busca com  $n$  dimensões, onde os lobos mesmo assim se moverão ao redor da presa.

### 2.3.8.2 MODELAGEM MATEMÁTICA DA CAÇA DOS LOBOS CINZENTOS

Os lobos cinzentos durante o processo de caça são capazes de achar a sua presa e cerca-la. O lobo alfa é o encarregado de guiar a matilha na caçada, porém os lobos betas e deltas também são capazes de envolver-se casualmente no comando das caçadas. Entretanto, há um entrave na modelagem e elaboração do algoritmo de otimização: os lobos cinzentos não possuem conhecimento da posição da sua presa (melhor solução). Para contornar essa situação, Mirjalili, Mirjalili e Lewis (2014) propõe que os lobos alfa, beta e delta detém o conhecimento da localização potencial da presa. Desta forma, salva-se as soluções apresentadas pelos lobos alfa, beta e delta, e assim é imposto ao restante dos agentes de busca atualizar as suas respectivas posições de acordo com a melhor posição encontrada. As equações a seguir são propostas por Mirjalili, Mirjalili e Lewis (2014) com

o intuito de modelar o comportamento citado acima.

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}|, \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}|, \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}| \quad (2.9)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha), \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_\beta), \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_\delta) \quad (2.10)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (2.11)$$

### 2.3.8.3 ATAQUE DOS LOBOS CINZENTOS

Uma característica dos lobos cinzentos, é que eles atacam a presa quando a mesma para de mover-se. Desta forma, com intuito de modelar matematicamente este comportamento de acercamento dos lobos cinzentos, Mirjalili, Mirjalili e Lewis (2014) propõem uma variável denominada  $\vec{a}$ , essa decresce ao longo das iterações, impactando no valor de  $\vec{A}$ . Portanto,  $\vec{A}$  é um valor aleatório que está compreendido entre  $-a$  e  $a$ , onde  $a$  decai de 2 a 0 ao decorrer das iterações.

### 2.3.8.4 EXPLORAÇÃO DO ESPAÇO DE BUSCA

Os lobos cinzentos realizam a busca da presa de acordo com a posição do lobo alfa, beta e delta. Com o objetivo de deixar a busca mais eficiente, eles divergem entre si na hora de buscar a presa e convergem no momento de ataque. Desta maneira, Mirjalili, Mirjalili e Lewis (2014) utiliza  $\vec{A}$  com valores entre -1 e 1 para fazer com que os agentes de busca discordem um do outro e o algoritmo GWO por fim realize uma exploração global. Além disto, um parâmetro que auxilia a melhorar o processo de busca do algoritmo GWO é o  $\vec{C}$ . Ao observar a Equação 2.8, nota-se que  $\vec{C}$  engloba valores aleatórios de 0 a 2, fornecendo assim pesos aleatórios para as posições da presa, auxiliando o algoritmo GWO a ter um comportamento mais aleatório no processo de otimização e assim evitar ótimos locais.

O pseudo código do algoritmo de otimização dos lobos cinzentos, o GWO, é demonstrado a seguir (Algoritmo 2).

### 2.3.9 ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO POR BALEIAS

As baleias são um dos maiores mamíferos do mundo, uma vez que em sua vida adulta podem possuir até 30 metros de comprimento e apesar aproximadamente 180 toneladas. Elas também são grandes predadoras e extremamente inteligentes (MIRJALILI; LEWIS, 2016).

O algoritmo de otimização por Baleias (WOA) é uma técnica de otimização bio-inspirada baseada no comportamento de caça das baleias jubarte, com o intuito

---

**Algoritmo 2: Pseudo-código do GWO**


---

```

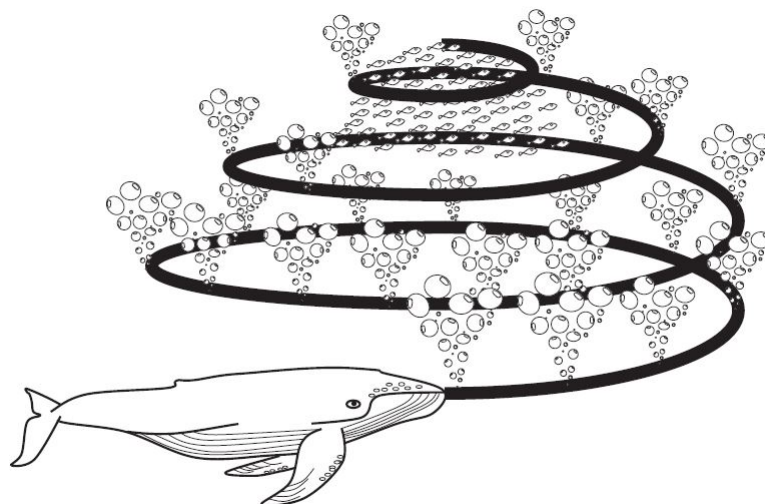
1  início
2      Definir a dimensões do problema;
3      Definir os limites inferiores e superiores;
4      Definir o número de agentes de busca e número máximo de iterações;
5      Gerar uma população inicial de  $n$  lobos cinzentos;
6       $X_\alpha$  = o melhor agente de busca;
7       $X_\beta$  = o segundo melhor agente de busca;
8       $X_\delta$  = o terceiro melhor agente de busca;
9      Inicializar as posições a, A e C;
10  repete
11      repete
12          | Atualiza a posição do agente de busca;
13      para todos os agente de busca;
14          Atualiza as posições a, A e C;
15          Calcula a aptidão de todos os agentes de busca;
16          Atualiza  $X_\alpha$ ,  $X_\beta$  e  $X_\delta$ ;
17      verifica o critério de parada
18          | Se o critério de parada foi atingido sai do loop;
19          | Se o critério de parada não foi atingido fica no loop;
20      fim
21  até número máximo de iterações seja atingido;
22  Apresentar os valores encontrados por  $X_\alpha$ ;
23  fim

```

Fonte: Adaptado de (MIRJALILI; MIRJALILI; LEWIS, 2014)

de representar a conduta das baleias em busca de seu alimento. A inteligência deste algoritmo de otimização é fundamentada na utilização de populações para a solução de problemas (FILHO, 2018). Em suma, a estratégia de caça das baleias é extremamente interessante, elas procuram suas presas de forma aleatória, normalmente cardumes ou pequenos peixes que ficam próximos à superfície. Quando encontram suas presas o seu ataque baseia-se em gerar bolhas enquanto se direcionam a mesma em formato de 9, como ilustra a Figura 2.18.

O WOA utiliza a mesma lógica dos algoritmos de otimização evolutivos baseados em populações. Deste modo, ao iniciar, o WOA produz uma população inicial de soluções candidatas aleatórias, conjunto de baleias, a quantidade desta variável é limitada pelo usuário que desfruta desta técnica de otimização. Ao decorrer das iterações o WOA atualiza as suas respectivas populações. Deste modo, com as suas populações atualizadas de acordo a iteração atual, a melhor hipótese de solução será encontrada dentro da população corrente. O WOA irá repetir o procedimento comentado acima até que algum critério de parada seja atingido.

**Figura 2.18** – Conduta das baleias jubarte durante o ataque da presa.

Fonte: (MIRJALILI; LEWIS, 2016)

### 2.3.9.1 CERCAMENTO DA PRESA

As baleias quando encontram suas presas, observam a sua localização e as cercam para realizar o ataque. No entanto, Mirjalili e Lewis (2016) comenta que no algoritmo WOA a posição da melhor solução é desconhecida, desta forma ele assume que a posição da presa atual é a melhor solução ou esta próximo do ótimo. Logo após ser elegido o melhor agente de busca, os demais agentes iram atualizar as suas posições de acordo com a posição do melhor agente de busca. Para retratar o comportamento comentado acima (MIRJALILI; LEWIS, 2016) apresenta as seguintes equações:

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (2.12)$$

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \cdot \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (2.13)$$

As variáveis  $i$ ,  $X^*$ ,  $\vec{X}$ ,  $\vec{A}$  e  $\vec{C}$ , indicam respectivamente a iteração atual, vetor da melhor posição encontrada até o presente momento, vetor posição e vetores coeficientes. Os vetores  $\vec{A}$  e  $\vec{C}$  são calculados através de:

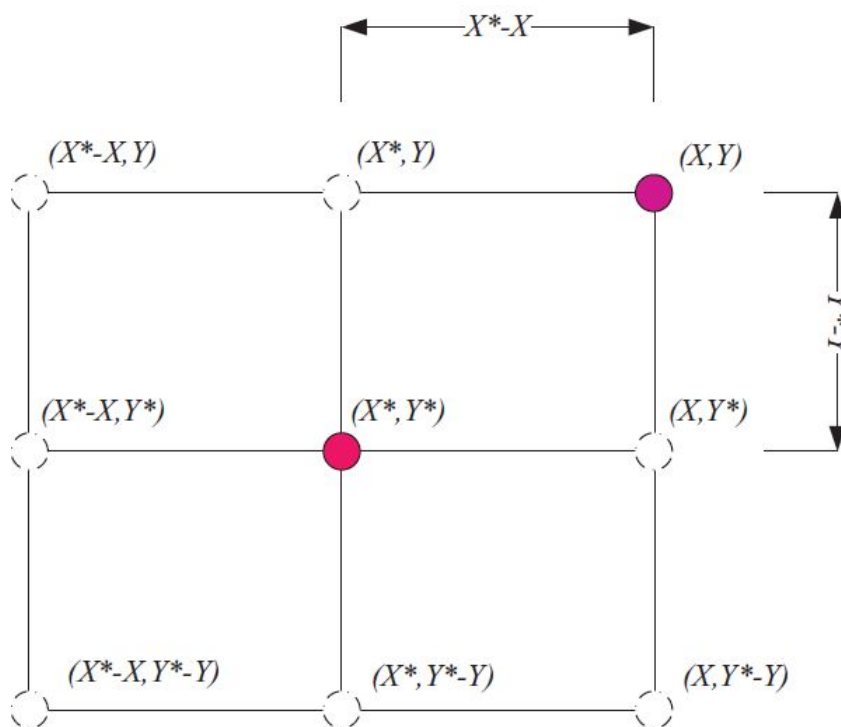
$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (2.14)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (2.15)$$

O parâmetro  $\vec{r}$  é um valor aleatório entre 0 e 1, já  $\vec{a}$  diminuí de 2 a 0. A Figura 2.19 demonstra a lógica de busca da Equação 2.13 para um problema de duas dimensões, onde a posição  $(X, Y)$  dos agentes de busca é atualizada de acordo com a melhor posição atual



**Figura 2.19** – Representação da exploração do espaço de busca seguindo a lógica das baleias.



Fonte: (MIRJALILI; LEWIS, 2016)

$(X^*, Y^*)$ , além disto refinando os vetores  $\vec{A}$  e  $\vec{B}$ , diferentes posições ao redor da melhor solução podem ser encontradas. Por fim, o conceito comentado acima pode ser aplicado para um problema que possua  $n$  dimensões.

