



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

André Felipe Vitorio Sprotte

**CONTRIBUIÇÃO À OTIMIZAÇÃO EVOLUCIONÁRIA MULTI OBJETIVO:
PESQUISA APLICADA A PROJETOS DE TRANSFORMADORES ELÉTRICOS**

Florianópolis
2021

André Felipe Vitorio Sprotte

**CONTRIBUIÇÃO À OTIMIZAÇÃO EVOLUCIONÁRIA MULTI OBJETIVO:
PESQUISA APLICADA A PROJETOS DE TRANSFORMADORES ELÉTRICOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do título de mestre em
Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Jean Viane Leite, Dr.

Coorientador: Prof. Walter Pereira Carpes Junior, Dr.

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Sprotte, André Felipe Vitorio

Contribuição à otimização evolucionária multiobjetivo :
Pesquisa aplicada a projetos de transformadores elétricos / André Felipe Vitorio Sprotte ; orientador, Jean Vianeí Leite, coorientador, Walter Pereira Carpes Junior, 2021.

169 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Algoritmos Genéticos. 3. Otimização Multiobjetivo. 4. Transformadores Elétricos. 5. Razão de Hiperárea. I. Leite, Jean Vianeí. II. Carpes Junior, Walter Pereira. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

André Felipe Vitorio Sprotte

**CONTRIBUIÇÃO À OTIMIZAÇÃO EVOLUCIONÁRIA MULTIOBJETIVO:
PESQUISA APLICADA A PROJETOS DE TRANSFORMADORES ELÉTRICOS**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Jean Viane Leite, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Leandro dos Santos Coelho, Dr.

Universidade Federal do Paraná e

Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Prof. Maurício Valencia Ferreira da Luz, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica.

Prof. Telles Brunelli Lazzarin, Dr.

Coordenador do Programa de Pós-Graduação

Prof. Jean Viane Leite, Dr.

Orientador

Florianópolis, 2021

À minha família, aos meus amigos e àqueles que me querem bem.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus pelo fenômeno da vida e aos meus pais pela criação e suporte desde a infância. Agradeço também aos meus amigos de todas as horas, sejam elas boas ou ruins, nas diversas atividades, regadas a trilhas, jogos de tabuleiro, atividade físicas, confraternizações, proporcionadas em Florianópolis e além. Em especial, agradeço a meu amigo engenheiro eletricitista Marcelo Silva Sousa pelo suporte técnico na parte sobre custo e tarifação de energia elétrica desta dissertação. Nessa linha, também agradeço ao grupo de corrida da Academia Natatorium, em especial aos líderes, Luís e Fábio, pelos bons momentos e incentivos nas atividades físicas no primeiro ano do mestrado, o ano anterior à pandemia.

Um grandioso agradecimento ao meu orientador e amigo, professor Jean Viane Leite, por todo suporte e conselhos oferecidos neste mestrado, conhecimento e experiência compartilhados, pelas conversas produtivas e pelas contribuições a esta dissertação apesar de suas dificuldades pessoais inerentes ao tempo, a suas funções relevantes no ambiente universitário e aos desafios inerentes à pandemia de Covid-19.

Aproveito também para estender minha gratidão aos professores do GRUCAD, não só pelo ensino nas disciplinas da pós-graduação, mas também por tudo que já me haviam ensinado na graduação. Em especial, agradeço ao professor Patrick Kuo-Peng por também contribuir no meu aperfeiçoamento docente ao me aceitar como estagiário da sua turma da tarde de laboratório de *Circuitos Elétricos A* por um semestre e me delegar certo grau de liberdade nas funções avaliativas e receptividade a algumas ideias e metodologias propostas. Aliás, agradeço também a todos os alunos dessa turma, pois, sem eles, não haveria desafio nem desenvolvimento pessoal nenhum. Gostaria também de agradecer a todo o corpo discente do GRUCAD e do LAESP. Aos mestrados e doutorandos veteranos pelos conselhos, conversas, trocas de artigos e materiais de estudo, além dos colegas que entraram no mestrado e no doutorado no mesmo semestre que eu e cursaram a maior parte das disciplinas junto comigo.

Por fim, estendo os meus agradecimentos: aos professores Leandro Coelho e Maurício da Luz pela disposição em integrarem a banca da defesa e pelas valiosas contribuições; ao professor Sérgio Ávila pela excelente escrita de sua tese, referência na qual eu mais consegui aprender sobre algoritmos genéticos; a todo corpo docente do Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica da UFSC pelo ensino forte e de qualidade na graduação; aos secretários Marcelo, Lis, e Wilson, e aos coordenadores, professores Bartolomeu e Telles, do PPGEEL da UFSC pelos seus trabalhos profissionais; à CAPES por todo auxílio financeiro prestado durante estes dois anos de mestrado e ao povo brasileiro por financiar todos esses custos.

“Inteligência é a capacidade de se adaptar a mudanças. A genialidade é antes de tudo a habilidade de aceitar a disciplina”.

(Stephen Hawking)

“Quem pensa conhecer alguma coisa, ainda não conhece como deveria”.

(Paulo de Tarso, 1 Coríntios 8:2)

RESUMO

Algoritmos genéticos de otimização multiobjetivo tem sido utilizados na resolução de problemas do eletromagnetismo, caracterizados pela complexidade matemática e pela dificuldade de diferenciação de funções, quando isto é possível de ser feito. Em vista disso, esta dissertação de mestrado possui como objetivo desenvolver um algoritmo genético de otimização multiobjetivo (AGMULTI), aplicado a projetos de transformadores elétricos. Por meio de duas funções objetivo, AGMULTI pode minimizar simultaneamente, em pares, uma das seguintes grandezas: a massa total, os custos total e de fabricação dos transformadores. Além disso, pode maximizar o rendimento do dispositivo enquanto realiza a minimização de umas das grandezas já citadas. O algoritmo apresenta eficiência, robustez e precisão, o que é reforçado pelos valores elevados da razão de hiperárea das funções de teste, as quais são utilizadas para pôr o algoritmo à prova e compará-lo com técnicas clássicas de otimização multiobjetivo. Por fim, o projeto de um transformador trifásico de 300 kVA é otimizado junto com outros três projetos realizados de maneira tradicional, com potências distintas, o que inclui um dispositivo trifásico de 30 kVA, outro trifásico de 2 kVA e um monofásico de 300 VA. Parte dos resultados é comparada com as simulações realizadas no *software* de modelagem eletromagnética via elementos finitos EFCAD. Os resultados demonstram que o algoritmo é eficiente, robusto e preciso, com soluções bem distribuídas. Também é observado que não há razão para tornar o rendimento uma das funções de custo em otimização multiobjetivo de projetos de transformadores com potência acima de 10 kVA, porque a diferença entre o indivíduo mais eficiente e o menos eficiente da população não excede 1%.

Palavras-chave: Algoritmos Genéticos. Otimização Multiobjetivo. Transformadores Elétricos. Razão de Hiperárea.

ABSTRACT

Multi-objective genetic algorithms have been used to solve electromagnetic problems, which are characterized by their mathematical complexity, and by their difficulty in differentiating functions, while this is possible to be done. Considering that, this master's thesis has as objective developing a multi-objective optimization genetic algorithm (AGMULTI) applied to electric transformers design. By means of two cost functions, AGMULTI can minimize simultaneously, in pairs, the following quantities of the transformers: their total mass, their fabrication and their total costs. Besides, it can maximize the efficiency of the device while it minimizes one of the previous cited quantities. The algorithm presents efficiency, robustness, and precision, which is reinforced by high values of hyperarea ratios obtained in test functions, which are applied to the algorithm to prove those three characteristics, and to compare it to other classic multi-objective optimization techniques. At last, a 300 kVA three-phase transformer design is optimized in addition to other three designs made in the traditional way, with different power levels, which include a 30 kVA three-phase device, a 2 kVA three-phase one and a 300 VA single-phase one. Part of the results is compared with simulations performed in the finite element method electromagnetic modeling software EFCAD. The results demonstrate the algorithm is efficient, robust, and precise, and it has well distributed solutions. Moreover, it is observed there is no reason using the efficiency as a cost function in multi-objective transformers designs with less than 10 kVA of power, since the difference between the most and the least efficient individuals of the entire population does not exceed 1%.

Keywords: Multi-Objective Optimization. Genetic Algorithms. Electric Transformers. Hyperarea Ratio.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Vista frontal de um transformador de núcleo trifásico. É composto por um núcleo com três colunas, uma por fase, e duas travessas além de dois enrolamentos concêntricos, um AT (externo), composto por três bobinas e série, e um BT (interno), sem os terminais.	21
Figura 3.2: Circuito elétrico monofásico equivalente do transformador real com carga Z'_C ligada aos terminais de baixa tensão e fonte de alimentação \dot{V}_{fAT} conectada ao lado de alta tensão. As grandezas do núcleo e do lado BT são referidas ao lado AT.....	27
Figura 3.3: Representação do circuito magnético de um núcleo trifásico, com três colunas e duas travessas, para a obtenção da relutância equivalente entre os nós e e q . A representação faz analogia com a obtenção da impedância equivalente de Thévenin em circuitos elétricos. Por isso, as forças magneto-motrizas são omitidas.....	30
Figura 4.1: Um projeto do transformador de distribuição trifásico de núcleo envolvido. Somente o núcleo envolvido e os enrolamentos concêntricos sem os diafragmas estão representados. O AT, composto por três bobinas em série, é externo ao BT.....	39
Figura 4.2: Cortes do transformador projetado (Figura 4.1): vista superior (abaixo) e lateral (direita).	40
Figura 4.3: Dimensões dos transformadores trifásicos.	41
Figura 4.4: Fronteira de Pareto quando as duas funções objetivo são minimizadas, com três soluções não-dominadas destacadas e uma solução dominada (asterisco verde) que domina outras oito na área hachurada.	47
Figura 4.5: Fronteira de Pareto quando as duas funções objetivo são maximizadas, com três soluções não-dominadas destacadas e uma solução dominada (asterisco verde) que domina outras seis na área hachurada.....	47
Figura 4.6: Fronteira de Pareto quando a função objetivo horizontal é minimizada enquanto a da vertical é maximizada, com três soluções não-dominadas destacadas e uma solução dominada (asterisco verde) que domina outras nove na área hachurada.	48
Figura 4.7: Roleta da população da Tabela 4.1 com as probabilidades de cada indivíduo ser selecionado (esquerda) e uma roleta de jogos de azar (direita).	52
Figura 4.8: Representação gráfica da hiperárea de uma fronteira de Pareto composta por cinco soluções, com referência em $r = (100, 100)$, num espaço dos objetivos \mathbb{R}^2 delimitado pelos pontos $(0, 0)$, $(100, 0)$, $(100, 100)$ e $(0, 100)$	55

Figura 4.9: Dado um espaço dos objetivos \mathbb{R}^2 delimitado pelos pontos (0, 0), (100, 0), (100, 100) e (0, 100), a razão de hiperárea se altera com a escolha do vértice de referência (r) para uma dada fronteira de Pareto composta por cinco soluções. Na esquerda, $r = (100, 100)$ cobre um hipervolume maior, o que resulta em uma razão de hiperárea de 0,5475. Já na direita, $r = (80, 80)$ reduz o hipervolume, o que acarreta também na redução da razão de hiperárea para 0,2275. 56

Figura 5.1: (Esquerda) Funções objetivo em função dos valores do parâmetro x . (Direita) Fronteira de Pareto – Caso com um parâmetro; algoritmo desenvolvido por Ávila. 59

Figura 5.2: (Esquerda) Funções objetivo em função dos valores do parâmetro x . (Direita) Fronteira de Pareto – Caso com um parâmetro; algoritmo *ga_pareto_mp*..... 59

Figura 5.3: (Esquerda) Funções objetivo em função dos valores dos parâmetros x e y . (Direita) Fronteira de Pareto – Caso com dois parâmetros; algoritmo *ga_pareto_mp*. 59

Figura 5.4: (Esquerda) Funções objetivos em função dos valores do parâmetro x . (Direita) Fronteira de Pareto – AGMO de Sérgio Ávila. 60

Figura 5.5: (Esquerda) Funções objetivos em função dos valores do parâmetro x . (Direita) Fronteira de Pareto – Algoritmo *ga_Schaffer*..... 60

Figura 5.6: Fronteira de Pareto de MSP2SO para o primeiro caso. 62

Figura 5.7: Fronteira de Pareto de MSP2SO para o segundo caso..... 62

Figura 5.8: Fronteira de Pareto de MSP2SO para o terceiro caso..... 62

Figura 5.9: Fronteira de Pareto de *ga_ZDT* para o primeiro caso. 62

Figura 5.10: Fronteira de Pareto de *ga_ZDT* para o segundo caso. 62

Figura 5.11: Fronteira de Pareto de *ga_ZDT* para o terceiro caso. 62

Figura 5.12: Soluções não-dominadas encontradas por AGMO de Ávila (esquerda) e *ga_Himmelblau_v3* (direita)..... 64

Figura 5.13: Fronteiras encontradas por *ga_Himmelblau_v3* para cada solução de g 65

Figura 5.14: Fronteira encontrada por AGMO de Ávila (esquerda) e *ga_Himmelblau_v3* (direita)..... 65

Figura 6.1: Curva de Pareto oriunda da minimização da massa e da maximização do rendimento do transformador em cem rodadas. 68

Figura 6.2: Curva de Pareto oriunda da minimização do custo de fabricação e da maximização do rendimento do transformador em cem rodadas. 69

Figura 6.3: Curva de Pareto oriunda da minimização da massa e do custo de fabricação do transformador em cem rodadas.....	69
Figura 6.4: Fluxo máximo no transformador de 300 kVA inicial. $\Phi_M = 0,049$ Wb. .	72
Figura 6.5: Transformador 300 kVA inicial em um dos instantes (caso 80) onde ocorre indução magnética máxima ($B = 1,28T$) na coluna central.	73
Figura 6.6: População na 20ª geração com as curvas de Pareto na 1ª (verde) e 20ª (azul) geração – Transformador trifásico de 300 kVA – $m_T \times \eta$	74
Figura 6.7: As dez soluções e a curva de Pareto na 20ª geração – Transformador trifásico de 300 kVA – $m_T \times \eta$. Destaque para a solução 1, a escolhida.	75
Figura 6.8: População na 20ª geração com as curvas de Pareto na 1ª (verde) e 20ª (azul) geração – Transformador trifásico de 300 kVA – $m_T \times C_{tot}$	76
Figura 6.9: As seis soluções e a curva de Pareto na 20ª geração – Transformador trifásico de 300 kVA – $m_T \times C_{tot}$. Destaque para a solução 5, a escolhida.	77
Figura 6.10: População na 20ª geração com as curvas de Pareto na 1ª (verde) e 20ª (azul) geração – Transformador trifásico de 300 kVA – $m_T \times C_{fab}$	77
Figura 6.11: As nove soluções e a curva de Pareto na 20ª geração – Transformador trifásico de 300 kVA – $m_T \times C_{fab}$. Destaque para a solução 6, a escolhida.	78
Figura 6.12: Fluxo máximo no transformador de 300 kVA (solução nº 6). $\Phi_M = 0,0471$ Wb.	79
Figura 6.13: Distribuição das induções no transformador de 300 kVA (solução nº 6) em um dos instantes (caso 14) onde ocorre indução magnética máxima predominante ($B = 1,12T$) e nas extremidades ($B = 1,47T$) na coluna central.....	79
Figura 6.14: Nova curva de Pareto oriunda da minimização da massa total e da maximização do rendimento do dispositivo.	82
Figura 6.15: População na 20ª geração com as curvas de Pareto na 1ª (verde) e 20ª (azul) geração – Transformador trifásico de 300 kVA – $m_T \times C_{fab}$. 100 indivíduos, 20 gerações.	83
Figura 6.16: População final com as curvas de Pareto na 1ª (verde) e última (azul) geração – Transformador trifásico de 300 kVA – $m_T \times C_{fab}$	84
Figura 6.17: População final com as curvas de Pareto na 1ª (verde) e 10ª (azul) geração – Transformador trifásico de 300 kVA – $m_T \times C_{fab}$. 100 indivíduos e 10 gerações.	84
Figura 6.18: População na 10ª geração com as curvas de Pareto na 1ª (verde) e 10ª (azul) geração – Transformador trifásico de 30 kVA – $m_T \times \eta$	87

Figura 6.19: As seis soluções e a curva de Pareto na 10 ^a geração – Transformador trifásico de 30 kVA – $m_T \times \eta$. Destaque para a solução 4, a escolhida.	87
Figura 6.20: População na 10 ^a geração com as curvas de Pareto na 1 ^a (verde) e 10 ^a (azul) geração – Transformador trifásico de 30 kVA – $m_T \times C_{tot}$	88
Figura 6.21: As quatro soluções e a curva de Pareto na 10 ^a geração – Transformador trifásico de 30 kVA – $m_T \times C_{tot}$. Destaque para a solução 5, a escolhida.	88
Figura 6.22: População na 10 ^a geração com as curvas de Pareto na 1 ^a (verde) e 10 ^a (azul) geração – Transformador trifásico de 30 kVA – $m_T \times C_{fab}$	91
Figura 6.23: As seis soluções e a curva de Pareto na 10 ^a geração – Transformador trifásico de 30 kVA – $m_T \times C_{fab}$. Destaque para a solução 1, a escolhida.	91
Figura 6.24: População na 10 ^a geração com as curvas de Pareto na 1 ^a (verde) e 10 ^a (azul) geração – Transformador trifásico de 2 kVA – $m_T \times \eta$	95
Figura 6.25: As sete soluções e a curva de Pareto na 10 ^a geração – Transformador trifásico de 2 kVA – $m_T \times \eta$. Destaque para a solução 6, a escolhida.	95
Figura 6.26: População na 10 ^a geração com as curvas de Pareto na 1 ^a (verde) e 10 ^a (azul) geração – Transformador trifásico de 2 kVA – $m_T \times \eta$ – Seleção por roleta no rendimento.	96
Figura 6.27: Curva de Pareto na 10 ^a geração após o agrupamento – Transformador trifásico de 2 kVA – $m_T \times \eta$ – Seleção por roleta no rendimento. Destaque para a solução 7, a escolhida.	96
Figura 6.28: População na 10 ^a geração com as curvas de Pareto na 1 ^a (verde) e 10 ^a (azul) geração – Transformador trifásico de 2 kVA – $m_T \times \eta$ – Seleção por roleta na massa.	97
Figura 6.29: Curva de Pareto na 10 ^a geração após o agrupamento – Transformador trifásico de 2 kVA – $m_T \times \eta$ – Seleção por roleta na massa. Destaque para a solução 8, a escolhida.	97
Figura B.7.1: Esquema de diferenciação das expressões: enrolamento, espira, bobina e sistema de bobinas.	113
Figura B.7.2: Corte das seções transversais das colunas de um transformador trifásico com enrolamentos concêntricos sem os diafragmas. Os AT são externos aos BT.	114
Figura B.7.3: Detalhe da ligação série entre as bobinas AT de uma fase.	115
Figura G.7.4: Curva $B-H$ do ferrosilício.	167

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Valores típicos de $P_{EC-R(pu)}$ para transformadores de potência.	33
Tabela 4.1: Esquema de seleção por roleta.	51
Tabela 5.1: Razões de hiperárea dos três problemas ZDT por algoritmo evolutivo multiobjetivo.....	63
Tabela 6.1: Melhor resultado fornecido por AGMONO.....	68
Tabela 6.2: Comparação das soluções para as três situações estudadas, com o rendimento mais próximo do obtido por AGMONO.	70
Tabela 6.3: Comparação dos parâmetros nas soluções de AGMONO e soluções com rendimento mais próximo no AGMULTI para as três situações estudadas.	70
Tabela 6.4: Diferenças absolutas dos parâmetros e do rendimento de AGMONO em relação às soluções mais próximas do AGMULTI para as três situações estudadas.	70
Tabela 6.5: Parâmetros e resultados do projeto inicial do transformador de 300 kVA.	72
Tabela 6.6: Comparativo entre as grandezas calculadas analiticamente e simuladas no EFCAD.	72
Tabela 6.7: Parâmetros e resultados ótimos do projeto do transformador de 300 kVA – Funções objetivo: $m_T \times \eta$. Solução 1.	75
Tabela 6.8: Parâmetros e resultados ótimos do projeto do transformador de 300 kVA – Funções objetivo: $m_T \times C_{tot}$. Solução 5.....	76
Tabela 6.9: Parâmetros e resultados ótimos do projeto do transformador de 300 kVA – Funções objetivo: $m_T \times C_{fab}$. Solução 6.	78
Tabela 6.10: Comparativo entre as grandezas calculadas pelo AGMULTI e as simuladas no EFCAD.	80
Tabela 6.11: Valores dos parâmetros no projeto inicial e nas soluções ótimas escolhidas.	81
Tabela 6.12: Valores das grandezas otimizadas pelo algoritmo genético multiobjetivo. Os com fundo cinza são funções objetivo em dado processo de otimização; em verde, os melhores resultados e, em vermelho, os piores.	81
Tabela 6.13: Parâmetros e resultados do projeto inicial do transformador de 30 kVA.	86

Tabela 6.14: Parâmetros e resultados ótimos do projeto do transformador de 30 kVA	
– Funções objetivo: $m_T \times \eta$. Solução 4.	87
Tabela 6.15: Parâmetros e resultados ótimos do projeto do transformador de 30 kVA	
– Funções objetivo: $m_T \times C_{tot}$. Solução 5.	89
Tabela 6.16: Parâmetros e resultados ótimos do projeto do transformador de 30 kVA	
– Funções objetivo: $m_T \times C_{fab}$. Solução 1	90
Tabela 6.17: Parâmetros e resultados ótimos do projeto do transformador de 30 kVA	
– Funções objetivo: $m_T \times C_{fab}$. Solução 6.	90
Tabela 6.18: Valores dos parâmetros no projeto inicial e nas soluções ótimas escolhidas.	91
Tabela 6.19: Valores das grandezas otimizadas pelo algoritmo genético multiobjetivo. Os com fundo cinza são funções objetivo em dado processo de otimização; em verde, os melhores resultados e, em vermelho, os piores.	92
Tabela 6.20: Parâmetros e resultados do projeto inicial do transformador de 2 kVA.	93
Tabela 6.21: Parâmetros e resultados do projeto ótimo do transformador de 2 kVA. Funções objetivo: $m_T \times \eta$. Solução 6.	94
Tabela 6.22: Parâmetros e resultados do projeto ótimo do transformador de 2 kVA com seleção por roleta no rendimento. Funções objetivo: $m_T \times \eta$. Solução 7.	96
Tabela 6.23: Parâmetros e resultados do projeto ótimo do transformador de 2 kVA com seleção por roleta na massa. Funções objetivo: $m_T \times \eta$. Solução 8.	97
Tabela 6.24: Parâmetros e grandezas obtidos nas soluções das otimizações multiobjetivos da massa e do rendimento do transformador de 2kVA com três critérios diferentes de seleção de indivíduos: por amostragem determinística no centro e torneio nas extremidades da fronteira de Pareto (usual), por roleta na função objetivo rendimento e por roleta na massa.	98
Tabela A.7.1: Tipos de transformadores de acordo com a aplicação.	112
Tabela C.7.2: Fator K em correspondência à carga do circuito elétrico.	118
Tabela A.7.3: Parâmetros das 16 soluções quando os objetivos são m_T e η	125
Tabela A.7.4: Objetivos m_T e η e outras grandezas das 16 soluções.	126
Tabela A.7.5: Parâmetros das 8 soluções quando os objetivos são C_{fab} e η	126
Tabela A.7.6: Objetivos C_{fab} e η e outras grandezas das 8 soluções.	127
Tabela A.7.7: Parâmetros das 16 soluções quando os objetivos são m_T e C_{fab}	127

Tabela A.7.8: Objetivos m_T e C_{fab} e outras grandezas das 16 soluções.	128
Tabela B.7.9: Parâmetros, N_{AT} e N_{BT} das 10 soluções quando os objetivos são m_T e η	129
Tabela B.7.10: Objetivos m_T e η e outras grandezas das 10 soluções.	129
Tabela B.7.11: Parâmetros, N_{AT} e N_{BT} das 6 soluções quando os objetivos são m_T e C_{tot}	130
Tabela B.7.12: Objetivos m_T e C_{tot} e outras grandezas das 6 soluções.	130
Tabela B.7.13: Parâmetros, N_{AT} e N_{BT} das 10 soluções quando os objetivos são m_T e C_{fab}	131
Tabela B.7.14: Objetivos m_T e C_{fab} e outras grandezas das 10 soluções.	131
Tabela C.7.15: Parâmetros, N_{AT} e N_{BT} das 9 soluções quando os objetivos são m_T e η	132
Tabela C.7.16: Objetivos m_T e η e outras grandezas das 9 soluções.	132
Tabela C.7.17: Parâmetros, N_{AT} e N_{BT} das 5 soluções quando os objetivos são m_T e C_{tot}	133
Tabela C.7.18: Objetivos m_T e C_{tot} e outras grandezas das 5 soluções.	133
Tabela C.7.19: Parâmetros, N_{AT} e N_{BT} das 6 soluções quando os objetivos são m_T e C_{fab}	133
Tabela C.7.20: Objetivos m_T e C_{fab} e outras grandezas das 6 soluções.	134
Tabela D.7.21: Parâmetros, N_{AT} e N_{BT} das 10 soluções por seleção usual.	135
Tabela D.7.22: Objetivos m_T e η e outras grandezas das 10 soluções por seleção usual.	135
Tabela D.7.23: Parâmetros, N_{AT} e N_{BT} das 11 soluções por seleção por roleta no η	136
Tabela D.7.24: Objetivos m_T e η e outras grandezas das 11 soluções por seleção por roleta no η	136
Tabela D.7.25: Parâmetros, N_{AT} e N_{BT} das 10 soluções por seleção por roleta na m_T	137
Tabela D.7.26: Objetivos m_T e η e outras grandezas das 10 soluções por seleção por roleta na m_T	137
Tabela G.7.27: Pontos da curva $B-H$ do ferrosilício.	168

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AE – Algoritmo Evolutivo ou Evolucionário

AG – Algoritmo Genético

AGMO – Algoritmo Genético Multiobjetivo de Sérgio Luciano Ávila

AGMONO – Algoritmo Genético Mono-Objetivo do GRUCAD

AGMULTI – Algoritmo Genético Multiobjetivo Genérico

ANSI – Instituto Nacional Americano de Padrões (do inglês, *American National Standards Institute*)

AT – Alta Tensão

AWG – Escala Americana Normalizada (do inglês, *American Wire Gauge*)

BFGS – Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno

BLDC – Corrente Contínua Sem Escovas (do inglês, *Brushless Direct Current*)

BR – Brasil

BT – Baixa Tensão

CA – Corrente Alternada

CADES – *Computer Aided Design and Evaluation System*

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CA-CA – De Corrente Alternada para Corrente Alternada

CA-CC – De Corrente Alternada para Corrente Contínua

CC – Corrente Contínua

CC-CA – De Corrente Contínua para Corrente Alternada

CC-CC – De Corrente Contínua para Corrente Contínua

CELESC – Centrais Elétricas de Santa Catarina

CLP – Controlador Lógico Programável

CTC – Centro Tecnológico

DFT – Teoria do Funcional da Densidade (do inglês, *Density Functional Theory*)

DOA – Grau de Aproximação (do inglês, *Degree of Approximation*)

dom – Indivíduo Dominado

DNA ou ADN – Ácido Desoxirribonucleico (DNA: do inglês, *Deoxyribonucleic Acid*)

EFCAD – *Electromagnetic Fields Computer Aided Design*

FEMM – *Finite Element Method Magnetics*

FeSi – Ferrossilício/Ferro sílico

FIESC – Federação das Indústrias do Estado de Santa Catarina

GD – Distância Geracional (do inglês, *Generational Distance*)

GRUCAD – Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos

HR – Razão de Hiperárea (do inglês, *Hyperarea Ratio*)

HV – Hipervolume

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IEC – Comissão Eletrotécnica Internacional (do inglês, *International Electrotechnical Commission*)

IEEE – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

IGD – Distância Geracional Invertida (do inglês, *Inverted Generational Distance*)

INEP – Instituto de Eletrônica de Potência

LEEI – Laboratório de Eletrotécnica e Eletrônica Industrial ENSEEIHT (do francês, *Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle ENSEEIHT*)

log HV – Hipervolume Logarítmico (do inglês, *Logarithmic Hypervolume*)

MATLAB – *Matrix Laboratory*

MEF – Método dos Elementos Finitos

MOEA/D – Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo Baseado em Decomposição (do inglês, *Multi-Objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition*)

MOGA – Algoritmo Genético Multiobjetivo (um específico, do inglês, *Multiobjective Genetic Algorithm*)

MSP2SO – Otimização Multiobjetivo por Enxame de Partículas baseada na Força de Pareto (do inglês, *Multiobjective Strength Pareto Particle Swarm Optimization*)

NBR – Norma Técnica Brasileira

ndom – Indivíduo Não-Dominado

NPGA – Algoritmo Genético Baseado em Pareto Dominante (do inglês, *Niched Pareto Genetic Algorithm*)

NSGA – Algoritmo Genético Baseado em Ordenação Não-dominada (do inglês, *Nondominated Sorting Genetic Algorithm*)

ONVG – *Overall Nondominated Vector Generation*

ONVGR – *Overall Nondominated Vector Generation Ratio*

PCH – Pequena Central Hidrelétrica

PhD – Doutor da Filosofia (do latim, *Philosophiae Doctor*)

PIB – Produto Interno Bruto

PlatEMO – Plataforma para Otimização Evolutiva Multiobjetivo (do inglês, *Platform for Evolutionary Multi-Objective Optimization*)

Pop – Tamanho da População

PPGEEL – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

prob – Probabilidade

PROMETHEE – *Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations*

PSO – Otimização por Enxame de Partículas (do inglês, *Particle Swarm Optimization*)

pu – Por Unidade

RAM – Memória de Acesso Aleatório (do inglês, *Random Access Memory*)

RBF – Funções de Base Radial (do inglês, *Radial Basis Functions*)

RNA – Redes Neurais Artificiais

RSM – Modelo de Superfície de Resposta (do inglês, *Response Surface Model*)

SC – Santa Catarina

SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas

SEP – Sistema Elétrico de Potência

SF₆ – Hexafluoreto de Enxofre

SP – Espaçamento (do inglês, *Spacing*)

SPEA – Algoritmo Evolutivo Baseado na Força de Pareto (do inglês, *Strong Pareto Evolutionary Algorithm*)

SQP – Programação Quadrática Sequencial (do inglês, *Sequential Quadratic Programming*)

SR1 – *Symmetric Rank-One*

TC – Transformador de Corrente

TES – Transformador de Estado Sólido

THD – Taxa de Distorção Harmônica Total (do inglês, *Total Harmonic Distortion*)

TP – Transformador de Potencial

TOPSIS – *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

UPS – Fonte de Alimentação Ininterrupta (do inglês, *Uninterruptible Power Supply*)

UTI – Unidade de Terapia Intensiva

VEGA – Algoritmo Genético baseado em Vetor de Avaliação (do inglês, *Vector Evaluated Genetic Algorithm*)

LISTA DE SÍMBOLOS

Legenda:

Símbolo¹ – Significado [Unidade(s) utilizada(s) no trabalho]²

A	– Área [mm ²]
A_{AT}	– Área da Seção Transversal de Cobre do Enrolamento de Alta Tensão [mm ²]
A_{BT}	– Área da Seção Transversal de Cobre do Enrolamento de Baixa Tensão [mm ²]
A_{Cu}	– Área da Seção Transversal de Cobre [mm ²]
A_g	– Área Geométrica do Núcleo [mm ²]
A_m	– Área Magnética do Núcleo [mm ²]
a	– Constante para Transformadores Isolados a Óleo [A.esp/cm]
\vec{B}	– Indução Magnética ou Fluxo de Densidade Magnética [T]
B	– Módulo da Indução Magnética [T]
B_M	– Módulo da Indução Magnética Máxima no Núcleo do Transformador [T]
B_0	– Módulo da Indução Magnética Padronizada na Caracterização da Chapa [T]
b_{HV}	– Base do Retângulo da Hiperárea
b_m	– Susceptância Magnetizante ou de Magnetização [μ S]
b_n	– Comprimento da Maior Lâmina da Coluna Quase-Circular do Transformador [mm]
b_w	– Largura da Janela do Transformador [mm]
C	– Constante de Dimensionamento de Núcleos Trifásicos com Enrolamentos Circulares
C_{fab}	– Custo de Fabricação do Transformador [US\$]
C_{fix}	– Custo Fixo [US\$]
C_{kWh}	– Preço da Energia Elétrica [US\$/kWh]
C_{PCu}	– Custo com as Perdas no Cobre [US\$]
C_{PFe}	– Custo com as Perdas no Ferro [US\$]
C_{tot}	– Custo Total sobre a Vida Útil do Transformador ou Custo de Capitalização [US\$]
Cot_{Cu}	– Cotação do Cobre [US\$/kg]
Cot_{Fe}	– Cotação do Ferro [US\$/kg]
Cu_s	– Custo do Cobre [US\$]
c	– Comprimento da Coluna Retangular do Transformador [mm]

¹ Para constantes físicas, o símbolo precede o valor atribuído à constante e à unidade utilizada. O significado é fornecido no final.

² Para grandezas adimensionais, a unidade é suprimida.

c_s – Fator de Segurança
 D_C – Diâmetro da Coluna Idealmente Circular do Transformador [mm]
 dom – Indivíduo Dominado
 e_{ATex} – Comprimento entre o Enrolamento de Alta Tensão e Obstáculo Externo [mm]
 $e_{ATexmin}$ – Comprimento Mínimo entre o Enrolamento AT e Obstáculo Externo [mm]
 e_{BTAT} – Comprimento entre os Enrolamentos de Baixa e Alta Tensões [mm]
 e_{cBT} – Comprimento Mínimo entre a Coluna do Núcleo e o Enrolamento BT [mm]
 F – Função de Aptidão
 Fe_s – Custo do Ferro [US\$]
 f – Frequência da Rede [Hz]
 $f_1(x)$ – Função objetivo número 1 – do eixo das abcissas
 $f_2(x)$ – Função objetivo número 2 – do eixo das ordenadas
 f_c – Fator de Correção
 f_{Cu} – Fator de Preenchimento do Cobre
 g_c – Condutância das Perdas no Núcleo [μS]
 \vec{H} – Campo Magnético [A/m]
 H – Módulo do Campo Magnético [A/m]
 h – Ordem da harmônica;
 h_{AT} – Altura do Enrolamento de Alta Tensão [mm]
 h_{BT} – Altura do Enrolamento de Baixa Tensão [mm]
 h_{Fe} – Altura de Ferro [mm]
 h_{HV} – Altura do Retângulo da Hiperárea
 hw – Altura da Janela do Transformador [mm]
 I – Corrente Elétrica Eficaz [A]
 I_1 – Corrente Elétrica Eficaz do Enrolamento Primário do Transformador [A]
 I_2 – Corrente Elétrica Eficaz do Enrolamento Secundário do Transformador [A]
 I_{AT} – Corrente Elétrica Eficaz de Linha Enrolamento de Alta Tensão [A]
 I_{BT} – Corrente Elétrica Eficaz de Linha Enrolamento de Baixa Tensão [A]
 $I_{h(pu)}$ – Componente Harmônica de Corrente Eficaz em Relação à Fundamental [pu]
 I_L – Corrente Elétrica Eficaz de Linha [A]
 I_R – Corrente Eficaz Sinusoidal Nominal na Carga [A]
 $I_{max(pu)}$ – Corrente Total Máxima Admissível no Secundário [pu]
 \dot{I}_{AT} – Fator Corrente Elétrica do Enrolamento de Alta Tensão [A]

\dot{I}_{BT} – Fator Corrente Elétrica do Enrolamento de Baixa Tensão [A]
 \dot{I}_c – Fator Corrente Elétrica de Perdas no Núcleo [A]
 \dot{I}_m – Fator Corrente Elétrica de Magnetização [A]
 \dot{I}_ϕ – Fator Corrente Elétrica de Excitação [A]
i – Taxa de Juros
ind – Indivíduo
J – Módulo da Densidade de Corrente Elétrica [A/mm²]
J₀ – Valor do Módulo da Densidade de Corrente Elétrica dos Transformadores [A/mm²]
J_{AT} – Módulo da Densidade de Corrente Elétrica do Enrolamento de Alta Tensão [A/mm²]
J_{BT} – Módulo da Densidade de Corrente Elétrica do Enrolamento de Baixa Tensão [A/mm²]
j = $\sqrt{-1}$ – Número imaginário
K – Fator K
K_f – Fator de Empilhamento das Lâminas
K_{rup} – Ruptura da Rigidez Dielétrica [kV/m]. 3.100 para o Ar e 15.000 para o Óleo Mineral
k – Fator de Rogowski
k_w – Fator de Preenchimento da Janela
L – Indutância Própria [H]
L_{eq_AT} – Indutância Equivalente Vista do Lado de Alta Tensão [H]
L_m – Indutância Magnetizante ou de Magnetização [H]
l – Comprimento [m, cm ou mm]
l_{AT} – Espessura do Enrolamento de Alta Tensão [mm]
l_{BT} – Espessura do Enrolamento de Baixa Tensão [mm]
l_{ATesp} – Espessura Média de uma Espira do Enrolamento de Alta Tensão [mm]
l_{BTesp} – Espessura Média de uma Espira do Enrolamento de Baixa Tensão [mm]
l_{Cu} – Comprimento Médio das Espiras dos Enrolamentos [m]
l_{CuAT} – Comprimento Total de Cobre Utilizado no Enrolamento de Alta Tensão [m]
l_{CuBT} – Comprimento Total de Cobre Utilizado no Enrolamento de Baixa Tensão [m]
l_{Fe} – Comprimento de Ferro [mm]
m – Número de Parâmetros
m_{Cu} – Massa do Cobre [kg]
m_{CuAT} – Massa de Cobre do Enrolamento de Alta Tensão [kg]
m_{CuBT} – Massa de Cobre do Enrolamento de Baixa Tensão [kg]

m_{Fe} – Massa do Ferro [kg]
 m_T – Massa Total do Dispositivo [kg]
 N – Número de Espiras
 N_1 – Número de Espiras no Enrolamento Primário do Transformador
 N_2 – Número de Espiras no Enrolamento Secundário do Transformador
 N_{AT} – Número de Espiras no Enrolamento Alta Tensão do Transformador
 N_{BT} – Número de Espiras no Enrolamento Baixa Tensão do Transformador
 n – Relação de Transformação do Transformador
 $ndom$ – Indivíduo Não-Dominado
 P – Potência Ativa [W]
 P_{Cu} – Perdas de Condução no Cobre [W]
 P_{EC} – Perdas Nominais por Correntes Parasitas sob Condições Não-Sinusoidais [W]
 P_{EC-R} – Perdas Nominais por Correntes Parasitas no Cobre sob Condições Sinusoidais [W]
 $P_{EC-R(pu)}$ – Perdas Nominais por Correntes Parasitas no Cobre sob Condições Sinusoidais [pu]
 P_{Fe} – Perdas no Ferro ou no Núcleo [W]
 Pop – Tamanho da População
 $prob$ - Probabilidade
 P_{St} – Perdas no Ferro Segundo a Equação de Steimmetz [W]
 p – Profundidade da Coluna Retangular do Transformador [mm]
 pf – Indivíduo da Fronteira de Pareto – Solução Não-Dominada
 R – Resistência Elétrica [Ω]
 R_{eq_AT} – Resistência Elétrica Equivalente vista do Lado de Alta Tensão [Ω]
 r_{AT} – Resistência Elétrica do Enrolamento de Alta Tensão [Ω]
 r_{BT} – Resistência Elétrica do Enrolamento de Baixa Tensão [Ω]
 r'_{BT} – Resistência Elétrica do Enrolamento de Baixa Tensão Referida ao Lado de Alta [Ω]
 \mathfrak{R} – Relutância Magnética [A.esp/Wb]
 \mathfrak{R}_{col} – Relutância Magnética em uma Coluna do Núcleo [A.esp/Wb]
 \mathfrak{R}_{eq} – Relutância Magnética Equivalente [A.esp/Wb]
 \mathfrak{R}_{tra} – Relutância Magnética em uma Secção de Travessa do Núcleo [A.esp/Wb]
 S – Potência Aparente [VA, kVA ou MVA]
 T – Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]
 t – Tempo [s]
 u – Vida Útil do Transformador [ano]