### 2.3.9.2 REDE DE BOLHAS (EXPLORAÇÃO DO ESPAÇO DE BUSCA)

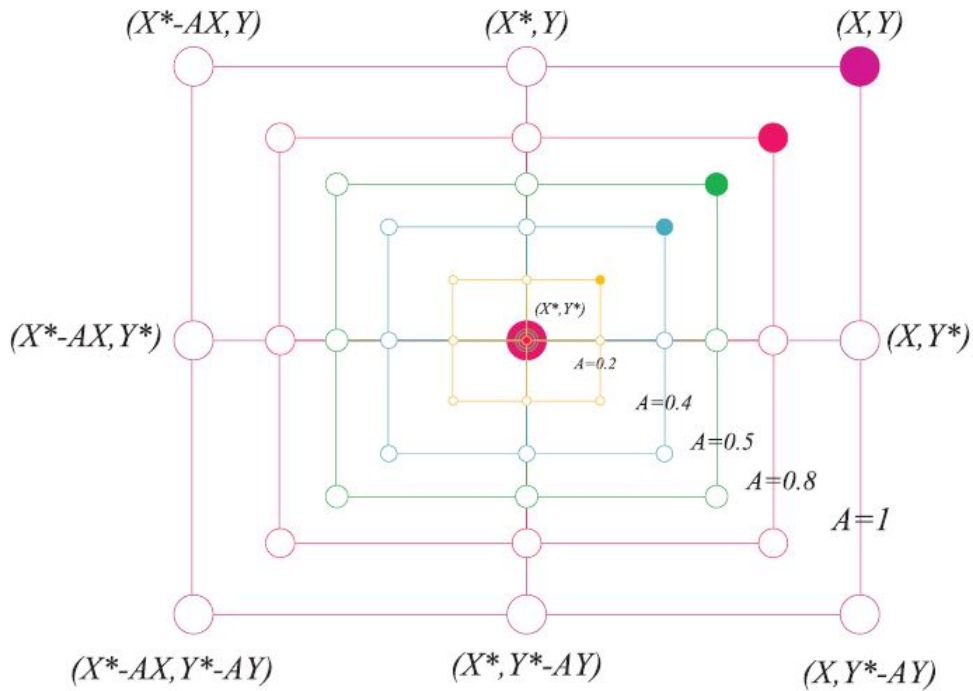
Com o objetivo de facilitar a modelagem matemática do comportamento das baleias durante a busca por alimento, Mirjalili e Lewis (2016) separou dois tópicos para descrever e comentar este procedimento, esses são abordados a seguir.

O primeiro deles é o mecanismo de encolhimento das baleias, esse é obtido quando o valor de  $\vec{a}$  é diminuído na Equação 2.14. Também, pode ser observado que o intervalo do valor de  $\vec{A}$  também é abaixado por  $a$ . Desta forma, os agentes que encontram-se na posição  $(X, Y)$  vão em busca da melhor posição considerada, que na iteração corrente é a  $(X^*, Y^*)$ . A Figura 2.20 demonstra o comportamento citado anteriormente.

O segundo tópico é a espiral de atualização da posição, este processo calcula a distância entre os agentes de busca que estão localizados em  $(X, Y)$  e a presa situada  $(X^*, Y^*)$ . A Equação 2.16 representa matematicamente o movimento em forma de espiral das baleias.

$$\vec{X}(t + 1) = \vec{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi L) + \vec{X}^*(t) \tag{2.16}$$

Figura 2.20 – Mecanismo de encolhimento das baleias.



Fonte: (MIRJALILI; LEWIS, 2016)

A variável  $\vec{D}'$  indica a distância da baleia até a presa,  $b$  é uma constante empregada para fazer com que exista uma definição do formato do comportamento de espiral logarítmica, já  $I$  é um valor aleatório entre -1 e 1.

Deve-se lembrar que segundo Mirjalili e Lewis (2016) as baleias nadam ao redor da presa em círculos que vão diminuindo ao longo de um caminho, esse que é em formato de espiral. Assim sendo, para modelar este comportamento simultâneo das baleias, Mirjalili e Lewis (2016) coloca 50% de chance para a escolha de cada mecanismo de atualização, o encolhimento ou modelo de espiral, o modelo matemático formulado por ele para representar este comportamento é demonstrado a seguir na Equação 2.17.

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \vec{X}^* - \vec{A} \cdot \vec{D} & \text{se } p < 0,5 \\ \vec{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi L) + \vec{X}^*(t) & \text{se } p > 0,5 \end{cases} \quad (2.17)$$

Além dos métodos de busca comentados acima, as baleias buscam também suas presas aleatoriamente, este último será apresentado em uma seção a seguir.

### 2.3.9.3 BUSCA ALEATÓRIA PELA PRESA

As baleias também possuem um comportamento de busca aleatória pela sua presa, esta teoria é fundamentada na variação do vetor  $\vec{A}$ . Em síntese, as baleias buscam

aleatoriamente as suas presas de acordo com as posições uma das outras. Sendo assim, segundo Mirjalili e Lewis (2016) deve ser aplicado valores aleatórios maiores que 1 e menores que -1 à variável  $\vec{A}$ , com objetivo de fazer com que o agente de busca desloque-se para longe da baleia de referência, aumento o nível de exploração. A atualização das posições dos agentes de busca durante o processo de exploração ocorre conforme a escolha aleatória de um agente de busca, isto é contrário a atualização da posição dos agentes por meio da escolha do melhor agente de busca encontrado até o presente momento. Por consequência, com este mecanismo e  $|\vec{A}| > 1$ , a exploração é enfatizada e viabiliza uma busca global executada através do algoritmo WOA. O modelo matemático é exposto a seguir. Onde  $\vec{A}_{rand}$  é uma baleia escolhida aleatoriamente da população.

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_{rand} - \vec{X}| \quad (2.18)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_{rand} - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (2.19)$$

Dessa forma, o algoritmo WOA ao inicializar começa com um conjunto de soluções aleatórias, essas são hipóteses candidatas a melhor solução. No decorrer das iterações, os agentes de busca atualizam suas respectivas posições de acordo com um agente de busca escolhido aleatoriamente ou o melhor agente de busca da iteração atual. A variável  $a$  vai de 2 a 0 para melhorar o processo de exploração do espaço de busca e o aproveitamento do mesmo. Além disso, dependendo do valor de  $|\vec{A}|$  o processo de escolha de um dos agentes de busca para atualizar a posição dos demais pode mudar, caso  $|\vec{A}| > 1$  o agente de busca será escolhido aleatoriamente, porém se  $|\vec{A}| < 1$  o agente de busca é selecionado conforme a melhor solução contida na iteração atual. O algoritmo WOA também é capaz de selecionar o tipo de movimento que irá executar durante o processo de busca, espiral ou circular, isto depende do valor de  $p$ . Por fim, o algoritmo WOA encerra suas iterações quando chega ao seu objetivo ou quando atingir seu limite máximo de iterações, ambas ações são determinadas pelo respectivo programador. O pseudo-código do WOA será apresentado a seguir.

---

**Algoritmo 3: Pseudo-código do WOA**

---

```
1  início
2  | Definir a função objetivo e a dimensão do problema;
3  | Definir os limites inferiores e superiores para o espaço de busca;
4  | Definir o número de iterações e agentes de busca;
5  | Gerar uma população inicial de  $n$  baleias (aleatoriamente);
6  | Calcular a aptidão da população em relação a função objetivo;
7  | Determinar a melhor solução;
8  | repete
9  |   atualiza para cada baleia os parâmetros  $a$ ,  $A$ ,  $C$ ,  $L$  e  $p$ 
10 |     se  $p < 0,5$  faça
11 |       se  $A < 1$  faça
12 |         | Atualiza a posição da baleia de acordo com a Equação 2.13;
13 |       fim
14 |       se  $A > 1$  faça
15 |         | Atualiza a posição das baleias de acordo com a Equação 2.19;
16 |       fim
17 |       se  $p > 0,5$  faça
18 |         | Atualiza a posição das baleias de acordo com a Equação 2.16;
19 |       fim
20 |     fim
21 |   fim
22 |   Calcular a aptidão de cada agente de pesquisa;
23 |   Atualizar a melhor solução;
24 | até o critério de parada ser atingido ou chegar ao número máximo de iterações
25 | Apresenta a melhor solução;
26 fim
```

Fonte: Adaptada de (MIRJALILI; LEWIS, 2016)

### 3 METODOLOGIA

O principal propósito deste trabalho é a proposição de métodos de obtenção de modelo caixa cinza para um enrolamento de transformador de potência. Com o modelo detalhado e em conjunto com softwares de simulações elétricas (ATP e LTspice) é possível obter tensões e correntes dos nós e ramificações que ficam presentes no interior do dispositivo. Na elaboração do trabalho atual, o software Matlab foi amplamente utilizado, dado que, diferentes procedimentos de cálculo foram implementados através de algoritmos de otimização e uma interface com o LTspice foi utilizada para aquisição da resposta em frequência do modelo. As simulações realizadas para a aquisição dos resultados do modelo caixa cinza, utilizando os softwares citados anteriormente, foram realizadas em um notebook com processador de 2GHz e memória instalada (RAM) de 4GB. O modelo caixa cinza desenvolvido é válido para frequência acima 10kHz, onde a influência do núcleo magnético pode ser desconsiderada (RAHIMPOUR et al., 2003). O estudo de caso é realizado com base no enrolamento do transformador de potência que foi utilizado em (AGHMASHEH; RASHTCHI; RAHIMPOUR, 2017), devido a pandemia não tivemos acesso ao laboratório para realizar a fabricação de um enrolamento. Deste modo, esta escolha fez com que o trabalho se concentrasse no desenvolvimento do método de modelagem para o enrolamento.