V – Tensão Elétrica, Diferença de Potencial Elétrico – d.d.p – ou Força Eletromotriz Eficaz [V]

V_1 – Tensão Elétrica Eficaz do Enrolamento Primário do Transformador [V]

V_2 – Tensão Elétrica Eficaz do Enrolamento Secundário do Transformador [V]

V_3 – Tensão Elétrica Eficaz do Enrolamento Terciário do Transformador [V]

V_{AT} – Tensão Elétrica Eficaz do Enrolamento de Alta Tensão [V]

V_{BT} – Tensão Elétrica Eficaz do Enrolamento de Baixa Tensão [V]

V_{fAT} – Tensão Elétrica Eficaz de Fase do Enrolamento de Alta Tensão [V]

V_{fBT} – Tensão Elétrica Eficaz de Fase do Enrolamento de Baixa Tensão [V]

\dot{V}_{fAT} – Fator Tensão Elétrica Eficaz de Fase do Enrolamento de Alta Tensão [V]

\dot{V}_{fBT} – Fator Tensão Elétrica Eficaz de Fase do Enrolamento de Baixa Tensão [V]

\dot{V}'_{fBT} – Fator Tensão Elétrica Eficaz de Fase do Lado BT Referido ao Lado AT [V]

V_L – Tensão Elétrica Eficaz de Linha [V]

V_{LAT} – Tensão Elétrica Eficaz de Linha do Enrolamento de Alta Tensão [V]

V_{LBT} – Tensão Elétrica Eficaz de Linha do Enrolamento de Baixa Tensão [V]

\dot{V}_{fR1} – Fator Tensão Elétrica de Fase da Fase R do Enrolamento Primário [V]

\dot{V}_{fS1} – Fator Tensão Elétrica de Fase da Fase S do Enrolamento Primário [V]

\dot{V}_{fT1} – Fator Tensão Elétrica de Fase da Fase T do Enrolamento Primário [V]

v – Volume [mm³]

$w_{Cu} = 8920 \text{ kg/m}^3$ – Massa Específica do Cobre

$w_{Fe} = 7650 \text{ kg/m}^3$ – Massa Específica do Ferro

X – Reatância [Ω]

X_{eq_AT} – Reatância Equivalente Vista do Lado de Alta Tensão [Ω]

$X_{kcross...dir}^n$ – Indivíduo Pai com Cruzamento da Esquerda para a Direita

$X_{kcross...dir}^{n+1}$ – Indivíduo Filho com Cruzamento da Esquerda para a Direita

x_{AT} – Reatância do Enrolamento de Alta Tensão [Ω]

x_{BT} – Reatância do Enrolamento de Baixa Tensão [Ω]

x'_{BT} – Reatância do Enrolamento de Baixa Tensão Referida ao Lado de Alta [Ω]

\vec{x} – Vetor de variáveis

Z_C – Impedância da Carga [Ω]

Z_C' – Impedância da Carga Referida ao Lado AT [Ω]

α – Coeficiente de Multiplicação do Cruzamento

α_{pol} – Coeficiente de Multiplicação Polarizado

β, γ, θ – Parâmetros Empíricos de Steinmetz

η – Rendimento

μ – Permeabilidade Magnética [H/m]

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m – Permeabilidade Magnética do Vácuo ou do Ar

μ_r – Permeabilidade Magnética Relativa

$\rho_{Cu} = 0,0216 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ – Resistividade do Cobre Recozido a 75°C

ϕ – Fluxo Magnético [Wb]

ϕ_1 – Fluxo Magnético Devido ao Circuito Elétrico Primário [Wb]

ϕ_2 – Fluxo Magnético Devido ao Circuito Elétrico Secundário [Wb]

ϕ_M – Fluxo Magnético Máximo no Núcleo do Transformador [Wb]

$\dot{\phi}$ – Fasor Fluxo Magnético [Wb]

ω – Frequência Angular da Rede [rad/s]

ω_{Cu} – Perda Específica no Cobre [W/kg]

ω_{Fe} – Perda Específica no Ferro [W/kg]

ω_{0Fe} – Perda Específica no Ferro para o Módulo da Indução Magnética Padronizada [W/kg]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	2
1.2	ROTEIRO DE LEITURA.....	2
2	MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO	4
2.1	CONCEITOS INERENTES	5
2.2	CLASSIFICAÇÕES	6
2.3	APLICAÇÕES EM ELETROMAGNETISMO	8
2.3.1	Pesquisas recentes produzidas pelo GRUCAD	10
2.4	ALGORITMOS EVOLUTIVOS.....	13
2.4.1	Algoritmos Genéticos.....	13
3	ASPECTOS CONSTRUTIVOS EM TRANSFORMADORES	19
3.1	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E CONCEITOS FUNDAMENTAIS	20
3.1.1	Conceitos inerentes aos transformadores de núcleo trifásico.....	20
3.2	ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO NÚCLEO.....	22
3.3	ASPECTOS CONSTRUTIVOS DOS ENROLAMENTOS	23
3.4	POTÊNCIA DISSIPADA E POTÊNCIA REATIVA EM PROJETOS DE TRANSFORMADORES.....	26
3.4.1	As duas principais perdas e a potência reativa	27
3.4.2	Considerações sobre harmônicas e correntes parasitas no cobre	32
3.5	AJUSTES NO EQUACIONAMENTO DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS	34
3.5.1	Alterações devido à geometria.....	34
3.5.2	Alterações devido à redução de fases elétricas.....	35
4	TRANSFORMADORES ANALISADOS E METODOLOGIA DA OTIMIZAÇÃO	36
4.1	ASPECTOS ECONÔMICOS.....	36

4.2	PROJETO E ESCOLHA DOS TRANSFORMADORES.....	38
4.3	O ALGORITMO GENÉTICO DESENVOLVIDO	41
4.3.1	O critério de Pareto	46
4.3.1.1	<i>Minimização simultânea das duas funções objetivo.....</i>	48
4.3.1.2	<i>Maximização simultânea das duas funções objetivo.....</i>	49
4.3.1.3	<i>Minimização da primeira e maximização da segunda função objetivo</i>	49
4.3.1.4	<i>Maximização da primeira e minimização da segunda função objetivo</i>	50
4.3.2	Seleção, cruzamento, mutação e reposição.....	50
4.4	MÉTRICA UTILIZADA.....	53
4.4.1	Hipervolume ou hiperárea e razão de hiperárea	54
4.5	METODOLOGIA DE VALIDAÇÃO.....	57
5	VALIDAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO MULTIOBJETIVO	58
5.1	OS DOIS PRIMEIROS PROBLEMAS E <i>ga_pareto_mp</i>	58
5.2	O PROBLEMA DAS FUNÇÕES DE SCHAFFER NÚMERO 2 – <i>ga_Schaffer</i> .	60
5.3	O PROBLEMA PROPOSTO PELAS FUNÇÕES DE ZITZLER-DEB-THIELE – <i>ga_ZDT</i>	61
5.3.1	Comparação com meta-heurísticas consolidadas	63
5.4	O PROBLEMA DAS FUNÇÕES DE HIMMELBLAU – <i>ga_Himmelblau_v3</i> ...	64
5.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A VALIDAÇÃO DO ALGORITMO	66
6	RESULTADOS DA PESQUISA	67
6.1	O TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE 300 VA.....	67
6.2	O TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 300 kVA.....	71
6.2.1	O projeto inicial	71
6.2.2	Os projetos otimizados	74
6.2.2.1	<i>Massa X Rendimento</i>	74
6.2.2.2	<i>Massa X Custo Total</i>	76
6.2.2.3	<i>Massa X Custo de Fabricação</i>	77

6.2.2.4	<i>Comparativo dos quatro projetos</i>	80
6.2.3	Efeito da população e do número de gerações nos resultados	82
6.3	O TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 30 kVA.....	85
6.3.1	O projeto inicial	85
6.3.2	Os projetos otimizados	85
6.3.2.1	<i>Massa X Rendimento</i>	86
6.3.2.2	<i>Massa X Custo Total</i>	88
6.3.2.3	<i>Massa X Custo de Fabricação</i>	89
6.3.2.4	<i>Comparativo dos quatro projetos</i>	91
6.4	O TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 2 kVA.....	92
6.4.1	O projeto inicial	93
6.4.2	O projeto com a massa e o rendimento otimizados	93
6.4.2.1	<i>Seleção usual</i>	93
6.4.2.2	<i>Seleção por roleta</i>	95
6.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS RESULTADOS	98
7	CONCLUSÃO	100
7.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	101
	REFERÊNCIAS	103
	APÊNDICE A – Classificações de Transformadores	110
I.	Número de fases do circuito elétrico	110
II.	Tipo e formato do núcleo.....	110
III.	Tipo dos enrolamentos.....	111
IV.	Meio isolante	111
V.	Aplicações.....	111
VI.	Finalidade	112
	APÊNDICE B – Técnicas na confecção de enrolamentos de transformadores industriais	113

APÊNDICE C – Harmônicas em Transformadores e <i>K-Rated Transformers</i>	116
APÊNDICE D – Resfriamento de Transformadores	121
APÊNDICE E – Os Limites dos Parâmetros dos Transformadores Trifásicos	123
ANEXO A: Soluções de Pareto de AGMULTI para o Transformador Monofásico	125
ANEXO B: Soluções de Pareto de AGMULTI - Transformador Trifásico de 300 kVA	129
ANEXO C: Soluções de Pareto de AGMULTI - Transformador Trifásico de 30 kVA	132
ANEXO D: Soluções de Pareto de AGMULTI - Transformador Trifásico de 2 kVA	135
ANEXO E: Tabela de Diâmetros e Seções Retas de Fios Padrão AWG	138
ANEXO F: Códigos da Otimização dos Transformadores Trifásicos – 300 kVA	139
ANEXO G: Curva <i>B-H</i> do material ferromagnético do núcleo	167

1 INTRODUÇÃO

Santa Catarina consta entre os cinco estados brasileiros com a maior quantidade de empresas e de funcionários na indústria de transformação (FIESC, 2014). Com o sétimo maior Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil (IBGE, 2020), é a unidade da federação com a segunda maior participação da indústria de transformação no PIB (FIESC, 2014), com 19,0% de toda fatia desempenhada pelo setor secundário, o qual corresponde a 27,1% do PIB estadual (NÚCLEO DE ESTUDOS DE ECONOMIA CATARINENSE, 2018). Portanto, Santa Catarina desempenha um papel relevante para a indústria brasileira.

A indústria de transformação é composta, dentre diversos produtos, por materiais elétricos e eletrônicos, além de máquinas e equipamentos. São nessas categorias que os transformadores estão inseridos. A quantidade de empresas que fabricam esse produto somadas às que produzem geradores e motores elétricos era de setenta e oito em 2010 em todo o território estadual, o que representava 9,8% das companhias da categoria instaladas no território nacional (SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS, 2013). A respeito das indústrias de transformadores, de diferentes potências e aplicações, a maioria situa-se próxima a região litorânea, de norte a sul, do estado, com maior concentração no Nordeste Catarinense e Vale do Itajaí, macrorregião que possui duas multinacionais, voltadas aos ramos de transmissão e distribuição de energia elétrica, instaladas na cidade de Blumenau.

Na confecção de um produto, tal como o transformador, o setor industrial está sempre em busca da redução de custos e na melhora do rendimento (ALVES, 2016), apontadas por (AYALA et al., 2016) como a chave da sobrevivência desse ramo. No entanto, não raras são as situações que o incremento de uma dessas características ocasiona o decremento da outra. Por isso, torna-se necessário realizar um estudo topológico desses dispositivos eletromagnéticos a fim de desenvolver um método de otimização que aponte soluções ótimas a esse impasse. Ademais, as restrições inerentes ao projeto e aos materiais que compõem os transformadores devem ser consideradas durante o processo.

A respeito dos métodos de otimização, que podem ou não possuir restrições e analisarem um objetivo (mono-objetivo) ou mais (multiobjetivo), eles se dividem entre os clássicos (décadas de 1950 a 1980), a exemplo do método do gradiente conjugado, dos multiplicadores de Lagrange e da programação sequencial quadrática (SQP na sigla inglesa), e os modernos, também conhecidos como inteligentes (a partir da década de 1980) (ÁVILA, 2006; BARBOSA, 2012; LEI; ZHU; GUO, 2016; NOCEDAL; WRIGHT, 1999). Sobre esses

últimos, são predominantemente probabilísticos e estocásticos conforme a discussão presente no capítulo 2 desta dissertação.

A fim de contribuir com o desenvolvimento desta pesquisa de mestrado, além do estudo e do desenvolvimento tecnológico de transformadores, é proposto um algoritmo de otimização multiobjetivo para otimizar projetos desses dispositivos eletromagnéticos.

1.1 OBJETIVOS

Esta dissertação de mestrado propõe como objetivo geral:

- Desenvolver, em um *software* de cálculo numérico, um algoritmo de otimização multiobjetivo com a finalidade de encontrar soluções as quais, ao mesmo tempo que diminuam os custos de produção, aumentem o rendimento de um transformador projetado ou que diminuam a massa total e o custo simultaneamente.

Quanto aos objetivos específicos, são propostos:

- Pesquisar e realizar a revisão literária da física e dos projetos de transformadores, com ênfase nos trifásicos de distribuição;
- Pesquisar e realizar a revisão literária da otimização multiobjetivo, sobretudo a aplicada a dispositivos eletromagnéticos, com ênfase em transformadores;
- Realizar uma revisão bibliográfica abrangente sobre o assunto a fim de identificar uma alternativa viável para aplicar ao caso estudado;
- Implementar o método visando a otimização de um transformador monofásico e em três trifásicos projetados com métodos clássicos;
- Comparar os resultados simulados com os obtidos via um *software* de elementos finitos consolidado na academia e no mercado;
- Contribuir com a comunidade científica internacional ao publicar os resultados dessa pesquisa em veículos de extensa divulgação.

1.2 ROTEIRO DE LEITURA

Em vista desses objetivos, esta dissertação de mestrado é organizada em oito capítulos, de tal maneira que o primeiro é esta introdução. No capítulo 2, os métodos de otimização são conceituados além de explorados em aplicações de projetos de dispositivos eletromagnéticos,

alguns dos quais estudados pelo Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos (GRUCAD). Dentre eles, conceitos e métodos multiobjetivos baseados em algoritmos genéticos (AGs) são enfatizados devido ao uso nesta pesquisa.

Em seguida, o capítulo 3 desenvolve os aspectos construtivos dos transformadores monofásicos e trifásicos. Ademais, busca discutir os efeitos das perdas além de fenômenos indutivos na confecção desses dispositivos. Quanto ao capítulo 4, busca abordar os transformadores sob um prisma econômico de produção, referente aos custos considerados na pesquisa, além de sintetizar os dispositivos otimizados bem como suas funções objetivo além de outras metodologias de pesquisa.

No capítulo 5, é relatada a forma como o algoritmo desenvolvido é validado. Similarmente ao quinto, o capítulo 6 aborda os resultados, os quais contemplam análises do algoritmo, submetido a diferentes ajustes nos parâmetros de controle, além de comparações dos conjuntos de soluções, das diferentes técnicas e com o método dos elementos finitos (MEF). Por fim, no sétimo capítulo, escreve-se a conclusão da dissertação, seção em que os resultados são reforçados, os objetivos são ratificados e as considerações finais são elaboradas.

2 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

A otimização é uma ferramenta poderosa para a análise de sistemas físicos e tomada de decisões em ciência, engenharia e economia (NOCEDAL; WRIGHT, 1999). Por meio dela, o ser humano é capaz de: minimizar os custos de passagens aéreas; maximizar os retornos em investimentos financeiros; maximizar o rendimento de um dispositivo; minimizar a massa ou o volume de um objeto; minimizar os custos de produção; determinar a melhor trajetória de um projétil, de veículos tanto na terra quanto nos céus quanto nas águas, do fluxo de fluidos em tubulações ou da energia elétrica em linhas de transmissão, entre outros (BARBOSA, 2012; NOCEDAL; WRIGHT, 1999). Além disso, ela pode ocorrer naturalmente em: sistemas físicos, os quais tendem a um estado mínimo de energia; moléculas num sistema químico isolado, as quais reagem umas com as outras até que a energia potencial de seus elétrons seja minimizada; raios luminosos, que sempre se deslocam no trajeto mais curto (NOCEDAL; WRIGHT, 1999).

Por possuir diversas aplicações, diversos métodos de otimização foram desenvolvidos e aprimorados no decorrer do tempo. A maioria absoluta é numérico, porque foram desenvolvidos com o auxílio de ferramentas computacionais sobretudo após os avanços tecnológicos oriundos do advento de transistores de junção empregados a circuitos de computadores a partir de 1948. Isso os deixou cada vez menores e, principalmente, mais potentes (SPROTTE, 2018), o que, conseqüentemente, impactou consideravelmente as ciências da computação. Por isso, tem havido uma redução gradual do custo computacional dos *softwares*, o qual, é, portanto, a grande causa da explosão de novos e cada vez mais aprimorados métodos numéricos de otimização.

Independentemente da metodologia numérica adotada, algoritmos de otimização compartilham características em comum. Uma delas é que são processos iterativos os quais começam com uma estimativa inicial de soluções ótimas. Enquanto alguns avançam com informações acumuladas desde o início do processo iterativo, outros apenas fazem uso de dados da iteração atual (NOCEDAL; WRIGHT, 1999).

Além disso, novos algoritmos de otimização devem seguir as três boas práticas de programação (NOCEDAL; WRIGHT, 1999). A primeira delas é a eficiência, atingida com alta velocidade de convergência e uso de pouca memória. A segunda é a robustez, atendida pela boa performance do algoritmo na resolução dos mais diversos problemas nas mais variadas escolhas de valores iniciais para as variáveis. Enfim, devem possuir precisão nos resultados, com o mínimo possível de introdução de erros, como os de arredondamento, no decorrer dos cálculos

e das iterações. Portanto, um algoritmo de otimização pode ser considerado bom se satisfazer essas três boas práticas de programação. Todavia, algumas dessas boas práticas podem ser conflitantes em certos algoritmos (NOCEDAL; WRIGHT, 1999).

Na quarta seção do capítulo 4, algumas métricas utilizadas em otimização serão discutidas a fim de esclarecer, com o devido formalismo matemático, a obtenção de algoritmos de otimização que sigam essas três boas práticas. Já neste capítulo, conceitos referentes à otimização serão apresentados, assim como os métodos serão classificados conforme à literatura. Por fim, uma seção exclusiva é reservada aos algoritmos evolucionários, ou evolutivos, (AEs) devido à importância para esta dissertação de mestrado.

2.1 CONCEITOS INERENTES

Todo processo de otimização trabalha com os seguintes conceitos (ÁVILA, 2006; NOCEDAL; WRIGHT, 1999):

- a) Função objetivo: também conhecida como função de custo ou de mérito ou ainda critério de otimização, é a equação matemática, ou vetor de equações, que define o que deve ser melhorado em um processo, isto é, maximizado ou minimizado;
- b) Parâmetros: em otimização, é o nome dado às variáveis da função objetivo. Por isso, também atendem pelos seguintes nomes: variáveis-objeto, de otimização, de concepção ou de projeto. São ajustados no decorrer do processo de otimização até a obtenção da solução ótima ou quando um critério de parada for atendido;
- c) Espaço/Região de busca: equivalente ao domínio de uma função, é a região, delimitada ou não por restrições, em que se atribui valores aos parâmetros. Também é neste espaço onde as soluções estão contidas. Assume outros nomes como espaço/região dos parâmetros e ambiente;
- d) Espaço/Região dos objetivos: é a região em que todos os valores possíveis das funções de custo podem ser encontrados. Corresponde ao conjunto imagem do espaço de busca;
- e) Restrições: são condições do problema que limitam à região de busca a uma faixa de valores pré-estabelecidos. Podem ser fornecidas por equações ou inequações de parâmetros ou de funções, inclusive com combinações dessas. Alternativamente, podem ser chamadas de condições de restrição. Obviamente, não existem em problemas irrestritos;

- f) Espaço/Região/Domínio viável: é um local do espaço dos parâmetros ou/e objetivos o qual respeita as restrições. Possui outros nomes, tais como: espaço/região/domínio factível, admissível ou realizável. Na otimização irrestrita, a região viável é igual ao espaço de busca ou/e dos objetivos;
- g) Espaço/Região/Domínio inviável: é um local do espaço onde ocorre a violação das restrições. É conhecido por outros nomes, como espaço/região/domínio não viável, não admissível, não realizável, não factível ou infactível. Não existe na otimização irrestrita.

Ademais, métodos numéricos de otimização também trabalham com conceitos de processos iterativos, tais como: condições iniciais, parâmetros de controle, número de iterações e critérios de parada (ÁVILA, 2006).

Apresentados esses conceitos e dado o seguinte problema de otimização:

$$\begin{aligned} & \min_{\vec{x} \in \mathbb{R}^n} f(\vec{x}) \\ & \text{sujeito a: } \begin{cases} g(\vec{x})=0 \\ h(\vec{x}) \geq 0 \end{cases} \end{aligned}$$

Tem-se que, portanto:

- $f(\vec{x})$ é a função objetivo;
- \vec{x} é o vetor de parâmetros;
- \mathbb{R}^n é o espaço de busca;
- $g(x) = 0$ e $h(x) \geq 0$ são as restrições.

2.2 CLASSIFICAÇÕES

Os métodos de otimização recebem diversas classificações; muitas decorrem de conceitos matemáticos utilizados em sistemas de equações e em funções a serem otimizadas; em alguns, também de suas primeira e segunda derivadas (NOCEDAL; WRIGHT, 1999). Portanto, podem ser classificados entre métodos: contínuos e discretos; convexos e não-convexos; globais e locais; lineares e não-lineares; entre outras classificações possíveis. Também podem ser categorizados com respeito à presença ou não de restrições, entre métodos restritos e irrestritos, respectivamente. Por fim, ainda podem ser divididos, de acordo com o número de funções de custo analisadas, em métodos mono-objetivos (uma) e multiobjetivos (duas ou mais).

O critério mais utilizado e pelo qual as classificações sofrem ramificações é o da linearidade. Métodos de otimização que fazem uso de programação linear são menos complexos e limitados à resolução de problemas com funções objetivo lineares, a exemplo do método Simplex (NOCEDAL; WRIGHT, 1999). Entretanto, como estão fora do escopo deste trabalho, não serão discutidos. Já os que fazem uso da programação não-linear são mais complexos e amplos em quantidade e aplicabilidade. (NOCEDAL; WRIGHT, 1999) subdivide os métodos não-lineares entre determinísticos e estocásticos. Uma terceira subdivisão, a dos métodos enumerativos, também é acrescentada por (BAZARAA; SHERALI; SHETTY, 1993).

Os métodos determinísticos se baseiam em cálculos de derivadas das funções objetivos ou em aproximações dessas para a busca de soluções dos problemas (ÁVILA, 2006). Exemplos dessas metodologias são amplamente discutidos em (FERRAZ, 2017; NOCEDAL; WRIGHT, 1999). São os métodos: do Gradiente ou do Máximo Declive (*Gradient Descent, Steepest Descent*), de Newton-Raphson, de Quase-Newton (BFGS, DFT, SR1), do Gradiente Conjugado, de Cauchy, do Lagrangiano Aumentado, da Programação Quadrática Sequencial (SQP), dos Mínimos Quadrados Não-Lineares, das Diferenças Finitas, das Funções Parcialmente Separáveis (*Partially Separable Functions*), de Broyden, da Diferenciação Automática, de Steihaug, Dogleg, da Seção Áurea, da Programação Quadrática, Quadrático da Penalidade, da Barreira Logarítmica e dos Tensores.

Ao invés de se orientarem com base em informações das derivadas das funções, os métodos estocásticos procuram cenários de soluções ótimas de forma aleatoriamente ordenada ao fazerem uso de um conjunto de ações probabilísticas (ÁVILA, 2006; NOCEDAL; WRIGHT, 1999). Exemplos desses métodos serão melhor discutidos na seção 2.4, visto que um deles será utilizado nesta pesquisa; adianta-se que podem ser baseados no critério de Pareto e em algoritmos evolutivos. Por fim, os métodos enumerativos são os quais realizam uma busca exaustiva de todas as soluções possíveis, o que normalmente os deixam mais lentos em comparação com as demais metodologias devido ao tempo excessivo requisitado para o cálculo numérico (ÁVILA, 2006; BAZARAA; SHERALI; SHETTY, 1993).

Alternativamente a essa subdivisão dos métodos não-lineares, também é mencionado, em (ÁVILA, 2006; FERREIRA JUNIOR, 2017), outro critério de distinção entre eles em três diferentes grupos. O primeiro é composto por métodos de direção de busca, como os do Gradiente, de Newton-Raphson e de Quase-Newton BFGS, os quais procuram o ponto ótimo dentro do espaço de otimização por meio de um passo de cálculo e um vetor de direção de

decréscimo da função a ser minimizada, o qual é função do gradiente ou da hessiana, que é o gradiente do gradiente, da função de custo (ÁVILA, 2006; NOCEDAL; WRIGHT, 1999).

O segundo grupo é o dos métodos de exclusão de semiespaços, compostos, por exemplo, pelos métodos elipsoidais, dos pontos interiores e do plano de corte. Neles, a cada iteração ocorre a repartição do espaço dos objetivos em dois semiespaços de modo que o gradiente deve obrigatoriamente decrescer em um deles. Este subespaço então é mantido a fim de o ponto ótimo ser encontrado enquanto o outro semiespaço é excluído. O processo iterativo continua até alguma condição de convergência ser atendida (ÁVILA, 2006; FERREIRA JUNIOR, 2017).

Por fim, o terceiro grupo abrange os métodos de busca por populações, os quais trabalham com um conjunto de soluções de forma simultânea a cada iteração, diferentemente dos outros dois, que trabalham com uma única solução. Por isso, os métodos de busca por populações trabalham com valores das funções objetivo em diversos pontos distintos no espaço dos parâmetros sem requisitarem o gradiente ou a hessiana delas (ÁVILA, 2006; FERREIRA JUNIOR, 2017). Contudo, possuem duas desvantagens impactantes na eficiência. Uma delas é a necessidade de os pontos iniciais serem bem distribuídos no espaço dos parâmetros com a finalidade de garantirem soluções confiáveis. Já a outra é a possível lentidão para atingirem os mesmos resultados em comparação com outras metodologias, visto que podem requerer uma maior quantidade de avaliações do problema a fim de convergirem. Estão contidos neste grupo a abordagem de Pareto e os algoritmos evolutivos, cujos fundamentos serão desenvolvidos na seção 2.4 deste capítulo em virtude da importância deles para esta pesquisa

2.3 APLICAÇÕES EM ELETROMAGNETISMO

Apresentadas todas essas classificações, os métodos mais apropriados, e abrangentes na literatura (ÁVILA, 2006; LEI; ZHU; GUO, 2016), na resolução de problemas de otimização aplicados ao eletromagnetismo são os estocásticos de busca por populações, porque a natureza matemática destes se adapta melhor à natureza dos fenômenos eletromagnéticos, cujas funções não são diferenciáveis na maioria das vezes. A fim de reforçar este argumento, cita-se (BASTOS; SADOWSKI, 2003); esses autores reafirmam que as situações-problema do eletromagnetismo são comumente: não-lineares, complexos, de difícil representação, com funções de difícil diferenciação; e que, portanto, frequentemente fazem uso de ferramentas

numéricas, tal que a mais comum é o método dos elementos finitos (MEF), para a obtenção de soluções.

Especificamente, os métodos inteligentes, ou meta-heurísticos, os quais são algoritmos, geralmente estocásticos, de busca por população que simulam fenômenos naturais e comportamentos (TAO; ZHANG; LAILI, 2015), são normalmente os utilizados junto ao MEF na otimização de dispositivos eletromagnéticos (LEI; ZHU; GUO, 2016). Aplicados a dispositivos eletromagnéticos, assistem os projetistas a: minimizarem a massa ou/e o volume dos materiais ou de um material específico; minimizarem os custos; minimizarem as perdas ou maximizarem o rendimento; maximizarem a transferência de potência; dentre outros (LEI; ZHU; GUO, 2016).

Desde a década de 1990, pesquisadores da área de eletromagnetismo têm explorado a aplicação, nesse campo do conhecimento, de diversos algoritmos meta-heurísticos de otimização mono e, mais recentemente, multiobjetivos, dentre os quais têm se destacado a pesquisa Tabu além dos algoritmos genéticos, evolutivos diferenciais, imune, de seleção clonal e os de otimização por enxame de partículas, conhecidos, em inglês, como *Particle Swarm Optimization* (PSO) (BARANYAI et al., 2018; LEI; ZHU; GUO, 2016). No entanto, embora preciso e aplicável a diversas máquinas de geometria complexa, o emprego desses algoritmos junto ao FEM pode se tornar inviável devido à complexidade e ao extenso custo computacional da análise por elementos finitos. Para reduzir esse esforço, foram, portanto, desenvolvidos métodos de otimização específicos para projetos de engenharia que trabalhem com os métodos aproximados, também conhecidos como surrogados, dentre os quais se destacam os modelos: de superfície de resposta (*Response Surface Model* – RSM), das funções de base radial (*Radial Basis Functions* – RBF), de Kriging e redes neurais artificiais (RNA) (BARANYAI et al., 2018; LEI; ZHU; GUO, 2016).

Há relatos de desenvolvimento ou de validação de métodos aplicados: a dispositivos eletromagnéticos genéricos (BATISTA; GUIMARÃES; RAMIREZ, 2009; TENAGLIA; LEBENSZTAJN, 2014), como os algoritmos imunes artificiais, baseados no sistema imunológico do corpo humano (CHEN; LUO; YE, 2008; CHUN et al., 1997; HUANG; LUO, 2013; YING et al., 2018); a testes de interferência eletromagnética (HUANG; LUO, 2013) e à resolução de problemas de energia armazenada em campos (CHEN et al., 2012; COELHO; ALOTTO, 2008; DIAS; DE VASCONCELOS, 2002; TANG et al., 2020).

Pode-se ainda citar estudos relacionados à otimização dos seguintes dispositivos eletromagnéticos: geradores síncronos (BAZZO, 2017; BECKER, 2016; CARLSON; WURTZ;

VOLTOLINI, 2012; KÖLZER, 2017; LI; CHEN, 2009; MA et al., 2019; RESMINI, 2013; TEDESCO, 2019; ZAVVOS; MCDONALD; MUELLER, 2013); motores de corrente contínua sem escovas (BLDC) (BARBOSA, 2012; SCHMITZ, 2017) e lineares de fluxo transversal (HASANIEN, 2011; HASANIEN; ABD-RABOU; SAKR, 2010); indutores (JERONYMO et al., 2018); transformadores (AYALA et al., 2015, 2016; COELHO et al., 2013a, 2018a; RIES, 2013; TSILI et al., 2018); antenas (ÁVILA, 2002, 2006; YING et al., 2018) e cavidades ressonantes (BARRERA; CARPES JR, 2016). Por fim, ainda houve estudos de técnicas de otimização aplicadas ao modelo de histerese de Jiles–Atherton (COELHO et al., 2013b, 2014, 2018b; COELHO; MARIANI; LEITE, 2010, 2012; LEITE et al., 2004).

Há também uma situação contrária: a concepção de um algoritmo baseado no mecanismo eletromagnético das partículas carregadas (*Electromagnetism-like Mechanism Algorithm*) para fins diversos em otimização. Criado por (BIRBIL; FANG, 2003), tal algoritmo trabalha com o cálculo das cargas e das forças elétricas nas partículas a fim de realizar a minimização de funções objetivo; foi aprimorado por (TAN et al., 2017). Ademais, dentro dos métodos estocásticos de busca por populações, os algoritmos evolutivos foram preferidos para esta pesquisa devido à possibilidade de trabalharem com espaços de busca grandes e complexos. Além de serem mais flexíveis e de se adaptarem facilmente a problemas propostos diversos; fora a característica de busca global e o desempenho robusto (ÁVILA, 2006).

Como desafios para a otimização aplicada a projetos de dispositivos eletromagnéticos, (BARANYAI et al., 2018; LEI; ZHU; GUO, 2016) citam que progressos podem ser alcançados quando os problemas advindos do elevado custo computacional dos métodos dos elementos finitos e dos algoritmos surrogados forem contornados. Segundo esses autores, tal deficiência pode ser resolvida efetivamente por meio de métodos de otimização multinível.

2.3.1 Pesquisas recentes produzidas pelo GRUCAD

Na última década, houve diversas pesquisas sobre a temática de otimização aplicada a problemas eletromagnéticos publicadas pelo GRUCAD em parceria com instituições nacionais e internacionais, da França, da Grécia e da Colômbia; algumas em formato de dissertação de mestrado ou de tese de doutorado. Nesta seção, serão apresentados algumas dessas pesquisas. Foram desenvolvidos, e aplicados à solução do modelo de histerese de Jiles–Atherton, algoritmos evolutivos diferenciais (COELHO; MARIANI; LEITE, 2010, 2012) e outros três que imitam fenômenos da natureza. Um deles é sobre o comportamento dos pássaros cuco

(COELHO et al., 2013b), outro sobre o sonar dos morcegos (COELHO et al., 2014) e o último sobre a propagação de um relâmpago (COELHO et al., 2018b).

O Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos junto com as instituições parceiras também contribuiu com estudos de otimização aplicada a geradores síncronos. (CARLSON; WURTZ; VOLTOLINI, 2012) otimizaram duas máquinas de ímãs permanentes com o uso do MEF e o auxílio das ferramentas *Reluctool* e CADES, que pode utilizar o método SQP e a abordagem de Pareto. Na dissertação de mestrado de (RESMINI, 2013), foram estudadas a otimização de geradores a ímãs permanentes com auxílio de *softwares* e foi introduzida a otimização gama, que resulta em projetos ótimos de máquinas elétricas, porém com características distintas entre si. Na de (BECKER, 2016), um gerador de ímãs permanentes teve a potência do entreferro maximizada a fim de ser utilizado na geração maremotriz. (KÖLZER, 2017), em sua tese de doutorado, emprega um método de otimização determinístico em conjunto com ferramentas computacionais auxiliares a fim de comparar diferentes topologias de geradores de ímãs permanentes de ferrite para uso em microgeração eólica. Por fim, na tese de (BAZZO, 2017), é apresentada uma metodologia de projeto ótimo para a mesma máquina da tese anterior e com finalidade semelhante, porém considera o perfil do vento para a minimização do custo e a maximização da capacidade de geração de energia elétrica. Por fim, na dissertação de (TEDESCO, 2019), é criada uma ferramenta que utiliza um algoritmo genético para projetos ótimos de geradores síncronos de polos salientes. Houve também uma dissertação de mestrado em que o rendimento de motores BLDC foi maximizado com o auxílio das ferramentas do CADES e os modelos térmico e de rede de relutâncias (SCHMITZ, 2017). O estudo foi validado por meio do MEF.

A otimização de transformadores também foi explorada pelo grupo e colaboradores científicos. Na dissertação de (RIES, 2013), transformadores de distribuição foram modelados por meio do MEF e do método por rede de relutâncias para, depois de projetados, serem otimizados por diferentes técnicas de otimização mono e multiobjetivo, como a SQP, a determinística global, o critério de Pareto e por algoritmos genéticos. Nessa otimização, (RIES, 2013) usou como critérios o custo total e o custo de fabricação em detrimento da vida útil. Além disso, foram publicados estudos de otimização com o uso de algoritmos evolucionários. (COELHO et al., 2013a) inventaram um novo algoritmo evolutivo diferencial multiobjetivo a fim de minimizarem a massa e as perdas de um transformador monofásico de 400 VA. Outro algoritmo, que simula o comportamento de improvisação dos músicos, foi estudado por (AYALA et al., 2015) em busca de otimizar o transformador anterior. (TSILI et al., 2018)

desenvolveram técnicas de otimização estocásticas com uso de diferentes algoritmos evolutivos diferenciais aplicadas à minimização dos custos de fabricação e total de três transformadores trifásicos de distribuição com potências de 160 kVA, 400 kVA e 630 kVA. Outra publicação, de (COELHO et al., 2018a), procura otimizar o mesmo dispositivo de (COELHO et al., 2013a) e (AYALA et al., 2015) só que com um algoritmo que imita o comportamento de caça das formigas-leão.

Uma característica recorrente nesses trabalhos é a validação do algoritmo de otimização em algum *software* de elementos finitos, como o EFCAD, o FEMM e o CADES. Por fim, entre 2010 e 2020, a sociedade estabelecida entre o GRUCAD e outros institutos rendeu outras duas publicações de estudos de otimização, ambos relacionados a altas frequência. O primeiro deles é de uma cavidade ressonante (BARRERA; CARPES JR, 2016), cujo objetivo é maximizar a frequência de ressonância por um método PSO, o qual imita o comportamento migratório de aves e insetos. Já o segundo deles é de um indutor utilizado em circuitos de radiofrequência (JERONYMO et al., 2018) por meio de algoritmos genéticos e de um que simula o processo de explosão de fogos de artifício. Neles, a função objetivo foi elaborada de modo que a frequência central desejada fosse de 95 MHz com a minimização da amplitude a maximização da largura de banda.

Deve-se mencionar também outro estudo de métodos de otimização, aplicados sobretudo a antenas refletoras (ÁVILA, 2002, 2006) no GRUCAD entre os anos 2000 e 2006. Essa menção é válida, porque o conteúdo conceitual vasto e os AGs desenvolvidos nessas pesquisas são importantes para o desenvolvimento desta dissertação, conforme é melhor discutido no capítulo 4. Por fim, também é importante afirmar que os pesquisadores do GRUCAD desenvolveram um algoritmo genético mono-objetivo (AGMONO), cujas aplicações foram validadas para minimizar a massa ou maximizar o rendimento de transformadores monofásicos e para identificar os parâmetros do modelo de Jiles-Atherton (LEITE et al., 2004). Esse AGMONO será utilizado para comparar alguns estudos de caso de transformadores junto a um algoritmo genético multiobjetivo (AGMULTI), conforme é melhor explicado no capítulo 4.

2.4 ALGORITMOS EVOLUTIVOS

Os algoritmos evolutivos, também chamados algoritmos evolucionários, são um subconjunto de métodos de otimização meta-heurísticos (estocásticos de busca por populações) surgidos na década de 1950 com o advento de computadores transistorizados. No entanto, o desenvolvimento de novas técnicas se expandiu a partir da década de 1980, quando a capacidade de processamento dos computadores se tornou cada vez maior devido a avanços na descoberta e na confecção de novos transistores, menores e mais eficientes (ÁVILA, 2006; SPROTTE, 2018).

Esses algoritmos possuem esse nome, porque simulam o fenômeno da evolução por meio da seleção natural, descrito pelo cientista britânico Charles Darwin na clássica obra científica *A origem das espécies* (DARWIN, 1859). Essa simulação é uma característica comum a todos os AEs e a raiz do código de cada um. Por isso, é comum que, dentre as diversas técnicas de otimização evolucionárias existentes, simulem sistemas biológicos, tal como: o movimento e migração de aves, insetos e partículas em algoritmos PSO (BARBOSA, 2012; BARRERA; CARPES JR, 2016; SIVANANDAM; DEEPA, 2008); os formigueiros (DORIGO; BIRATTARI; STÜTZLE, 2006; SIVANANDAM; DEEPA, 2008); o comportamento de caça de determinadas espécies de formigas (COELHO et al., 2018a) e de pássaros, como o cuco (*cuckoo search*) (COELHO et al., 2013b); o sonar dos morcegos (COELHO et al., 2014); o sistema imunológico (BATISTA; GUIMARÃES; RAMIREZ, 2009; CHEN; LUO; YE, 2008; CHUN et al., 1997; HUANG; LUO, 2013; YING et al., 2018) e as redes neurais artificiais (CHEN; LUO; YE, 2008; HERTZ et al., 1991). Além disso, também podem simular sistemas físicos, como a explosão de fogos de artifício (JERONYMO et al., 2018) e as correntes de ar (AYALA et al., 2016), ou se associarem a conceitos matemáticos nos algoritmos evolutivos diferenciais (COELHO et al., 2014; COELHO; MARIANI; LEITE, 2010, 2012; TENAGLIA; LEBENSZTAJN, 2014; TSILI et al., 2018).

2.4.1 Algoritmos Genéticos

Dentre os algoritmos evolutivos, existe uma classe utilizada em otimização, que é a dos algoritmos genéticos, os quais são baseados em conceitos de seleção natural e evolução, propostos em (DARWIN, 1859), além de genética (ÁVILA, 2006; BARBOSA, 2012; SIVANANDAM; DEEPA, 2008). O pioneiro em pesquisa e desenvolvimento de AGs, no início

dos anos 60 do século XX, foi o estadunidense John Henry Holland (SIVANANDAM; DEEPA, 2008), que foi físico, matemático, engenheiro eletricista, cientista da computação e psicólogo.

A fim de abrir a discussão sobre esses algoritmos, introduzem-se os seguintes conceitos, muitos dos quais devidamente importados da biologia, tal que alguns deles também são utilizados nas demais metodologias evolucionárias. Todos esses conceitos foram extraídos de (ÁVILA, 2006; BARBOSA, 2012; SIVANANDAM; DEEPA, 2008).

- Indivíduo: uma solução candidata do problema matemático, composto por um vetor contendo os valores dos parâmetros, que podem estar ou não codificados. Em biologia, é um ser vivo ou uma parte dele (célula, núcleo celular, mitocôndria), que possui determinadas características genéticas.
- Geração: um dos critérios de controle do AG, serve tanto para o controle do número de indivíduos quanto para a parada do método. O programador define a quantidade de gerações do AG, as quais acabam por atuar como as iterações do método numérico. Em biologia, segundo o Dicionário Online de Português, é “qualquer fase necessária para manter a sobrevivência de uma espécie” ou, ainda, “etapa da descendência natural que deve ser seguida por outra” (DICIONÁRIO ONLINE DE PORTUGUÊS, [s.d.]). Tanto em biologia quanto em otimização, os indivíduos da geração seguinte estão relacionados com o modo como ocorre a seleção, a reprodução e até com a mutação e aptidão dos indivíduos da geração anterior;
- População: conjunto de indivíduos, os quais podem ou não ser solução do problema. Em biologia, o conceito é mais restritivo: seres da mesma espécie que habitam um determinado local do espaço ou ecossistema. Na primeira geração, existe uma população inicial, que é gerada de forma aleatória ou a partir de uma base de dados e que pode se manter em igual quantidade, maior ou menor (esta somente na ciência da vida) com o passar do tempo;
- Aptidão: também conhecido pelo nome em inglês *fitness*, ou, ainda, avaliação ou função de avaliação, é um fator de controle atuante no espaço dos objetivos do AG. Determina a qualidade dos indivíduos, tanto para a reprodução quanto para a manutenção dos indivíduos após esse processo ao avaliar o quão próximos podem estar dos possíveis valores ótimos. Diversos critérios podem ser utilizados para determinar a aptidão de um indivíduo a depender da quantidade de funções de custo e de outros definidos pelo desenvolvedor. Em AGs que usam métodos multiobjetivos, o critério

de Pareto é utilizado para determinar a aptidão. Em biologia, a aptidão está relacionada com as qualidades que um indivíduo tem de se adaptar às condições externas, a disputas e a mudanças, tais como: força, inteligência, resistência e imunidade;

- Seleção: é o processo de escolha de dois indivíduos, os pais, para o processo de cruzamento. Em AGs, normalmente, é a etapa que diferencia um algoritmo genético de outro. As formas de seleção mais conhecidas são a: por roleta, por torneio, por amostragem determinística e a elitista; normalmente estão relacionadas com a aptidão. De acordo com a teoria da seleção natural proposta por Charles Darwin, os indivíduos mais aptos sobrevivem às condições externas e às competições entre indivíduos da mesma ou de diferente espécie por território, alimento e acasalamento; geram descendentes que herdam essas aptidões e, assim, os melhores indivíduos são selecionados ao longo das gerações, o que ocasiona a evolução de algumas espécies em detrimento da extinção de outras, como os dinossauros (DARWIN, 1859);
- Cruzamento: também conhecido pelos nomes recombinação ou *crossover*, é a etapa em que ocorre a reprodução de indivíduos; pode ou não ocorrer mutação. Tipos comuns de cruzamento são: o do ponto único, o dos dois pontos, o multiponto, o uniforme, o dos três pais, o embaralhado e o ordenado. Ademais, nem todos os indivíduos sofrem esse processo, pois esse fenômeno é definido tanto na otimização quanto na natureza pela probabilidade de cruzamento, que é uma variável aleatória. Indivíduos que não atingem um valor mínimo de probabilidade de cruzamento, não reproduzem descendentes diversos em relação aos originais, ou seja, geram clones;
- Reprodução: etapa do cruzamento em que os pais são selecionados para terem o vetor dos parâmetros quebrados até um determinado ponto de modo que parte deles é conservada enquanto outra modificada nos descendentes. Esse segundo grupo então é re combinado para gerarem os filhos, ou seja, novos indivíduos. A depender dos critérios adotados na reprodução, do ponto em que o vetor dos parâmetros foi quebrado e da probabilidade de cruzamento, alguns filhos, como em ciências biológicas, podem ser iguais aos pais (reprodução assexuada – sem cruzamento de material genético) ou diferentes (reprodução sexuada – com cruzamento de material genético). Dentre os filhos diferentes dos pais, mantêm o conjunto de características, ou valores de parâmetros, muito parecido ou próximo do dos pais, porém nunca todas iguais;

- Mutação: tanto em otimização quanto em ciências biológicas, é um processo aleatório raro, definido pela probabilidade de mutação, em que o material genético (informação) dos indivíduos descendentes é modificado. Essa modificação pode ser de troca de posição de variáveis no vetor ou de valores de um ou vários parâmetros;
- Reposição: etapa em que os indivíduos novos substituem os piores indivíduos da geração anterior, os quais são excluídos do processo – são extintos, morrem. Substituição é um nome alternativo para essa etapa;
- Agrupamento: mais conhecido pelo nome inglês *cluster*, é o processo utilizado em otimização e aprendizagem de máquinas para agrupar indivíduos muito semelhantes ou próximos em uma única solução, o que gera economia no custo computacional e melhora na distribuição das soluções no espaço dos objetivos.

Em resumo, quando os parâmetros de controle são bem ajustados, os laços de um algoritmo genético no decorrer de um processo iterativo fazem a população evoluir (SIVANANDAM; DEEPA, 2008). Ademais, alguns conceitos como a aptidão, a seleção, o cruzamento, a reprodução e até a mutação, os quais são os operadores genéticos, serão melhor elucidados nas discussões pertinentes à metodologia de pesquisa, apresentada no capítulo 4. Vale também mencionar que, durante todos os processos que ocorrem em uma iteração, os parâmetros dos indivíduos não devem extrapolar os limites impostos pelas restrições, quando existirem. Se chegam a extrapolar, o mais comum é que tenham os valores saturados de acordo com o limite que extrapolou, seja o superior ou o inferior (ÁVILA, 2006; SIVANANDAM; DEEPA, 2008).

Como critérios de parada, um algoritmo genético pode ter o processo terminado ou interrompido quando atender a um dos seguintes critérios (SIVANANDAM; DEEPA, 2008):

- 1) Atingir o número máximo de gerações;
- 2) Atingir um tempo máximo de processamento, o qual é definido pelo programador;
- 3) Não se verificar mais mudanças na aptidão;
- 4) Não haver mais mudanças nas funções objetivos entre uma geração e outra em sucessivas gerações;
- 5) Não haver mais mudanças nas funções objetivos em um intervalo de tempo definido pelo desenvolvedor.

Além desses critérios, o programador pode inventar outros que julgar conveniente desde que comprove que sejam eficazes e mais vantajosos que os cinco acima. Na tese de Ávila,

pode ser encontrado uma pesquisa sobre o estado da arte dos algoritmos genéticos utilizados na otimização multiobjetivo. Segundo essa fonte, o pioneiro foi o pesquisador J. D. Schaffer em 1984 em sua tese de *PhD* (SCHAFFER, 1984), que inventou o VEGA (do inglês, *Vector Evaluated Genetic Algorithm*) para aplicar em alguns experimentos de aprendizagem de máquinas. A seguir, será apresentado o resumo das principais características dos métodos de otimização multiobjetivo com uso de AGs dessa pesquisa, tal que cada sigla provém do nome inglês de cada um, com exceção do último, cujo nome está em português por ser da autoria do brasileiro Sérgio Ávila. As fontes originais e detalhes adicionais estão situados na segunda, na quarta e na sexta seções do terceiro capítulo de (ÁVILA, 2006), exceto quando mencionado o contrário.

- AG baseado em Vetor de Avaliação (VEGA): as populações são divididas entre cada objetivo de maneira que ocorra otimizações mono-objetivos para cada uma delas;
- Algoritmo Genético Multiobjetivo (*Multi-Objective Genetic Algorithm* – MOGA): divide e classifica a população entre indivíduos não-dominados e dominados. Os primeiros recebem classificação igual enquanto os segundos são penalizados de acordo com a dominância de Pareto. Esses conceitos pertinentes à dominância de Pareto serão desenvolvidos em 4.3.1;
- AG Baseado em Ordenação Não-Dominada (*Nondominated Sorting Genetic Algorithm* – NSGA I, NSGA II e NSGA III): pode gerar concentração de soluções em certas regiões, visto que só indivíduos não-dominados, com mesma classificação e probabilidades de cruzamento, são selecionados (ÁVILA, 2006; DEB; JAIN, 2014);
- Algoritmo Genético Baseado em Pareto Dominante (*Niched Pareto Genetic Algorithm* – NPGA): a ideia de competição inerente à técnica de torneio para a seleção de indivíduos é utilizada na dominância de Pareto;
- Método das Populações Intermediárias: primeiramente, por meio de um método monocritério, determina o ponto ótimo, que deve ser único, de cada função objetivo. Com base nisso, populações intermediárias são definidas e a otimização multiobjetivo é realizada com base no critério de Pareto;
- Algoritmo Evolutivo Baseado na Força de Pareto (*Strong Pareto Evolutionary Algorithm* – SPEA I e SPEA II): a aptidão de cada indivíduo nesse algoritmo é dado pela força de Pareto, que é função da dominância de Pareto. Na minimização, a força de Pareto dos não-dominados é menor que um e quanto menor for essa grandeza, maior

a probabilidade de um indivíduo ser selecionado para reprodução. Na maximização, acontece o contrário, isto é, a força dos não-dominados é maior que um e quanto maior for essa grandeza, maior a probabilidade de um indivíduo ser selecionado para reprodução (ÁVILA, 2006; BARBOSA, 2012);

- Algoritmo Genético Multiobjetivo (AGMO): produz soluções mais eficientes em relação aos métodos anteriores em detrimento de maior custo computacional. Não necessita de codificação, apenas do conhecimento prévio do número de objetivos e de parâmetros de cada indivíduo bem como os limites de cada variável;
- Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo Baseado em Decomposição (Multi-Objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition – MOEA/D): decompõe um problema de otimização em subproblemas escalares, os quais são otimizados simultaneamente com base na informação dos subproblemas vizinhos. Possui complexidade computacional menor que NSGA II além de poder superá-lo em performance em determinados problemas (ZHANG; LI, 2007).

Ainda, os métodos SPEA II, NSGA II e III e MOEA/D foram os que melhor se consolidaram, com uso em diversos estudos e trabalhos de diferentes áreas do conhecimento (ÁVILA, 2006; TIAN et al., 2017). Além disso, para a ampliar a revisão literária de algoritmos genéticos nesta dissertação, foram consultadas outras publicações além da dissertação e da tese do professor Sérgio Ávila, que os utilizou em otimização mono e multiobjetivo de projetos de antenas refletoras (ÁVILA, 2002, 2006). (TEDESCO, 2019) utilizou AGs para maximizar o rendimento e minimizar o custo de geradores síncronos de polos salientes utilizados em geração eólica. (LIZ, 2019) os empregou em projetos de controladores aplicados à sincronização de uma rede elétrica ilhada, alimentada por uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH), com o sistema principal. (LI; CHEN, 2009) os usaram para minimizar o custo de um sistema de geração de energia eolielétrica, com turbinas compostas por máquinas síncronas de ímãs permanentes. (AYALA et al., 2016) os utilizaram de modo a desenvolver um algoritmo que simula a dinâmica dos ventos com a finalidade de ser utilizado na otimização de projeto de transformadores. Por fim, (LEITE et al., 2004) desenvolveram um algoritmo genético mono-objetivo, o qual se mostrou eficaz para identificar os parâmetros do modelo de histerese de Jiles-Atherton e maximizar o rendimento ou minimizar a massa de um transformador monofásico de baixa potência.

3 ASPECTOS CONSTRUTIVOS EM TRANSFORMADORES

Este estudo é focado nos transformadores cuja transferência de potência entre o primário e secundário se dá unicamente por indução eletromagnética, ou seja, sem contato elétrico entre os enrolamentos. Restringe-se também este estudo aos transformadores utilizados em frequências industriais.

Os transformadores são dispositivos eletromagnéticos de conversão de energia elétrica, compostos basicamente por um *núcleo*, quase sempre fabricado com material ferromagnético, num formato em que haja colunas, os ramos do circuito magnético, separadas a uma determinada distância por um espaço, cujo nome é *janela*, preenchido com material dielétrico, normalmente ar, óleo mineral ou óleo vegetal. No entanto, as extremidades de cada coluna, também chamada de perna, são juntadas em um nó comum por uma travessa de modo a fechar o circuito magnético. Geralmente, cada coluna possui bobinas (enrolamentos) com espiras de material condutor de eletricidade, comumente o cobre ou o alumínio. Cada *enrolamento* é projetado para operar em regime permanente com valores de tensão e correntes próprios, chamados de valores nominais, com potências aparentes iguais. O transformador altera os níveis da tensão e corrente dos enrolamentos de maneira que os readéque do primeiro ao segundo circuito ao mesmo tempo que os isola eletricamente. Existem ainda outros elementos acessórios, de acordo com a aplicação, que podem vir a constituir um transformador: radiadores, sensores para medir grandezas térmicas e eletromagnéticas, elementos estruturais além de tanque, dispositivo de alívio de pressão, relé de pressão súbita, relé do tipo Buchholz, buchas, conservadores e medidores de nível de óleo nos transformadores a óleo (WEG S.A., 2010).

Esses dispositivos eletromagnéticos possuem diversas aplicações em engenharia. Normalmente, são selecionados de acordo com o número de fases, a frequência, a potência e os níveis de tensão e de corrente dos circuitos. Nesta dissertação, serão analisados projetos de transformadores trifásicos, um de 2 kVA e dois de distribuição, com potências aparentes de 30 kVA e 300 kVA, além de um monofásico de 300 VA. Pode-se consultar mais sobre as diferentes formas de classificação desses dispositivos no Apêndice A.

Este capítulo busca apresentar aspectos construtivos no dimensionamento do núcleo e dos enrolamentos de transformadores, os quais são os elementos do dispositivo considerados nesta pesquisa. Além disso e devido à relevância, as perdas dos transformadores são

apresentadas em uma seção à parte. Por fim, alguns equacionamentos das seções anteriores são reajustados para o caso dos dispositivos eletromagnéticos monofásicos.

3.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Ao saber que um transformador é constituído de, pelo menos, um núcleo magnético, um enrolamento primário e um secundário, é possível explicar o funcionamento desses dispositivos eletromagnéticos. Eles funcionam devido às consequências de três leis do eletromagnetismo: a Lei de Ampère, a Lei da Conservação do Fluxo Magnético e a Lei da Indução de Faraday. Abordagens detalhadas sobre esses princípios estão amplamente difundidas na literatura, a exemplo de (BASTOS, 2012), e, portanto, não serão discutidas. Quanto às consequências delas para o funcionamento dos transformadores, pode-se consultar diferentes obras, a exemplo de (ALVES, 2016; DEL VECCHIO; FEGHALI; AHUJA, 2010; KULKARNI; KHAPARDE, 2004; MARTIGNONI, 1973).

3.1.1 Conceitos inerentes aos transformadores de núcleo trifásico

É importante ressaltar que, no caso dos transformadores de núcleo trifásico, cada fase do circuito primário gera um fluxo magnético, o qual pode ser decomposto em fasores cujos ângulos são os mesmos das respectivas correntes originais. Do resultado dessa soma fasorial nos ramos do núcleo magnético observam-se dois fatos. O primeiro é que os ângulos dos fluxos resultantes em cada coluna se mantêm em relação às angulações dos fluxos originais. Já o segundo, e mais importante para projetos de transformadores trifásicos, supostos balanceados, é que a amplitude dos fluxos resultantes em cada caminho magnético sempre será 1,5 vez maior em relação à amplitude dos fluxos originais.

Outro aspecto a ser mencionado é referente aos conceitos de circuitos elétricos trifásicos aplicados a transformadores. Os enrolamentos primário e secundário podem assumir diversas conexões, como a Y, a delta (Δ), a Y-aterrada, a zig-zag e a Scott, iguais ou diferentes de acordo com a aplicação e escolhas do engenheiro (ALEXANDER; SADIKU, 2012; ALVES, 2016; DEL VECCHIO; FEGHALI; AHUJA, 2010; KULKARNI; KHAPARDE, 2004; MARTIGNONI, 1973). Então as conversões entre as grandezas de fase e de linha em cada enrolamento seguem os mesmos conceitos apresentados em disciplinas teóricas que abordam circuitos elétricos equilibrados. Em projetos de transformadores trifásicos, contudo, deve-se

aplicar a relação de transformação às grandezas de fase (DEL VECCHIO; FEGHALI; AHUJA, 2010; MARTIGNONI, 1973).

Por fim, apresentam-se as equações (3.1) e (3.2), adaptadas de (AYALA et al., 2015; MARTIGNONI, 1973) e utilizadas para obter o número de espiras dos lados de baixa e de alta tensão em projetos de transformadores trifásicos. Além disso, um desses dispositivos é representado na Figura 3.1.

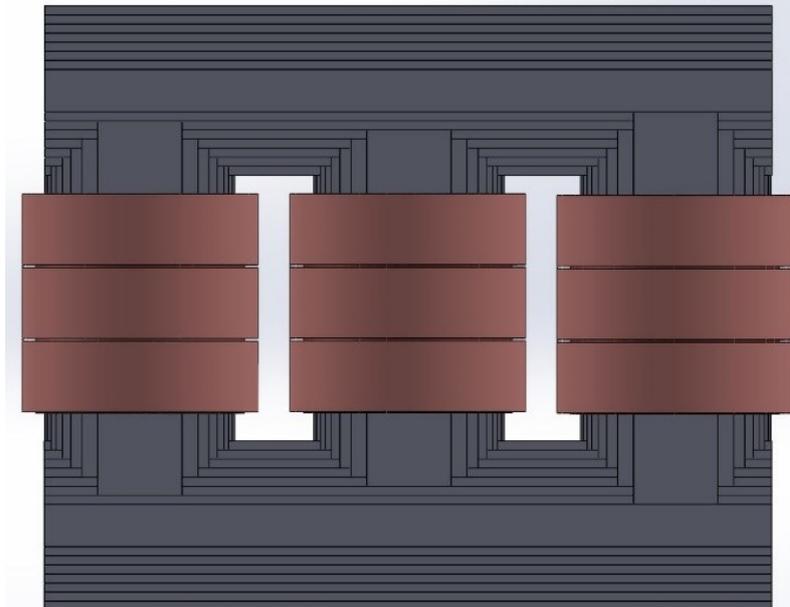
$$N_{BT} = \frac{V_{fBT}}{4,44 f \phi_M} \quad (3.1)$$

$$N_{AT} = N_{BT} \frac{V_{fAT}}{V_{fBT}} \quad (3.2)$$

Onde:

- f – Frequência da Rede [Hz];
- N_{AT} – Número de Espiras no Enrolamento de Alta Tensão;
- N_{BT} – Número de Espiras no Enrolamento de Baixa Tensão;
- V_{fAT} – Tensão Elétrica Eficaz de Fase do Enrolamento de Alta Tensão [V];
- V_{fBT} – Tensão Elétrica Eficaz de Fase do Enrolamento de Baixa Tensão [V];
- ϕ_M – Fluxo Magnético Máximo no Núcleo do Transformador [Wb];

Figura 3.1: Vista frontal de um transformador de núcleo trifásico. É composto por um núcleo com três colunas, uma por fase, e duas travessas além de dois enrolamentos concêntricos, um AT (externo), composto por três bobinas e série, e um BT (interno), sem os terminais.



3.2 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO NÚCLEO

Núcleos de transformadores são dimensionados a partir dos valores nominais de potência e tensões dos enrolamentos, além da indução magnética máxima permitida no material do núcleo e do volume e da massa máxima do dispositivo definidos pelo fabricante ou por normas. Geralmente são confeccionados com material ferromagnético laminado a fim de minimizar as correntes de Foucault, responsáveis por parte das perdas no núcleo. Dentre as matérias-primas mais utilizadas na produção industrial, destacam-se as compostas por chapas de ferrossilício de grão orientado, também conhecido pelo nome de ferro sílico (FeSi) (ALVES, 2016; RIES, 2013; MARTIGNONI, 1973). Ademais, para a construção do núcleo na indústria, essa parte do dispositivo é dividida entre as colunas e as travessas (MARTIGNONI, 1973). A união dessas partes pode ser feita por meio de juntas frontais, encaixadas ou combinações de ambas. O uso de juntas frontais é menos trabalhoso, porém aumenta as perdas no ferro devido ao emprego de parafusos. Já o emprego de juntas encaixadas é muito mais custoso embora minimize a adição de perdas no núcleo devido ao recorte nas lâminas para encaixe (DEL VECCHIO; FEGHALI; AHUJA, 2010; MARTIGNONI, 1973).

Independentemente das juntas utilizadas, as colunas e travessas são formadas pelo empilhamento de lâminas retangulares distribuídas em pacotes de maneira que, em núcleos arredondados, o formato da seção transversal, por onde flui a indução magnética, conhecida como área magnética (A_m), aproxime-se da forma circular (RIES, 2013; MARTIGNONI, 1973). Esse formato, com seção geométrica (A_g) igual à área do círculo, facilita a adesão das bobinas cilíndricas sobretudo em transformadores de alta tensão, cujo porte é maior. Essa aproximação impacta nos cálculos para a construção dos transformadores de maneira que as áreas são relacionadas por um coeficiente de enchimento (K_f), cujo valor depende do tipo de lâmina e da distribuição dos pacotes no empilhamento utilizados na fabricação. Ademais, essa relação e as áreas são dadas pela equação (3.3). Por fim, as equações (3.4) a (3.11) resumem os demais cálculos utilizados para a confecção de núcleos de transformadores trifásicos e que são adotadas nesta dissertação (ALVES, 2016; RIES, 2013; MARTIGNONI, 1973).

$$A_m = K_f A_g \quad (3.3)$$

$$A_g = \pi \frac{D^2}{4} \quad (3.4)$$

$$\phi_M = B_M A_m \quad (3.5)$$

$$hw = \frac{k_w N_{AT} I_{AT}}{a} \quad (3.6)$$

$$bw = \frac{2k_w N_{AT} A_{AT}}{f_{Cu} hw} \quad (3.7)$$

$$b_n = \sqrt{K_f} D_C \quad (3.8)$$

$$l_{Fe} = 3b_n + 2bw \quad (3.9)$$

$$h_{Fe} = 2b_n + hw \quad (3.10)$$

$$m_{Fe} = w_{Fe} A_m (3hw + 4bw + 6b_n) \quad (3.11)$$

Onde:

- A_g – Área Geométrica do Núcleo [mm^2];
- A_m – Área Magnética do Núcleo [mm^2];
- a – Constante para Transformadores Isolados a Óleo [A.esp/cm];
- B_M – Módulo da Indução Magnética Máxima no Núcleo do Transformador [T];
- b_n – Comprimento da Maior Lâmina da Coluna do Transformador [mm];
- bw – Largura da Janela do Transformador [mm];
- D_C – Diâmetro da Coluna Idealmente Circular do Transformador [mm];
- f_{Cu} – Fator de Preenchimento do Cobre;
- h_{Fe} – Altura de Ferro [mm];
- hw – Altura da Janela do Transformador [mm];
- I_{AT} – Corrente Elétrica Eficaz de Linha do Enrolamento de Alta Tensão [A];
- J – Módulo da Densidade de Corrente Elétrica [A/mm^2];
- K_f – Coeficiente de Enchimento (Fator de Empilhamento) das Lâminas;
- k_w – Fator de Preenchimento da Janela;
- l_{Fe} – Comprimento do Ferro [mm];
- m_{Fe} – Massa do Ferro [kg];
- $w_{Fe} = 7650 \text{ kg}/\text{m}^3$ – Massa Específica do Ferro.

3.3 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DOS ENROLAMENTOS

Enrolamentos são sempre formados por espiras enroladas nas colunas do núcleo. No entanto, a forma como são enroladas é que diferencia um enrolamento de outro. Nos transformadores, há enrolamentos que podem ser compostos por uma bobina cada um, a qual é

um conjunto de espiras. Em outros, geralmente acima de 10 kVA, uma bobina pode ser insuficiente e, por isso, devem ser constituídos por um sistema de bobinas em ligação série, porém todas envoltas numa mesma coluna.

Em transformadores trifásicos de dois enrolamentos com relação de transformação não-unitária, os enrolamentos do lado de alta tensão (AT) e do lado de baixa tensão (BT) da mesma fase, geralmente fabricados com cobre ou alumínio, são normalmente colocados na mesma coluna. Quanto à montagem, destacam-se os enrolamentos concêntricos ou tubulares e os com enrolamentos com bobinas alternadas ou de disco, ambas em formato cilíndrico.

A respeito da construção dos enrolamentos, os quais ocupam uma porção de área da janela, depende das dimensões da janela e da distância de isolação entre as bobinas e entre essas e o núcleo. Convencionalmente, essa porção da área da janela ocupada pelos enrolamentos de uma coluna não deve exceder um terço do total, ou, em outras palavras, a área da janela deve ser, pelo menos, três vezes maior que a área ocupada pelos enrolamentos de uma coluna. Além disso, a construção dos enrolamentos também é dependente da densidade de corrente e da área da seção transversal dos condutores pelos quais fluirá a corrente elétrica. Essas grandezas e outras importantes no dimensionamento dos condutores são obtidas das equações de número (3.12) a (3.27), as quais são as utilizadas para os dispositivos trifásicos desta dissertação e provêm de (ALVES, 2016; RIES, 2013; MARTIGNONI, 1973). Sobre a equação (3.27), destaca-se que uma característica importante dos transformadores de distribuição, ditada pela Norma Técnica Brasileira – NBR – 5440, é que, independentemente da potência nominal do transformador, a massa somada de todos os componentes que o constituem não deve ultrapassar 1500 kg para a instalação no poste (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

$$S = \sqrt{3}V_L I_L \quad (3.12)$$

$$J_{BT} = f_c J \quad (3.13)$$

$$A_{BT} = \frac{I_{BT}}{J_{BT}} \quad (3.14)$$

$$J_{AT} = \frac{J}{f_c} \quad (3.15)$$

$$A_{AT} = \frac{I_{AT}}{J_{AT}} \quad (3.16)$$

$$e_{cBT} = \frac{c_s V_{LBT}}{K_{rup}} \quad (3.17)$$

$$e_{BTAT} = \frac{c_s (V_{LAT} + V_{LBT})}{K_{rup}} \quad (3.18)$$

$$e_{ATexmin} = \frac{c_s V_{LAT}}{K_{rup}} \quad (3.19)$$

$$l_{BTesp} = 2\pi \left(\frac{b_n}{2} + e_{cBT} + \frac{l_{BT}}{2} \right) \quad (3.20)$$

$$l_{ATesp} = 2\pi \left(\frac{b_n}{2} + e_{cBT} + l_{BT} + e_{BTAT} + \frac{l_{AT}}{2} \right) \quad (3.21)$$

$$l_{CuBT} = N_{BT} l_{CuBTesp} \quad (3.22)$$

$$l_{CuAT} = N_{AT} l_{CuATesp} \quad (3.23)$$

$$m_{CuAT} = 3w_{Cu} A_{AT} l_{CuAT} \quad (3.24)$$

$$m_{CuBT} = 3w_{Cu} A_{BT} l_{CuBT} \quad (3.25)$$

$$m_{Cu} = m_{CuAT} + m_{CuBT} \quad (3.26)$$

$$m_T = m_{Fe} + m_{Cu} \quad (3.27)$$

Onde:

- A_{AT} – Área da Seção Transversal de Cobre do Enrolamento de Alta Tensão [mm^2];
- A_{BT} – Área da Seção Transversal de Cobre do Enrolamento de Baixa Tensão [mm^2];
- $c_s = 5$ é o fator de segurança;
- e_{ATex} – Comprimento entre o Enrolamento de Alta Tensão e Obstáculo Externo [mm];
- $e_{ATexmin}$ – Comprimento Mínimo entre o Enrolamento AT e Obstáculo Externo [mm];
- e_{BTAT} – Comprimento entre os Enrolamentos de Baixa e Alta Tensões [mm];
- e_{cBT} – Comprimento Mínimo entre a Coluna do Núcleo e o Enrolamento BT [mm];
- $f_c = 1,05$ é o fator de correção;
- I_{BT} – Corrente Elétrica Eficaz de Linha do Enrolamento de Baixa Tensão [A];
- I_L – Corrente Elétrica Eficaz de Linha [A];
- J_{AT} – Módulo da Densidade de Corrente Elétrica do Enrolamento AT [A/mm^2];
- J_{BT} – Módulo da Densidade de Corrente Elétrica do Enrolamento BT [A/mm^2];
- K_{rup} – Ruptura da Rigidez Dielétrica [kV/m]. Vale 3100 kV/m para o ar e 15000 kV/m para o óleo mineral;
- l_{AT} – Espessura do Enrolamento de Alta Tensão [mm];

- l_{BT} – Espessura do Enrolamento de Baixa Tensão [mm];
- l_{CuAT} – Comprimento Total de Cobre Utilizado no Enrolamento de Alta Tensão [m];
- l_{CuBT} – Comprimento Total de Cobre Utilizado no Enrolamento de Baixa Tensão [m];
- l_{ATesp} – Espessura Média de uma Espira do Enrolamento de Alta Tensão [mm]
- l_{BTesp} – Espessura Média de uma Espira do Enrolamento de Baixa Tensão [mm]
- m_{Cu} – Massa do Cobre [kg];
- m_{CuAT} – Massa de Cobre do Enrolamento de Alta Tensão [kg];
- m_{CuBT} – Massa de Cobre do Enrolamento de Baixa Tensão [kg];
- m_T – Massa Total do Dispositivo [kg];
- S – Potência Aparente [VA];
- V_L – Tensão Elétrica Eficaz de Linha [V];
- V_{LAT} – Tensão Elétrica Eficaz de Linha do Enrolamento de Alta Tensão [V];
- V_{LBT} – Tensão Elétrica Eficaz de Linha do Enrolamento de Baixa Tensão [V];
- $w_{Cu} = 8920 \text{ kg/m}^3$ – Massa Específica do Cobre.

Independentemente do lado, o projeto das espiras dos enrolamentos concêntricos dos transformadores desta dissertação procura ser com fios de cobre com padronização AWG na medida do possível dos limites elétricos e espaciais. Ainda pode haver casos, sobretudo no lado AT, que os enrolamentos precisem ser construídos por meio de um sistema de bobinas ligadas em série com a finalidade de se enquadrarem na janela, descontada a distância de isolamento até o ferro (MARTIGNONI, 1973). Informações adicionais sobre técnicas de confecção de enrolamentos em transformadores industriais são disponibilizadas no Apêndice B.

3.4 POTÊNCIA DISSIPADA E POTÊNCIA REATIVA EM PROJETOS DE TRANSFORMADORES

Projetos de transformadores devem levar em consideração a potência dissipada e a potência reativa no dispositivo. Nesta seção, serão discutidas as duas principais maneiras de dissipação de energia consideradas. Em seguida, os dois fenômenos associados à potência reativa são discutidos. Enfim uma discussão introdutória de correntes parasitas no cobre e de harmônicas nos transformadores e nos circuitos onde estão inseridos é realizada.

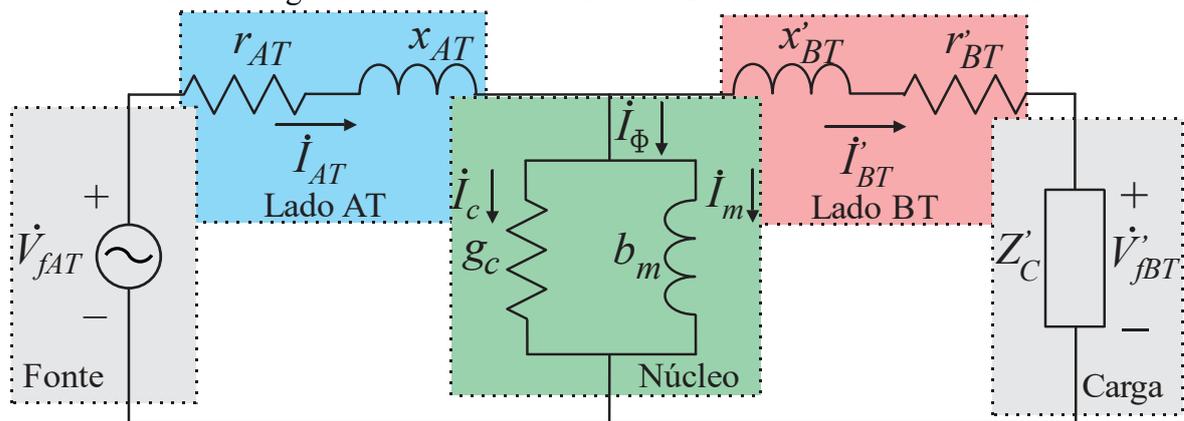
3.4.1 As duas principais perdas e a potência reativa

As perdas de condução no cobre e as perdas no núcleo são as duas formas fundamentais de dissipação de energia em transformadores. Quanto à circulação de potência reativa nesses dispositivos, pode ocorrer de duas maneiras também: uma no núcleo por meio do fenômeno de magnetização e a outra nos enrolamentos via dispersão. Esses fenômenos são utilizados para esquematizar o circuito elétrico linear equivalente de transformadores (Figura 3.2).

As perdas de condução no cobre ocorrem devido ao aquecimento do material condutor por Efeito Joule. Ademais, são calculados classicamente em transformadores trifásicos de acordo com equação (3.28).

$$P_{Cu} = 3(r_{AT}I_{AT}^2 + r_{BT}I_{BT}^2) \quad (3.28)$$

Figura 3.2: Circuito elétrico monofásico equivalente do transformador real com carga Z'_C ligada aos terminais de baixa tensão e fonte de alimentação \dot{V}_{fAT} conectada ao lado de alta tensão. As grandezas do núcleo e do lado BT são referidas ao lado AT.



Onde:

- b_m – Susceptância Magnetizante ou de Magnetização [μS];
- \dot{I}_{AT} – Fator Corrente Elétrica do Enrolamento de Alta Tensão [A];
- \dot{I}_{BT} – Fator Corrente Elétrica do Enrolamento de Baixa Tensão [A];
- \dot{I}_c – Fator Corrente Elétrica de Perdas no Núcleo [A];
- \dot{I}_m – Fator Corrente Elétrica de Magnetização [A];
- \dot{I}_{ϕ} – Fator Corrente Elétrica de Excitação [A];
- g_c – Condutância das Perdas no Núcleo [μS];
- P_{Cu} – Perdas de Consumo no Cobre [W];

- r_{AT} – Resistência do Enrolamento de Alta Tensão [Ω];
- r_{BT} – Resistência do Enrolamento de Baixa Tensão [Ω];
- r'_{BT} – Resistência do Enrolamento de Baixa Tensão Referida ao Lado AT [Ω];
- \dot{V}_{jAT} – Fator Tensão Elétrica Eficaz de Fase do Enrolamento de Alta Tensão [V];
- \dot{V}'_{jBT} – Fator Tensão Elétrica Eficaz de Fase do Lado BT Referido ao Lado AT [V]
- x_{AT} – Reatância do Enrolamento de Alta Tensão [Ω];
- x'_{BT} – Reatância do Enrolamento de Baixa Tensão Referida ao Lado AT [Ω];
- Z_C – Impedância da Carga Referida ao Lado AT [Ω].

Já as perdas no núcleo, também referidas como perdas no ferro em núcleos ferrosos, são obtidas, por serem independentes da carga em geral, a partir das perdas específicas do material, as quais são encontradas em tabelas, que, por sua vez, são elaboradas através de experimentos de caracterização de chapas. Para esta dissertação, a lâmina considerada foi uma comercial, M-6 de 0,35 mm, cuja indução magnética de 1,5 T de valor de pico, padronizada na caracterização, resulta numa perda específica inicial (ω_{0Fe}) de 1,34 W/kg numa rede de 60 Hz de frequência. Para outros valores de indução magnética, utiliza-se a relação de conversão apresentada na equação (3.29), onde ω_{Fe} são as perdas específica no ferro e B_0 a indução de referência.