Um fator que influencia na precisão do modelo caixa cinza é a estimativa correta dos parâmetros que irão formá-lo. Para a estimativa destes parâmetros pode-se aplicar diversas técnicas de otimização como: técnica dos mínimos quadrados, correlação e algoritmos de otimização inteligente. A definição da quantidade de circuitos/células que iram constituir o modelo caixa cinza também é um fator de grande impacto na exatidão da modelagem.

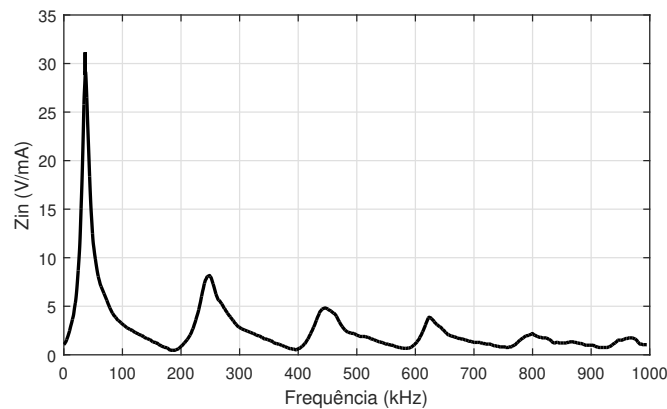
Uma proposta para estipular um número aproximado de circuitos que fará parte do modelo caixa cinza é apresentada por Shabestary (SHABESTARY et al., 2014), partindo do número de picos de ressonância presente na resposta em frequência do enrolamento. Para a obtenção dos valores dos parâmetros do enrolamento, (BROZIO; VERMEULEN, 2003) expõe uma sugestão de como minimizar uma função objetivo utilizando a programação quadrática. Outra lógica é proposta por (AGUGLIA; VIAROUGE; MARTINS, 2013), aplicando o método da máxima verossimilhança.

Neste trabalho a estimativa do número de circuitos que compõem a modelagem caixa cinza é feita através de (SHABESTARY et al., 2014) e o valor dos parâmetros R-L-C são encontrados por meio dos algoritmos de otimização que foram empregados, são eles: Algoritmo de Otimização dos Lobos Cinzentos (GWO), Cuckoo Search (CS) e Algoritmo de Otimização das Baleias (WOA). As subseções seguintes apresentam comentários sobre o enrolamento empregado, esqueleto da função objetivo utilizada e detalhamento sobre os procedimentos realizados.

### 3.1 ESTUDO DE CASO

A resposta em frequência de (AGHMASHEH; RASHTCHI; RAHIMPOUR, 2017) foi utilizada como referência para o desenvolvimento do presente trabalho. Esta resposta foi obtida através de um enrolamento composto por discos duplos, com um total de 44 discos e 7 espiras por disco. A Figura 3.1 ilustra a resposta em frequência do enrolamento de transformador de potência. Para representar o potencial que existe em relação ao núcleo magnético, um cilindro de alumínio foi alocado no interior deste enrolamento. Em (AGHMASHEH; RASHTCHI; RAHIMPOUR, 2017) estão informações mais detalhadas a respeito da geometria do enrolamento utilizado.

**Figura 3.1** – Resposta em frequência do enrolamento de transformador de potência.



Fonte: (AGHMASHEH; RASHTCHI; RAHIMPOUR, 2017)

### 3.2 FUNÇÃO OBJETIVO

Esta seção é dedicada a comentar sobre a função objetivo utilizada e o impacto que ela possui na modelagem proposta. A função objetivo desempenha um papel relevante na definição do valor final dos parâmetros do modelo e no algoritmo de otimização ela possui uma influência direta na convergência. Deste modo, ela possui um grande peso para a qualidade da modelagem proposta. Em 3.1 é apresentada a estrutura da função objetivo utilizada neste trabalho, ela é composta por dois termos, o primeiro indica o erro quadrado entre os dados experimentais e simulados. A segunda parte faz a correlação entre os dados medidos e os dados obtidos via simulação. As variáveis  $TF_{exp}(f_i)$  e  $TF_{sim}(f_i)$  presentes na função objetivo, são os valores de função de transferência medida e função de transferência simulada, respectivamente. O parâmetro  $K$  refere-se a quantidade de pontos presentes na função de transferência. O índice  $i$ , assinala a posição no vetor da função de transferência medida ou função de transferência simulada, a qual está ligada a uma frequência e amplitude. O  $\beta$  é o coeficiente de peso que a correlação irá possuir dentro da função de

transferência, este varia de 0 a 1. Os artigos (RAHIMPOUR; RASHTCHI; SHAHROUZI, 2012) e (RASHTCHI; RAHIMPOUR; SHAHROUZI, 2012) possuem informações mais aprofundadas sobre a função objetivo empregada neste trabalho.

$$F.O = \sum_{i=1}^K \left( \frac{TF_{exp}(f_i) - TF_{sim}(f_i)}{TF_{exp}(f_i)} \right)^2 + \beta \left( \frac{\sum_{i=1}^K (TF_{exp}^*(f_i) TF_{sim}^*(f_i))}{\sqrt{\sum_{i=1}^K (TF_{exp}^*(f_i))^2 (TF_{sim}^*(f_i))^2}} + 1 \right)^{-1}$$

$$TF^*(f_i) = |TF(f_i)| - \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K |TF(f_i)| \quad (3.1)$$

### 3.3 FUNCIONAMENTO DO ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO

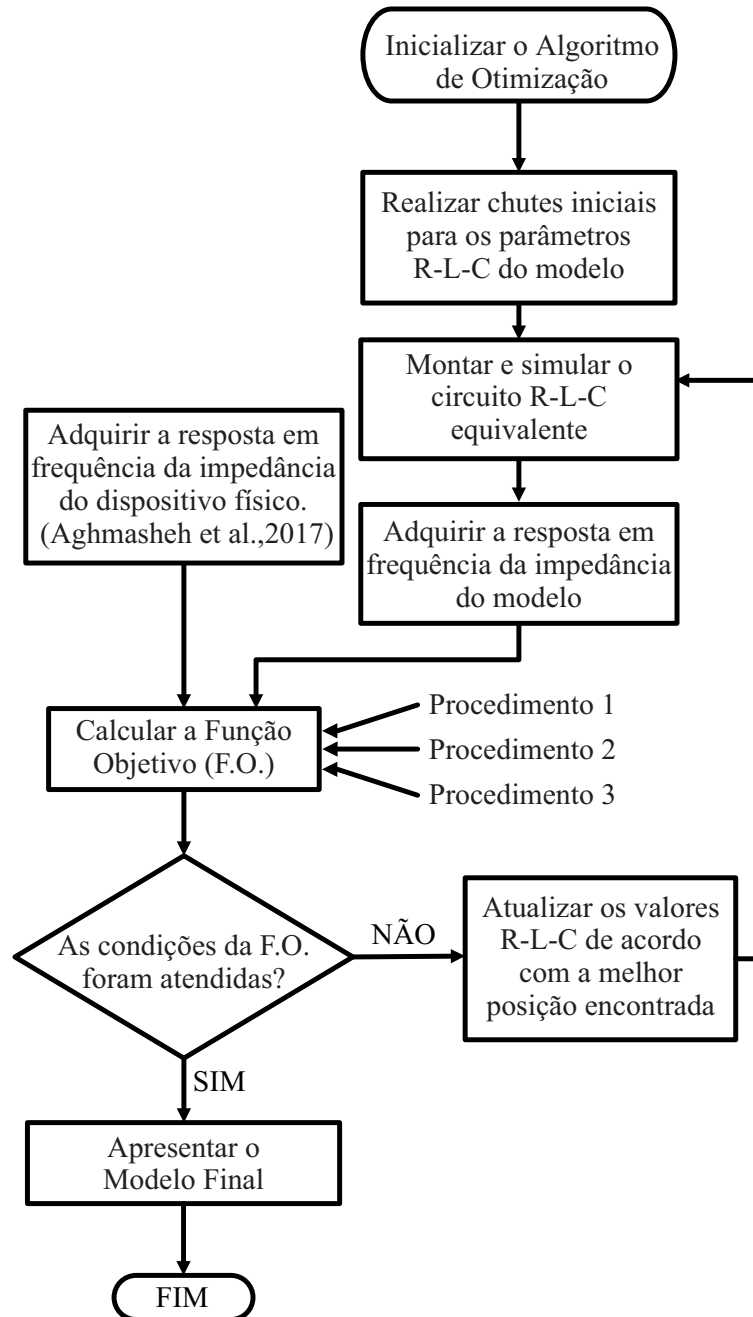
Os algoritmos de otimização utilizados no desenvolvimento da presente modelagem caixa cinza operam conforme o fluxograma da Figura 3.2. Inicialmente, o algoritmo parte de uma estimativa inicial dos parâmetros R-L-C que irão compor o circuito equivalente da modelagem, logo após, acontece a aquisição da resposta em frequência da impedância do modelo, em seguida ocorre o cálculo da função objetivo, onde três diferentes procedimentos de cálculo da função objetivo foram propostos, com o intuito de melhorar o rastreamento do melhor valor global. Por fim, ocorre a verificação se as condições da função objetivo é atendida, se sim ele apresenta o modelo final da modelagem caixa cinza, caso não atenda, atualiza os valores R-L-C e segue buscando a melhor solução.