Por fim, as perdas no núcleo são estimadas em ensaios de circuito aberto, com tensão nominal, conforme a equação (3.30) (ALVES, 2016; KULKARNI; KHAPARDE, 2004; MARTIGNONI, 1973) e são modeladas, no circuito elétrico equivalente de uma das fases do transformador, por uma condutância g_c , cujo valor pode ser obtido pela equação (3.31).

$$\omega_{Fe} = \omega_{0Fe} \left(\frac{B_M}{B_0} \right)^2 \quad (3.29)$$

$$P_{Fe} = \omega_{Fe} m_{Fe} \quad (3.30)$$

$$g_c = \frac{P_{Fe}}{3V_{jAT}^2} \quad (3.31)$$

Devido às condições de baixa corrente, em relação à nominal, no ensaio de circuito aberto, as perdas no cobre são negligenciadas. Então todas as perdas podem ser simplificadas como ocorrendo somente no núcleo de modo que a queda de tensão no enrolamento pode ser

desprezada na equação (3.31). Quanto à origem, as perdas no núcleo podem ser subdivididas em três (BASTOS, 2012): as por correntes de Foucault, ocasionadas pelas correntes induzidas pelo campo magnético na chapa ferromagnética; as de histerese, por consequência das propriedades eletromagnéticas do material e as anômalas ou excedentes, de origem ainda em estudo. Embora existam maneiras de calcular as duas primeiras subdivisões, não será desenvolvido o raciocínio do cálculo delas nesta dissertação, porque a equação utilizada para determinar as perdas no ferro é a (3.30), que considerada propriedades específicas, obtidas de ensaios, das lâminas que compõem o núcleo do transformador.

Além das perdas no ferro, o núcleo magnético lida com potência reativa, modelada em circuitos elétricos através da susceptância magnetizante, que é o inverso da reatância magnetizante, definida como o produto entre a frequência angular (ω), em radianos por segundo, da corrente magnetizante e a indutância magnetizante (L_m). O valor dessa indutância magnetizante pode ser determinado analiticamente por meio do cálculo da relutância equivalente do circuito magnético. Nesse cálculo, apenas o fenômeno da magnetização é considerado, ou seja, desconsideram-se outros efeitos, como as dispersões. Ademais, o valor da relutância equivalente varia segundo a referência utilizada no circuito. Independentemente disso, destaca-se que essa grandeza é configurada pelas relutâncias das colunas e das travessas do circuito magnético, todas em função dos parâmetros geométricos e magnéticos projetados para o núcleo.

Neste caso, as equações (3.32), (3.33) e (3.34), adaptadas da dissertação de (RIES, 2013), adotam como referência a coluna central. Destaca-se que a relutância equivalente da equação (3.34) é obtida do mesmo modo que uma impedância equivalente de Thévenin seria calculada caso o circuito magnético da Figura 3.3 em análise fosse elétrico. Sobre o circuito dessa figura, refere-se a um núcleo de um transformador trifásico com três colunas e duas travessas.

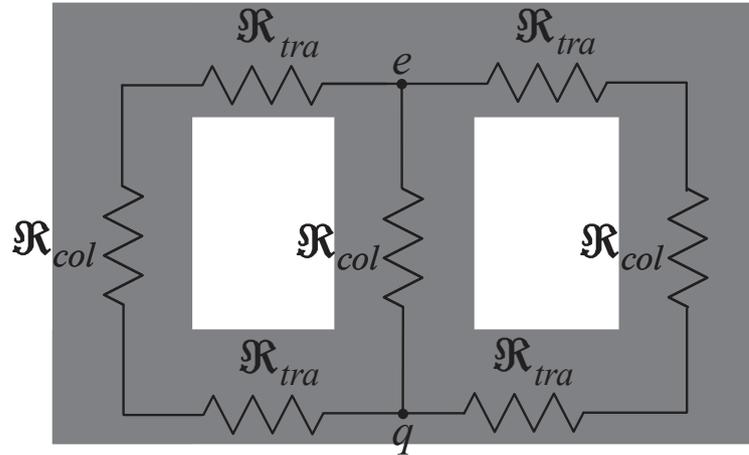
$$\mathfrak{R}_{col} = \frac{2e_{ATexmin} + 0,5(h_{AT} + h_{BT}) + D_C}{A_m \mu_0 \mu_r(H)} \quad (3.32)$$

$$\mathfrak{R}_{tra} = \frac{2(e_{cBT} + l_{BT} + e_{BTAT} + l_{AT} + e_{ATex}) + D_C}{A_m \mu_0 \mu_r(H)} \quad (3.33)$$

$$\mathfrak{R}_{eq} = \mathfrak{R}_{col} + \frac{2\mathfrak{R}_{col} + \mathfrak{R}_{tra}}{2} \quad (3.34)$$

Figura 3.3: Representação do circuito magnético de um núcleo trifásico, com três colunas e duas travessas, para a obtenção da relutância equivalente entre os nós e e q . A representação faz analogia com a obtenção da impedância equivalente de Thévenin em circuitos elétricos.

Por isso, as forças magneto-motrizes são omitidas.



Onde:

- h_{AT} – Altura do Enrolamento de Alta Tensão [mm];
- h_{BT} – Altura do Enrolamento de Baixa Tensão [mm];
- \mathfrak{R}_{col} – Relutância Magnética em uma Coluna do Núcleo [A.esp/Wb];
- \mathfrak{R}_{eq} – Relutância Magnética Equivalente [A.esp/Wb];
- \mathfrak{R}_{tra} – Relutância Magnética em uma Secção de Travessa do Núcleo [A.esp/Wb];
- $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m – Permeabilidade Magnética do Vácuo ou do Ar;
- $\mu_r(H)$ – Permeabilidade Magnética Relativa em função do Módulo do Campo Magnético (H).

Por fim, define-se a indutância (L_m) e a susceptância magnetizantes (b_m) nas equações (3.35) e (3.36) – em que a condutância das perdas no núcleo (g_c) é desprezada nelas por ser muito pequena – a partir da Lei de Ampère e do conceito de indutância.

$$L_m = \frac{N_{AT}^2}{\mathfrak{R}_{eq}} \quad (3.35)$$

$$b_m = \frac{1}{\omega L_m} \quad (3.36)$$

Por fim, embora não seja considerada perda devido à natureza reativa, a dispersão é um fenômeno impactante em projetos de transformadores, porque, além de estar associada à fuga de fluxo magnético dos enrolamentos, pode gerar correntes parasitas, as quais se traduzem

em perdas neles, o que resulta em queda de tensão, mas também gerar perdas nos elementos estruturais se não forem devidamente projetados (KASSICK, 2008). O fenômeno da dispersão acontece devido à fuga de fluxo magnético do núcleo para o dielétrico na região dos enrolamentos, onde o fluxo é dito concatenado e é definido como a multiplicação entre o número de espiras de um enrolamento pelo fluxo resultante neste ramo do circuito magnético. A dispersão ocorre, porque o campo magnético precisa percorrer um caminho fechado rotacionando os condutores por onde flui a corrente que deu origem ao campo.

A reatância de dispersão provém do produto da frequência angular da rede pela indutância de dispersão, a qual depende da geometria e da disposição dos enrolamentos. Devido a isso, diversos métodos de cálculo para esse parâmetro foram desenvolvidos; alguns analíticos, como os métodos: das imagens, de Rabin e de Roth; outros com o uso de elementos finitos (ALVES, 2016; KULKARNI; KHAPARDE, 2004). Analiticamente, também existem métodos genéricos, os quais partem do conceito de indutância e o misturam com o conceito de energia magnética concatenada e a Lei de Ampère, apresentados detalhadamente em (BASTOS, 2012; SADOWSKI, 2012), a fim de obter o valor da indutância de dispersão exclusivamente por parâmetros geométricos dos enrolamentos (ALVES, 2016; DEL VECCHIO; FEGHALI; AHUJA, 2010; KULKARNI; KHAPARDE, 2004; MARTIGNONI, 1973).

Como existem tipos diferentes de disposição de enrolamentos, esta dissertação se limita a apresentar as equações finais das resistências nos enrolamentos e das reatâncias de dispersão em função da geometria utilizada entre (3.37) e (3.43). Todas elas foram utilizadas para dimensionar os transformadores no algoritmo genético.

$$X_{eq_AT} = \omega L_{eq_AT} = 2\pi f L_{eq_AT}$$

$$X_{eq_AT} = 2\pi f \frac{\mu_0 N_{AT}^2 k l_{Cu} (e_{BTAT} + \frac{l_{AT} + l_{BT}}{3})}{0,5(h_{AT} + h_{BT})} \quad (3.37)$$

$$X_{eq_AT} = 4\pi f \frac{\mu_0 N_{AT}^2 k l_{Cu} (e_{BTAT} + \frac{l_{AT} + l_{BT}}{3})}{h_{AT} + h_{BT}}$$

$$r_{BT} = \frac{\rho_{Cu} l_{BTesp}}{A_{BT}} \quad (3.38)$$

$$r'_{BT} = n^2 r_{BT} \quad (3.39)$$

$$r_{AT} = \frac{\rho_{Cu} l_{ATesp}}{A_{AT}} \quad (3.40)$$

$$R_{eq_AT} = r_{AT} + r'_{BT} \quad (3.41)$$

$$x'_{BT} = n^2 x_{BT} \quad (3.42)$$

$$X_{eq_AT} = x_{AT} + x'_{BT} \quad (3.43)$$

Onde:

$$k = 1 - \frac{1}{2\pi} \left[\frac{2e_{BTAT} + l_{AT} + l_{BT}}{0,5(h_{AT} + h_{BT})} \right] = 1 - \frac{1}{\pi} \left[\frac{2e_{BTAT} + l_{AT} + l_{BT}}{h_{AT} + h_{BT}} \right]$$

- k – Fator de Rogowski, cujo valor é válido para a geometria apresentada
- L_{eq_AT} – Indutância Equivalente Vista do Lado de Alta Tensão [H];
- n – Relação de Transformação;
- X_{eq_AT} – Reatância Equivalente Vista do Lado de Alta Tensão [Ω];
- x_{BT} – Reatância do Enrolamento de Baixa Tensão [Ω];
- $\rho_{Cu} = 0,0216 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ – Resistividade do Cobre Recozido a 75°C;

É importante ressaltar que as equações (3.41) e (3.43) não consideram o ramo do núcleo do circuito equivalente (Figura 3.2) e são válidas para transformadores em geral. Além disso, ressalta-se que cálculos para outras disposições e geometrias de enrolamentos podem ser encontrados em (ALVES, 2016), (DEL VECCHIO; FEGHALI; AHUJA, 2010), (MARTIGNONI, 1973) e (KULKARNI; KHAPARDE, 2004). Neste último, pode-se contemplar o desenvolvimento dos cálculos desde o princípio.

3.4.2 Considerações sobre harmônicas e correntes parasitas no cobre

Ainda que alimentados com sinais sinusoidais puros, devido às não-linearidades do núcleo magnético, os transformadores podem ser fontes de harmônicas nos sinais elétricos. Foi tentado, nesta pesquisa, considerar um modelo de perdas devido ao conteúdo harmônico nesses dispositivos eletromagnéticos. Contudo, ainda há estudos em desenvolvimento para calculá-las analiticamente de modo que é difícil determiná-las em transformadores, até mesmo por elementos finitos (BARG et al., 2017) ou por meio de fórmulas empíricas (KASSICK, 2008), provenientes de estudos até mais específicos, com materiais ferromagnéticos (BATISTELA,

2001). Ao leitor interessado no tema, informa-se que uma revisão literária sobre harmônicas em transformadores de potência foi realizada e encontra-se disponível no Apêndice C. Além do que, esta pesquisa de mestrado não contempla parte experimental para medir o conteúdo harmônico e, assim, poder aplicar as fórmulas da norma (ANSI; IEEE, 1988) ao menos aos transformadores de potência analisados. Portanto, o algoritmo genético multiobjetivo implementado nesta dissertação não considera o efeito das harmônicas.

Todavia, de (ANSI; IEEE, 1988; KASSICK, 2008), foi possível encontrar uma maneira de estimar as perdas devido às correntes parasitas da componente fundamental no cobre e integrá-la ao AGMULTI para os transformadores de distribuição. Neste caso, adota-se o incremento de 0,01 pu nas perdas devido às correntes parasitas no cobre em transformadores a óleo com potência aparente menor que 2,5 MVA e tensão nominal de linha do enrolamento BT menor ou igual a 480 V. Essa tabela provém da Tabela 8-I de (KASSICK, 2008), o qual, por sua vez, adaptou-a de (DIAS, 1998), e se encontra disponível na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Valores típicos de $P_{EC-R(pu)}$ para transformadores de potência.

Tipo	Potência Aparente [MVA]	Tensão	$P_{EC-R(pu)}$
Seco	$S < 1$	AT: 5 kV	0,03 a 0,08
Seco	$S > 1,5$	AT: 5 kV	0,12 a 0,20
Seco	$S < 1,5$	AT: 15 kV	0,09 a 0,15
Óleo	$S < 2,5$	BT: 480 V	0,01
Óleo	$2,5 \leq S \leq 5$	BT: 480 V	0,01 a 0,05
Óleo	$S > 5$	BT: 480 V	0,09 a 0,15

Fonte: Adaptado de (DIAS, 1998; KASSICK, 2008)

Portanto, o rendimento (η) dos transformadores é dado pela equação (3.44), tal que P é a potência de saída e P_{EC-R} as perdas devido às correntes parasitas nos condutores, de cobre para esta pesquisa.

$$\eta = \frac{P}{P + P_{Fe} + P_{Cu} + P_{EC-R}} \quad (3.44)$$

Para os transformadores de distribuição: $P_{EC-R} = 0,01P_{Cu}$. Para os demais dispositivos, o valor dessa grandeza é zero.

A depender da quantidade de perdas, pode ser necessário que o dispositivo precise ser refrigerado. Além disso, a depender do tipo do transformador, as técnicas de refrigeração mudam. Por isso, o resfriamento de transformadores é brevemente discutido no Apêndice D. No entanto, nesta pesquisa, essas técnicas não são empregadas, isto é, supõem-se que a condução e a convecção natural, as formas de transferência de calor dos transformadores analisados, garantem a refrigeração desses dispositivos sem ocasionar danos.

3.5 AJUSTES NO EQUACIONAMENTO DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Por serem alimentados com apenas uma fase da rede elétrica, algumas fórmulas apresentadas nas seções anteriores, referentes aos transformadores trifásicos, precisam ser ajustadas à situação dos monofásicos. Ademais, serão retratados os monofásicos com núcleo de formato retangular. Portanto, esta seção possui o objetivo de indicar esses ajustes e relacioná-los com a causa, seja a geométrica ou seja a elétrica, a fim de poderem ser utilizados pelo algoritmo genético multiobjetivo desenvolvido na otimização do transformador monofásico o qual será introduzido no capítulo 4 juntos aos demais dispositivos, trifásicos.

3.5.1 Alterações devido à geometria

A mudança da geometria do núcleo do formato circular para o retangular acarreta mudanças no cálculo de diversas grandezas, porque o diâmetro das colunas (D_C) é substituído pelo comprimento (c) e profundidade (p) dessas pernas. Com efeito prático no AGMULTI, destacam-se as seguintes: a área geométrica (eq. 3.4) e, por conseguinte, a área magnética (eq. 3.3) e a massa do ferro (eq. 3.11); comprimento médio de uma espira (l_{Cu} – equações (3.20) e (3.21)) e massa do cobre (eq. 3.26). Todas essas expressões são reescritas a seguir, entre (3.45) e (3.49) para o transformador monofásico analisado de (MARTIGNONI, 1973).

$$A_g = 2cp \quad (3.45)$$

$$A_m = K_f A_g = 2K_f cp \quad (3.46)$$

$$m_{Fe} = w_{Fe} A_m (2hw + 2bw + 4c) \quad (3.47)$$

$$l_{Cu} = 4c + 2p + \pi bw \quad (3.48)$$

$$m_{Cu} = w_{Cu} l_{Cu} (N_{AT} A_{AT} + N_{BT} A_{BT}) 10^{-6} \quad (3.49)$$

3.5.2 Alterações devido à redução de fases elétricas

No que tange às alterações elétricas, sobretudo à redução de três para uma fase apenas, salienta-se que todas as grandezas de linha ou de fase agora são apenas valores eficazes, o que implica na alteração da equação (3.12) para a (3.50), referente ao cálculo da potência aparente em função dos valores eficazes de tensão (V) e de corrente (I), e da equação (3.28), sobre as perdas no cobre. Ainda sobre esta última expressão, (MARTIGNONI, 1973) apresenta uma fórmula alternativa, a (3.52), sem depender das resistências dos enrolamentos, apenas das perdas específicas do cobre, calculadas pela equação (3.51), em função da resistividade e da massa específica do condutor além da densidade de corrente, a qual agora não é corrigida de acordo com o nível de tensão dos enrolamentos, tal como ocorre nas equações (3.13) e (3.15). Portanto, as equações (3.50), (3.51) e (3.52) ficam conforme mostrado em seguida.

$$S = VI \quad (3.50)$$

$$\omega_{Cu} = \frac{\rho_{Cu}}{w_{Cu}} J^2 10^6 \quad (3.51)$$

$$P_{Cu} = \omega_{Cu} m_{Cu} \quad (3.52)$$

Por fim, reforça-se que as equações (3.51) e (3.52) poderiam ser utilizadas para determinar as perdas de condução no cobre de qualquer transformador, independentemente do número de fases, geometria do núcleo ou tipo dos enrolamentos. No entanto, para os dispositivos trifásicos, preferiu-se fazer uso da equação (3.28).

4 TRANSFORMADORES ANALISADOS E METODOLOGIA DA OTIMIZAÇÃO

Neste trabalho foi desenvolvido um algoritmo genético multiobjetivo com a finalidade de otimizar transformadores de diferentes potências. O problema consiste em duas funções objetivos, as quais são, inicialmente, a minimização da massa e a maximização do rendimento do dispositivo. Outras configurações testadas para otimizar transformadores foram: a minimização do custo de fabricação e maximização do rendimento; a minimização da massa e do custo de fabricação; e a minimização da massa e do custo total.

Este capítulo, portanto, divide-se em cinco tópicos. O primeiro busca elucidar alguns aspectos pertinentes aos custos desses dispositivos. O segundo apresenta o projeto do transformador e a escolha desse e de outros para a otimização multiobjetivo. Já o terceiro introduz o AG desenvolvido, as funções objetivo da aplicação nos referidos dispositivos eletromagnéticos e, devido às especificidades, elucida melhor alguns conceitos do capítulo 2. Por fim, enquanto o quarto tópico revisa os indicadores de performance de AGs multiobjetivos para introduzir o utilizado nesta dissertação, o quinto explica como funciona a metodologia utilizada para a validação tanto do algoritmo quanto dos resultados obtidos com os dispositivos eletromagnéticos empregados na dissertação.

4.1 ASPECTOS ECONÔMICOS

Uma preocupação extra dos engenheiros industriais é em relação aos custos para fabricar e vender os transformadores mais os necessários para mantê-los em operação, os quais estão relacionados com as manutenções e, sobretudo, as perdas anuais. Em virtude disso, alguns modelos econômicos foram desenvolvidos. Alguns, mais simples, consideram o custo total sobre a vida útil como a soma dos custos de fabricação mais as perdas no cobre com carga nominal mais as perdas a vazio (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014; MARTÍN et al., 1969; RIES, 2013). Outros, mais detalhistas, consideram, além disso, as dimensões do núcleo e dos enrolamentos somados às reatâncias (MARTÍN, 1978) ou, ainda, o montante salvo pelas perdas reduzidas, a redução do custo de manutenção, o custo de remoção e substituição de transformadores antigos, o valor da venda da reciclagem desses dispositivos, risco de falhas, redução de consumo, eliminação das despesas de capital e da sobrecarga de trabalho para manter níveis adequados de fornecimento de energia (RIES, 2013).

Para esta pesquisa, será utilizado o modelo mais simples, o qual coincide com as exigências do Apêndice F da NBR 5440, que não considera os custo de manutenção e suas consequências (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) no cálculo final, e que foi utilizado em outra dissertação de mestrado defendida no GRUCAD em 2013 (RIES, 2013). Antes de entrar em detalhes acerca desse modelo econômico, é importante afirmar que ele é válido para transformadores de distribuição e considera que as perdas dele, sujeito a diferentes situações de carregamento, em operação vinte e quatro horas por dia nos sete dias da semana durante a sua vida útil, geram custos (RIES, 2013). Segundo esse modelo econômico, o custo de fabricação (C_{fab}) é dado pela equação 4.1.

$$C_{fab} = C_{fix} + Cu_s + Fe_s \quad (4.1)$$

Tal que o custo fixo (C_{fix}) é uma constante, porém é atualizado de tempos em tempos; varia conforme o modelo e o fabricante, pois considera a mão-de-obra e o lucro com a venda; será considerado nulo nesta pesquisa. Portanto, o transformador é simulado com preço de custo, porém sem considerar os gastos com os elementos auxiliares e o óleo. Ademais, os custos com o cobre (Cu_s) e com o ferro (Fe_s) são fornecidos pelas equações 4.2 e 4.3 respectivamente.

$$Cu_s = Cot_{Cu} m_{Cu} \quad (4.2)$$

$$Fe_s = Cot_{Fe} m_{Fe} \quad (4.3)$$

A cotação dos metais (Cot_{Cu} e Cot_{Fe}) é feita no site *Daily Metal Prices*³. Além disso, como o preço deles varia em função do tempo, foi feito uma estimativa de preços com base no valor médio das cotações em um intervalo de um ano (agosto de 2019 a julho de 2020), o que resultou em US\$0,10 para o quilograma de ferro e US\$6,00 para o de cobre. Por fim, com a finalidade de evitar flutuações no câmbio, esses valores, que já variam na moeda estadunidense, não foram convertidos para o real. Quanto ao custo total sobre a vida útil ou de capitalização (C_{tot}), é calculado de acordo com a equação (4.4).

$$C_{tot} = C_{fab} + C_{PCu} + C_{PFe} \quad (4.4)$$

Tal que os C_{PCu} e C_{PFe} representam os custos devido às perdas no cobre e no ferro na condição de carga nominal respectivamente; dependem da vida útil (u) do dispositivo, que pode variar de 25 a 50 anos (DEL VECCHIO; FEGHALI; AHUJA, 2010), mas que será considerada

³ <https://www.dailymetalprice.com/metalpricecharts.php>. Acesso em: 30/07/2020.

igual a trinta anos em todos os estudos; do preço da energia elétrica (C_{kWh}), expresso em US\$/kWh e que varia conforme o tempo e a concessionária (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014; RIES, 2013), e da taxa de juros (i) sobre esse montante, considerada 5 % a.a. Os valores desses dois custos são calculados conforme às equações (4.5) e (4.6), usadas por (RIES, 2013) alternativamente à (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) ao considerar o custo durante todos anos de 8760 horas da vida útil do transformador com 20% desse tempo em carga nominal.

$$C_{PCu} = 0,2(8760P_{Cu}C_{kWh}) \sum_{k=1}^u \frac{1}{(1+i)^k} \quad (4.5)$$

$$C_{PFe} = 8760P_{Fe}C_{kWh} \sum_{k=1}^u \frac{1}{(1+i)^k} \quad (4.6)$$

Sobre o preço da energia, será adotado como critério, nesta otimização, o valor da tarifa convencional residencial normal da CELESC descontados os tributos do ano base de 2019 (CELESC, 2019) a um câmbio de R\$5,30 para US\$1,00, o que resulta em $C_{kWh} = 0,46978$ R\$/kWh = 0,08864 US\$/kWh. Portanto, determinar os custos de fabricação e de capitalização são etapas tão importantes quanto o rendimento e a massa total para vender o produto.

4.2 PROJETO E ESCOLHA DOS TRANSFORMADORES

Para esta pesquisa de dissertação de mestrado, é projetado um transformador trifásico de distribuição com ligação $\Delta - Y$ com núcleo envolvido, de dois enrolamentos de cobre concêntricos, isolado a óleo. A potência aparente escolhida foi de 300 kVA, a frequência da rede de 60 Hz, coeficiente de enchimento igual a 0,87, densidade de corrente no cobre suposta constante em 2,6 A/mm² e a relação de tensão de 13,8 kV/380 V em valores eficazes de linha, o que possibilita o seu uso nas redes de distribuição do território catarinense. O primário desse enrolamento é escolhido com a conexão delta, porque age como um filtro natural de harmônicas ímpares de corrente de múltiplo três, de modo que essas não saiam do enrolamento em delta e atinjam outros componentes do sistema (KASSICK, 2008). Recorda-se que a maior parte das harmônicas são originadas de cargas não-lineares, as quais, em grande parte, são eletrônicas, mas também podem ser: motores, lâmpadas, indutores não lineares e outros dispositivos eletromagnéticos (KASSICK, 2008). Além disso, para determinar a bitola do fio do enrolamento primário, é necessário aplicar as equações (3.12), (3.15) e (3.16), referentes ao

cálculo da corrente de linha, do ajuste da densidade de corrente no lado AT e da área da bitola do lado AT respectivamente. Com isso, obtém-se uma seção de $5,0 \text{ mm}^2$, o que permitiria a fabricação do enrolamento AT com fio de bitola padrão AWG 10, de seção um pouco maior, $5,261 \text{ mm}^2$ segundo a Tabela E.26, a qual é apresentada no Anexo E.

Ademais, o secundário desses transformadores é determinado como conectado em Y com a finalidade de facilitar a conexão entre eles e as instalações elétricas residenciais. Além do que, como a aplicação das equações (3.12), (3.13) e (3.14) resultou em uma área de 167 mm^2 , não é possível fabricar o enrolamento BT de acordo com o padrão AWG (Tabela E.26 do Anexo E). Então foi optado fabricar esse enrolamento com dois blocos retangulares de cobre, cuja área total deve ser sempre um pouco maior que a calculada, com medidas iniciais de 3,3 mm na vertical e 25,64 mm por bloco, mas que variam na otimização. Esses dois blocos estão em paralelo, separados por 0,2 mm de material isolante e com isolamento de 0,1 mm com o exterior. Por fim, todas as colunas do núcleo são construídas com as mesmas dimensões a fim de que a indução máxima seja maior na do meio.

Além disso, preferiu-se esse modelo, representado parcialmente pela Figura 4.1, com cortes na Figura 4.2, ao invés de um banco de transformadores trifásicos, porque geralmente é mais barato e usual (MARTIGNONI, 1973). Salienta-se que, neste transformador, mas também nos seguintes, o efeito pelicular é desprezado no dimensionamento dos enrolamentos, porque as consequências desse efeito são menos perceptíveis em baixas frequências. Ademais, esta pesquisa não considera as estruturas metálicas nem o tanque, em que esse efeito seria relevante no cálculo de perdas oriundas de correntes parasitas geradas por consequência da Lei de Ampère mesmo nessas frequências (BASTOS, 2012).

Figura 4.1: Um projeto do transformador de distribuição trifásico de núcleo envolvido. Somente o núcleo envolvido e os enrolamentos concêntricos sem os diafragmas estão representados. O AT, composto por três bobinas em série, é externo ao BT.

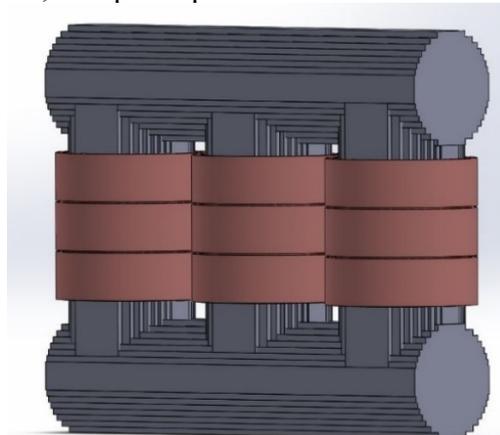
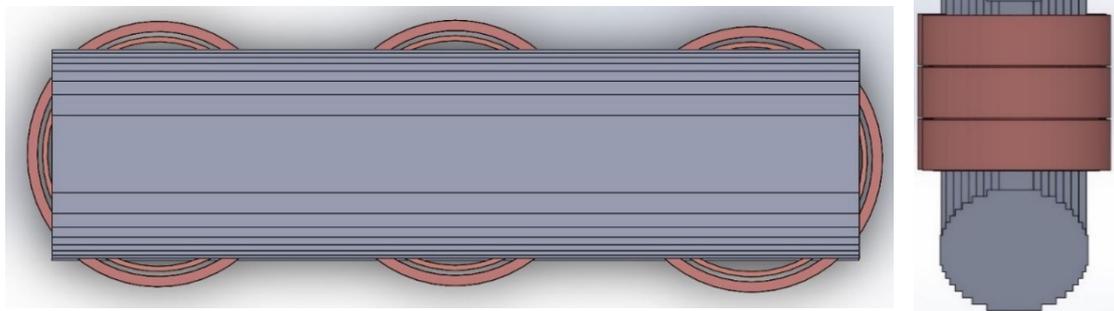


Figura 4.2: Cortes do transformador projetado (Figura 4.1): vista superior (abaixo) e lateral (direita).



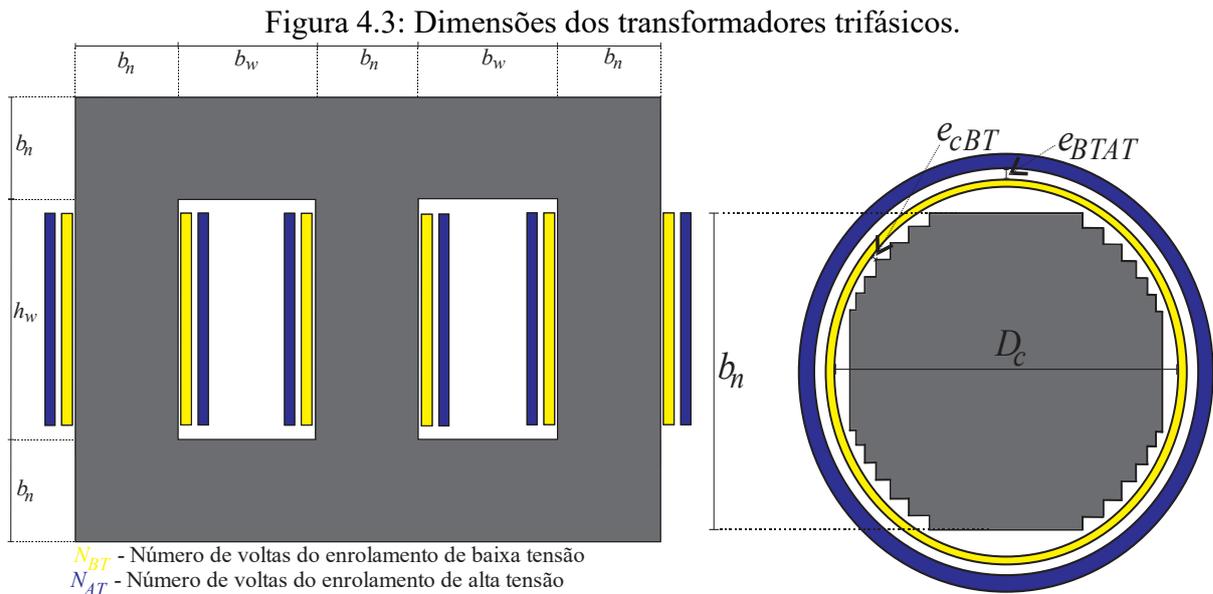
Além desse transformador, foram estudados outros três projetos, prontos, de (MARTIGNONI, 1973). O primeiro deles também é de um transformador trifásico de distribuição com as mesmas características construtivas do anterior além da mesma frequência da rede e coeficiente e enchimento, porém com conexão Y–Y, 30 kVA de potência aparente e relação de tensão de 12 kV/220 V em valores eficazes de linha. Ao seguir o procedimento descrito no dispositivo anterior para determinar o cobre dos enrolamentos, (MARTIGNONI, 1973) decidiu confeccionar o lado AT com fio de bitola AWG 19, pois a área calculada de 6,58 mm² é muito próxima dos 6,53 mm² informados na Tabela E.26. Ademais, o engenheiro citado optou por fabricar os blocos do enrolamento BT com área superior aos 32,6 mm² calculados.

Quanto ao segundo, também é trifásico, mas não de distribuição. É projetado com coeficiente de enchimento igual a 0,92 e para operar em redes elétricas de 50 Hz de frequência, com 2 kVA de potência e conexões Δ -Y nos enrolamentos de alta e baixa tensão (380 V/127 V) com bitolas AWG 16 e AWG 14 respectivamente, determinadas de acordo com os mesmos procedimentos citados para os dispositivos de 300 kVA e 30 kVA.

Já o terceiro é de um transformador a seco, com núcleo retangular, de baixa potência (300 VA), $f = 50$ Hz, coeficiente de enchimento igual a 0,95 e 120V/220V de relação de transformação e bitolas AWG 18 e AWG 20 nos enrolamentos de baixa e alta tensão respectivamente. Novamente, as bitolas foram escolhidas com base nos cálculos das seções BT e AT, os quais foram utilizados nos demais dispositivos eletromagnéticos. Esse transformador foi otimizado na pesquisa do AGMONO, que foi desenvolvido pelo GRUCAD e que uma das aplicações foi publicada em (LEITE et al., 2004). Por fim, reforça-se que, em todos os dispositivos, os fatores de potências assumem o valor unitário e seus enrolamentos são projetados com cobre afim de simplificar as análises porvindouras.

4.3 O ALGORITMO GENÉTICO DESENVOLVIDO

Neste algoritmo genético de otimização multiobjetivo (AGMULTI), desenvolvido em MATLAB 2013a para Windows e simulado sempre em um computador com processador *Intel Core i5-6200U*, 2,3-2,4 GHz e 12 GHz de memória RAM (do inglês, *Random Access Memory*), N indivíduos com m parâmetros são gerados, tal que N e m são números naturais, de maneira que N pares de valores das funções objetivos, as quais são sempre duas para esta pesquisa, são calculadas por uma função computacional de recorrência. No caso aplicado aos transformadores trifásicos, devido ao formato arredondado do núcleo, são utilizados cinco parâmetros, ilustrados na Figura 4.3 e nesta ordem nos resultados: diâmetro da coluna (D_c), altura da janela (hw), largura da janela (bw), indução máxima permitida no núcleo (B_M) e densidade de corrente (J).



Os valores limites para cada restrição em cada transformador são os seguintes:

S = 300 kVA	S = 30 kVA	S = 2 kVA
$D_c \in [195; 246]$ mm	$D_c \in [100; 250]$ mm	$D_c \in [30; 100]$ mm
$hw \in [482; 563]$ mm	$hw \in [200; 300]$ mm	$hw \in [80; 300]$ mm
$bw \in [145; 200]$ mm	$bw \in [100; 150]$ mm	$bw \in [24; 100]$ mm
$B_M \in [1,1; 1,5]$ T.	$B_M \in [1,1; 1,5]$ T.	$B_M \in [1,0; 1,5]$ T.
$J \in [2,6]$ A/mm ² .	$J \in [2,3]$ A/mm ² .	$J \in [2,5]$ A/mm ² .

Os limites desses parâmetros são estimados pelas equações (3.6) e (3.7) do capítulo 3, mas também pela expressão (E.1) do Apêndice E, onde a escolha desses valores é melhor justificada. Ademais, observa-se que a grandeza densidade de corrente é imposta com o valor constante de projeto de $2,6 \text{ A/mm}^2$ para $S = 300 \text{ kVA}$, $J = 2,3 \text{ A/mm}^2$ para $S = 30 \text{ kVA}$ e $J = 2,5 \text{ A/mm}^2$ para $S = 2 \text{ kVA}$, de tal maneira que não é afetada pelos operadores genéticos e, portanto, mantém-se inalterável para todos os indivíduos de todas as gerações. Também se menciona que foi decidido alterar o limite inferior da B_M do dispositivo de 2 kVA para $1,0 \text{ T}$ por conveniência. A largura da janela é sempre aproximada ao inteiro múltiplo de cinco mais próximo no decorrer do processo. As demais grandezas podem assumir quaisquer valores desde que dentro dos respectivos limites impostos. Em todos os casos analisados até então, foram utilizados mil indivíduos, vinte gerações e trinta rodadas com base em trabalhos prévios sobre otimização de transformadores (AYALA et al., 2015, 2016; COELHO et al., 2013a, 2018a; LEITE et al., 2004; TSILI et al., 2018). Testes serão feitos no capítulo 6 com a finalidade de determinar se esses números são adequados, ruins ou se há melhores possibilidades.

Ademais, as funções objetivo são otimizadas simultaneamente em pares e correspondem à: minimização da massa total do dispositivo (eq. 4.7), a qual provém diretamente da equação (3.27) e indiretamente entre as expressões (3.20) e (3.26) além da (3.11); maximização do rendimento (eq. 4.8), expressão oriunda da expressão (3.44) e de diversas equações do capítulo anterior, com destaque às de numeração (3.29), (3.30), (3.31), (3.11), (3.38), (3.40), (3.20), (3.21) e as situadas entre (3.13) e (3.16); minimização do custo de fabricação (eq. 4.9), proveniente da equação (4.1) e das expressões (4.2), (4.3) além de outras já citadas; e minimização do custo total (eq. 4.10), oriunda da equação (4.4) e das expressões (4.5), (4.6), entre outras já mencionadas. Portanto, ao juntar às equações principais em função dos parâmetros, disponíveis diretamente nas expressões secundárias, AGMULTI trabalha na otimização das seguintes funções de custo tal que a última delas é válida apenas para os transformadores de distribuição e J_0 é o valor da densidade de corrente, o qual é suposto constante, porém assume valores diferentes a depender do dispositivo eletromagnético.

Minimização da massa total:

$$\begin{aligned}
 \min m_T &= m_{Fe} + m_{Cu} \\
 &= w_{Fe} K_f \pi \frac{D_c^2}{4} (3hw + 4bw + 6\sqrt{K_f} D_c) \\
 &+ 6\pi w_{Cu} \left[\frac{f_c I_{AT}}{J} N_{AT} \left(\frac{\sqrt{K_f} D_c}{2} + e_{cBT} + l_{BT} + e_{BTAT} + \frac{l_{AT}}{2} \right) + \frac{I_{BT}}{f_c J} N_{BT} \left(\frac{\sqrt{K_f} D_c}{2} + e_{cBT} + \frac{l_{BT}}{2} \right) \right] \\
 \text{Sujeito a: } &\begin{cases} D_{C \min} \leq D_C \leq D_{C \max} \\ hw_{\min} \leq hw \leq hw_{\max} \\ bw_{\min} \leq bw \leq bw_{\max} \\ B_{M \min} \leq B_M \leq B_{M \max} \\ J = J_0 \end{cases} \tag{4.7}
 \end{aligned}$$

Maximização do rendimento:

$$\begin{aligned}
 \max \eta &= \frac{P}{P + P_{Fe} + P_{Cu} + P_{EC-R}} \\
 &= \frac{P}{P + \omega_0 w_{Fe} \left(\frac{B_M}{B_0} \right)^2 w_{Fe} K_f \pi \frac{D_c^2}{4} (3hw + 4bw + 6\sqrt{K_f} D_c) + \dots} \\
 &\dots + 6y\pi\rho_{Cu} \left[\frac{J}{f_c} \left(\frac{\sqrt{K_f} D_c}{2} + e_{cBT} + l_{BT} + e_{BTAT} + \frac{l_{AT}}{2} \right) I_{AT} + Jf_c \left(\frac{\sqrt{K_f} D_c}{2} + e_{cBT} + \frac{l_{BT}}{2} \right) I_{BT} \right] \\
 \text{Sujeito a: } &\begin{cases} D_{C \min} \leq D_C \leq D_{C \max} \\ hw_{\min} \leq hw \leq hw_{\max} \\ bw_{\min} \leq bw \leq bw_{\max} \\ B_{M \min} \leq B_M \leq B_{M \max} \\ J = J_0 \\ y = 1,01 \text{ se o transformador for de distribuição, senão } y = 1 \end{cases} \tag{4.8}
 \end{aligned}$$

Minimização do custo de fabricação:

$$\begin{aligned}
 \min C_{fab} &= C_{fix} + Fe_s + Cu_s \\
 &= C_{fix} + Cot_{Fe} w_{Fe} K_f \pi \frac{D^2}{4} (3hw + 4bw + 6\sqrt{K_f} D_C) \\
 &\quad + 6\pi Cot_{Cu} w_{Cu} \left[\frac{f_c I_{AT}}{J} N_{AT} \left(\frac{\sqrt{K_f} D_C}{2} + e_{cBT} + l_{BT} + e_{BTAT} + \frac{l_{AT}}{2} \right) + \frac{I_{BT}}{f_c J} N_{BT} \left(\frac{\sqrt{K_f} D_C}{2} + e_{cBT} + \frac{l_{BT}}{2} \right) \right] \\
 \text{Sujeito a: } &\begin{cases} D_{C\min} \leq D_C \leq D_{C\max} \\ hw_{\min} \leq hw \leq hw_{\max} \\ bw_{\min} \leq bw \leq bw_{\max} \\ B_{M\min} \leq B_M \leq B_{M\max} \\ J = J_0 \end{cases} \tag{4.9}
 \end{aligned}$$

Minimização do custo total:

$$\begin{aligned}
 \min C_{tot} &= C_{fab} + C_{PFe} + C_{PCu} \\
 &= C_{fix} + 6\pi Cot_{Cu} w_{Cu} \left[\frac{f_c I_{AT}}{J} N_{AT} \left(\frac{\sqrt{K_f} D_C}{2} + e_{cBT} + l_{BT} + e_{BTAT} + \frac{l_{AT}}{2} \right) + \frac{I_{BT}}{f_c J} N_{BT} \left(\frac{\sqrt{K_f} D_C}{2} + e_{cBT} + \frac{l_{BT}}{2} \right) \right] \\
 &\quad + Cot_{Fe} w_{Fe} K_f \pi \frac{D^2}{4} (3hw + 4bw + 6\sqrt{K_f} D_C) + 8760 C_{kWh} \left\{ \omega_{0Fe} \left(\frac{B_M}{B_0} \right)^2 w_{Fe} K_f \pi \frac{D^2}{4} (3hw + 4bw + 6\sqrt{K_f} D_C) \right. \\
 &\quad \left. + 1,212\pi \rho_{Cu} \left[\frac{J}{f_c} \left(\frac{\sqrt{K_f} D_C}{2} + e_{cBT} + l_{BT} + e_{BTAT} + \frac{l_{AT}}{2} \right) I_{AT} + J f_c \left(\frac{\sqrt{K_f} D_C}{2} + e_{cBT} + \frac{l_{BT}}{2} \right) I_{BT} \right] \sum_{k=1}^u \frac{1}{(1+i)^k} \right\} \\
 \text{Sujeito a: } &\begin{cases} D_{C\min} \leq D_C \leq D_{C\max} \\ hw_{\min} \leq hw \leq hw_{\max} \\ bw_{\min} \leq bw \leq bw_{\max} \\ B_{M\min} \leq B_M \leq B_{M\max} \\ J = J_0 \end{cases} \tag{4.10}
 \end{aligned}$$

Além das restrições indicadas nas última quatro equações, deve-se atentar para outras três. Primeiro, a área da janela deve ser ao menos três vezes maior que a área ocupada pelos enrolamentos dentro dela (ALVES, 2016; DEL VECCHIO; FEGHALI; AHUJA, 2010; KULKARNI; KHAPARDE, 2004; MARTIGNONI, 1973; RIES, 2013). Segundo, as distâncias mínimas de isolamento entre os enrolamentos, dada pela equação (3.18), entre estes e o núcleo, equações (3.17) e (3.19), e entre dois enrolamentos AT consecutivos, expressão (3.19), devem

ser respeitadas (ALVES, 2016; MARTIGNONI, 1973; RIES, 2013). Terceiro, principalmente para o transformador de maior potência, a massa total do dispositivo deve ser menor ou igual a 1500 kg (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

Em relação aos algoritmos genéticos multiobjetivos desenvolvidos e aplicados ao projeto de transformador monofásico da página 87 de (MARTIGNONI, 1973) e comparado com os resultados de AGMONO, o qual foi cedido pelo professor Dr. Jean Viane Leite, orientador desta dissertação de mestrado, há duas mudanças nos parâmetros. Portanto, as equações que devem ser utilizadas são as indicadas na seção 3.5, onde melhores detalhes são fornecidos sobre o uso delas. Essas modificações ocorrem, porque o núcleo do transformador é de formato retangular, o que implica na substituição do diâmetro da coluna pelo seu comprimento (c) e pela sua profundidade (p); os demais parâmetros são mantidos. Quanto aos valores limites para cada restrição, são os seguintes:

$$\begin{array}{lll} c \in [1; 3] \text{ cm} & hw \in [10; 20] \text{ cm} & B_M \in [1,2; 1,3] \text{ T.} \\ p \in [1; 4] \text{ cm} & bw \in [1; 5] \text{ cm} & J \in [3] \text{ A/mm}^2. \end{array}$$

Dos limites desses parâmetros, observa-se que a grandeza densidade de corrente é imposta com o valor constante de projeto de 3 A/mm^2 , ou seja, não se aplicam os operadores genéticos a ela.

Em relação à população e ao número de gerações dos transformadores monofásicos, utilizaram-se as mesmas quantidades de AGMONO, isto é, 50 indivíduos em 35 iterações. Soma-se a esses parâmetros de controle também cem rodadas com a finalidade de escolher a fronteira de Pareto mais indicada, conforme a métrica a ser apresentada na seção 4.4. Quanto às funções otimizadas, são as mesmas do dispositivo de 2 kVA, ou seja, (4.7), (4.8) e (4.9). Contudo, apenas a primeira linha dessas equações é válida, por se tratar de um transformador monofásico retangular, o qual segue as equações modificadas na seção 3.5, e as restrições c e p são inseridas no lugar de D_C .

A respeito ao método de otimização utilizado dentro do algoritmo, utilizou-se o critério de Pareto. Então, os conceitos de dominância de Pareto são aplicados às funções objetivos de modo a produzir um conjunto de soluções ótimas. Cabe, então, ao engenheiro ou responsável escolher a solução mais conveniente para a aplicação desejada, a exemplo do que ocorre na manufatura de produtos industrializados.

4.3.1 O critério de Pareto

A maioria dos métodos de otimização multiobjetivo fazem uso do critério de Pareto (ÁVILA, 2006; BARBOSA, 2012), apresentada pelo economista, sociólogo e engenheiro ferroviário ítalo-francês Vilfredo Pareto em (PARETO, 1897). Essa abordagem, introduz os conceitos de dominância de Pareto, os quais são utilizados para dividir a população de problemas de otimização multiobjetivo entre indivíduos dominados e não-dominados de modo a determinar um conjunto de soluções ótimas, que compõe a curva ou fronteira de Pareto. Ademais, descontinuidades e não-convexidades não afetam os algoritmos que se baseiam no critério de Pareto. A curva pode ser contínua ou descontínua a depender da natureza matemática das funções objetivo e dos efeitos das restrições no espaço das funções. O mesmo pode ser afirmado sobre a convexidade, visto que funções convexas formam fronteiras convexas enquanto funções não-convexas produzem curvas de Pareto não-convexas (ÁVILA, 2006).

O critério de Pareto aplicado à otimização de duas funções objetivos, f_1 e f_2 , pode produzir um dos quatro casos: minimização simultânea das duas; maximização simultânea das duas; minimização da primeira e maximização da segunda ou maximização da primeira e minimização da segunda. Em todos eles, uma fronteira é gerada; contudo, a partir de definições matemáticas diferentes para os mesmos conceitos de dominância. Por isso, é necessário exaltar esses quatro casos e unificar tal conceito.

Portanto, a partir do conhecimento que a fronteira de Pareto é composta pelas soluções ótimas, tem-se nelas os indivíduos não-dominados. Ao escolher qualquer uma dessas soluções e definir um vetor gradiente com origem no mesmo ponto dela, os indivíduos dominados serão os que estiverem na direção que aponta para dentro da curva. Isso pode ser visto nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6. Para fora, não existem soluções por definição, e quando o vetor for tangente à fronteira, encontrará um vizinho não-dominado. Se o vetor original for decomposto em duas direções, uma vertical e outra horizontal, afirma-se que um indivíduo domina todos os indivíduos contidos na área retangular cujos lados são essas duas decomposições mais suas projeções no infinito, conforme mostram as Figuras 4.4, 4.5 e 4.6. Portanto, existem soluções que, mesmo sem pertencerem à curva de Pareto, podem dominar outras soluções não contidas no conjunto ótimo também.

Figura 4.4: Fronteira de Pareto quando as duas funções objetivo são minimizadas, com três soluções não-dominadas destacadas e uma solução dominada (asterisco verde) que domina outras oito na área hachurada.

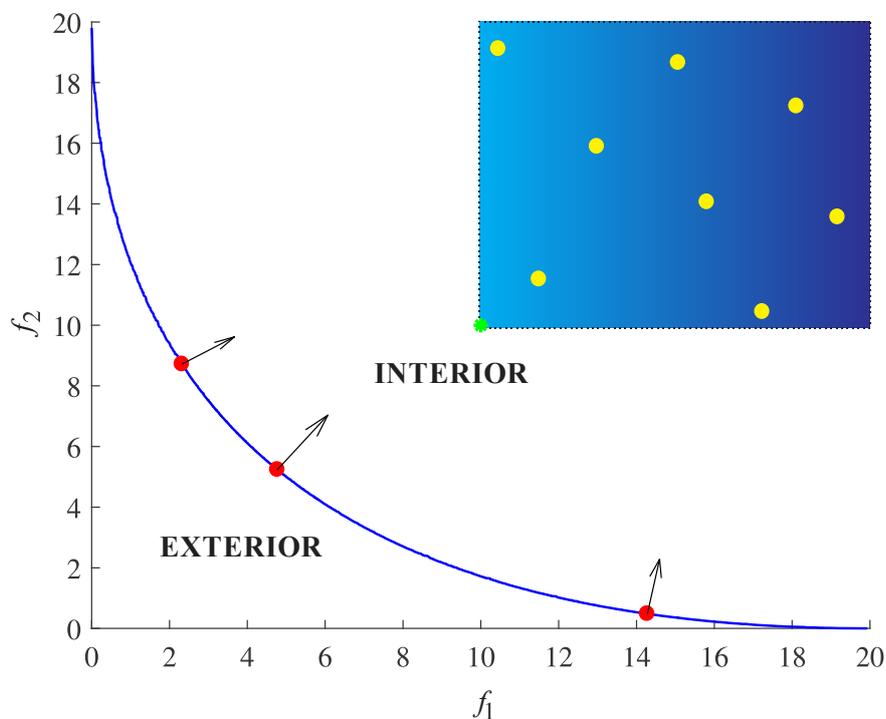


Figura 4.5: Fronteira de Pareto quando as duas funções objetivo são maximizadas, com três soluções não-dominadas destacadas e uma solução dominada (asterisco verde) que domina outras seis na área hachurada.

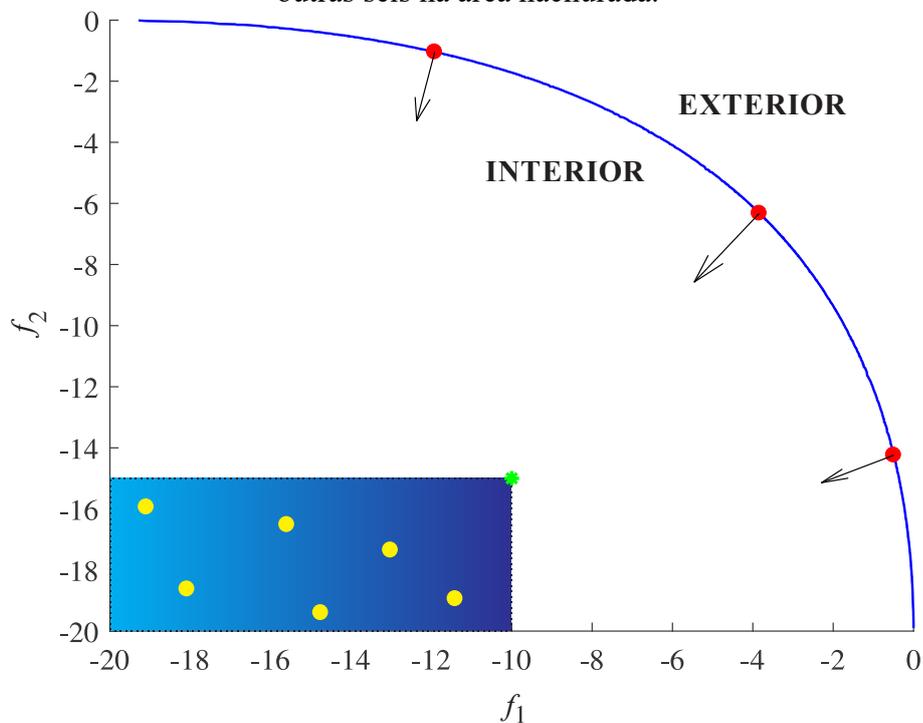
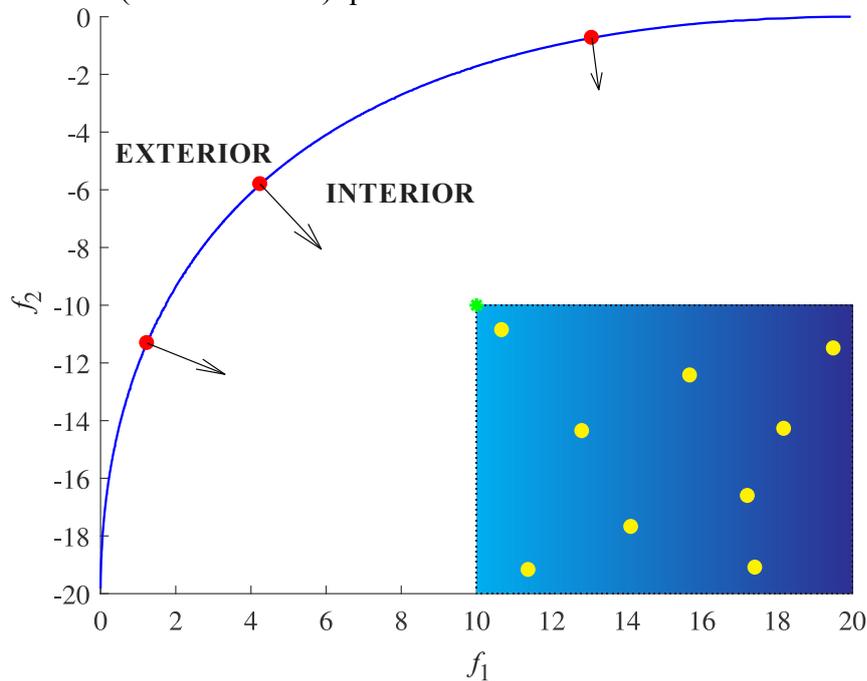


Figura 4.6: Fronteira de Pareto quando a função objetivo horizontal é minimizada enquanto a da vertical é maximizada, com três soluções não-dominadas destacadas e uma solução dominada (asterisco verde) que domina outras nove na área hachurada.



Das Figuras 4.4, 4.5 e 4.6, percebe-se que o indivíduo representado pelo asterisco verde domina todos os conteúdos no retângulo hachurado, representados pelos círculos amarelos. No entanto, esse indivíduo é dominado pelos três pontos destacados na fronteira de Pareto da Figura 4.5 e pelos dois indivíduos de maior valor de f_2 das curvas da Figura 4.6 e os dois de menor valor dessa mesma função da Figura 4.4.

Para a programação do algoritmo que verifica o critério de Pareto, no entanto, ordenam-se os indivíduos do menor para maior valor em relação à primeira função objetivo e faz-se uso da explicação clássica, caso a caso. Além disso, com a finalidade de torná-lo mais eficiente, a quarta situação não foi implementada. Alternativamente ao quarto caso, o programador pode inverter a posição das funções de custo e aplicar a terceira situação. A seguir, serão apresentadas a formulação matemática caso a caso. Todavia, antes dessas apresentações, frisa-se que *ind* representa a numeração do indivíduo perante a população e *pf* a numeração do indivíduo perante a fronteira de Pareto nas notações matemáticas seguintes.

4.3.1.1 Minimização simultânea das duas funções objetivo

Dado o ponto mínimo da primeira função objetivo, o qual também é o primeiro ponto da curva, a fronteira de Pareto é traçada de modo que o próximo ponto dela tenha

necessariamente o valor da segunda função objetivo menor que a solução não-dominada (*ndom*) anterior e f_1 maior. Matematicamente isso é representado por:

$$ndom(pf + 1) \Leftrightarrow [f_2(ind + 1) < f_2(pf)] \text{ E } [f_1(ind + 1) > f_1(pf)]$$

As soluções que se enquadram na condição acima classificam-se como não-dominadas enquanto as dominadas não se encaixam. Por fim, em casos em que exista candidatos à fronteira de Pareto com iguais valores de f_1 , o indivíduo não-dominado será o com menor valor de f_2 .

4.3.1.2 Maximização simultânea das duas funções objetivo

Dado o ponto máximo da primeira função objetivo, o qual também é o primeiro ponto da curva, a fronteira de Pareto é traçada de modo que o próximo ponto dela tenha necessariamente o valor da segunda função objetivo maior que a solução não-dominada (*ndom*) anterior e f_1 menor. Matematicamente isso é representado por:

$$ndom(pf + 1) \Leftrightarrow [f_2(ind + 1) > f_2(pf)] \text{ E } [f_1(ind + 1) < f_1(pf)]$$

As soluções que se enquadram na condição acima classificam-se como não-dominadas enquanto as dominadas não se encaixam. Por fim, em casos em que exista candidatos à curva de Pareto com iguais valores de f_1 , o indivíduo não-dominado será o com maior valor de f_2 .

4.3.1.3 Minimização da primeira e maximização da segunda função objetivo

Dado o ponto mínimo da primeira função objetivo, o qual também é o primeiro ponto da curva, a fronteira de Pareto é traçada de modo que o próximo ponto dela tenha necessariamente o valor da segunda função objetivo maior que a solução não-dominada (*ndom*) anterior e f_1 maior. Matematicamente isso é representado por:

$$ndom(pf + 1) \Leftrightarrow [f_2(ind + 1) > f_2(pf)] \text{ E } [f_1(ind + 1) > f_1(pf)]$$

As soluções que se enquadram na condição acima classificam-se como não-dominadas enquanto as dominadas não se encaixam. Por fim, em casos em que exista candidatos à fronteira de Pareto com iguais valores de f_1 , o indivíduo não-dominado será o com maior valor de f_2 .

4.3.1.4 Maximização da primeira e minimização da segunda função objetivo

Dado o ponto máximo da primeira função objetivo, o qual também é o primeiro ponto da curva, a fronteira de Pareto é traçada de modo que o próximo ponto dela tenha necessariamente o valor da segunda função objetivo menor que a solução não-dominada (*ndom*) anterior e f_1 menor. Matematicamente isso é representado por:

$$ndom(pf + 1) \Leftrightarrow [f_2(ind + 1) < f_2(pf)] \text{ E } [f_1(ind + 1) < f_1(pf)]$$

As soluções que se enquadram na condição acima classificam-se como não-dominadas enquanto as dominadas não se encaixam. Por fim, em casos em que exista candidatos à curva de Pareto com iguais valores de f_1 , o indivíduo não-dominado será o com menor valor de f_2 .

4.3.2 Seleção, cruzamento, mutação e reposição

O AGMULTI é iniciado com uma população N em que cada indivíduo possui m parâmetros, os quais são gerados aleatoriamente num intervalo restrito por limites matemáticos, físicos e geométricos no caso dos transformadores. A partir dos m parâmetros e seus respectivos valores no espaço dos objetivos dos N indivíduos da 1ª geração, o espaço de busca é limitado por elitismo de modo que todas as soluções não-dominadas e mais um número $nbind/4$ das melhores soluções dominadas são pré-selecionadas para a próxima etapa, que é a seleção propriamente dita. Nesta etapa, adota-se o procedimento de Ávila, isto é, os indivíduos são selecionados de acordo com um critério misto de amostragem determinística, que mistura a aptidão dos dois objetivos em uma média ou mediana, para os indivíduos localizados próximo ao centro da curva de Pareto e dois torneios para cada extremo da curva, onde estão os melhores resultados, vencedores dos torneios, para cada uma das duas funções objetivos. Nessa forma de seleção, nomeada usual, são, então, selecionados $nbind$ indivíduos na proporção de 50% : 25% : 25%.

Alternativamente, a seleção pode ser realizada por roleta, que foi o primeiro método de seleção proposto na história dos algoritmos genéticos justamente pelo pioneiro John Henry

Holland (PANCHEVA; ATANASSOV; SHANNON, 2009). Nessa seleção, inspirada nas roletas de jogos de azar, realiza-se a escolha dos indivíduos de acordo com a aptidão em um dos objetivos por vez. Nela, deve-se calcular a probabilidade (*prob*) de um indivíduo (*i*) ser selecionado pela roleta de acordo com a equação 4.11.

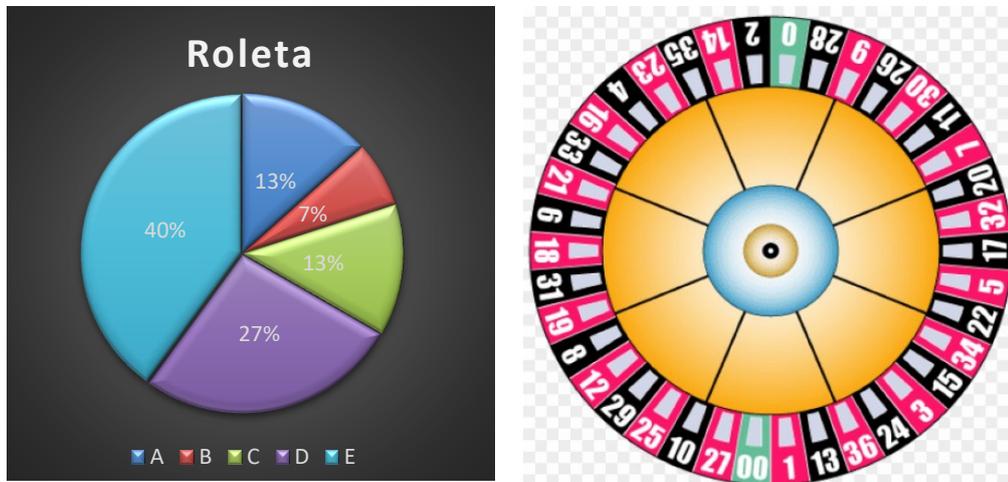
$$prob(i) = \frac{F_i}{\sum_{j=1}^{Pop} F_j} \quad (4.11)$$

Nessa equação, válida para problemas de maximização, *Pop* representa o tamanho da população e *F* as funções de aptidão, que, em AGMULTI, assumem os mesmos valores da função objetivo em análise. No caso dos problemas de minimização, a expressão *F_j* deve ser invertida dentro do somatório da eq. 5.1 a fim de tornar válida a seleção nessa forma de otimização (XAVIER et al., 2013). Então, a roleta é dividida entre os indivíduos de modo proporcional à aptidão de cada um em específico. Por exemplo, no caso de cinco indivíduos, cujas aptidões são mostradas na Tabela 4.1, os setores da roleta são dados conforme as probabilidades do lado esquerdo da Figura 4.7. Então, seleciona-se um indivíduo para cada vez, cujo total é definido pelo operador e deve ser menor ou igual à população, de maneira similar quando se gira a roleta dos jogos de azar, representada no lado direito da Figura 4.7. A chance de um deles ser escolhido é diretamente proporcional à área do setor da roleta que ele ocupa. Além do que, um indivíduo pode ser selecionado mais de uma vez nesse método de seleção a fim de passar para a etapa seguinte, a de reprodução.

Tabela 4.1: Esquema de seleção por roleta.

Indivíduo	Aptidão
A	2
B	1
C	2
D	4
E	6
Total	15

Figura 4.7: Roleta da população da Tabela 4.1 com as probabilidades de cada indivíduo ser selecionado (esquerda) e uma roleta de jogos de azar (direita).



Fonte da imagem da direita: https://toppng.com/pink-and-black-roulette-wheel-PNG-free-PNG-Images_118886?search-result=black. Acesso em: 24/08/2020

Após a seleção, é realizado o cruzamento e a mutação por meio de uma única função computacional com base nos fundamentos apresentados em (ÁVILA, 2006; SIVANANDAM; DEEPA, 2008). Na primeira etapa, a reprodução se dá pela partição do vetor de parâmetros em um único ponto e por meio das equações 4.12 e 4.13, transcritas de (ÁVILA, 2006).

$$X_{kcross...dir}^{n+1,i} = \alpha_{pol} X_{kcross...dir}^{n,i} + (1 - \alpha_{pol}) X_{kcross...dir}^{n,j} \tag{4.12}$$

$$X_{kcross...dir}^{n+1,j} = (1 - \alpha) X_{kcross...dir}^{n,i} + \alpha X_{kcross...dir}^{n,j} \tag{4.13}$$

Onde X é a matriz com N linhas de indivíduos e m colunas de parâmetros tal que i e j sinalizam indivíduos distintos; α_{pol} é o coeficiente de multiplicação polarizado, fixado em 0,9 pelo criador da técnica; α é um coeficiente de multiplicação, de distribuição uniforme de acordo com (ÁVILA, 2006).

Logo em seguida, ocorre a mutação dos indivíduos, a qual segue os mesmos preceitos de (ÁVILA, 2006). Segundo essa referência, a probabilidade de mutação é muito baixa; possui valor máximo de 5%, valor este que será o adotado neste procedimento. Nessa etapa, cada indivíduo recebe um valor, entre zero e um, de probabilidade de mutação (p_{mut}). Então, os indivíduos com $p_{mut} \leq 0,05$ têm a porção do material genético proveniente da reprodução

multiplicada aleatoriamente por um número dentro do intervalo $[0,95;1,05]$. Ao final da função computacional de reprodução, os valores dos parâmetros são enquadrados dentro dos limites mínimos e máximos estabelecidos no início do processo ótimo.

Dos parâmetros gerados nessa função, obtêm-se as novas soluções, as quais são armazenadas em cada geração. Ademais, elas são misturadas à população inicial de modo a compor a população da 2ª geração. A partir deste ponto, o programador pode escolher se elimina os indivíduos menos aptos da geração anterior por meio de um processo de recombinação elitista ou se os deixa sobreviver até a última geração, o que torna a população cada vez maior com o decorrer do tempo

Então, parte-se dessa nova população na 3ª geração e o processo é repetido até que o único critério de parada seja atendido: a geração máxima definida pelo programador. Na última, pode ocorrer uma das duas situações a depender do uso ou não de uma função elitista. Se não for utilizada, as soluções não-dominadas da primeira geração e os indivíduos oriundos de todas as reproduções comporão a população da última geração. Independentemente do caso, o critério de Pareto é aplicado a essa população e o conjunto solução definitivo é traçado. Por outro lado, se a função for usada, o método de otimização se torna mais elitista e mais rápido por ter fixado a população em um valor máximo. Por fim as soluções semelhantes são agrupadas e resumidas ao indivíduo com menor valor de f_1 . Independentemente do resultado escolhido, o conjunto solução é quase sempre o mesmo, pois deve ser eficiente, robusto e preciso.

4.4 MÉTRICA UTILIZADA

Existem inúmeros indicadores para testar a performance de um algoritmo de otimização multiobjetivo. Em resumo (AUDET et al., 2021; JIANG et al., 2014; OKABE; JIN; SENDHOFF, 2003; RIQUELME; LÜCKEN; BARÁN, 2015), são classificados em quatro grandes grupos de acordo com a:

- a) Cardinalidade: número de soluções não-dominadas produzidas pelo algoritmo. Exemplos: *overall nondominated vector generation* (ONVG), *overall nondominated vector generation ratio* (ONVGR) e métrica C;
- b) Convergência ou precisão: quão próxima a fronteira de Pareto fornecida pelo algoritmo está da teórica ou de um conjunto solução de referência. Exemplos: distância geracional (GD – *generational distance*), indicador ε e grau de aproximação (DOA – *degree of approximation*);

- c) Distribuição e espalhamento: quão distribuídos as soluções não-dominadas estão no espaço dos objetivos e quão espalhadas estão umas das outras. Exemplos: espaçamento (SP – *spacing*), índices delta e métrica M_3^* ;
- d) Convergência e distribuição: indicadores que quantificam tanto as propriedades de precisão quanto as de distribuição. Exemplos: hipervolume (HV), hipervolume logarítmico (log HV – *logarithmic hypervolume*) e distância geracional invertida (IGD – *inverted generational distance*).

Em (AUDET et al., 2021), é realizada uma discussão abrangente de cada métrica citada dentre outras tantas. Desse estudo, conclui-se que os indicadores mais utilizados são os que possibilitam a comparação e a análise de resultados de diferentes algoritmos multiobjetivos de otimização. Dentre todos, o mais importante é o indicador do hipervolume; inclusive, estudos empíricos comprovaram a sua eficiência em detrimento de outras métricas (AUDET et al., 2021). Para reforçar ainda mais esse argumento, entre 2005 e 2013, o hipervolume foi a métrica mais citada em publicações (noventa e uma vezes), três vezes e meia de citações a mais que a segunda da lista, a distância geracional (vinte e seis vezes) (RIQUELME; LÜCKEN; BARÁN, 2015). Portanto, nesta dissertação, será utilizada a hiperárea para medir a performance de AGMULTI. Por isso, é necessário introduzi-la, com o devido formalismo, nos próximos itens.

4.4.1 Hipervolume ou hiperárea e razão de hiperárea

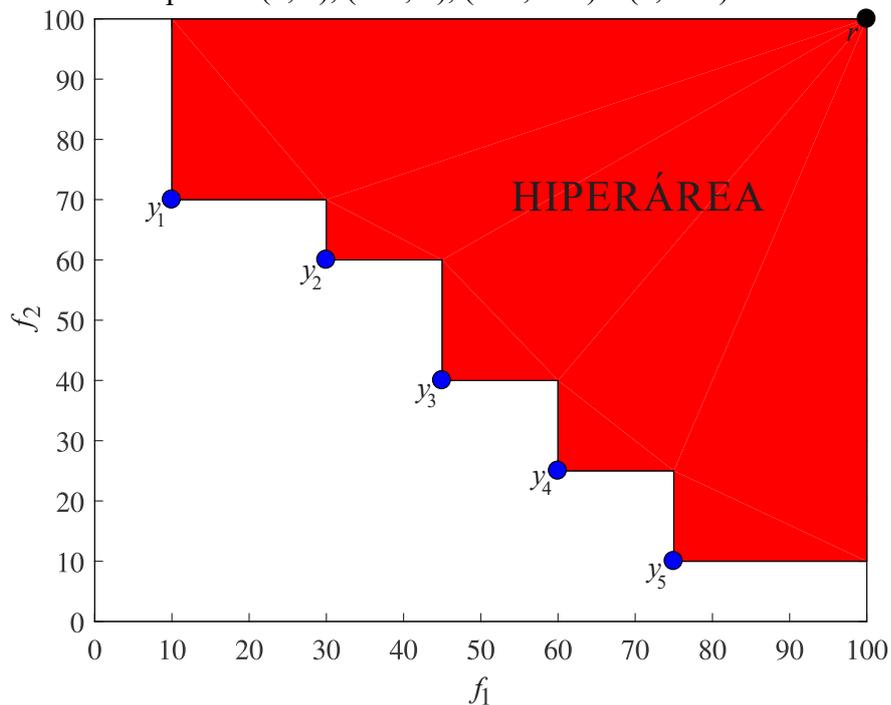
Formulada em 1999, a métrica do hipervolume, originalmente métrica S (AUDET et al., 2021; RIQUELME; LÜCKEN; BARÁN, 2015; ZITZLER, 1999), ou hiperárea, no caso de analisar problemas biobjetivos, como os desta dissertação de mestrado, é a mais consagrada no meio acadêmico para avaliar algoritmos multiobjetivos de otimização devido as suas propriedades matemáticas para avaliar a precisão, a distribuição e a robustez das soluções não-dominadas deles, além de, conforme já citado, ter sua eficácia comprovada empiricamente (AUDET et al., 2021; RIQUELME; LÜCKEN; BARÁN, 2015). O nome se justifica pela descrição do indicador, que é o volume (área para duas funções de custo) do espaço dos objetivos delimitado pela fronteira de Pareto e um vértice de referência, o qual deve ser necessariamente dominado por todas as soluções que a compõem, mas também pertencer a esse espaço dos objetivos. Para problemas de maximização sem restrições num espaço dos objetivos

inteiramente inscrito no primeiro quadrante do plano cartesiano, esse vértice geralmente é a origem (AUDET et al., 2021; ZITZLER, 1999).

O referido volume (área), o hipervolume (hiperárea – HV), é, então, calculado pela união dos volumes (áreas) que cada uma das N_p soluções não-dominadas y_i da fronteira de Pareto Y_N produz ao dominar esse vértice de referência (r), conforme demonstrado graficamente na Figura 4.8 para o caso com minimização simultânea das funções de custo num problema biobjetivo. Isso corresponde à formulação matemática exibida em (4.14) (AUDET et al., 2021; JIANG et al., 2014).

$$HV(Y_N; r) = \bigcup_{i=1}^{N_p} [y_i, r] \tag{4.14}$$

Figura 4.8: Representação gráfica da hiperárea de uma fronteira de Pareto composta por cinco soluções, com referência em $r = (100, 100)$, num espaço dos objetivos \mathbb{R}^2 delimitado pelos pontos $(0, 0)$, $(100, 0)$, $(100, 100)$ e $(0, 100)$.



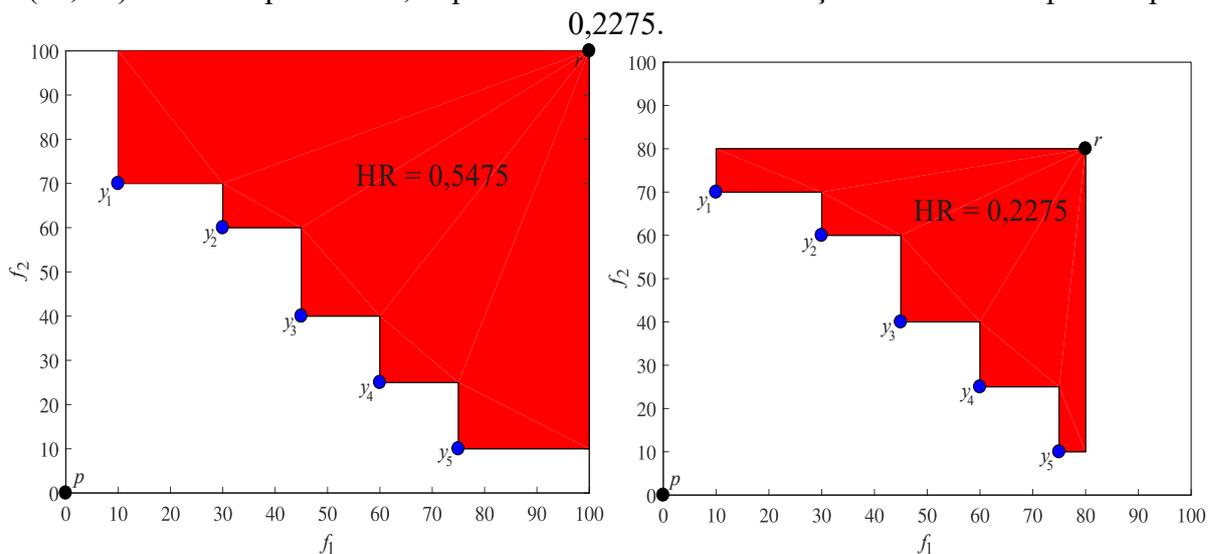
Ademais, ao definir outro vértice (p), nos limites do espaço dos objetivos, que domine todos os pontos da fronteira de Pareto a partir da região externa dela, de modo a formar uma diagonal com o vértice de referência e um prisma retangular (retângulo para problemas biobjetivos) das projeções dessa diagonal, calcula-se o hipervolume (hiperárea) do prisma

(figura geométrica) do mesmo modo que o volume (área) dele é calculado. Logo, para o caso bidimensional, essa hiperárea é dada pelo produto da base (b_{HV}) pela altura (h_{HV}) do retângulo. Portanto, a razão de hiperárea (HR – *hyperarea ratio*) é obtida da equação (4.15), tal que a primeira hiperárea está contida na segunda e $0 < HR(Y_N, p; r) \leq 1$ (AUDET et al., 2021).

$$HR(Y_N, p; r) = \frac{HV(Y_N; r)}{b_{HV}h_{HV}} \tag{4.15}$$

Quanto maior a razão de hiperárea, melhor o algoritmo de otimização multiobjetivo é, ou seja, obtém-se uma curva de Pareto mais robusta e com melhor convergência, além de possuir soluções não-dominadas bem distribuídas no espaço dos objetivos (AUDET et al., 2021). Outra vantagem do indicador, é que, diferentemente de muitas outras métricas, não requer conhecimento da fronteira de Pareto teórica dos objetivos a serem otimizados, tampouco é necessário utilizar uma curva dessas como referência. Em relação às desvantagens dessa métrica, destacam-se o elevado custo computacional, o qual cresce exponencialmente com o número de objetivos, e a escolha do ponto de referência, que não é trivial e afeta todo o cálculo da métrica (AUDET et al., 2021), conforme ilustrado na Figura 4.9.

Figura 4.9: Dado um espaço dos objetivos \mathbb{R}^2 delimitado pelos pontos (0, 0), (100, 0), (100, 100) e (0, 100), a razão de hiperárea se altera com a escolha do vértice de referência (r) para uma dada fronteira de Pareto composta por cinco soluções. Na esquerda, $r = (100, 100)$ cobre um hipervolume maior, o que resulta em uma razão de hiperárea de 0,5475. Já na direita, $r = (80, 80)$ reduz o hipervolume, o que acarreta também na redução da razão de hiperárea para



4.5 METODOLOGIA DE VALIDAÇÃO

A validação desta pesquisa de mestrado ocorre em duas etapas. A primeira é a validação do algoritmo genético multiobjetivo desenvolvido para este estudo. Isso é feito por meio de cinco problemas testes com naturezas e números de parâmetros diferentes, porém sempre com duas funções de custo. A discussão acerca desses problemas bem como os resultados da validação será realizada no capítulo 5.