### 3.4 PROCEDIMENTOS REALIZADOS PARA O DESENVOLVIMENTO DA MODELAGEM CAIXA CINZA

A modelagem caixa cinza proposta por este trabalho deve descrever corretamente o comportamento de um enrolamento do transformador de potência, deste modo os algoritmos de otimização são os responsáveis por estimar precisamente o valor das variáveis R-L-C que integram o circuito da modelagem. Salienta-se que neste trabalho a variação da resistência série em função da frequência não foi aplicada, provocando assim um aumento na diferença entre as amplitudes dos picos de ressonância do modelo caixa cinza final e as amplitudes dos picos de ressonância medidos.

Os parâmetros do modelo caixa cinza devem ser definidos de modo que a resposta de entrada e saída do enrolamento do transformador de potência seja satisfeita, além disto eles devem descrever adequadamente o comportamento interno do enrolamento. Um parâmetro importante a ser modelado devido a sua complexidade é o acoplamento magnético das espiras. O seu valor inversamente proporcional a distância entre os discos do enrolamento. Desta forma, algumas restrições são impostas aos elementos indutivos durante a sua modelagem, em (3.2) está descrito essas restrições.

Figura 3.2 – Fluxograma do funcionamento do algoritmo de otimização.



Fonte: Própria autoria.



$$L_{1,1} = L_{2,2} = \dots = L_{i,i} > 0$$

$$L_{1,2} = L_{2,3} = \dots = L_{i-1,i} > 0$$

$$L_{1,3} = L_{2,4} = \dots = L_{i-2,i} > 0$$

$$L_{1,i-1} = L_{2,i} > 0$$

$$L_{1,1} > L_{1,2} = \dots = L_{1,i-1} > L_{1,i} > 0 \quad (3.2)$$

Para facilitar a implementação do acoplamento magnético e reduzir o número de variáveis desconhecidas, o trabalho atual optou por representá-lo através de uma função exponencial, (3.3), onde  $A$  é o coeficiente a ser estimado e  $N$  o número do disco do enrolamento.

$$K_{1,N} = A.e^{0,1 \cdot (-N)} \quad (3.3)$$

O total de circuitos que irão compor a modelagem caixa cinza é uma das variáveis a ser determinada pelo projetista. Neste trabalho, como já mencionado, segue-se a proposta de (SHABESTARY et al., 2014) que apresenta uma metodologia de como estimar o número de circuitos da modelagem caixa cinza a partir da análise da quantidade de picos de ressonância presente na função de transferência medida. Uma desvantagem desta metodologia é que ela não considera a configuração dos discos. Portanto, como foi constatado a presença de 6 picos de ressonância na função de transferência medida, a estimativa foi de 11 circuitos para a modelagem proposta. Todavia, o projeto do enrolamento era de discos duplos, tendo o total de 22 segmentos físicos. Para ajudar o algoritmo de otimização inteligente na busca do valor das capacitâncias, indutâncias e resistências, são estipulados alguns intervalos, demonstrados a seguir:

$$K_{min} < K < K_{max} \quad (3.4)$$

$$C_{emin} < C_e < C_{emax} \quad (3.5)$$

$$R_{smin} < R_s < R_{smax} \quad (3.6)$$

$$\tan(\delta)_{min} < \tan(\delta) < \tan(\delta)_{max} \quad (3.7)$$

As técnicas de otimização necessitam de chutes iniciais para instaurar o processo de busca, esses chutes iniciais devem ser relativamente próximos aos valores a serem obtidos, caso o valor desta variável seja demasiadamente distante, a convergência do algoritmo de otimização será afetada. (RAHIMPOUR; RASHTCHI; SHAHROUZI, 2012) e (RASHTCHI; RAHIMPOUR; SHAHROUZI, 2012), apresentam estudos que demonstram o valor da capacitância série, capacitância paralelo, indutância própria e indutância mútua são da ordem de nF, mH e  $\mu\text{H}$ , respectivamente. O valor da resistência série está em torno de algumas dezenas de ohms como é constatado em (RAHIMPOUR et al., 2003) e (NADERI et al., 2004). O valor do fator de perda dielétrica do isolamento é cerca de 0,001. Por consequência, o valor inicial adotado para a capacitância série, capacitância paralela, indutância própria e indutância mútua são, respectivamente:  $10^{-12}$ ,  $10^{-12}$ ,  $10^{-4}$  e  $10^{-5}$ .

A formulação de uma boa proposta de função objetivo, aprimora o processo de busca da melhor posição com o algoritmo de otimização dos lobos cinzentos. Sendo assim, três diferentes procedimentos de cálculo da função objetivo foram elaborados. Os métodos desenvolvidos para melhorar a modelagem caixa cinza são descritos a seguir.

### 3.4.1 PROCEDIMENTO 1

O procedimento 1 realiza o cálculo do valor final da função objetivo aplicando somente os valores de frequência dos pontos de ressonância, ou seja, apenas os valores de frequência de ressonância medida e simulada são envolvidas no cálculo da função objetivo. No final, a expressão do procedimento 1 fica igual a explicitada em (3.8), onde  $K$  é o número de picos de ressonância, o índice  $i$  aponta a posição no vetor das frequências de ressonância medida e simuladas,  $Freq_{exp}$  e  $Freq_{sim}$  são nesta ordem, valores de frequência dos pontos de ressonância medido e valores de frequência dos pontos de ressonância simulado.

$$F.O = \sum_{i=1}^K \left( \frac{Freq_{exp}(i) - Freq_{sim}(i)}{Freq_{exp}(i)} \right)^2 + \beta \left( \frac{\sum_{i=1}^K (Freq_{exp}^*(i) Freq_{sim}^*(i))}{\sqrt{\sum_{i=1}^K (Freq_{exp}^*(i))^2 (Freq_{sim}^*(i))^2}} + 1 \right)^{-1}$$

$$Freq^*(i) = |Freq(i)| - \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K |Freq(i)| \quad (3.8)$$

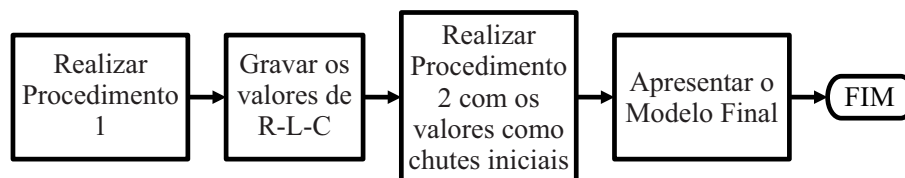
### 3.4.2 PROCEDIMENTO 2

Neste procedimento o cálculo da função objetivo é efetuado utilizando todos os pontos de amplitude da função de transferência, esses pontos estão localizados ao longo do eixo  $Y$ . Sendo assim, para obter o valor da função objetivo, utiliza-se durante o cálculo, todos os pontos da função de transferência, medida e simulada, resultando na Equação (3.1) com uma alteração do valor do parâmetro  $k$ , devido a quantidade de pontos considerados.

### 3.4.3 PROCEDIMENTO 3

O procedimento 3 é resultado da associação dos procedimentos 1 e 2. Ao iniciar, o procedimento 3 utilizará a função objetivo do procedimento 1, esta irá rastrear a melhor posição dos pontos de ressonância e fornecer os parâmetros aproximados do modelo caixa cinza, após concluir a busca, os valores encontrados são armazenados. O procedimento 2 será iniciado, utilizando os valores resultantes do procedimento 1 como chutes iniciais para o procedimento 2. Por último, depois da busca, será apresentado os parâmetros finais correspondentes ao modelo caixa cinza resultante. Com o intuito de demonstrar o funcionamento do procedimento 3 descrito anteriormente, a Figura 3.3 foi elaborada.

**Figura 3.3** – Fluxograma do funcionamento do procedimento 3.



Fonte: Própria autoria.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos com cada procedimento de cálculo da função objetivo será demonstrado nesta seção. Ademais, para auxiliar na comparação dos resultados, é realizada uma comparação gráfica entre a resposta em frequência dos procedimento e a respostas em frequência medida nos terminais do enrolamento.

Dois métodos de análise são propostos, esses possuem o objetivo de demonstrar a precisão da modelagem caixa cinza desenvolvida e comprovar a sua confiabilidade. O primeiro método refere-se a confiabilidade do valor de frequência apresentado pelos pontos de ressonância da modelagem caixa cinza. A partir do desvio entre a frequência de ressonância medida e a simulada, é feito o estudo que indica o quão eficaz é a modelagem. A equação que foi utilizada no cálculo do desvio de frequência, é mostrada em (4.1), com base nas funções de transferência medida e simulada, foi extraído os valores pertencentes as variáveis  $f_{sim(i)}$  e  $f_{exp(i)}$ , que são respectivamente, a frequência do ponto de ressonância simulado e a frequência do ponto de ressonância experimental. O índice  $i$  assinala o desvio do ponto de ressonância que está sendo calculado atualmente e também as frequência que estão sendo envolvidas.

$$DF_i = \frac{F_{sim(i)} - F_{exp(i)}}{F_{exp(i)}} \times 100 \quad (4.1)$$

O segundo critério aplicado na avaliação da modelagem caixa cinza considera a amplitude dos pontos de ressonância medido e simulado. Deste modo, o grau de precisão da modelagem caixa cinza depende do valor da amplitude dos pontos de ressonância da função de transferência, esses pontos estão localizados ao longo do eixo  $Y$ . Em (4.2) é apresentada a equação utilizada no procedimento de cálculo do desvio de amplitude para cada ponto de ressonância, as variáveis  $A_{sim(i)}$  e  $A_{exp(i)}$ , nesta ordem, são os valores de amplitude dos pontos de ressonância extraído da função de transferência simulada e experimental.