Quanto à segunda etapa de validação da pesquisa, após assegurada a eficácia do AGMULTI, os transformadores são testados. Primeiramente, os resultados do transformador monofásico são testados e comparados com os providos por AGMONO. Em seguida, os transformadores trifásicos de distribuição são otimizados e o de 300 kVA é comparado via um *software* de elementos finitos. Para esta dissertação, esse *software* é o EFCAD, o qual foi desenvolvido pelo GRUCAD. Para ser mais específico, será trabalhado com o módulo EFCJ do EFCAD, o qual executa a modelagem magnetodinâmica do transformador pelo método dos elementos finitos ao considerar as correntes parasitas, não-linearidades e transitórios além de definir como fontes as densidades de corrente J (BASTOS; SADOWSKI, 2008). Por fim, detalhes adicionais assim como os resultados dessa segunda etapa serão tratados no capítulo 6.

5 VALIDAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO MULTIOBJETIVO

Com a finalidade de validar o algoritmo implementando, foram escolhidos cinco problemas de otimização, sempre compostos por duas funções objetivo, quantidade diferente de parâmetros e naturezas matemáticas distintas. O primeiro e o segundo teste são desenvolvidas numa mesma seção por partirem diretamente de um problema 1D da tese de Ávila (ÁVILA, 2006) e outro de um variante 2D desse mesmo problema. Já os três últimos são *benchmark functions*, isto é, funções comumente utilizadas em validações de novos algoritmos genéticos (ÁVILA, 2006; BARBOSA, 2012): o problema de Schaffer número 2 (SCHAFFER, 1984), as três primeiras funções de Zitzler-Deb-Thiele (ZDT) (ZITZLER; DEB; THIELE, 2000) e as de Himmelblau (DEB, 1999). Convenientemente, AGMULTI é, aqui, renomeado conforme o problema que propõe solucionar. O nome dos AGs implementados para cada problema são escritos em itálico em cada seção deste capítulo.

A validação de AGMULTI é feita com base na comparação das fronteiras de Pareto teóricas e de referência, obtidas nos trabalhos citados, mas também da avaliação, de cada problema testado, pela métrica do hipervolume. Para tanto, o resultado final da otimização é obtido ao final da trigésima rodada, quando, então, é selecionada a fronteira de Pareto com maior razão de hiperárea.

5.1 OS DOIS PRIMEIROS PROBLEMAS E *GA_PARETO_MP*

O algoritmo genético implementado na rotina chamada de *ga_pareto_mp* permite trabalhar com a quantidade de parâmetros que o usuário escolher desde que sejam definidos os limites para cada parâmetro no código. Nesse primeiro exemplo, as funções objetivo originais são:

$$f_1(x) = x^2 \quad \text{e} \quad f_2(x) = (x - 2)^2$$

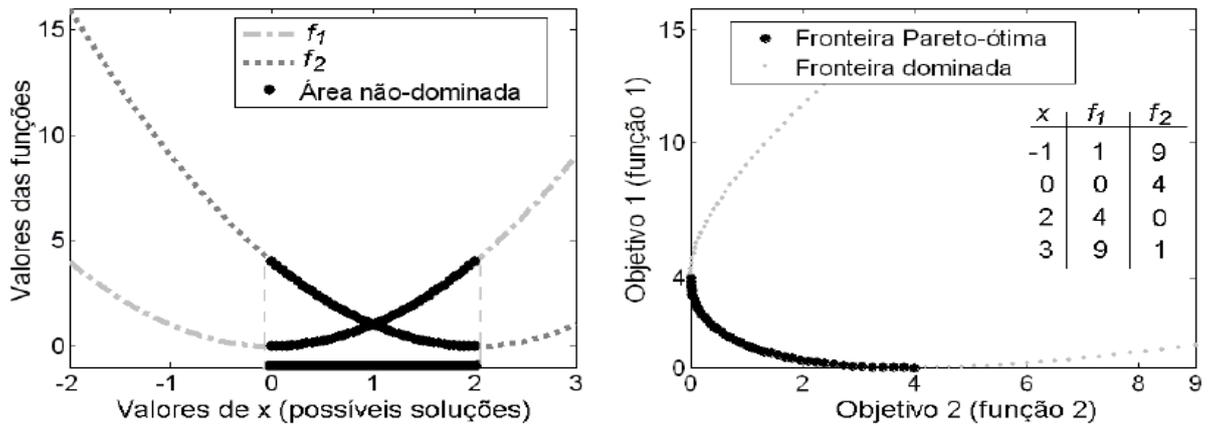
Já, para o caso com dois parâmetros, as funções de custo tornam-se:

$$f_1(x, y) = x^2 + y^2 \quad \text{e} \quad f_2(x, y) = (x - 2)^2 + (y - 4)^2$$

A população inicial para os dois casos foi definida em 1000 indivíduos. Quanto às restrições, são adotados os intervalos: $x \in [-2, 3]$ e $y \in [-4, 8]$. Para fins de validação dos resultados das funções com uma variável, são comparadas graficamente as curvas de Pareto geradas com às de Ávila. Conforme pode ser visualizado nas Figuras 5.1 e 5.2. Ademais, a Figura 5.3 fornece os resultados das funções com duas variáveis. Das Figuras 5.1 e 5.2, caso com um parâmetro, percebe-se que as curvas são praticamente idênticas. Então há bastante precisão de *ga_pareto_mp* em relação aos resultados obtidos por Ávila.

Por fim, ao escolher vértices de referência em (4, 4) e (20, 20) para, respectivamente, os problemas com um e dois parâmetros, obtiveram-se HRs respectivamente iguais a 0,8330 e 0,8325.

Figura 5.1: (Esquerda) Funções objetivo em função dos valores do parâmetro x . (Direita) Fronteira de Pareto – Caso com um parâmetro; algoritmo desenvolvido por Ávila.



Fonte: (ÁVILA, 2006)

Figura 5.2: (Esquerda) Funções objetivo em função dos valores do parâmetro x . (Direita) Fronteira de Pareto – Caso com um parâmetro; algoritmo *ga_pareto_mp*.

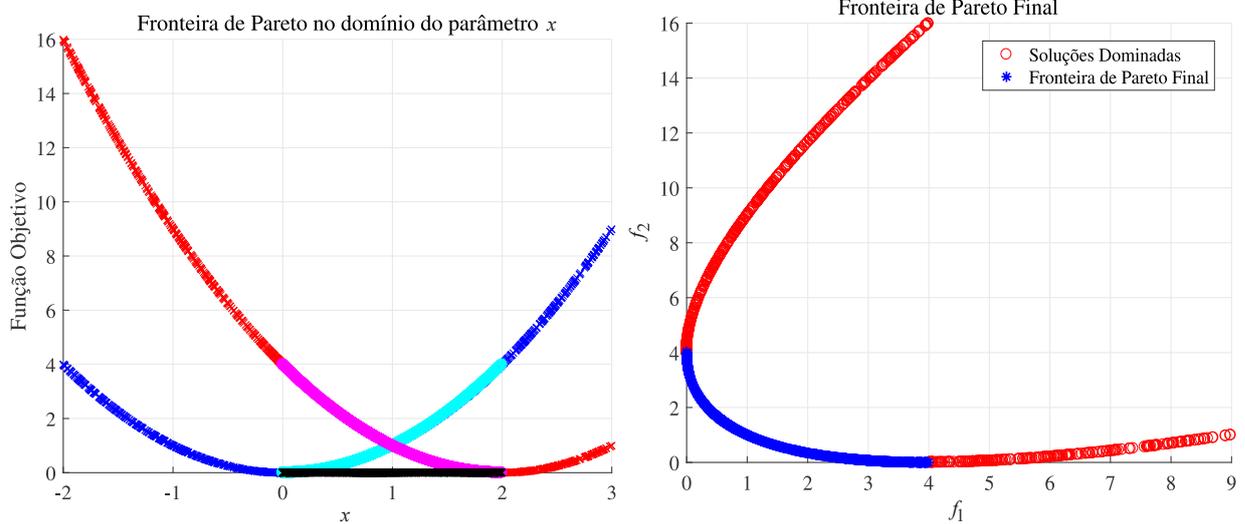
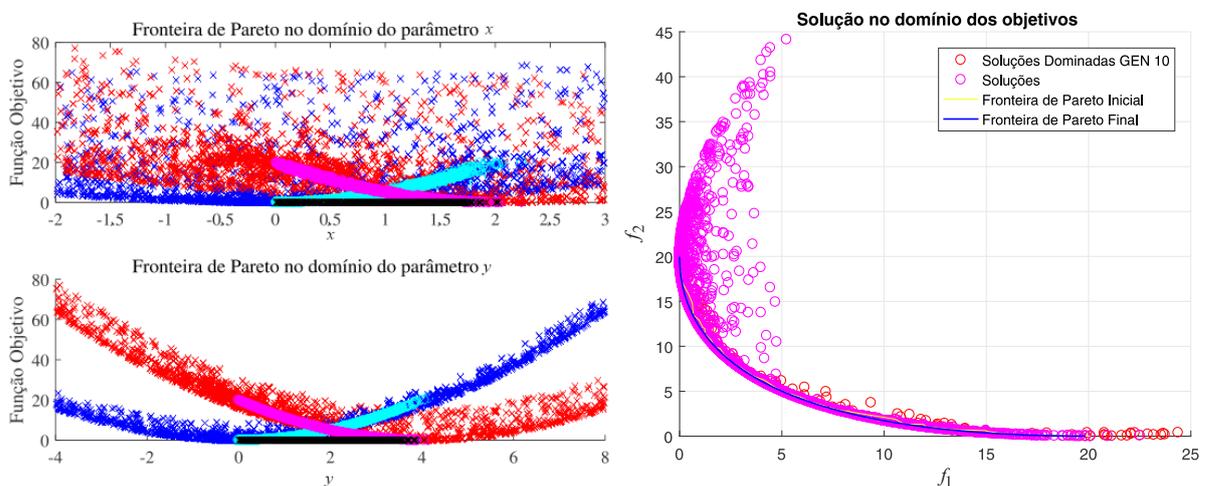


Figura 5.3: (Esquerda) Funções objetivo em função dos valores dos parâmetros x e y . (Direita) Fronteira de Pareto – Caso com dois parâmetros; algoritmo *ga_pareto_mp*.



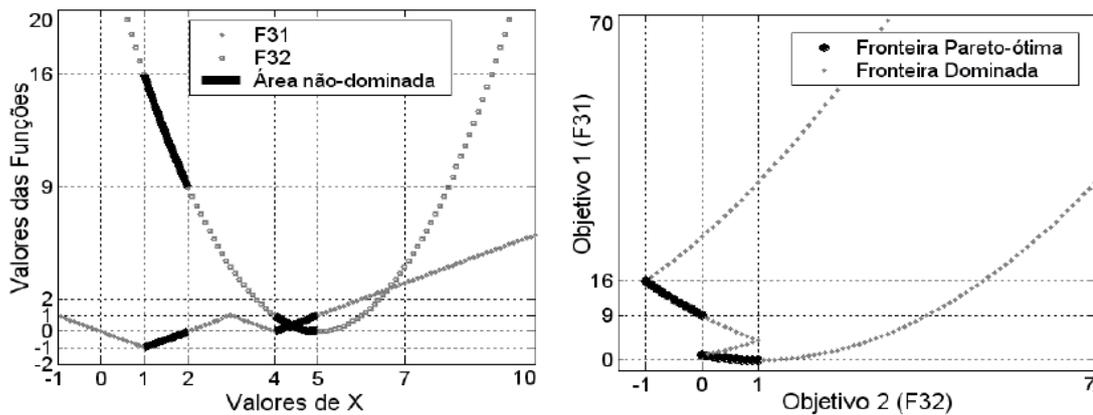
5.2 O PROBLEMA DAS FUNÇÕES DE SCHAFFER NÚMERO 2 – GA_SCHAFFER

O algoritmo *ga_Schaffer* trabalha com o parâmetro x , tal que $x \in [-1,10]$. Contudo, uma das funções objetivo é descontínua, o que acarreta descontinuidade na fronteira de Pareto. Essas funções número 2 de Schaffer, elaboradas pelo próprio pioneiro em AGs para otimização multiobjetivo em (SCHAFFER, 1984), são:

$$F_{31}(x) = \begin{cases} -x & \text{se } x \leq 1 \\ -2 + x & \text{se } 1 < x \leq 3 \\ 4 - x & \text{se } 3 < x \leq 4 \\ -4 + x & \text{se } x > 4 \end{cases} \quad \text{e} \quad F_{32}(x) = (x - 5)^2$$

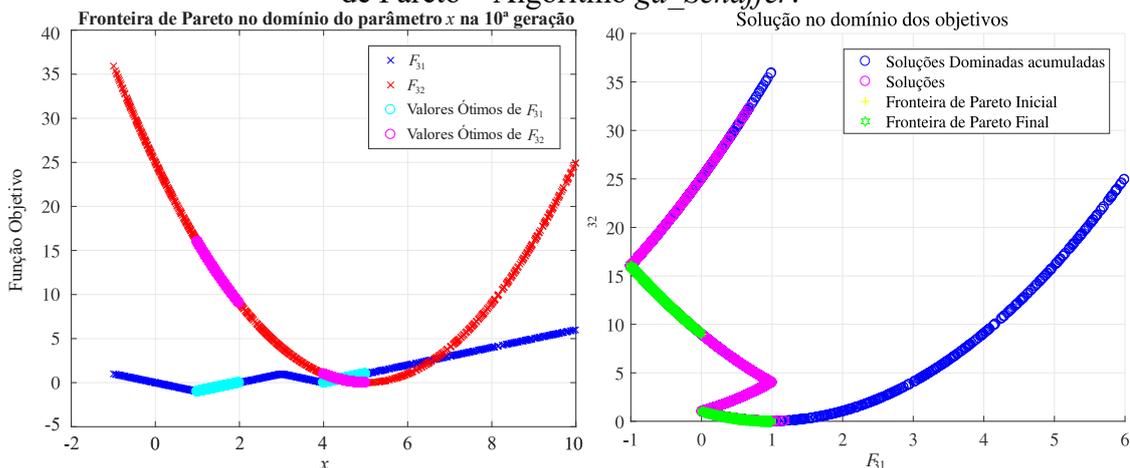
Os resultados gráficos obtidos por *ga_Schaffer*, executado com população inicial de 1000 indivíduos, são comparados com os do AGMO de Ávila. Dessa comparação, nota-se que os resultados fornecidos pelos dois algoritmos são bem próximos, conforme pode ser visto nas Figuras 5.4 e 5.5.

Figura 5.4: (Esquerda) Funções objetivos em função dos valores do parâmetro x . (Direita) Fronteira de Pareto – AGMO de Sérgio Ávila.



Fonte: (ÁVILA, 2006)

Figura 5.5: (Esquerda) Funções objetivos em função dos valores do parâmetro x . (Direita) Fronteira de Pareto – Algoritmo *ga_Schaffer*.



Por fim, ao aplicar a métrica do hipervolume, obtém-se uma razão e hiperárea igual a 0,6037 para os vértices de referência em (1; 16) e (-1; 0).

5.3 O PROBLEMA PROPOSTO PELAS FUNÇÕES DE ZITZLER-DEB-THIELE – GA_ZDT

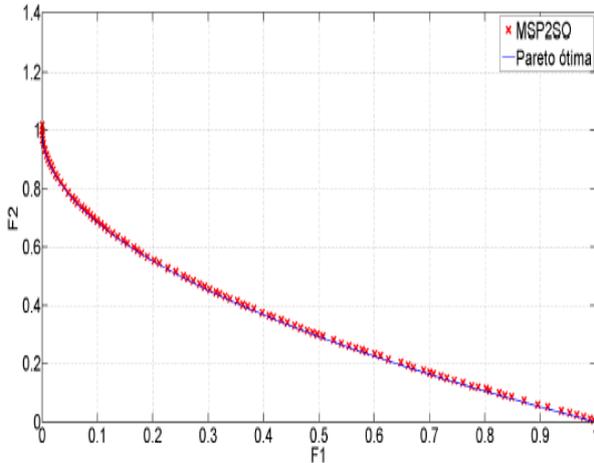
O algoritmo ga_ZDT propõe resolver as funções ZDT, as quais foram apresentadas pioneiramente em (ZITZLER; DEB; THIELE, 2000), compostas por trinta parâmetros (m) com os mesmos limites [0; 1]. As funções são definidas a seguir.

$$\begin{aligned} \min \quad & FT_i(\vec{x}) = (f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x})) \\ \text{Sujeito a} \quad & \begin{cases} f_2(\vec{x}) = g(\vec{x}) \cdot h(f_1(\vec{x}), g(\vec{x})) \\ \vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m) \end{cases} \\ \text{Tal que:} \quad & f_1(\vec{x}) = x_1 \quad \forall FT_i \\ & g(\vec{x}) = 1 + 9 \left| \sum_{j=2}^m \frac{x_j}{m-1} \right| \quad \forall FT_i \\ & h(f_1(\vec{x}), g(\vec{x})) = 1 - \sqrt{\frac{f_1(\vec{x})}{g(\vec{x})}} \Leftrightarrow FT_1 \\ & h(f_1(\vec{x}), g(\vec{x})) = 1 - \left(\frac{f_1(\vec{x})}{g(\vec{x})} \right)^2 \Leftrightarrow FT_2 \\ & h(f_1(\vec{x}), g(\vec{x})) = 1 - \sqrt{\frac{f_1(\vec{x})}{g(\vec{x})}} - \frac{f_1(\vec{x})}{g(\vec{x})} \text{sen}(10\pi x_1) \Leftrightarrow FT_3 \\ & i = 1, 2, 3 \end{aligned}$$

São, portanto, três problemas de minimização aqui propostos; cada um com duas funções objetivo. Diferentemente dos casos até então estudados, a segunda função objetivo é uma restrição e função composta, o que requer uma abordagem diferente dentro da função computacional responsável por calcular os valores das funções de custo em ga_ZDT . Deve-se, então, obter todas as imagens das funções g e h a fim de comporem o domínio da função objetivo f_2 .

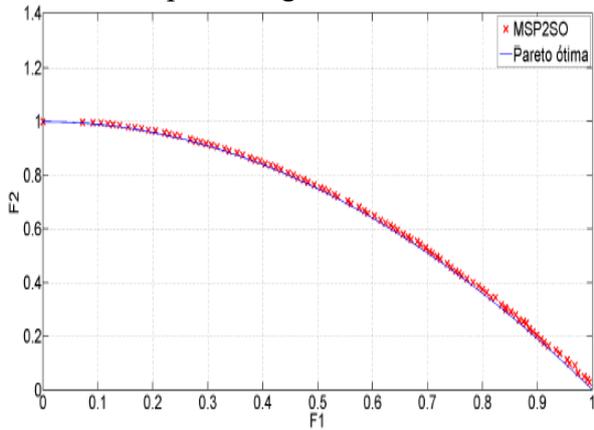
Isso é feito ao minimizar as funções g e h . Por inspeção, g é mínimo no cenário em que o somatório das vinte e nove variáveis é zero, o que é verdade quando todas elas são zero, o que fornece $\min g = 1$. Independentemente do cenário, o produto $g \times h$ é mínimo quando $g = 1$, o que torna x_1 como a única variável da função h mas também de f_2 . Isso possibilita obter resultados semelhantes aos de Barbosa. A população inicial implementada no algoritmo ga_ZDT é de 1000 para os três casos. As Figuras numeradas de 5.6 a 5.11 mostram os resultados encontrados. As da coluna esquerda são os resultados base obtidos pelo algoritmo MSP2SO desenvolvido por Barbosa em sua dissertação de mestrado (BARBOSA, 2012) enquanto as figuras da direita são obtidas ao final do processo iterativo de ga_ZDT .

Figura 5.6: Fronteira de Pareto de MSP2SO para o primeiro caso.



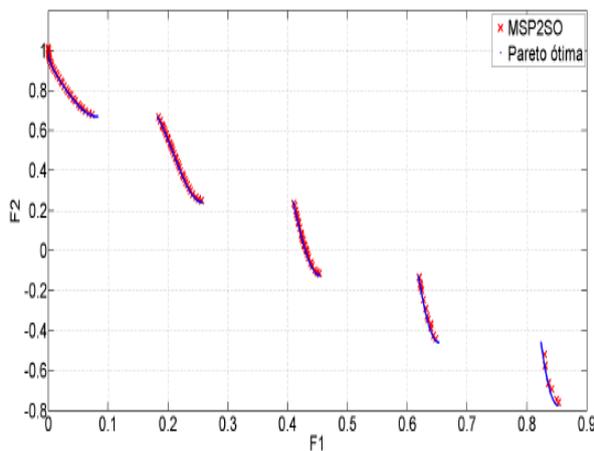
Fonte: (BARBOSA, 2012)

Figura 5.7: Fronteira de Pareto de MSP2SO para o segundo caso.



Fonte: (BARBOSA, 2012)

Figura 5.8: Fronteira de Pareto de MSP2SO para o terceiro caso.



Fonte: (BARBOSA, 2012)

Figura 5.9: Fronteira de Pareto de ga_ZDT para o primeiro caso.

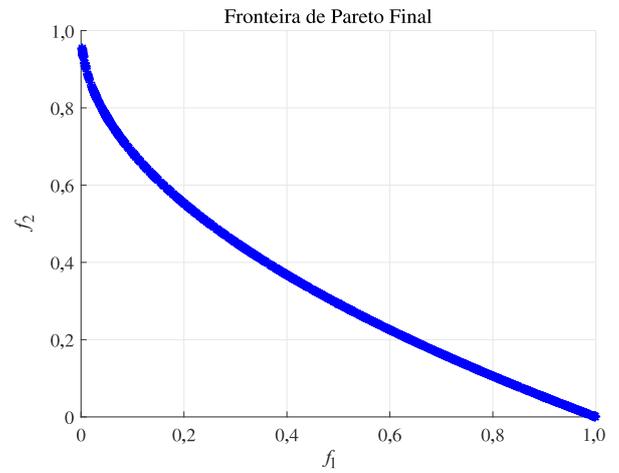


Figura 5.10: Fronteira de Pareto de ga_ZDT para o segundo caso.

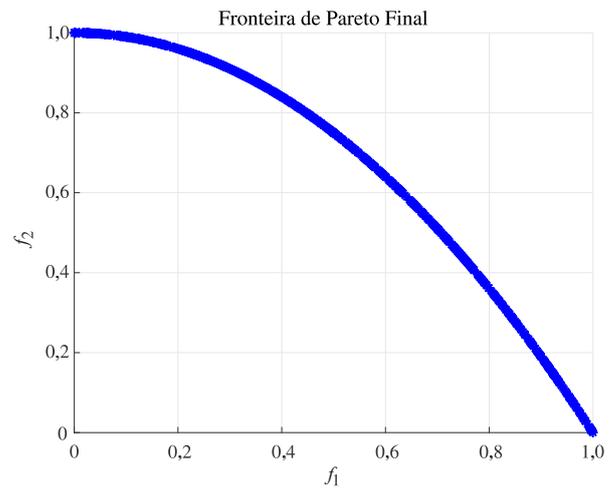
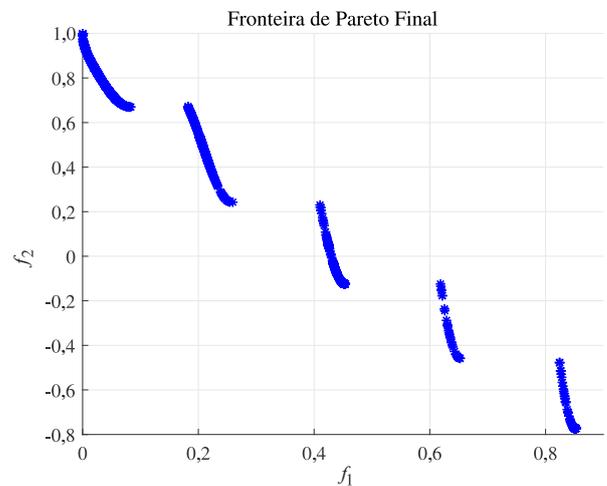


Figura 5.11: Fronteira de Pareto de ga_ZDT para o terceiro caso.



5.3.1 Comparação com meta-heurísticas consolidadas

Para os dois primeiros problemas ZDT, pode-se comparar, por meio da Plataforma para Otimização Evolutiva Multiobjetivo (*Platform for Evolutionary Multi-Objective Optimization – PlatEMO*), o desempenho de AGMULTI com outras meta-heurísticas consolidadas na literatura. PlatEMO é uma ferramenta de código aberto desenvolvida em MATLAB, com mais de cinquenta algoritmos evolutivos de otimização multiobjetivo, mais de cem problemas de teste e, ao menos, nove métricas, para facilitar a comparação e o desenvolvimento de novos algoritmos, problemas de teste e indicadores de performance (TIAN et al., 2017). Dentre os problemas de teste comuns a esta dissertação e aos disponíveis em PlatEMO, há os dois primeiros problemas ZDT. Portanto, estes dois são os únicos utilizados para comparar AGMULTI com outras meta-heurísticas.

Para tanto, foram escolhidas o NSGA II, o NSGA III, o SPEA II e o MOEA/D por serem métricas clássicas relevantes na literatura, e a razão de hiperárea (HR) como métrica, visto que é a única utilizada nesta pesquisa. As razões de hiperárea de cada problema são resumidas na Tabela 5.1, todas com as referências em $r = (1; 1)$ e $p = (0; 0)$, com exceção do terceiro problema ZDT, com $p = (0; -1)$. Este último não é comparado com as demais meta-heurísticas, porque a fronteira de Pareto de PlatEMO desse teste é restrita aos valores positivos das funções de custo, enquanto AGMULTI considera os valores negativos também.

Tabela 5.1: Razões de hiperárea dos três problemas ZDT por algoritmo evolutivo multiobjetivo.

Método	Problemas de Teste		
	ZDT 1	ZDT 2	ZDT 3
NSGA II	0,6560	0,2967	-
NSGA III	0,6382	0,1803	-
SPEA II	0,6576	0,3089	-
MOEA/D	0,6408	0,2123	-
AGMULTI	0,6658	0,3324	0,5217

Desses resultados, percebe-se que as razões de hiperárea de AGMULTI foram melhores, com destaque para a diferença percentual entre o valor obtido por AGMULTI e NSGA III em ZDT 2: 46%. Portanto, pode-se afirmar que AGMULTI é superior a essas quatro técnicas ao menos para os dois primeiros problemas propostos por Zitzler, Deb e Thiele.

5.4 O PROBLEMA DAS FUNÇÕES DE HIMMELBLAU – *GA_HIMMELBLAU_V3*

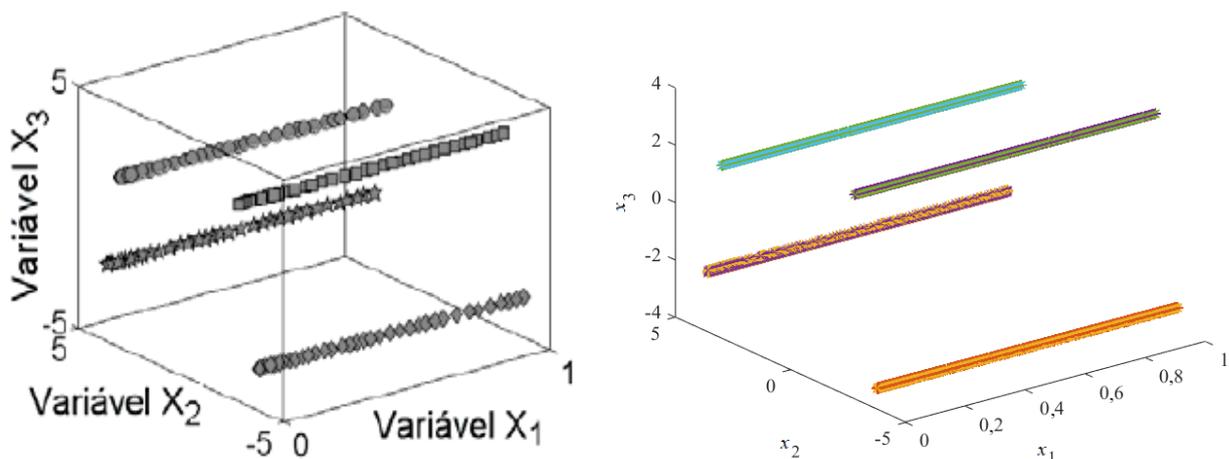
O algoritmo *ga_Himmelblau_v3* lida com o seguinte problema de otimização:

$$\min f_1(x) = x_1 \quad \text{e} \quad f_2(x) = g(x_2, x_3) \cdot h(g(x_2, x_3), f_1(x_1))$$

$$\text{Tal que} \begin{cases} h(x) = 1 - \sqrt{\frac{f_1(x_1)}{g(x_2, x_3)}} \\ g(x_2, x_3) = 1 + (x_2^2 + x_3 - 11)^2 + (x_2 + x_3^2 - 7)^2 \end{cases}$$

Nesse problema, as restrições são as seguintes: $x_1 \in [0,1]$ e $x_{2,3} \in [-5,5]$. Além disso, como nas funções de ZDT em *ga_ZDT*, esse problema de minimização lida com duas funções de restrição g e h . Por isso, deve-se, antes de determinar h , minimizar a função bidimensional g com um método mais simples a fim de encontrar as soluções da função de restrição, as quais são, segundo (ÁVILA, 2006): $(x_2; x_3) = \{(3;2), (3,584; -1,848), (-3,779; -3,283), (-2,805; 3,131)\}$. Isso tudo é realizado dentro da função computacional responsável por extrair os valores das funções objetivo de *ga_Himmelblau_v3*. Além disso, o código principal deste AG é levemente alterado em relação a todos os demais desta dissertação a fim de comportar cada conjunto-solução da função objetivo f_2 originada de cada solução de g . A fronteira de Pareto definitiva é então determinada ao aplicar os conceitos de dominância de Pareto simultaneamente a todos os indivíduos de todas as quatro fronteiras. Por fim, menciona-se que a população inicial implementada no algoritmo *ga_Himmelblau_v3* foi de 1001 para os três casos. As Figuras 5.12, 5.13 e 5.14 mostram os resultados encontrados, tal que a primeira e a última mostram, à esquerda, a comparação gráfica com os resultados de (ÁVILA, 2006).

Figura 5.12: Soluções não-dominadas encontradas por AGMO de Ávila (esquerda) e - *ga_Himmelblau_v3* (direita).



Fonte: (ÁVILA, 2006) – esquerda – e autoria própria – direita.

Figura 5.13: Fronteiras encontradas por *ga_Himmelblau_v3* para cada solução de *g*.
Fronteiras de Pareto por solução

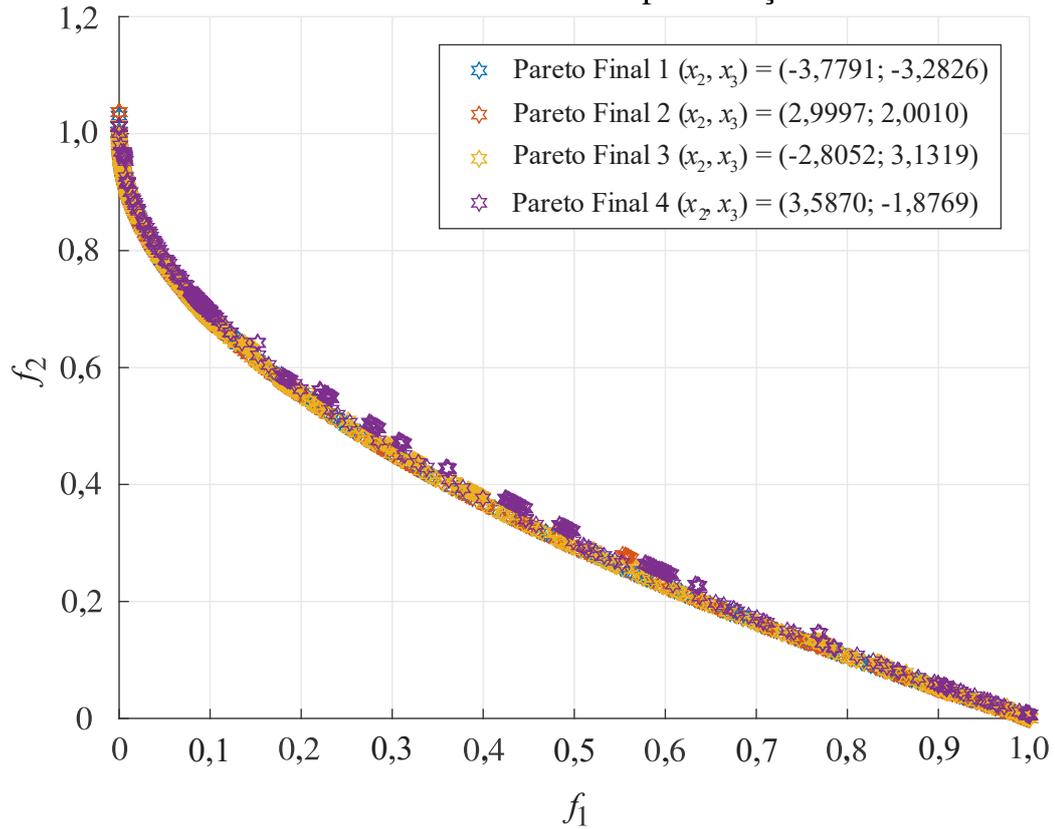
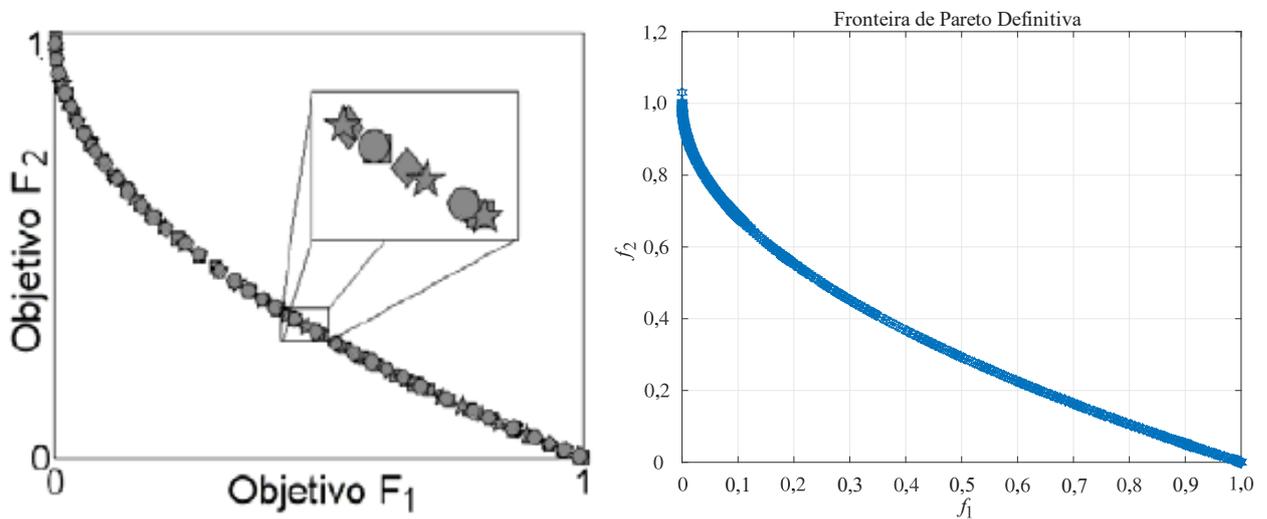


Figura 5.14: Fronteira encontrada por AGMO de Ávila (esquerda) e *ga_Himmelblau_v3* (direita).



Fonte: (ÁVILA, 2006) – esquerda – e autoria própria – direita.

Por fim, foi aplicada a métrica da hiperárea. Para uma referência $r = (1,0; 1,2)$, a razão de hiperárea do problema foi de 0,7196, ou seja, a hiperárea cobre 71,96% da área total do subespaço retangular mostrado integralmente na direita da Figura 5.14.

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A VALIDAÇÃO DO ALGORITMO

Ao comparar os resultados gráficos de todos os problemas simulados pelas rotinas de AGMULTI, nomeadas conforme o nome do problema teste, desenvolvidas para esta pesquisa, com os originais, percebe-se que apresentam razões de hiperárea mais próximos da unidade do que zero, o que indica boa distribuição e convergência das soluções ótimas. Também se percebe que os problemas simulados por AGMULTI são semelhantes, quando não coincidentes. Então o algoritmo genético multiobjetivo desenvolvido reproduz os resultados esperados para os exercícios de teste e pode, portanto, ser utilizado para a otimização multiobjetivo de problemas de diversos campos do conhecimento. No caso desta dissertação, será aplicado a projetos ótimos de transformadores, cujos resultados são apresentados no capítulo seguinte.

6 RESULTADOS DA PESQUISA

Com base na comprovação do capítulo anterior, a eficácia do AGMULTI permite que ele seja utilizado para resolver novas propostas de otimização. Portanto, serão otimizados projetos de transformadores neste capítulo, os quais são, conforme explicados anteriormente, de um monofásico de 300 VA e de três transformadores trifásicos tal que os dois primeiros são de distribuição, um com potência aparente 300 kVA e foi projetado exclusivamente para esta pesquisa, e o segundo de 30 kVA e foi extraído de (MARTIGNONI, 1973). Quanto ao terceiro, possui 2 kVA de potência e foi baseado em um projeto do mesmo livro fonte.

Os projetos são simulados diversas vezes a fim de verificar que os resultados para um mesmo problema, mantidas as funções objetivo, sejam similares devido à natureza estocástica dos algoritmos genéticos, que, se não forem bem desenvolvidos, podem ocasionar discrepâncias significantes entre os resultados. Por fim, os parâmetros geométricos fornecidos por esses resultados para um dos casos estudados no dispositivo de 300 kVA são utilizados com a finalidade de simular o dispositivo eletromagnético no EFCAD, um *software* de elementos finitos desenvolvido pelo GRUCAD e consolidado na academia. Por meio dessa modelagem eletromagnética, são obtidos os valores de indução máxima e fluxo magnético máximo na coluna central do núcleo do transformador, os quais devem ser relativamente próximos dos fornecidos pelo AGMULTI com a finalidade de comparar os resultados. Ainda, no caso do transformador monofásico, a comparação é realizada com o AGMONO desenvolvido e validado pelo GRUCAD no passado em problemas de otimização relacionados diretamente ao eletromagnetismo, conforme publicado neste artigo científico: (LEITE et al., 2004).

6.1 O TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE 300 VA

Recorda-se que o núcleo do transformador é de formato retangular com seis parâmetros: comprimento (c) e profundidade (p) da coluna, altura (hw) e largura (bw) da janela, indução magnética máxima no núcleo (B_M) e densidade de corrente (J); sujeitos às seguintes restrições:

$$\begin{array}{ll} c \in [1; 3] \text{ cm} & bw \in [1; 5] \text{ cm} \\ p \in [1; 4] \text{ cm} & B_M \in [1,2; 1,3] \text{ T.} \\ hw \in [10; 20] \text{ cm} & J \in [3] \text{ A/mm}^2. \end{array}$$

Quando a quantidade e os limites dos parâmetros além da função computacional responsável por executar os cálculos do transformador são ajustados ao AGMONO, resultam-se os seguintes valores dispostos na Tabela 6.1 para os parâmetros e o rendimento.