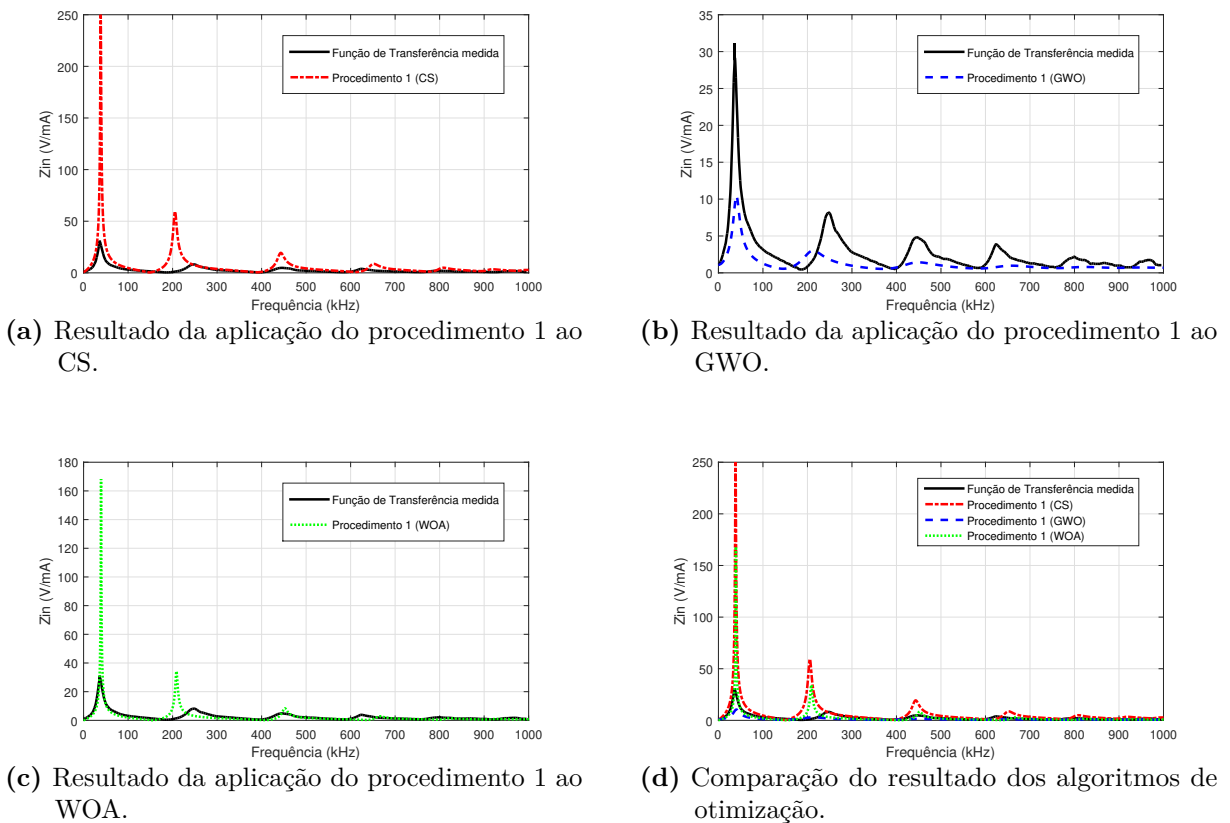
$$DA_i = \frac{A_{sim(i)} - A_{exp(i)}}{A_{exp(i)}} \times 100 \quad (4.2)$$

### 4.1 RESULTADO DOS ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO

Após a implementação dos algoritmos de otimização bio-inspirados à modelagem caixa cinza, alguns procedimentos de busca, com o propósito de obter a melhor solução, foram sugeridos. Por seguinte, executou-se a modelagem caixa cinza resultante, com a finalidade de estimar o circuito equivalente correspondente a um enrolamento de transformador de potência. Então, obteve-se o resultado da combinação entre procedimentos de busca e algoritmos de otimização.

A Figura 4.1 contém as funções de transferência encontradas com o emprego de uma das estratégias de busca sugerida anteriormente, o procedimento 1, esse foi combinado

**Figura 4.1** – Conjunto de gráficos com as funções de transferência resultante de cada algoritmo de otimização aplicando o procedimento 1.



Fonte: Própria autoria.

com alguns métodos de otimização: algoritmo de otimização busca Cuco (CS), algoritmo de Otimização dos Lobos Cinzentos (GWO) e algoritmo de Otimização das Baleias (WOA). Nesta mesma figura, existe a comparação entre as funções de transferência obtidas e a função de transferência medida nos terminais do enrolamento de transformador de potência. Desta forma, na Figura 4.1a temos o resultado encontrado com o emprego do algoritmo de otimização de busca Cuco, na Figura 4.1b com a utilização da lógica dos Lobos Cinzento e na Figura 4.1c com a estratégia das Baleias. Na Figura 4.1d é realizada uma comparação entre as funções de transferência citadas anteriormente. Ademais, a Tabela 1 demonstra os valores de frequência e amplitude dos pontos de ressonância referente a cada algoritmo de otimização utilizado, e na Tabela 2 apresenta-se os valores de desvio de frequência e amplitude.

Por fim, reunindo e analisando as informações contidas na Figura 4.1, Tabela 1 e Tabela 2, chega-se a conclusão que o procedimento 1 é eficaz para obter a localização correta dos pontos de ressonância. Contudo, em relação a amplitude dos pontos de ressonância, o procedimento 1 demonstrou não ser muito efetivo. Porém, mesmo assim é possível estabelecer a modelagem caixa cinza do enrolamento de transformador de potência.

O procedimento 2 foi uma estratégia de busca proposta com foco na localização

**Tabela 1** – Frequência ( $F_i$ ) e Amplitude ( $A_i$ ) dos pontos de ressonância da função de transferência medida e a simulada com diferentes algoritmos de otimização empregando o Procedimento 1.

PROCEDIMENTO 1				
Pontos de Ressonância	Experimental	Algoritmos de Otimização		
		(CS)	(GWO)	(WOA)
$F_1$ (kHz)	36,63	38,45	40,36	39,26
$A_1$ (V/mA)	31,19	249,95	10,45	168,23
$F_2$ (kHz)	250,3	205,58	212,81	208,44
$A_2$ (V/mA)	8,15	59,46	3,01	34,29
$F_3$ (kHz)	445,6	443,60	449,77	451,85
$A_3$ (V/mA)	4,82	19,35	1,42	8,41
$F_4$ (kHz)	622,6	651,62	659,17	665,27
$A_4$ (V/mA)	3,924	8,7	0,97	2,86
$F_5$ (kHz)	799,7	809,09	824,14	822,24
$A_5$ (V/mA)	2,13	4,97	0,8	1,42
$F_6$ (kHz)	970,6	918,33	948,41	928,96
$A_6$ (V/mA)	1,74	3,46	0,72	0,97

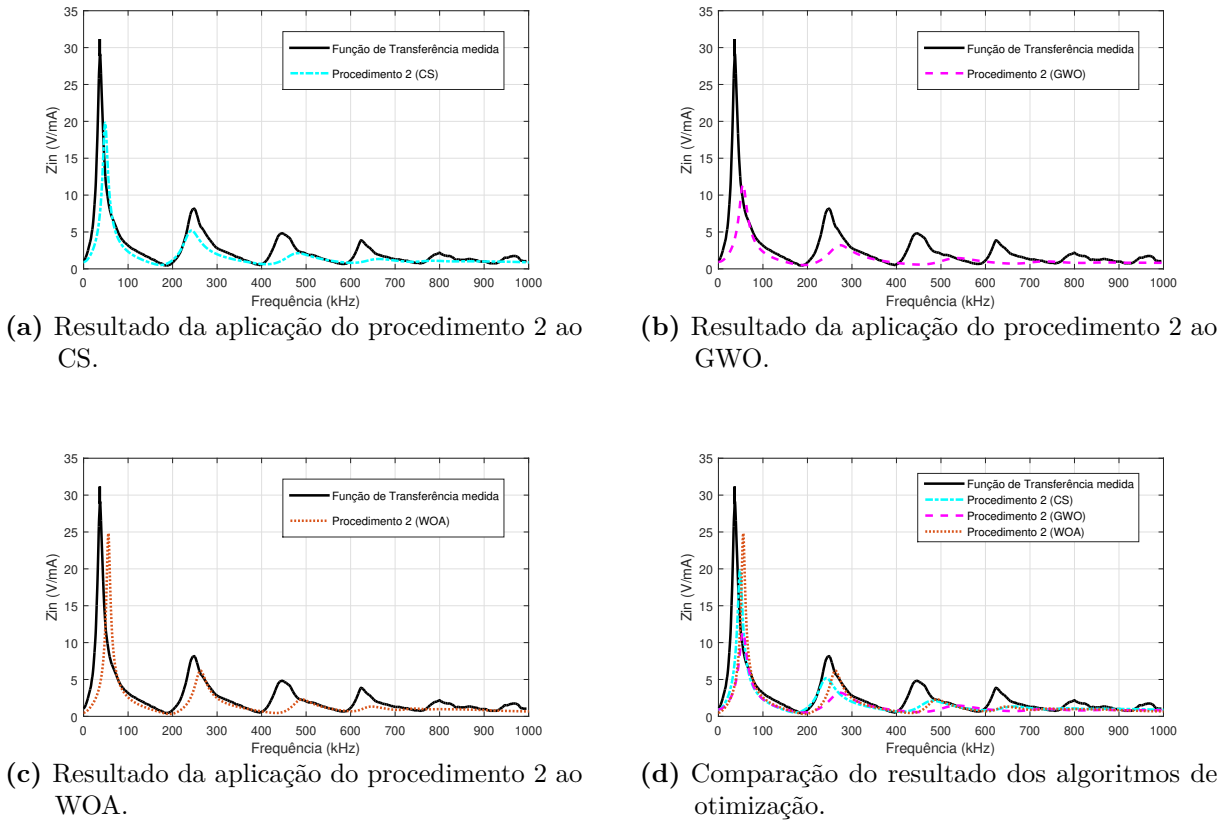
Fonte: Própria autoria.

**Tabela 2** – Desvio percentual de frequência e amplitude apresentado pelos algoritmos de otimização quando utilizado o procedimento 1.

PROCEDIMENTO 1			
$DF_i$ (%) $DA_i$ (%)	Algoritmos de Otimização		
	(CS)	(GWO)	(WOA)
$DF_1$	4,22	9,38	6,40
$DA_1$	758,45	-64,10	477,78
$DF_2$	-19,09	-16,24	-17,96
$DA_2$	637,39	-62,65	325,21
$DF_3$	-0,33	1,05	1,51
$DA_3$	301,80	-70,42	74,76
$DF_4$	4,24	5,45	6,42
$DA_4$	129,03	-74,45	-24,64
$DF_5$	1,12	3	2,76
$DA_5$	128,34	-63,30	-34,71
$DF_6$	-5,33	-2,23	-4,24
$DA_6$	98,62	-58,36	-44,04

Fonte: Própria autoria.

**Figura 4.2** – Conjunto de gráficos com as funções de transferência resultante de cada algoritmo de otimização aplicando o procedimento 2.



Fonte: Própria autoria.

correta da amplitude da função de transferência da modelagem caixa cinza. Os resultados referentes a implementação desse procedimento em conjunto com os algoritmos de otimização, pode ser observado na Figura 4.2, Tabela 3 e Tabela 4. Portanto, ao examinar os resultados coletados sobre o procedimento 2, verificamos que esse é produtivo para minimizar a diferença entre a amplitude da função de transferência obtida via caixa cinza e a medida nos terminais do enrolamento de transformador de potência. No entanto, em relação a localização dos pontos de ressonância, o procedimento 2, não teve um bom desempenho.

No âmbito de reduzir simultaneamente os valores de desvio de frequência e amplitude, avanta-se o procedimento 3, que utiliza partes do procedimento 1 e procedimento 2, concomitantemente. Após realizar simulações do procedimento 3, coletou-se o melhor resultado. As respectivas funções de transferência obtidas, são apresentadas na Figura 4.3, os valores de frequência e amplitude dos pontos de ressonância estão expostos na Tabela 5 e na Tabela 6 estão alocados os valores encontrados de desvio de frequência e amplitude. Realizando uma inspeção na Tabela 6, nota-se que o procedimento 3 teve uma influência considerável na redução dos valores de desvio de frequência e amplitude, caracterizando-se como um método intermediário, satisfazendo parcialmente os dois objetivos isocronica-

**Tabela 3** – Frequência ( $F_i$ ) e Amplitude ( $A_i$ ) dos pontos de ressonância da função de transferência medida e a simulada com diferentes algoritmos de otimização empregando o Procedimento 2.

PROCEDIMENTO 2				
Pontos de Ressonância	Experimental	Algoritmos de Otimização		
		(CS)	(GWO)	(WOA)
$F_1$ (kHz)	36,63	48,52	55,20	55,71
$A_1$ (V/mA)	31,19	19,82	11,46	24,82
$F_2$ (kHz)	250,3	242,66	273,52	263,02
$A_2$ (V/mA)	8,15	5,19	3,2	6,2
$F_3$ (kHz)	445,6	481,94	535,79	490,90
$A_3$ (V/mA)	4,82	2,12	1,46	2,29
$F_4$ (kHz)	622,6	663,74	734,51	647,14
$A_4$ (V/mA)	3,924	1,33	1	1,32
$F_5$ (kHz)	799,7	783,42	866,96	743,01
$A_5$ (V/mA)	2,13	1,09	0,87	1,05
$F_6$ (kHz)	970,6	860,99	948,41	799,83
$A_6$ (V/mA)	1,74	1,02	0,83	0,97

Fonte: Própria autoria.

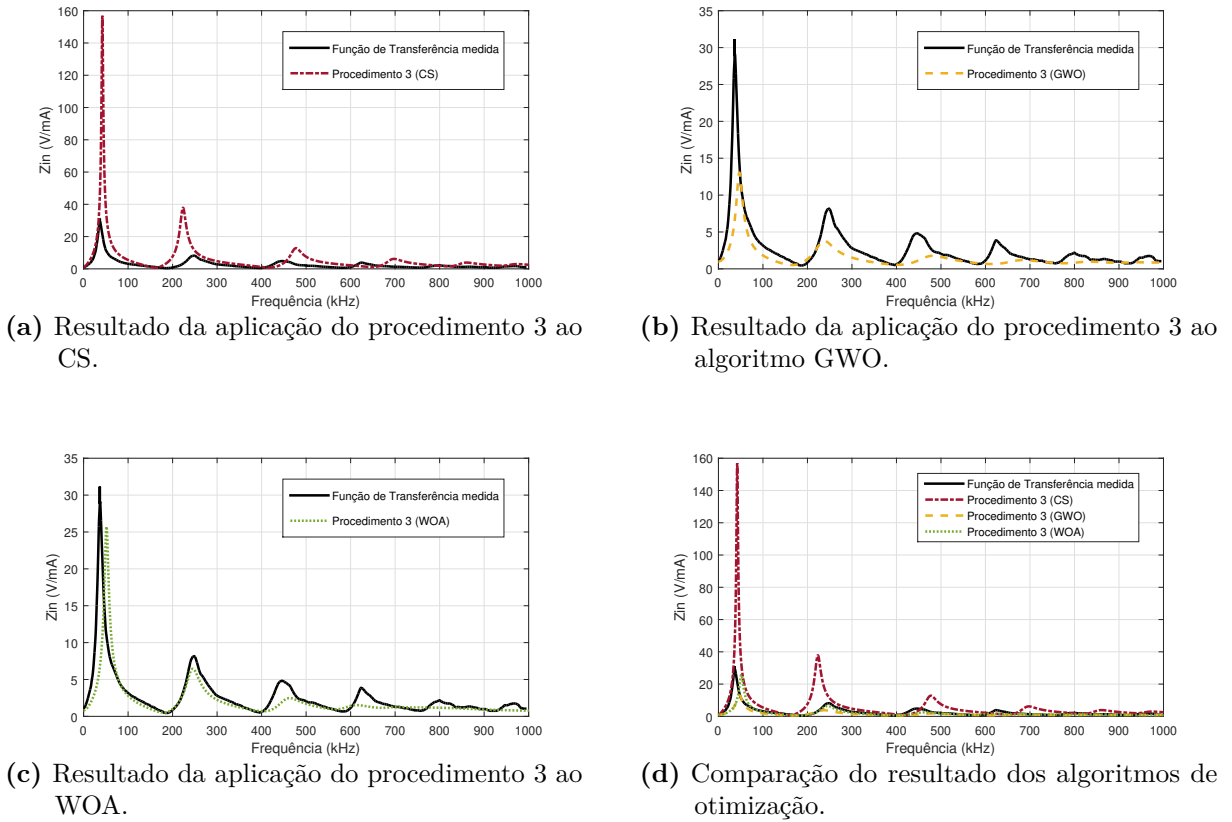
**Tabela 4** – Desvio percentual de frequência e amplitude apresentado pelos algoritmos de otimização quando utilizado o procedimento 2.

PROCEDIMENTO 2			
$DF_i$ (%) $DA_i$ (%)	Algoritmos de Otimização		
	(CS)	(GWO)	(WOA)
$DF_1$	31,51	49,61	50,99
$DA_1$	-31,91	-60,61	-14,73
$DF_2$	-4,5	7,64	3,51
$DA_2$	-35,63	-60,2	-23,10
$DF_3$	8,27	20,37	10,29
$DA_3$	-55,90	-69,59	-52,4
$DF_4$	6,18	17,5	3,52
$DA_4$	-64,84	-73,53	-65,07
$DF_5$	-2,08	8,35	-7,13
$DA_5$	-49,51	-59,99	-51,51
$DF_6$	-11,24	-2,23	-17,55
$DA_6$	-41,12	-52,34	-43,82

Fonte: Própria autoria.



**Figura 4.3** – Conjunto de gráficos com as funções de transferência resultante de cada algoritmo de otimização aplicando o procedimento 3.



Fonte: Própria autoria.

mente.

A Tabela 7 demonstra o valor de função objetivo obtida para cada procedimento combinado com os algoritmos de otimização. Contudo, nota-se que o procedimento 2 demonstrou valores maiores de função objetivo, isso é resultado do número de pontos utilizados no cálculo da função objetivo, uma vez que a quantidade de pontos envolvidos no respectivo cálculo é maior que nos demais procedimentos. Desse modo, também afeta o valor encontrado para a função objetivo do procedimento 3. A Tabela 8 expõe o tempo total gasto, em segundos, para a realização das iterações.