Tabela 6.1: Melhor resultado fornecido por AGMONO

Grandezas	c	p	hw	bw	B_M	J	η
Melhor indivíduo	2,635 cm	3,997 cm	12,54 cm	1,5 cm	1,3 T	3 A/mm ²	92,173%

Ademais, é relevante informar que o AGMONO é configurado com população inicial de cinquenta indivíduos e cessa o processo de otimização na trigésima quinta geração da centésima rodada. Também se reforça que o rendimento é a função objetivo maximizada pelo algoritmo de otimização mono-objetivo. Já quando ajustado ao AGMULTI, três pares de combinações com três funções objetivo são estudados. Na situação **A**, as funções objetivo otimizadas são a massa e o rendimento. Já na situação **B** as soluções ótimas são extraídas do custo de fabricação e do rendimento enquanto, na **C**, são da massa e do custo. Independentemente do caso, a massa total e o custo de fabricação são sempre minimizados enquanto o rendimento é sempre maximizado. As razões de hiperárea dos cenários A, B e C são, respectivamente iguais a 0,7858; 0,5845 e 0,6308 quando as referências são $r = (12; 0\%)$ e $p = (3; 100\%)$ para A, $r = (7; 0\%)$ e $p = (5; 100\%)$ para B, e $r = (7; 13)$ e $p = (3,5; 5,5)$ para C. Por fim, as Figuras 6.1, 6.2 e 6.3 mostram as curvas de Pareto das situações **A**, **B** e **C** respectivamente.

Figura 6.1: Curva de Pareto oriunda da minimização da massa e da maximização do rendimento do transformador em cem rodadas.

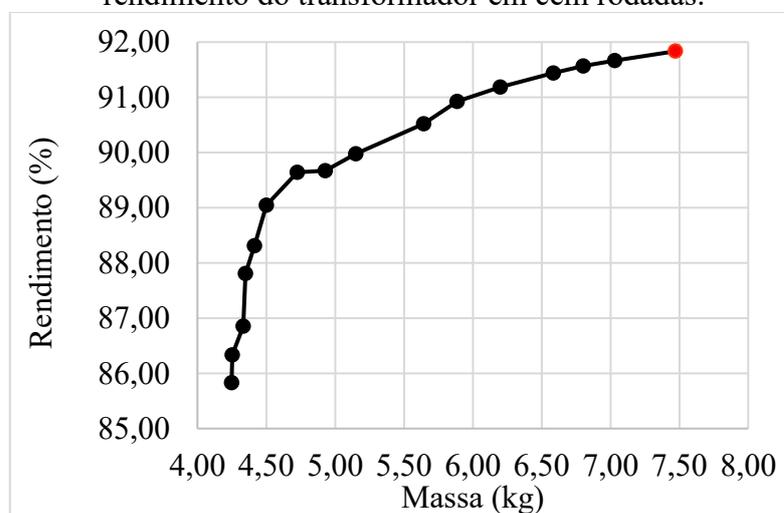


Figura 6.2: Curva de Pareto oriunda da minimização do custo de fabricação e da maximização do rendimento do transformador em cem rodadas.

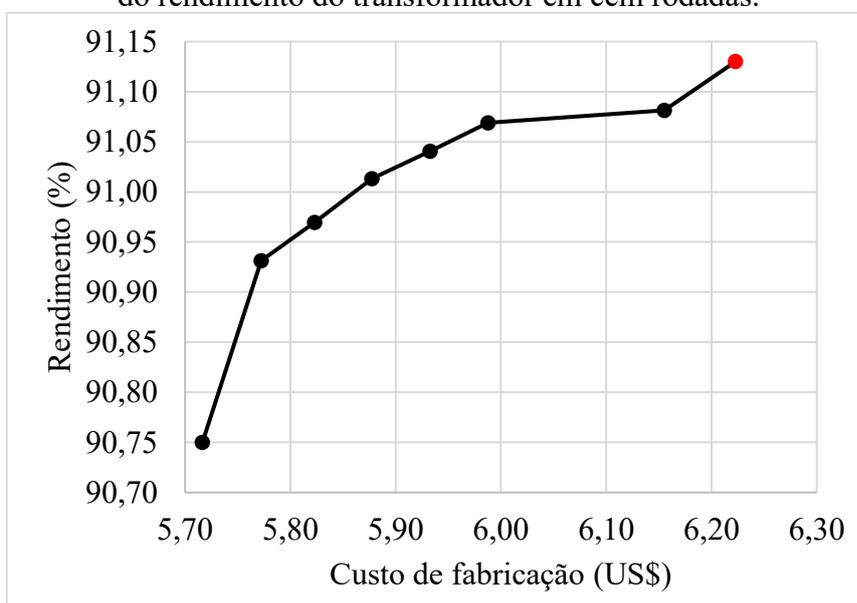
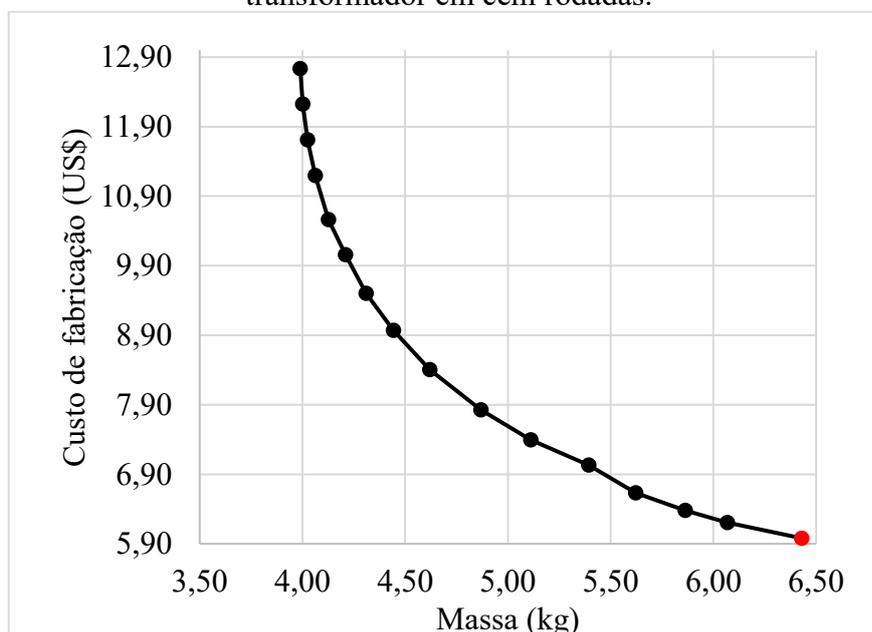


Figura 6.3: Curva de Pareto oriunda da minimização da massa e do custo de fabricação do transformador em cem rodadas.



De todos esses resultados, selecionam-se as soluções de cada algoritmo multiobjetivo em que o rendimento ficou mais próximo do do mono-objetivo para fins de comparação. Na situação **A**, foi a solução 16; na **B**, foi a solução 8 enquanto, na **C**, foi a 16. Essas soluções são expostas a seguir através de dois resumos comparativos elaborados nas Tabelas 6.2 e 6.3.

Tabela 6.2: Comparação das soluções para as três situações estudadas, com o rendimento mais próximo do obtido por AGMONO.

Grandeza	A: $m_T \times \eta$	B: $C_{fab} \times \eta$	C: $m_T \times C_{fab}$
Rendimento	91,83%	91,13%	91,84%
Massa do dispositivo	7,47 kg	8,73 kg	6,43 kg
Massa do ferro	6,62 kg	7,82 kg	5,53 kg
Massa do cobre	0,85 kg	0,91 kg	0,90 kg
Custo total com matéria-prima	US\$ 5,77	US\$ 6,22	US\$ 5,98
Custo com o ferro	US\$ 0,66	US\$ 0,78	US\$ 0,55
Custo com o cobre	US\$ 5,11	US\$ 5,44	US\$ 5,43

Tabela 6.3: Comparação dos parâmetros nas soluções de AGMONO e soluções com rendimento mais próximo no AGMULTI para as três situações estudadas.

Caso	c (cm)	t (cm)	hw (cm)	bw (cm)	B_M (T)	J (A/mm ²)	η
AGMONO	2,635	3,997	12,5408	1,5	1,3	3	92,173%
A: $m_T \times \eta$	2,982	3,508	13,1935	1,53	1,2376	3	91,83%
B: $C_{fab} \times \eta$	2,652	3,703	18,9803	1,75	1,2274	3	91,13%
C: $m_T \times C_{fab}$	2,479	3,959	11,4795	1,96	1,2553	3	91,84%

Da Tabela 6.3, obtêm-se as diferenças absolutas até a segunda casa decimal em relação à solução de AGMONO. Essas diferenças são mostradas na Tabela 6.4.

Tabela 6.4: Diferenças absolutas dos parâmetros e do rendimento de AGMONO em relação às soluções mais próximas do AGMULTI para as três situações estudadas.

Caso	c (cm)	t (cm)	hw (cm)	bw (cm)	B_M (T)	J (A/mm ²)	η
AGMONO (referência)	-	-	-	-	-	-	-
A: $m_T \times \eta$	0,347	-0,489	0,653	0,03	-0,062	0,00	-0,34
B: $C_{fab} \times \eta$	0,017	-0,294	6,440	0,25	-0,073	0,00	-1,04
C: $m_T \times C_{fab}$	-0,153	-0,038	-1,061	0,46	-0,045	0,00	-0,33

Da Tabela 6.4, observa-se que a variação entre os rendimentos foi menor que 1,05% e, nos parâmetros, com exceção da altura da janela, as variações não foram superiores a 1,0 cm, o que demonstra as similaridades entre as soluções de projeto. Ainda, recorda-se que, devido à natureza estocástica dos algoritmos genéticos, os resultados para os dois algoritmos podem sofrer alterações de modo a aumentarem ou diminuir as diferenças absolutas.

Por fim, é importante destacar que o projetista mais preocupado com o impacto da massa no rendimento do transformador deve utilizar a situação **A** enquanto o que leva o custo do dispositivo em detrimento do rendimento a situação **B**. Contudo, dos resultados observados na situação **B** comparados com os de rendimentos semelhantes na situação **A**, nota-se que, em geral, não há variação significativa no preço, ao menos na realidade da moeda aplicada (dólar americano), mas pode haver da massa. Portanto, para este transformador de pequeno porte, aplicado possivelmente a retificadores de dispositivos eletrônicos, o projetista deve preferir usar a situação **A**. Entretanto, isso pode não ser verdade quando o transformador projetado for de grande porte, situação em que a variação de quantidade de massa relativamente pequena pode ocasionar um impacto considerável no custo. Portanto, é necessário verificar a utilidade do uso da situação **B** em dispositivos de grande porte em comparação com a situação **A**.

Os resultados com o transformador monofásico são satisfatórios para o desenvolvimento da dissertação de mestrado. Portanto, pode-se prosseguir para a otimização dos projetos de transformadores trifásicos de distribuição.

6.2 O TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 300 KVA

6.2.1 O projeto inicial

O projeto do transformador trifásico de distribuição de 300 kVA descrito na seção 4.2 é realizado, inicialmente, com os seguintes valores de parâmetros e grandezas fornecidas na Tabela 6.5. Em seguida, é realizada a modelagem eletromagnética do dispositivo, mostradas nas Figuras 6.4 e 6.5, no módulo EFCJ do EFCAD com o material ferromagnético considerado como não linear e cuja curva $B-H$ é disponibilizada no Anexo G. O sentido das correntes elétricas dos enrolamentos de alta tensão é oposto aos de baixa e assume-se que o sistema trifásico está equilibrado com 100% de carregamento. Dentre os casos simulados, foi escolhido um dos instantes que a indução máxima acontece, o caso 80. Os resultados são comparados com os analíticos e mostrados na Tabela 6.6

Tabela 6.5: Parâmetros e resultados do projeto inicial do transformador de 300 kVA.

Parâmetro	Valor Inicial	Grandeza	Valor Ótimo
D_C	215 mm	Rendimento	98,72%
hw	532 mm	Massa do dispositivo	918 kg
bw	175 mm	Massa do ferro	848 kg
B_M	1,3 T	Massa do cobre	69,9 kg
J	2,6 A/mm ²	Custo total	US\$ 17.842,01
Grandeza	Valor Ótimo	Custo de fabricação	US\$ 504,35
r_{AT}	4,13 Ω	Custo com o ferro	US\$ 84,80
r_{BT}	1,67 m Ω	Custo com o cobre	US\$ 419,55
R_{eq_AT}	10,75 Ω	Perdas no ferro	853,5 W
X_{eq_AT}	17,33 Ω	Perdas no cobre	3024,7 W
L_{eq_AT}	45,97 mH	N_{AT}	1258 espiras
g_c	1,49 μ S	N_{BT}	20 espiras
b_m	63,67 μ S	L_m	41,66 H

Figura 6.4: Fluxo máximo no transformador de 300 kVA inicial. $\Phi_M = 0,049$ Wb.

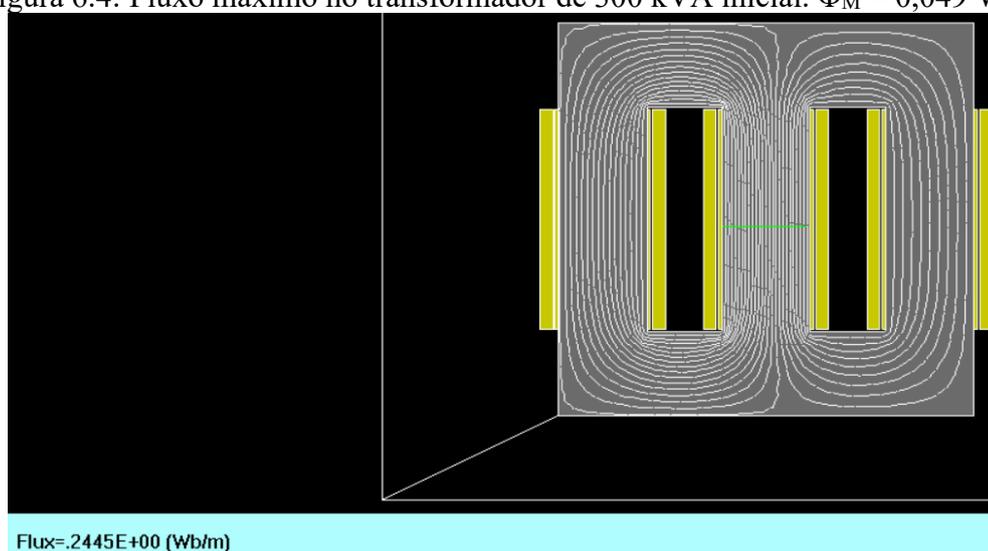
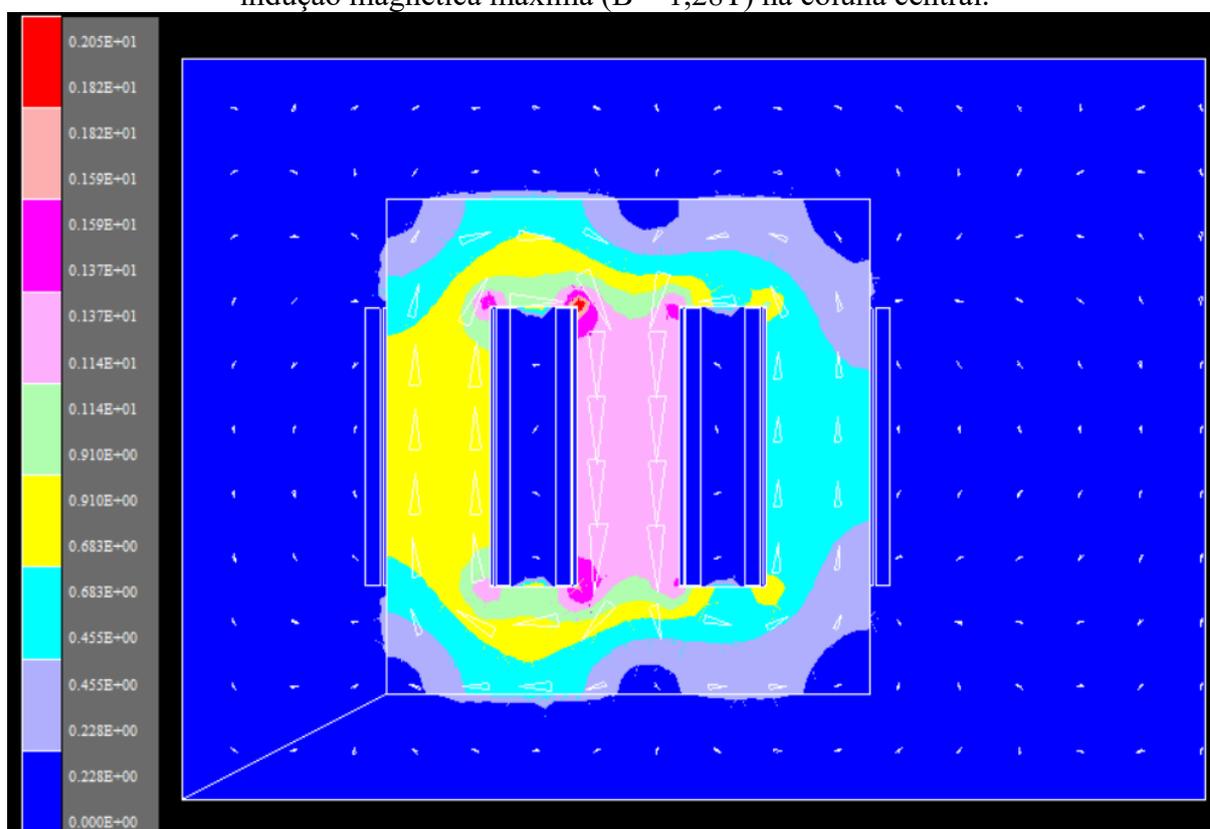


Tabela 6.6: Comparativo entre as grandezas calculadas analiticamente e simuladas no EFCAD.

Indução magnética máxima			Fluxo máximo		
Analítica	Simulação	Diferença	Analítico	Simulação	Diferença
1,3 T	1,28 T	-1,5%	0,041 Wb	0,049 Wb	19,5%

Figura 6.5: Transformador 300 kVA inicial em um dos instantes (caso 80) onde ocorre indução magnética máxima ($B = 1,28\text{T}$) na coluna central.



O fluxo máximo e a indução máxima foram consideradas na seção transversal da coluna central do transformador. Pode-se observar valores maiores de indução nos cantos internos das janelas, mas a comparação entre o modelo analítico e o numérico só ganha sentido nessas regiões pelas hipóteses simplificadoras utilizadas na modelagem analítica. Além disso, os resultados numéricos são também influenciados por fatores como a qualidade da malha utilizada nos cálculos, precisão do algoritmo da solução dos potenciais nos nós, fator de relaxação, entre outros. Por fim, é preciso ressaltar que, na simulação 2D, a anisotropia do ferro sílico de grãos orientados foi desconsiderada, além de a análise em duas dimensões ser menos precisa em relação à simulação 3D, sobretudo para os fenômenos de dispersão, perdas, dentre outros (BASTOS; SADOWSKI, 2014). Portanto, a simulação bidimensional foi realizada com o objetivo de avaliar a coerência entre os valores de indução obtidos pelo MEF e os obtidos por AGMULTI. Para a validação do transformador otimizado, é necessário realizar medições das induções magnéticas nas pernas e nos jugos do transformador.

6.2.2 Os projetos otimizados

Foram feitos três estudos de caso de otimização a depender da segunda função objetivo a ser otimizada, visto que a primeira, a massa total do dispositivo, é comum a todos. No primeiro caso, a segunda função é o rendimento; no segundo, é o custo total enquanto, no terceiro, é o custo de fabricação. Em todos os três estudos, todas as funções objetivo são minimizadas com exceção do rendimento, o qual é maximizado. Além do que, conforme informado na seção 4.3, a população inicial é de mil indivíduos, gerados aleatoriamente conforme as restrições impostas, e que deve permanecer quantitativamente inalterada em 20 gerações. Após trinta rodadas, é escolhida a rodada em que a fronteira de Pareto apresentou a maior razão de hiperárea.

6.2.2.1 Massa X Rendimento

A otimização do transformador de 300 kVA nessa configuração resultou nos indivíduos e na fronteira de Pareto, composta por dez soluções, mostradas na Figura 6.6, tal que esta última é ampliada na Figura 6.7. Para estudos de comparação de resultados, foi escolhida a primeira solução, destacada na Figura 6.7, porque a massa é mínima, mas também principalmente por causa da pouca variação no rendimento mesmo ao considerar os indivíduos dominados. Os parâmetros e demais grandezas de tal solução são arredondados e utilizados num algoritmo que recalcula todas as grandezas importantes para o projeto do transformador, todas as quais disponibilizadas na Tabela 6.7. Quanto às demais soluções, podem ser consultadas no Anexo B. Por fim, $HR = 0,8061$ para as referências $r = (1300; 98,40\%)$ e $p = (690; 98,90\%)$.

Figura 6.6: População na 20ª geração com as curvas de Pareto na 1ª (verde) e 20ª (azul) geração – Transformador trifásico de 300 kVA – $m_T \times \eta$.

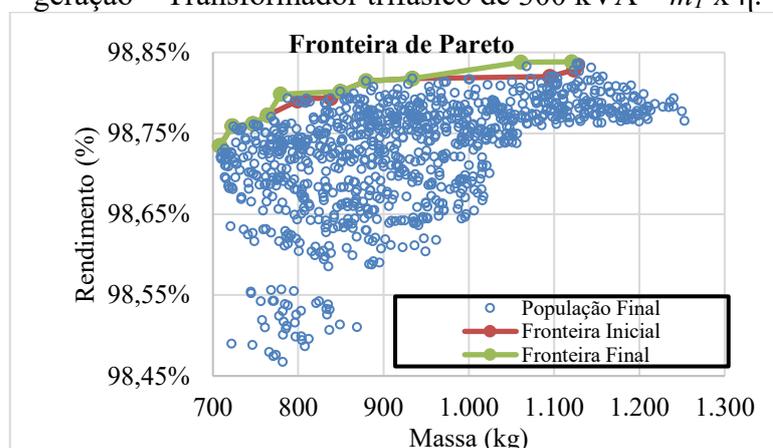


Figura 6.7: As dez soluções e a curva de Pareto na 20ª geração – Transformador trifásico de 300 kVA – $m_T \times \eta$. Destaque para a solução 1, a escolhida.

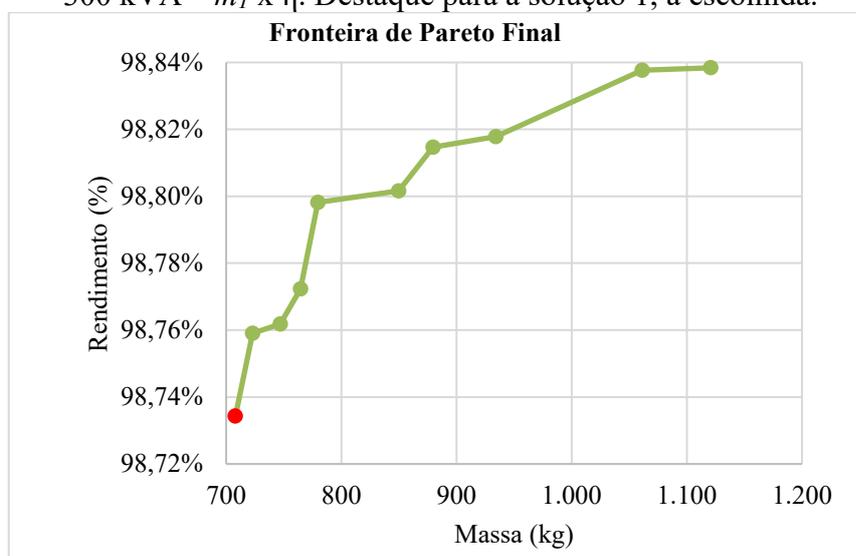


Tabela 6.7: Parâmetros e resultados ótimos do projeto do transformador de 300 kVA – Funções objetivo: $m_T \times \eta$. Solução 1.

Parâmetro	Valor Ótimo	Grandeza	Valor Ótimo
D_C	195 mm	Rendimento	98,73%
hw	497 mm	Massa do dispositivo	708,06 kg
bw	155 mm	Massa do ferro	638,94 kg
B_M	1,41 T	Massa do cobre	69,12 kg
J	2,6 A/mm ²	Custo total	US\$ 16.842,74
Grandeza	Valor Ótimo	Custo de fabricação	US\$ 478,60
r_{AT}	4,2410 Ω	Custo com o ferro	US\$ 63,89
r_{BT}	0,0017 Ω	Custo com o cobre	US\$ 414,70
R_{eq_AT}	10,9246 Ω	Perdas no ferro	753,8 W
X_{eq_AT}	21,5805 Ω	Perdas no cobre	3093,6W
L_{eq_AT}	57,24 mH	N_{AT}	1380 espiras
g_c	1,32 μ S	N_{BT}	22 espiras
b_m	58,44 μ S	L_m	45,39 H

6.2.2.2 Massa X Custo Total

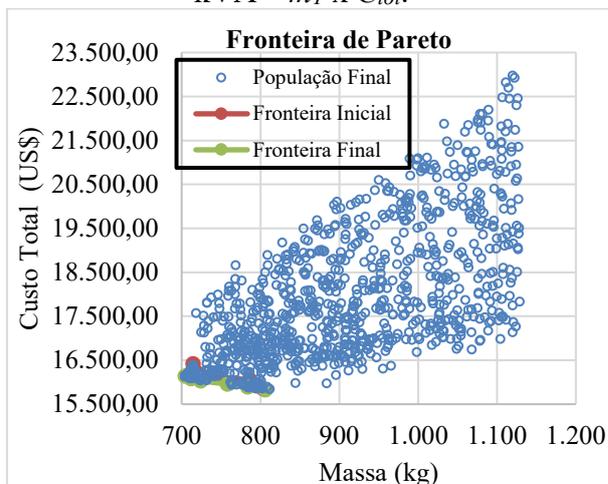
A otimização do transformador de 300 kVA nessa configuração resultou nos indivíduos e na fronteira de Pareto, composta por seis soluções, mostradas na Figura 6.8, tal que esta última é ampliada na Figura 6.9. Para estudos de comparação de resultados, foi selecionada a quinta solução, destacada na Figura 6.9 e com dados dispostos na Tabela 6.8, a qual consta com os valores arredondados e recalculados pelo algoritmo citado anteriormente. Quanto às demais soluções, podem ser consultadas no Anexo B. Por fim, $HR = 0,7768$ para as referências $r = (900; 18000)$ e $p = (690; 15500)$.

Tabela 6.8: Parâmetros e resultados ótimos do projeto do transformador de 300 kVA – Funções objetivo: $m_T \times C_{tot}$. Solução 5.

Parâmetro	Valor Ótimo	Grandeza	Valor Ótimo
D_C	203 mm	Rendimento	98,62%
hw	504 mm	Massa do dispositivo	783,87 kg
bw	150 mm	Massa do ferro	698,27 kg
B_M	1,16 T	Massa do cobre	85,60 kg
J	2,6 A/mm ²	Custo total	US\$ 15.890,34
Grandeza	Valor Ótimo	Custo de fabricação	US\$ 583,41
r_{AT}	5,0135 Ω	Custo com o ferro	US\$ 69,83
r_{BT}	0,0020 Ω	Custo com o cobre	US\$ 513,58
R_{eq_AT}	9,4017 Ω	Perdas no ferro	472,4 W
X_{eq_AT}	29,0239 Ω	Perdas no cobre	1697,1 W
L_{eq_AT}	76,99 mH	N_{AT}	1572 espiras
g_c	0,98 μS	N_{BT}	25 espiras
b_m	42,50 μS	L_m	62,41 H

Figura 6.8: População na 20ª geração com as curvas de Pareto na 1ª (verde) e 20ª (azul)

geração – Transformador trifásico de 300 kVA – $m_T \times C_{tot}$.



trifásico de 300 kVA – $m_T \times C_{tot}$. Destaque para a solução 5, a escolhida.

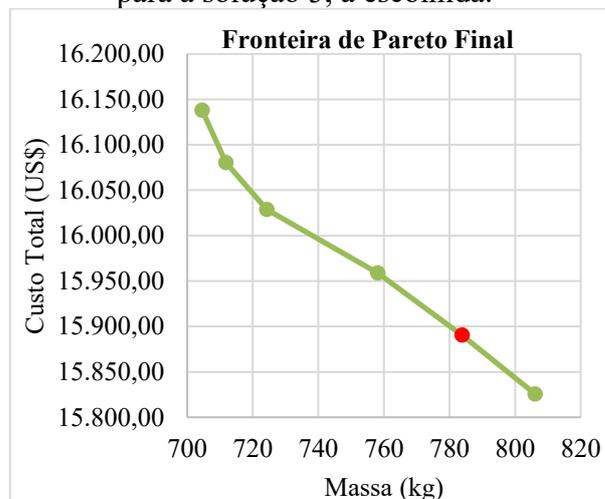


Figura 6.9: As seis soluções e a curva de Pareto na 20ª geração – Transformador

6.2.2.3 Massa X Custo de Fabricação

A otimização do transformador de 300 kVA nessa configuração resultou nos indivíduos e na fronteira de Pareto, composta por dez soluções, mostradas na Figura 6.10, tal que esta última é ampliada na Figura 6.11. Para estudos de comparação de resultados, foi escolhida a sexta solução, destacada na Figura 6.11, porque suas medidas geométricas são próximas das originais do projeto, sobretudo o diâmetro das colunas do núcleo. Os parâmetros e demais grandezas de tal solução são arredondados e utilizados no mesmo algoritmo, citado nos dois casos anteriores, que recalcula todas as grandezas importantes para o projeto do transformador, todas as quais disponibilizadas na Tabela 6.9. Quanto às demais soluções, podem ser consultadas no Anexo B. Por fim, $HR = 0,8686$ para as referências $r = (1300; 650)$ e $p = (690; 390)$.

Salienta-se que esse estudo foi selecionado para ser modelado no EFCAD, em detrimento dos outros dois, cujas medidas se distanciaram mais do projeto original, a fim de analisar se as grandezas, sobretudo as eletromagnéticas, tornam a implementação do projeto viável.

Figura 6.10: População na 20ª geração com as curvas de Pareto na 1ª (verde) e 20ª (azul)

geração – Transformador trifásico de 300 kVA – $m_T \times C_{fab}$.

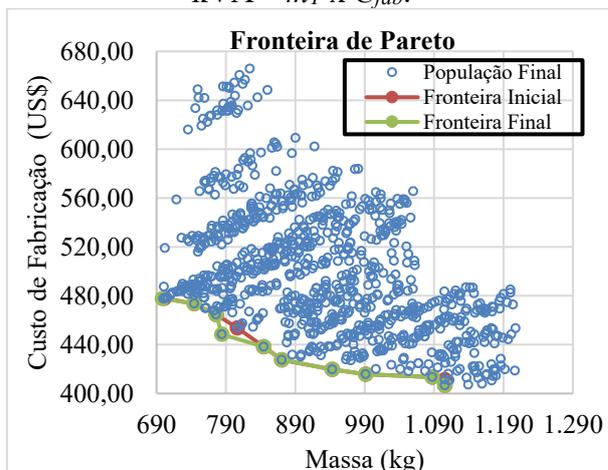


Figura 6.11: As nove soluções e a curva de Pareto na 20ª geração – Transformador trifásico de 300 kVA – $m_T \times C_{fab}$. Destaque para a solução 6, a escolhida.

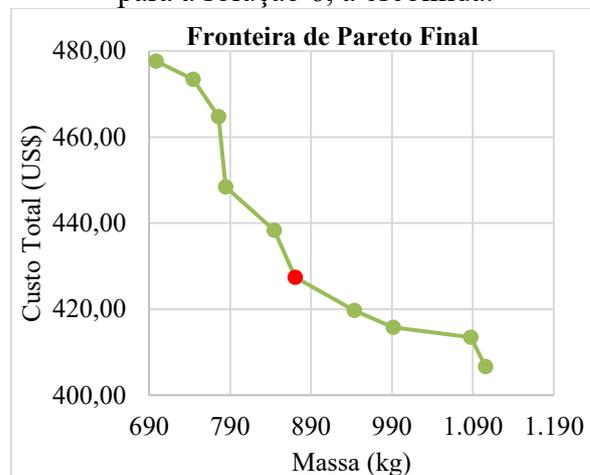


Tabela 6.9: Parâmetros e resultados ótimos do projeto do transformador de 300 kVA – Funções objetivo: $m_T \times C_{fab}$. Solução 6.

Parâmetro	Valor Ótimo	Grandeza	Valor Ótimo
D_C	215 mm	Rendimento	98,81%
h_w	503 mm	Massa do dispositivo	870,49 kg
b_w	160 mm	Massa do ferro	812,81 kg
B_M	1,50 T	Massa do cobre	57,69 kg
J	2,6 A/mm ²	Custo total	US\$ 19.407,38
Grandeza	Valor Ótimo	Custo de fabricação	US\$ 427,39
r_{AT}	3,4172 Ω	Custo com o ferro	US\$ 81,28
r_{BT}	0,0014 Ω	Custo com o cobre	US\$ 346,11
R_{eq_AT}	9,0795 Ω	Perdas no ferro	1086,3 W
X_{eq_AT}	11,5591 Ω	Perdas no cobre	2530,8 W
L_{eq_AT}	30,66 mH	N_{AT}	1070 espiras
g_c	1,90 μ S	N_{BT}	17 espiras
b_m	83,94 μ S	L_m	31,60 H

Dentre os casos simulados, foi escolhido um dos instantes em que a indução máxima acontece; então o caso 14, que atende a esse critério. Os resultados são apresentados nas Figuras 6.12 e 6.13 mais a Tabela 6.10, a qual compara os do EFCAD com os do AGMULTI.

Figura 6.12: Fluxo máximo no transformador de 300 kVA (solução nº 6). $\Phi_M = 0,0471$ Wb.

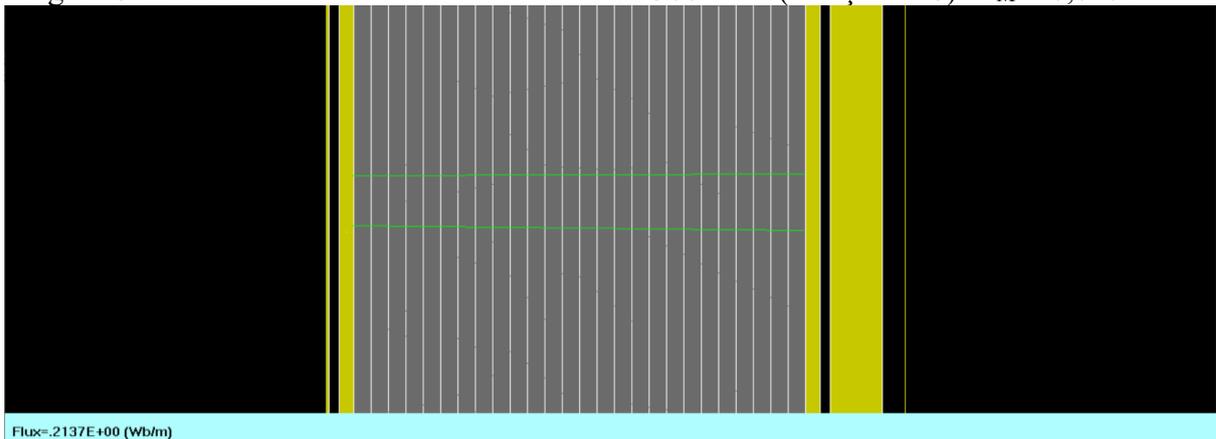


Figura 6.13: Distribuição das induções no transformador de 300 kVA (solução nº 6) em um dos instantes (caso 14) onde ocorre indução magnética máxima predominante ($B = 1,12$ T) e nas extremidades ($B = 1,47$ T) na coluna central.

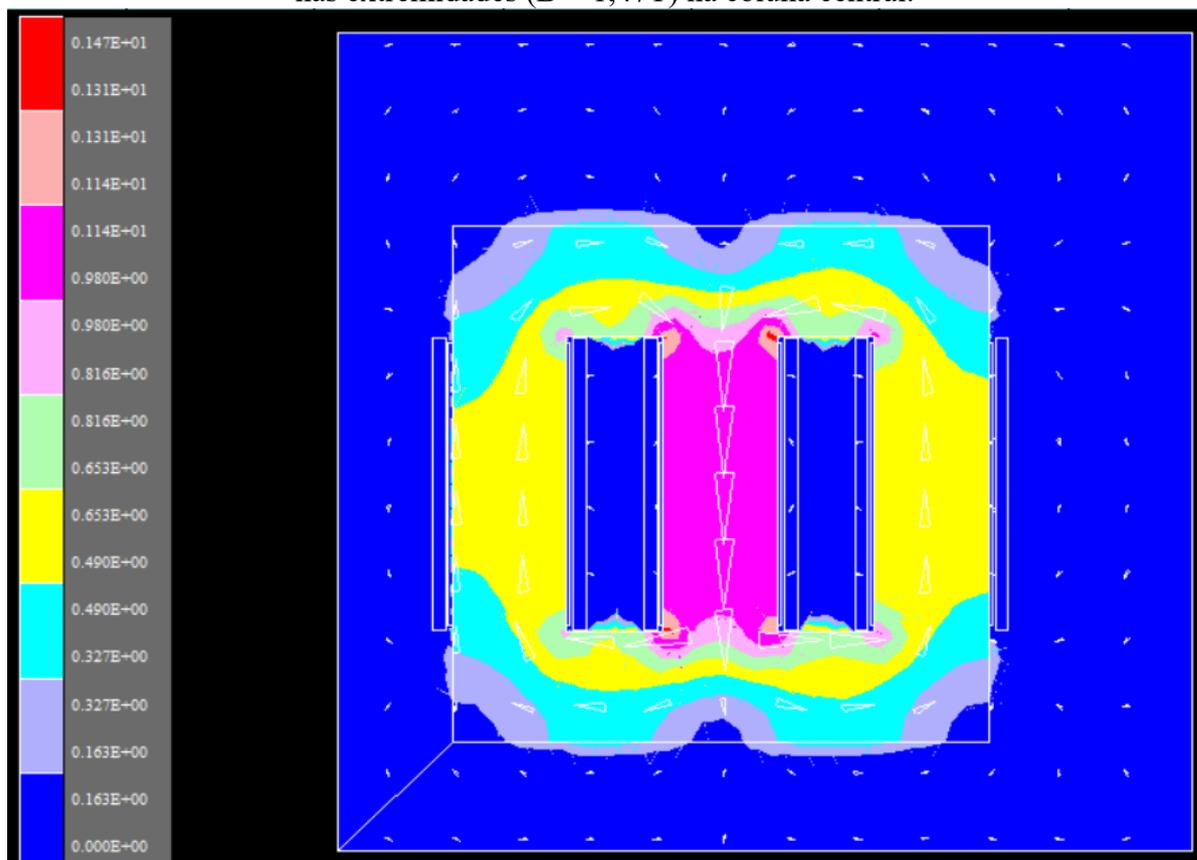


Tabela 6.10: Comparativo entre as grandezas calculadas pelo AGMULTI e as simuladas no EFCAD.