Na Tabela 9 constam os valores de resistência série ( $R_s(\Omega)$ ), capacitância paralelo ( $C_e(PF)$ ), capacitância série ( $K(PF)$ ) e fator de perda do dielétrico ( $\tan(\delta) \times 10^{-3}$ ), esses foram obtidos por meio da combinação entre procedimentos sugeridos e os algoritmos de otimização aplicados no trabalho. Desta forma, observando a Tabela 9 verifica-se que os métodos de cálculo da função objetivo combinados com algoritmos de otimização conseguem aproximar a modelagem caixa cinza dos valores de referência, caracterizando-se como uma boa aproximação.

**Tabela 5** – Frequência ( $F_i$ ) e Amplitude ( $A_i$ ) dos pontos de ressonância da função de transferência medida e a simulada com diferentes algoritmos de otimização empregando o Procedimento 3.

PROCEDIMENTO 3				
Pontos de Ressonância	Experimental	Algoritmos de Otimização		
		(CS)	(GWO)	(WOA)
$F_1$ (kHz)	36,63	42,16	46,98	51,52
$A_1$ (V/mA)	31,19	156,9	13,06	25,73
$F_2$ (kHz)	250,3	223,35	238,23	245,47
$A_2$ (V/mA)	8,15	37,91	3,78	6,44
$F_3$ (kHz)	445,6	477,52	481,94	463,44
$A_3$ (V/mA)	4,82	12,81	1,77	2,47
$F_4$ (kHz)	622,6	698,23	683,91	613,76
$A_4$ (V/mA)	3,924	6,16	1,19	1,52
$F_5$ (kHz)	799,7	860,99	833,68	704,69
$A_5$ (V/mA)	2,13	3,88	0,97	1,27
$F_6$ (kHz)	970,6	974,98	941,88	756,83
$A_6$ (V/mA)	1,74	2,97	0,89	1,2

Fonte: Própria autoria.

**Tabela 6** – Desvio percentual de frequência e amplitude apresentado pelos algoritmos de otimização quando utilizado o procedimento 3.

PROCEDIMENTO 3			
$DF_i$ (%) $DA_i$ (%)	Algoritmos de Otimização		
	(CS)	(GWO)	(WOA)
$DF_1$	14,28	27,34	39,62
$DA_1$	438,86	-55,14	-11,62
$DF_2$	-12,09	-6,24	-3,39
$DA_2$	370,20	-53,03	-20,03
$DF_3$	7,28	8,27	4,12
$DA_3$	166,10	-63,14	-48,56
$DF_4$	11,69	9,4	-1,81
$DA_4$	62,15	-68,67	-59,86
$DF_5$	7,61	4,19	-11,92
$DA_5$	78,37	-55,23	-41,45
$DF_6$	0,5	-2,9	-22,16
$DA_6$	70,46	-48,91	-30,74

Fonte: Própria autoria.

**Tabela 7** – Valor da função objetivo para os procedimentos combinados com os algoritmos de otimização.

VALOR DA FUNÇÃO OBJETIVO			
Procedimentos de Cálculo da Função Objetivo	Algoritmos de Otimização		
	(CS)	(GWO)	(WOA)
Procedimento 1	0,2879	0,2848	0,2894
Procedimento 2	37,8398	59,4276	56,3858
Procedimento 3	1407,02	49,2460	38,8631

Fonte: Própria autoria.

**Tabela 8** – Tempo total de simulação das iterações com os respectivos procedimentos e algoritmos de otimização.

TEMPO TOTAL DE SIMULAÇÃO			
Procedimentos de Cálculo da Função Objetivo	Algoritmos de Otimização		
	(CS)	(GWO)	(WOA)
Procedimento 1 (s)	1769,93	14241,84	147,69
Procedimento 2 (s)	2695,61	131,22	57,07
Procedimento 3 (s)	1905,79	14347,36	235,9

Fonte: Própria autoria.

**Tabela 9** – Valor dos parâmetros do modelo caixa cinza.

Procedimento da modelagem Caixa Cinza	Algoritmos de Otimização	Parâmetros			
		$R_s(\Omega)$	$C_e(PF)$	$K(PF)$	$\tan(\delta) \times 10^{-3}$
Referência		35,2	77,5	192,8	0,217
Procedimento 1	(CS)	68,98	63,20	42,34	0,23
	(GWO)	100	250	78,05	0,242
	(WOA)	15,73	156,71	206,65	0,124
Procedimento 2	(CS)	83,89	161,34	148,85	0,284
	(GWO)	70,01	171,80	120,47	0,1
	(WOA)	45,35	168,15	241,62	0,12
Procedimento 3	(CS)	101,08	60,15	40,81	0,21
	(GWO)	90,34	200	93,67	0,1
	(WOA)	73,20	141,04	198,99	0,1

Fonte: Própria autoria.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresenta uma opção de modelagem caixa cinza de um enrolamento de transformador de potência empregando três diferentes algoritmos de otimização. Os algoritmos de otimização efetuam o cálculo do valor dos componentes RLC do modelo caixa cinza tendo como base a resposta em frequência experimental do dispositivo magnético. Um fator que influencia consideravelmente na localização dos pontos de ressonância é os valores de indutância mútua. Sendo assim, no presente trabalho foi sugerido uma função exponencial afim de caracterizar corretamente o comportamento da indutância mútua e reduzir o número de parâmetros desconhecidos para o algoritmo de otimização. Além disso, outro fator ponderoso é a variação da resistência série com a frequência, que foi desconsiderado na implementação da modelagem, impactando assim na magnitude dos picos de ressonância, tornando os seus valores maiores. Ademais, três procedimentos de cálculo para a função objetivo foram propostos, esses apresentaram compatibilidade com os algoritmos de otimização, atingindo assim os objetivos aos quais foram designados. Também, a resposta em frequência do modelo caixa cinza foi comparada com a resposta em frequência experimental.

Por fim, o algoritmo por busca de Cuco (CS) combinado com o procedimento 1, apresentou os menores valores de desvio de frequência, ou seja, a localização dos pontos de ressonância assemelham-se muito a dos originais. Contudo, os valores de desvio de amplitude mostraram-se elevado. Em contrapartida, o algoritmo de otimização por Baleias (WOA) mesclado com o procedimento 3, obteve os menores valores de desvio de amplitude, dessa forma, aproximando-se o máximo da amplitude original. Ainda, o seu valor de desvio de frequência é consideravelmente baixo, caracterizando o algoritmo de otimização por Baleias (WOA) como o melhor para estabelecer uma modelagem caixa cinza aceitável em conjunto com os procedimentos de cálculo de função objetivo propostos.

### 5.1 CONTINUIDADE DOS ESTUDOS

Nesta seção são apresentadas as possíveis continuações do presente trabalho, aperfeiçoando algumas características. Em suma os pontos a serem trabalhados são:

- Fazer com que resistência série varie com a frequência.
- Aplicar outros algoritmos de otimização e verificar seus desempenhos.
- Expandir a modelagem para um transformador trifásico.
- Sugerir novos métodos de cálculo da função objetivo.
- Utilizar a modelagem caixa cinza desenvolvida para obter os dados geométricos do enrolamento de transformador de potência.
- Apresentar outra estimativa para o comportamento da indutância mútua.

## REFERÊNCIAS

- AGHMASHEH, R.; RASHTCHI, V.; RAHIMPOUR, E. Gray box modeling of power transformer windings for transient studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 32, n. 5, p. 2350–2359, Oct 2017. 28, 30, 44, 45
- AGHMASHEH, R.; RASHTCHI, V.; RAHIMPOUR, E. Gray box modeling of power transformer windings based on design geometry and particle swarm optimization algorithm. *IEEE*, v. 33, n. 5, p. 2384–2393, 2018. 19, 30
- AGUGLIA, D.; VIAROUGE, P.; MARTINS, C. d. A. Frequency-domain maximum-likelihood estimation of high-voltage pulse transformer model parameters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 49, n. 6, p. 2552–2561, 2013. 44
- AHMAD, A. et al. Power transformer transient modeling considering the effects of on-load tap changer. In: *2017 4th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 766–770. 15
- ARROYO, J. E. C. *Heurísticas e metaheurísticas para otimização combinatória multiobjetivo*. 232 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002. 31
- BARTHELEMY, P.; BERTOLOTI, J.; WIERSMA, D. S. A lévy flight for light. *Nature*, v. 453, n. 7194, p. 495–498, May 2008. ISSN 1476-4687. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/nature06948>>. 32
- BROWN, C.; LIEBOVITCH, L.; GLENDON, R. Lévy flights in dove ju/'hoansi foraging patterns. *Human Ecology*, v. 35, p. 129–138, 02 2007. 32
- BROZIO, C. C.; VERMEULEN, H. J. Wideband equivalent circuit modelling and parameter estimation methodology for two-winding transformers. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, v. 150, n. 4, p. 487–492, 2003. 44
- CHAGAS, N. B. *DA CAPACITÂNCIA DE ELEMENTOS MAGNÉTICOS PARA ELEVADAS FREQUÊNCIAS E CLASSES DE ISOLAÇÃO*. 150 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018. 27
- CHAPMAN, S. J. *Fundamentos de Máquinas Elétricas*. [S.l.]: The McGraw-Hill Companies, 2013. 18
- FILHO, O. G. M. *Projeto de sistemas de engenharia usando o Whale Optimization Algorithm*. 94 p. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2018. 31, 38
- FILIPOVIC-GRCIC, D.; FILIPOVIC-GRCIC, B.; UGLESIC, I. High-frequency model of the power transformer based on frequency-response measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 30, n. 1, p. 34–42, Feb 2015. 17
- FITZGERALD, K. *Máquinas Elétricas*. [S.l.]: The McGraw-Hill Companies, 2014. 21
- FOROUHARI, S.; ABU-SIADA, A. Application of adaptive neuro fuzzy inference system to support power transformer life estimation and asset management decision. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 25, n. 3, p. 845–852, 2018. 17

- GHAREHPETIAN, G. B.; MOHSENI, H.; MOLLER, K. Hybrid modelling of inhomogeneous transformer winding for very fast transient overvoltage studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 13, n. 1, p. 157–163, Jan 1998. 29
- GREENWOOD, A. *Electrial Transients in Power Systems*. United States: John Wiley Sons, Inc, 1991. ISBN 0-471-62058-0. 16
- GUSTAVSEN, B. A hybrid measurement approach for wideband characterization and modeling of power transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 25, n. 3, p. 1932–1939, July 2010. 19
- GUSTAVSEN, B.; BREDE, A. P.; TANDE, J. O. Multivariate analysis of transformer resonant overvoltages in power stations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 26, n. 4, p. 2563–2572, Oct 2011. 16, 29
- GUSTAVSEN, B.; PORTILLO, A. A black-box approach to interfacing white-box transformer models with electromagnetic transients programs. In: *2014 IEEE PES General Meeting / Conference Exposition*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–5. 29
- GUSTAVSEN, B.; PORTILLO, Interfacing  $k$ -factor based white-box transformer models with electromagnetic transients programs. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 29, n. 6, p. 2534–2542, Dec 2014. 27
- HALLIDAY, R. R. D. *FUNDAMENTO DE FÍSICA*. [S.l.]: Grupo Editorial Nacional, 2012. VOLUME 3. 19, 20
- HAMDANI, M. F. A. et al. Power transformer degradation condition and insulation index estimation based on historical oil dat. In: *2019 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–5. 17
- H.HARLOW, J. *Electric Power Transformer Engineering*. [S.l.]: CRC Press, 2007. 23, 24, 25, 26
- HOSSEINI, S. M. H.; VAKILIAN, M.; GHAREHPETIAN, G. B. Comparison of transformer detailed models for fast and very fast transient studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 23, n. 2, p. 733–741, April 2008. 29
- JOSHI, A. et al. Cuckoo search optimization- a review. *Materials Today: Proceedings*, v. 4, n. 8, p. 7262 – 7269, 2017. ISSN 2214-7853. International Conference on Advancements in Aeromechanical Materials for Manufacturing (ICAAMM-2016): Organized by MLR Institute of Technology, Hyderabad, Telangana, India. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785317313433>>. 32, 33
- KAZEMI, R. et al. Estimation of design parameters of single-phase distribution transformers from terminal measurements. In: *2018 IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–1. 30
- KOSOW, I. L. *Máquinas Elébricas e Transformadores*. [S.l.]: Globo, 1995. 18
- KULKARNI, S. K. S. *Transformer Engineering Design, Technology, and Diagnostics*. [S.l.]: CRC Press, 2013. (Second Edition). 17, 27
- LI, J.; HUANG, S. Improvement of grey model to forecast the transformer faults. v. 36, p. 100–102, 05 2008. 15

- LOPEZ-FERNANDEZ, X. M.; ALVAREZ-MARINO, C. Computation method for transients in power transformers with lossy windings. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 45, n. 3, p. 1863–1866, March 2009. 16, 28
- LUO, Y. et al. Prediction of the gas dissolved in power transformer oil by the grey model. v. 21, p. 65–69, 03 2001. 15
- MCNUTT, W. J.; BLALOCK, T. J.; HINTON, R. A. Response of transformer windings to system transient voltages. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-93, n. 2, p. 457–467, March 1974. 16
- MECH, L. D. Alpha status, dominance, and division of labor in wolf packs. *Canadian Journal of Zoology*, v. 77, n. 8, p. 1196–1203, 1999. Disponível em: <<https://doi.org/10.1139/z99-099>>. 35
- MIRJALILI, S.; LEWIS, A. The whale optimization algorithm. *Advances in Engineering Software*, v. 95, p. 51 – 67, 2016. ISSN 0965-9978. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997816300163>>. 37, 39, 40, 41, 42, 43
- MIRJALILI, S.; MIRJALILI, S. M.; LEWIS, A. Grey wolf optimizer. *Advances in Engineering Software*, v. 69, p. 46 – 61, 2014. ISSN 0965-9978. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997813001853>>. 32, 34, 35, 36, 37, 38
- MITCHELL, S. D.; WELSH, J. S. Modeling power transformers to support the interpretation of frequency-response analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 26, n. 4, p. 2705–2717, Oct 2011. 16
- MITCHELL, S. D.; WELSH, J. S. Initial parameter estimates and constraints to support gray box modeling of power transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 28, n. 4, p. 2411–2418, Oct 2013. 28
- MUKHERJEE, P.; SATISH, L. Construction of equivalent circuit of a single and isolated transformer winding from fra data using the abc algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 27, n. 2, p. 963–970, April 2012. 28
- MULLEROVA, E. et al. Life cycle management of power transformers: results and discussion of case studies. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 22, n. 4, p. 2379–2389, August 2015. 15
- MUNDO DA ELÉTRICA. *Um pouco mais sobre o sistema elétrico de potência (SEP)*. 2014. Disponível em: <<https://www.mundodaeletrica.com.br/um-pouco-mais-sobre-o-sistema-eletrico-de-potencia-sep/>>. Acesso em: 05 nov. 2019. 20
- MURO, C. et al. Wolf-pack (canis lupus) hunting strategies emerge from simple rules in computational simulations. *Behavioural Processes*, v. 88, n. 3, p. 192 – 197, 2011. ISSN 0376-6357. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376635711001884>>. 35
- NADERI, M. S. et al. An accurate method for estimation of series and parallel resistance in detailed model of transformer winding using impulse test results. *Electrical Engineering*, v. 86, p. 255–260, 09 2004. 49

- PAVLYUKEVICH, I. Cooling down lévy flights. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, v. 40, p. 12299, 09 2007. 32
- PAYNE, R. B. *The Cuckoos*. [S.l.]: Oxford University Press Inc., New York, 2005. 32, 34
- POPOV, M. et al. Analysis of very fast transients in layer-type transformer windings. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 22, n. 1, p. 238–247, Jan 2007. ISSN 1937-4208. 17
- RAHIMPOUR, E.; BIGDELI, M. Simplified transient model of transformer based on geometrical dimensions used in power network analysis and fault detection studies. In: *2009 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 375–380. 17
- RAHIMPOUR, E. et al. Transfer function method to diagnose axial displacement and radial deformation of transformer windings. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 18, n. 2, p. 493–505, April 2003. 44, 49
- RAHIMPOUR, E.; RASHTCHI, V.; AGHMASHEH, R. Parameters estimation of transformers gray box model. In: *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 372–375. 17
- RAHIMPOUR, E.; RASHTCHI, V.; SHAHROUZI, H. Applying artificial optimization methods for transformer model reduction of lumped parameter models. *Electric Power Systems Research*, v. 84, p. 100–108, 03 2012. 46, 49
- RASHTCHI, V.; RAHIMPOUR, E.; FOTOOHABADI, H. Parameter identification of transformer detailed model based on chaos optimisation algorithm. *IET Electric Power Applications*, v. 5, n. 2, p. 238–246, Feb 2011. 29, 30
- RASHTCHI, V.; RAHIMPOUR, E.; REZAPOUR, E. Using a genetic algorithm for parameter identification of transformer r-l-c-m model. *Electrical Engineering*, v. 88, p. 417–422, 06 2006. 30
- RASHTCHI, V.; RAHIMPOUR, E.; SHAHROUZI, H. Model reduction of transformer detailed r-c-l-m model using the imperialist competitive algorithm. *IET Electric Power Applications*, v. 6, n. 4, p. 233–242, April 2012. 46, 49
- REYNOLDS, A.; FRYE, M. Free-flight odor tracking in drosophila is consistent with an optimal intermittent scale-free search. *PloS one*, v. 2, p. e354, 02 2007. 32
- RIES, W. *TRANSFORMADORES Fundamentos para o Projeto e Cálculo*. [S.l.]: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2007. 17, 21, 22, 23, 24
- SHABESTARY, M. M. et al. Ladder network parameters determination considering nondominant resonances of the transformer winding. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 29, n. 1, p. 108–117, 2014. 44, 48
- SIMONE, G. A. *Transformadores: teoria e exercícios*. São Paulo: Érica, 2010. ISBN 978-85-7194-560-9. 22
- TORO, V. D. *FUNDAMENTOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS*. [S.l.]: Globo, 1995. 23



TRAN, N. T. et al. Capacitances in a physical distributed circuit of a black-box power transformer for frequency response analysis at medium frequencies. In: *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–4. 27

TRAN, N. T. et al. Inductances in a physical distributed circuit of a black-box power transformer for frequency response analysis at medium frequencies. In: *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–4. 27

WANG, K. Characteristic parameters prediction of power transformer based on discrete gray model. In: *2012 Power Engineering and Automation Conference*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–4. 19

WEG. *Catálogo de transformadores WEG*. 2008–2019. Disponível em: <[http://ecatalog.weg.net/tec\\_cat/tech\\_transformadores.asp](http://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_transformadores.asp)>. Acesso em: 05 nov. 2019. 19

WIKIPÉDIA. *Apagão no Amapá em 2020*. 2020. Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Apagão\\_no\\_Amapá\\_em\\_2020](https://pt.wikipedia.org/wiki/Apagão_no_Amapá_em_2020)>. Acesso em: 13 dez. 2020. 15

WOLPERT, D. H.; MACREARY, W. G. No free lunch theorems for optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 1, n. 1, p. 67–82, 1997. 31

YANG, X.; DEB, S. Cuckoo search via lévy flights. In: *2009 World Congress on Nature Biologically Inspired Computing (NaBIC)*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 210–214. 31, 32, 33, 34