Tipo do Valor	Indução magnética máxima			Fluxo máximo		
	AGMULTI	EFCAD	Diferença	AGMULTI	EFCAD	Diferença
Máximo Predominante	1,50 T	1,12 T	-25%	47,1 mWb	43 mWb	-8,8%
Máximo nas Extremidades	1,50 T	1,47 T	-2%	47,1 mWb	43 mWb	-8,8%

Apesar de a diferença entre as induções determinadas pelo AGMULTI e o EFCAD ter aumentado no projeto ótimo em relação ao inicial, destaca-se que o ótimo calcula as grandezas de maneira diferente do primeiro. No princípio, as grandezas eletromagnéticas são impostas e, a partir delas, os parâmetros geométricos são calculados e reajustados. Já no projeto ótimo, o algoritmo impõe valores para todos os parâmetros, o que acarreta a competição entre o valor de indução otimizado com um valor de indução idealizado para as dimensões geométricas do projeto, o que explica a diferença significativa entre a indução imposta pelo algoritmo e o valor encontrado pelo EFCAD, mais próximo do idealizado. Todavia, é importante frisar que os 1,12 T obtidos na simulação via elementos finitos está contido no intervalo permitido de induções magnéticas, o que torna a simulação válida. Se, no entanto, estivesse abaixo de 1,1 T ou acima de 1,5T, a solução deveria ser descartada e outra solução da curva de Pareto deveria ser escolhida e simulada para validação. Além disso, pode-se considerar ainda menor a diferença entre as induções se forem ponderados os efeitos de saturação e espraçamento nas bordas, os quais resultaram em um máximo de 1,47 T, ao invés da indução máxima média na coluna central do núcleo, onde a indução foi a de 1,12 T. Nesse caso, a diferença cai a -2%, conforme a comparação da Tabela 6.10.

6.2.2.4 Comparativo dos quatro projetos

Selecionada uma solução de cada um dos três estudos mais as grandezas do projeto inicial, comparam-se os parâmetros entre eles na Tabela 6.11 e os valores ótimos das funções objetivo na Tabela 6.12.

Tabela 6.11: Valores dos parâmetros no projeto inicial e nas soluções ótimas escolhidas.

Parâmetro	Projeto Inicial	$m_T \times \eta$	$m_T \times C_{tot}$	$m_T \times C_{fab}$
D_C	215 mm	195 mm	203 mm	215 mm
hw	532 mm	497 mm	504 mm	505 mm
b_w	175 mm	155 mm	150 mm	165 mm
B_M	1,3 T	1,41 T	1,16 T	1,50 T
J	2,6 A/mm ²	2,6 A/mm ²	2,6 A/mm ²	2,6 A/mm ²

Tabela 6.12: Valores das grandezas otimizadas pelo algoritmo genético multiobjetivo. Os com fundo **cinza** são funções objetivo em dado processo de otimização; em **verde**, os melhores resultados e, em **vermelho**, os piores.

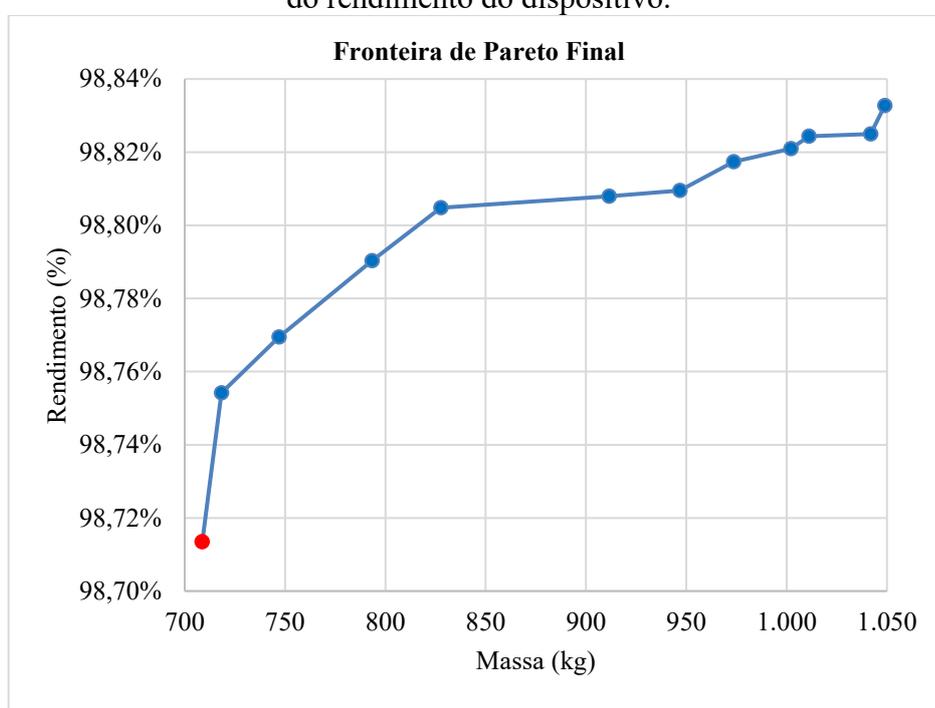
Grandeza	Projeto Inicial	$m_T \times \eta$	$m_T \times C_{tot}$	$m_T \times C_{fab}$
m_T	918,0 kg	708,06 kg	783,87 kg	874,63 kg
η	98,72%	98,73%	98,62%	98,81%
C_{fab}	US\$ 504,35	US\$ 478,60	US\$ 583,41	US\$ 427,81
C_{tot}	US\$ 17.842,01	US\$ 16.842,74	US\$ 15.890,34	US\$ 19.536,13

A respeito dos valores iniciais de projeto, o da massa total é o único pior em todos os cenários. Talvez se ela não fosse função objetivo nas três otimizações, o valor inicial pudesse ser menor que em algum novo cenário. Ademais, o rendimento pouco varia em transformadores de potência elevada, como o de 300 kVA; pode ser considerado como $(98,7 \pm 0,1)\%$ em todas as soluções de todas as otimizações, o que pode ser conferido no Anexo B. Além disso, percebe-se que o menor custo total gerado nas três otimizações é justamente o da que o possui como uma das funções objetivo, apesar de, dentro desse estudo, ser a segunda solução mais barata. Já no caso da que possui o custo de fabricação como um dos objetivos, é possível encontrar soluções mais caras, mas também mais baratas. Por fim, na que otimiza a massa total e o rendimento, a primeira grandeza é o mínimo global de fato.

Todavia, deve-se ter cuidado ao afirmar que tais valores são sempre os mínimos absolutos, ou máximos, no caso do rendimento, por três motivos. Primeiro, porque nem sempre a solução escolhida prioriza o valor mínimo (máximo) de uma das funções otimizadas, embora, nesse caso, tenha sido o caso da massa nas que possuem o rendimento e o custo total como f_2 . Mesmo assim, o segundo motivo é que o algoritmo genético lida com operações aleatórias, que, embora produzam resultados robustos, podem ser levemente alterados e resultar em valores diferentes, maiores ou menores, quando o AGMULTI reiniciar o processo de otimização. Por

exemplo, quando a massa total e o rendimento foram otimizados, o valor mínimo encontrado para a massa foi 708,06 kg na solução 1 adotada na pesquisa. Contudo, ao reiniciar o algoritmo, resultou num valor igual a 708,75 kg, que é 0,1% maior que o base, conforme destacado na fronteira de Pareto da Figura 6.14, gerada por AGMULTI no final do processo. É um detalhe mais matemático do que construtivo, visto o desvio irrelevante de 0,1% para cima. Quanto à razão de hiperárea do novo resultado, obteve-se 0,7939, um desvio de apenas -1,5% em detrimento do resultado inicial.

Figura 6.14: Nova curva de Pareto oriunda da minimização da massa total e da maximização do rendimento do dispositivo.



Quanto ao terceiro motivo, relaciona-se com as mudanças dos parâmetros de controle população inicial e quantidade de gerações. Ao mexer em um desses dois, o conjunto solução pode convergir mais rápido ou devagar, conforme será explorado na seção seguinte.

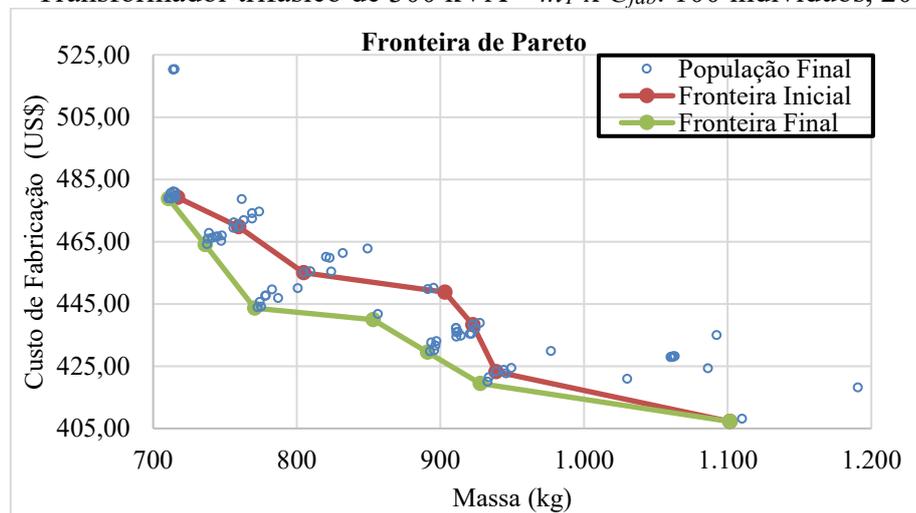
6.2.3 Efeito da população e do número de gerações nos resultados

Comparados os três estudos de otimização do transformador de 300 kVA, resta estudar o efeito da mudança dos parâmetros de controle população e número de gerações aos resultados. Como base de comparação, optou-se pelo estudo em que o custo de fabricação foi minimizado

junto com a massa do dispositivo, porque foi o mais explorado dentre os três. Recorda-se que nesse estudo, bem como em todos os anteriores relacionados com esse dispositivo, a população é composta por 1000 indivíduos e que a otimização cessa na vigésima geração.

A princípio, deseja-se manter constante o número de gerações em vinte e reduzir o número de indivíduos para 100 com a finalidade de analisar o impacto nas soluções dominadas e não-dominadas. Isso resulta em uma fronteira de Pareto semelhante à obtida na Figura 6.10, porém com as soluções dominadas concentradas perto da curva; em especial, próximas à região de mínimo da massa, seguida pela região central e a região de mínimo de custo nessa ordem decrescente. Essas novas soluções podem ser visualizadas na Figura 6.15.

Figura 6.15: População na 20ª geração com as curvas de Pareto na 1ª (verde) e 20ª (azul) geração – Transformador trifásico de 300 kVA – $m_T \times C_{fab}$. 100 indivíduos, 20 gerações.

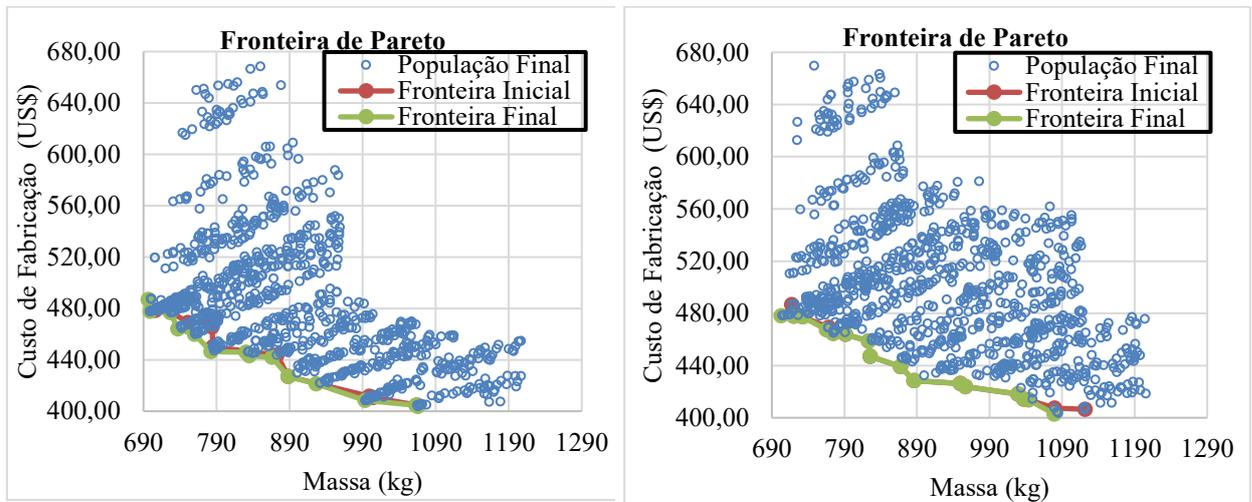


Em geral, o efeito da redução do número de indivíduos não resulta em mudanças significativas, nem mesmo a diminuição da razão de hiperárea de 0,8686 para 0,8321. No caso do aumento de indivíduos para 10.000, também não resulta em mudanças positivas impactantes, apenas deixa o processo iterativo mais lento em dez vezes.

Em seguida, retorna-se aos 1000 indivíduos originais e varia-se, agora, a quantidade de gerações de 20 para 40 e depois para 10. Se alterações significativas forem observadas de 20 para 40 gerações, significa que os resultados não foram bem otimizados até a 20ª geração. Contudo, a otimização gera uma fronteira de Pareto na Figura 6.16(a) semelhante à da Figura 6.10, o que significa que o algoritmo produz resultados precisos e robustos já na 20ª geração. Resta então saber se as soluções não-dominadas já são robustas na 10ª geração. Ao otimizar o programa com a alteração novamente nesse operador genético, obtêm-se, na Figura 6.16(b),

resultados semelhantes ao da Figura 6.10, o que comprova a precisão e a robustez do AGMULTI na 10ª geração também. Entretanto, destaca-se que, em algumas simulações tanto para mais quanto para menos gerações, perceberam-se modificações significativas de até $\pm 16\%$, nos extremos no valor de uma das funções objetivo. Ademais, as razões de hiperárea foram de 0,8527 e 0,8306 para 40 e 10 gerações respectivamente.

Figura 6.16: População final com as curvas de Pareto na 1ª (verde) e última (azul) geração – Transformador trifásico de 300 kVA – $m_T \times C_{fab}$.

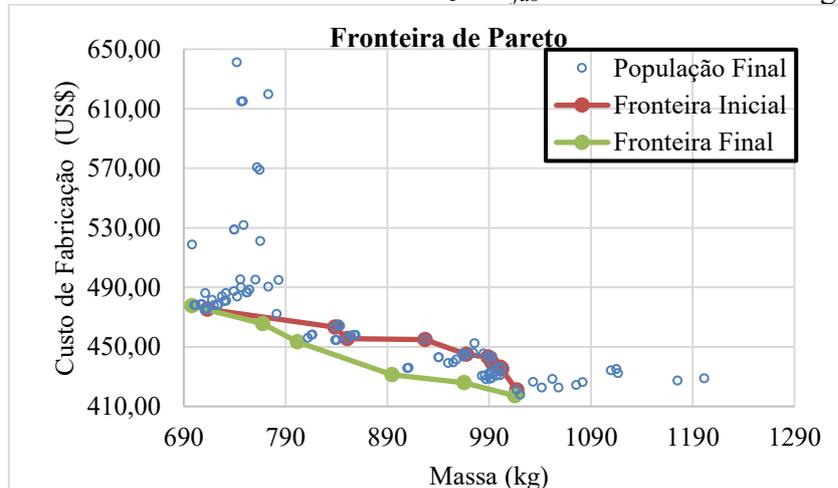


(a) 1000 indivíduos, 40 gerações.

(b) 1000 indivíduos, 10 gerações.

Como a redução nos dois operadores genéticos geraram soluções robustas, então foi testado um cenário combinado dos dois, mostrado na Figura 6.17.

Figura 6.17: População final com as curvas de Pareto na 1ª (verde) e 10ª (azul) geração – Transformador trifásico de 300 kVA – $m_T \times C_{fab}$. 100 indivíduos e 10 gerações.



Novamente, modificações significativas foram percebidas nos extremos no valor de uma das funções objetivo apesar do decréscimo da razão de hiperárea para 0,8167. No entanto, as reduções executadas nos dois operadores genéticos geraram soluções robustas também. Portanto, os resultados continuam precisos e robustos com 100 indivíduos e 10 gerações, 1/10 da população e metade das gerações do estudo inicial respectivamente, o que significa uma economia de custo computacional em detrimento da piora global da razão de hiperárea em 6,0%. Em relação ao tempo de processamento, houve uma economia de 0,75 a 1 segundo em relação ao estudo inicial no computador utilizado, o que corresponde em torno de 36%. Por fim, como a população foi reduzida, também foi diminuída a quantidade de indivíduos proibidos, isto é, os quais violam as restrições de espaçamento entre os enrolamentos e o núcleo do projeto do transformador.

6.3 O TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 30 KVA

Constatados os resultados do transformador trifásico de 300 kVA, que foi projetado para esta dissertação, há interesse de otimizar projetos de transformadores de menor potência já prontos e publicados; analisar os resultados e observar, em particular, a variação no rendimento a fim de julgá-lo válido em processos de otimização de transformadores de dezenas de kVA, visto que é válido em centenas de Volt-Ampères, mas não em centenas de milhar dessa mesma unidade. Para tanto, faz-se uso do projeto de um transformador trifásico de 30 kVA de (MARTIGNONI, 1973), mas com conexões Y-Y nos dois enrolamentos ao invés de Δ -Y

6.3.1 O projeto inicial

O projeto do transformador trifásico de distribuição de 30 kVA descrito na seção 4.2 é realizado, de início, com os seguintes valores de parâmetros e grandezas fornecidas na Tabela 6.13.

6.3.2 Os projetos otimizados

Assim como no transformador de 300 kVA, foram feitos os mesmos três estudos de caso de otimização anteriores. Todavia, como a robustez do algoritmo genético de otimização

multiobjetivo já foi testada, mudaram-se os valores dos operadores genéticos para cem indivíduos e dez gerações.

Tabela 6.13: Parâmetros e resultados do projeto inicial do transformador de 30 kVA.

Parâmetro	Valor Inicial	Grandeza	Valor Ótimo
D_C	140 mm	Rendimento	97,31%
hw	254 mm	Massa do dispositivo	205,9 kg
bw	125 mm	Massa do ferro	161,5 kg
B_M	1,1 T	Massa do cobre	44,4 kg
J	2,3 A/mm ²	Custo total	US\$ 4.739,85
Grandeza	Valor Ótimo	Custo de fabricação	US\$ 274,26
r_{AT}	48,6 Ω	Custo com o ferro	US\$ 16,15
r_{BT}	13,8 m Ω	Custo com o cobre	US\$ 258,11
R_{eq_AT}	89,59 Ω	Perdas no ferro	261,8 W
X_{eq_AT}	123,04 Ω	Perdas no cobre	561,52 W
L_{eq_AT}	326,37 mH	N_{AT}	1258 espiras
g_c	1,82 μ S	N_{BT}	20 espiras
b_m	33,43 μ S	L_m	79,34 H

6.3.2.1 Massa X Rendimento

Nessa configuração, a otimização do dispositivo eletromagnético de 30 kVA resultou nos indivíduos e na fronteira de Pareto, composta por nove soluções, mostradas na Figura 6.18, tal que esta última é ampliada na Figura 6.19. Para estudos de comparação de resultados, foi escolhida a quarta solução, destacada na Figura 6.19, porque os valores otimizados da duas funções objetivo encontram-se numa zona intermediária, além de constatar que, nessa região, os custos são menores. Os parâmetros e demais grandezas de tal solução são arredondados e utilizados num outro algoritmo que recalcula todas as grandezas importantes para o projeto do transformador, agora de 30 kVA. Por fim, são disponibilizadas na Tabela 6.14. Quanto às demais soluções, podem ser consultadas no Anexo C. Por fim, $HR = 0,6792$ para as referências $r = (200; 97,55\%)$ e $p = (100; 97,95\%)$.

Figura 6.18: População na 10ª geração com as curvas de Pareto na 1ª (verde) e 10ª (azul) geração – Transformador trifásico de 30 kVA – $m_T \times \eta$.

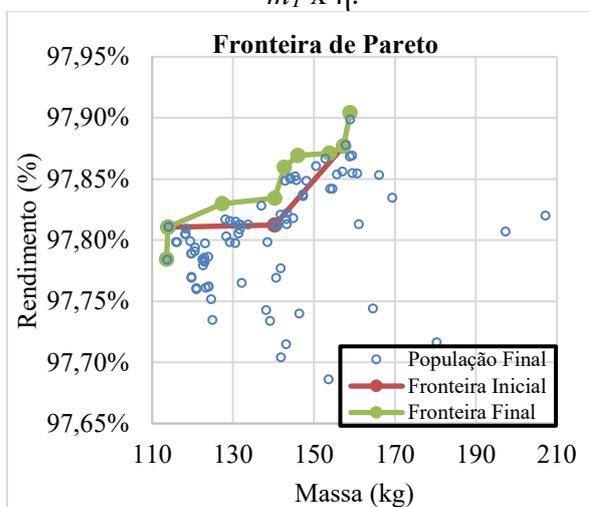


Figura 6.19: As seis soluções e a curva de Pareto na 10ª geração – Transformador trifásico de 30 kVA – $m_T \times \eta$. Destaque para a solução 4, a escolhida.

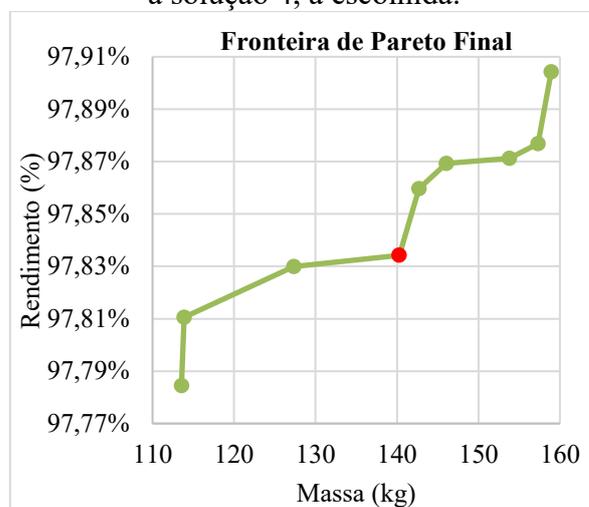


Tabela 6.14: Parâmetros e resultados ótimos do projeto do transformador de 30 kVA – Funções objetivo: $m_T \times \eta$. Solução 4.

Parâmetro	Valor Ótimo	Grandeza	Valor Ótimo
D_C	117 mm	Rendimento	97,83 %
h_w	213 mm	Massa do dispositivo	140,29 kg
b_w	105 mm	Massa do ferro	122,00 kg
B_M	1,11 T	Massa do cobre	18,29 kg
J	2,3 A/mm ²	Custo total	US\$ 3.617,85
Grandeza	Valor Ótimo	Custo de fabricação	US\$ 121,95
r_{AT}	41,7074 Ω	Custo com o ferro	US\$ 12,20
r_{BT}	10,7 m Ω	Custo com o cobre	US\$ 109,75
R_{eq_AT}	73,5343 Ω	Perdas no ferro	202,4 W
X_{eq_AT}	97,7657 Ω	Perdas no cobre	464,0 W
L_{eq_AT}	259,33 mH	N_{AT}	2510 espiras
g_c	1,41 μ S	N_{BT}	46 espiras
b_m	24,28 μ S	L_m	109,23 H

6.3.2.2 Massa X Custo Total

A otimização do transformador de 30 kVA nessa configuração resultou nos indivíduos e na fronteira de Pareto, composta por cinco soluções, mostradas na Figura 6.20, tal que esta última é ampliada na Figura 6.21. Para estudos de comparação de resultados, foi escolhida a quinta solução, destacada na Figura 6.21 e com dados dispostos na Tabela 6.15, na qual consta os valores arredondados dos dados do transformador e recalculados pelo algoritmo citado no caso precedente. Quanto às demais soluções, podem ser consultadas no Anexo C. Por fim, $HR = 0,5562$ para as referências $r = (130; 4500)$ e $p = (100; 3000)$.

Figura 6.20: População na 10ª geração com as curvas de Pareto na 1ª (verde) e 10ª (azul) geração – Transformador trifásico de 30 kVA – $m_T \times C_{tot}$.

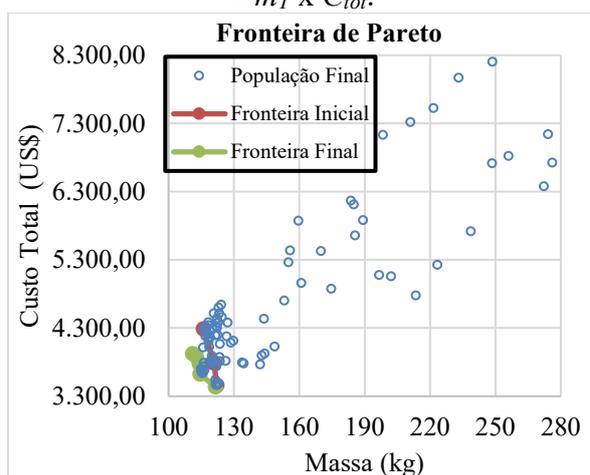
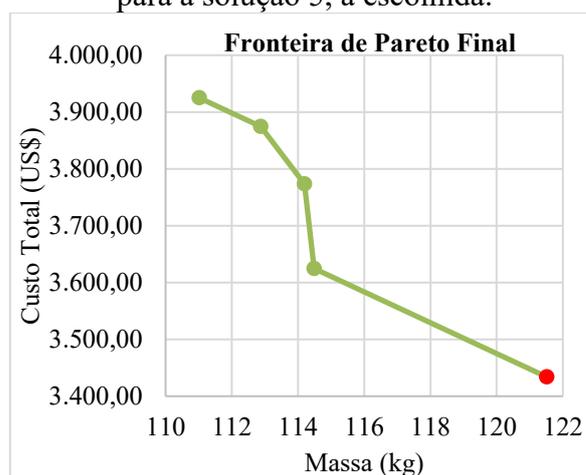


Figura 6.21: As quatro soluções e a curva de Pareto na 10ª geração – Transformador trifásico de 30 kVA – $m_T \times C_{tot}$. Destaque para a solução 5, a escolhida.



Apesar da solução apresentada ser válida, constatou-se que, para 100 indivíduos e 10 gerações, a otimização dessas duas funções objetivo pode não ser tão robusta. Após alguns ajustes e simulações, foi constatado que, com 1000 indivíduos e 20 gerações, essa otimização produz, enfim, resultados robustos. No entanto, será apresentado aqui o resultado com 100 indivíduos e 10 gerações, porque se aproximam dos robustos. Foi constatado que isso também ocorre com o transformador de 300 kVA com as mesmas funções objetivos embora em menor gravidade. Portanto, o problema de maior potência é solucionado apenas ao alterar o número de gerações de 10 para 20, com a população em 100.

Tabela 6.15: Parâmetros e resultados ótimos do projeto do transformador de 30 kVA – Funções objetivo: $m_T \times C_{tot}$. Solução 5.

Parâmetro	Valor Ótimo	Grandeza	Valor Ótimo
D_C	100 mm	Rendimento	97,61%
hw	289 mm	Massa do dispositivo	121,52 kg
bw	115 mm	Massa do ferro	98,90 kg
B_M	1,10 T	Massa do cobre	22,61 kg
J	2,3 A/mm ²	Custo total	US\$ 3.433,79
Grandeza	Valor Ótimo	Custo de fabricação	US\$ 145,58
r_{AT}	53,3434 Ω	Custo com o ferro	US\$ 9,89
r_{BT}	12,7 m Ω	Custo com o cobre	US\$ 135,69
R_{eq_AT}	91,1763 Ω	Perdas no ferro	159,8 W
X_{eq_AT}	137,7564 Ω	Perdas no cobre	575,6 W
L_{eq_AT}	365,41 mH	N_{AT}	3536 espiras
g_c	1,11 μ S	N_{BT}	63 espiras
b_m	19,55 μ S	L_m	135,70 H

6.3.2.3 Massa X Custo de Fabricação

A otimização do transformador de 30 kVA com essas duas funções objetivo resultou nos indivíduos e na fronteira de Pareto, composta por seis soluções, mostradas na Figura 6.22, tal que esta última é ampliada na Figura 6.23. Desta vez, foi acrescentado uma etapa a mais antes do estudo para comparação dos resultados das três otimizações. Isso por que se deseja confrontar o custo total da solução de massa mínima (primeira), destacada na Figura 6.23, com o da solução de custo de fabricação mínimo (sexta). Os parâmetros e demais grandezas dessas duas soluções são arredondados e utilizados no referido algoritmo que recalcula todas as grandezas importantes para o projeto do transformador. Por fim, os resultados fornecidos por esse algoritmo são disponibilizados nas Tabelas 6.16 e 6.17 para a primeira e sexta soluções respectivamente. Quanto às demais soluções, podem ser encontradas no Anexo C. Por fim, a razão de hiperárea obtida foi de 0,6840 para as referências $r = (250; 150)$ e $p = (100; 85)$.

Tabela 6.16: Parâmetros e resultados ótimos do projeto do transformador de 30 kVA – Funções objetivo: $m_T \times C_{fab}$. Solução 1

Parâmetro	Valor Ótimo	Grandeza	Valor Ótimo
D_C	110 mm	Rendimento	97,84%
hw	200 mm	Massa do dispositivo	121,64 kg
bw	105 mm	Massa do ferro	104,18 kg
B_M	1,25 T	Massa do cobre	17,46 kg
J	2,3 A/mm ²	Custo total	US\$ 3.785,70
Grandeza	Valor Ótimo	Custo de fabricação	US\$ 115,20
r_{AT}	40,1417 Ω	Custo com o ferro	US\$ 10,42
r_{BT}	10,2 m Ω	Custo com o cobre	US\$ 104,78
R_{eq_AT}	70,4022 Ω	Perdas no ferro	216,9 W
X_{eq_AT}	96,9277 Ω	Perdas no cobre	444,3 W
L_{eq_AT}	257,11 mH	N_{AT}	2510 espiras
g_c	1,51 μ S	N_{BT}	46 espiras
b_m	26,37 μ S	L_m	100,60 H

Tabela 6.17: Parâmetros e resultados ótimos do projeto do transformador de 30 kVA – Funções objetivo: $m_T \times C_{fab}$. Solução 6.

Parâmetro	Valor Ótimo	Grandeza	Valor Ótimo
D_C	124 mm	Rendimento	97,59%
hw	230 mm	Massa do dispositivo	169,39 kg
bw	140 mm	Massa do ferro	156,22 kg
B_M	1,456051 T	Massa do cobre	13,18 kg
J	2,3 A/mm ²	Custo total	US\$ 6097,85
Grandeza	Valor Ótimo	Custo de fabricação	US\$ 94,68
r_{AT}	26,8227 Ω	Custo com o ferro	US\$ 15,62
r_{BT}	6,7 m Ω	Custo com o cobre	US\$ 79,06
R_{eq_AT}	46,8224 Ω	Perdas no ferro	446,8 W
X_{eq_AT}	30,0719 Ω	Perdas no cobre	295,7 W
L_{eq_AT}	79,77 mH	N_{AT}	1690 espiras
g_c	3,10 μ S	N_{BT}	31 espiras
b_m	54,42 μ S	L_m	48,75 H

Com as informações fornecidas pelas Tabelas 6.16 e 6.17, pode-se determinar que a solução que passará para a próxima etapa é a primeira; não só pela menor massa e custo total menor em 62% em relação à sexta solução, mas por causa das perdas no ferro da sexta valerem mais que o dobro da primeira. Sobre meios de evitar que soluções com perdas elevadas sejam fornecidas pelo algoritmo, pode-se simplesmente alterar algumas linhas de código para que bloqueie a propagação dessas soluções nas etapas onde as operações genéticas são aplicadas. Por fim, pensa-se, como projeto futuro, realizar uma otimização mono-objetivo na parte da confecção dos enrolamentos a fim de determinar o melhor número de espiras no primário e no secundário que forneçam a estrutura que minimize as perdas no cobre.

Figura 6.22: População na 10ª geração com as curvas de Pareto na 1ª (verde) e 10ª (azul) geração – Transformador trifásico de 30 kVA – $m_T \times C_{fab}$.

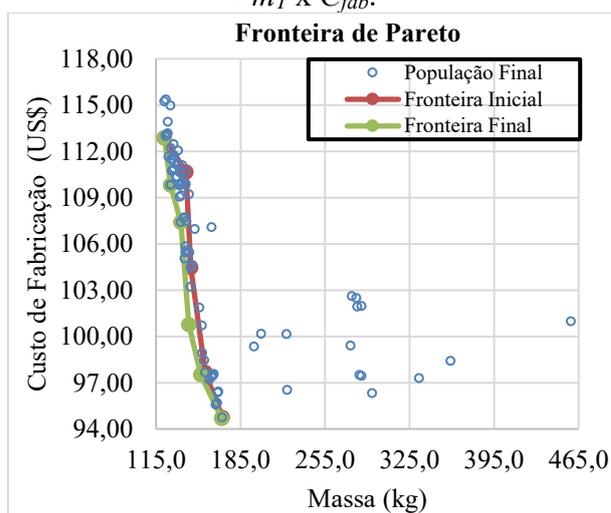
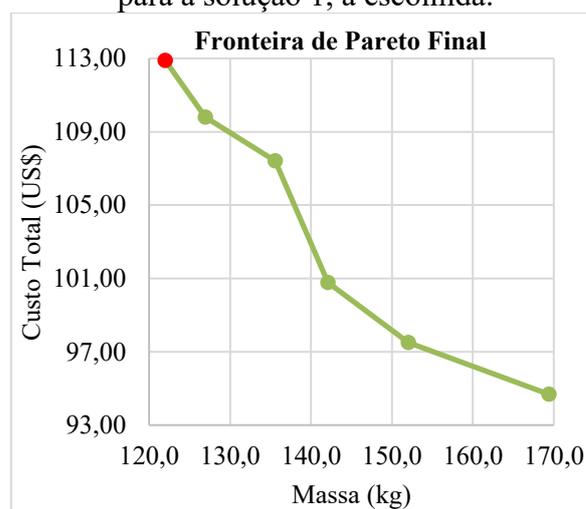


Figura 6.23: As seis soluções e a curva de Pareto na 10ª geração – Transformador trifásico de 30 kVA – $m_T \times C_{fab}$. Destaque para a solução 1, a escolhida.



6.3.2.4 Comparativo dos quatro projetos

Tabela 6.18: Valores dos parâmetros no projeto inicial e nas soluções ótimas escolhidas.

Parâmetro	Projeto Inicial	$m_T \times \eta$	$m_T \times C_{tot}$	$m_T \times C_{fab}$
D_C	140 mm	117 mm	100 mm	110 mm
h_w	254 mm	213 mm	289 mm	200 mm
b_w	125 mm	105 mm	115 mm	105 mm
B_M	1,10 T	1,11 T	1,10 T	1,25 T
J	2,3 A/mm ²	2,3 A/mm ²	2,3 A/mm ²	2,3 A/mm ²

Selecionada uma solução de cada um dos três estudos mais as grandezas do projeto inicial, comparam-se os parâmetros entre eles na Tabela 6.18 e os valores ótimos das funções objetivo na Tabela 6.19.

Tabela 6.19: Valores das grandezas otimizadas pelo algoritmo genético multiobjetivo. Os com fundo **cinza** são funções objetivo em dado processo de otimização; em **verde**, os melhores resultados e, em **vermelho**, os piores.

Grandeza	Projeto Inicial	$m_T \times \eta$	$m_T \times C_{tot}$	$m_T \times C_{fab}$
m_T	205,9 kg	140,29 kg	121,52 kg	121,64 kg
η	97,31%	97,83 %	97,61%	97,84%
C_{fab}	US\$ 274,26	US\$ 121,95	US\$ 145,58	US\$ 115,20
C_{tot}	US\$ 4.739,85	US\$ 3.617,85	US\$ 3.433,79	US\$ 3.785,70

Da Tabela 6.19, nota-se que todos os valores iniciais de projeto são os piores em todos os cenários. Quanto à otimização simultânea da massa total e do rendimento, nenhuma das funções é a melhor se comparar aos outros cenários do estudo. Contudo, isso pode ser modificado ao selecionar uma solução com massa menor que a menor atual, visto que existem soluções dentro dessa otimização para isso. Ademais, o rendimento pouco variou em transformadores 30 kVA também; pode ser considerado como $(97,5 \pm 0,5)\%$ em todas as soluções de todas as otimizações, o que pode ser conferido no Anexo C.

Além disso, percebe-se que o menor custo total gerado nas três otimizações é justamente o da que o possui como uma das funções objetivo. Já no caso da que possui o C_{fab} como um dos objetivos, é possível encontrar soluções mais baratas. Entretanto, nem todas podem ser viáveis se as perdas no ferro forem consideradas, conforme foi discutido com a sexta solução.

6.4 O TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 2 KVA

Após extraídos os resultados dos três transformadores anteriores, constatou-se que, devido à pouca variação do rendimento nos dispositivos de potência elevada, não há utilidade em otimizá-lo junto com outra grandeza. Em virtude disso, decidiu-se projetar um transformador trifásico de 2 kVA, o qual é baseado num projeto apresentado em (MARTIGNONI, 1973), com conexões Δ -Y nos enrolamentos de alta e baixa tensão respectivamente, com a finalidade de verificar se o rendimento varia significativamente na otimização multiobjetivo dos dispositivos dessa ordem de grandeza de potência. Para este

transformador, será apresentado o projeto inicial e apenas o projeto ótimo multiobjetivo da massa e do rendimento, visto que esta última grandeza é o objeto deste último estudo. Por fim, também será realizado um estudo quando o método de seleção de indivíduos é alterado no AG para seleção por roleta a fim verificar se os resultados são semelhantes e, portanto, igualmente válidos aos obtidos pelo AGMULTI até então.

6.4.1 O projeto inicial

O projeto inicial desse transformador trifásico, descrito na seção 4.2, é realizado com os seguintes valores de parâmetros e grandezas fornecidas na Tabela 6.20.

Tabela 6.20: Parâmetros e resultados do projeto inicial do transformador de 2 kVA.

Parâmetro	Valor Inicial	Grandeza	Valor Ótimo
D_C	62 mm	Rendimento	93,79%
hw	171 mm	Massa do dispositivo	29,81 kg
bw	48 mm	Massa do ferro	22,47 kg
B_M	1,025 T	Massa do cobre	7,34 kg
J	2,5 A/mm ²	Custo de fabricação	US\$ 46,26
Grandeza	Valor Ótimo	Custo com o ferro	US\$ 2,25
r_{AT}	2,3773 Ω	Custo com o cobre	US\$ 44,02
r_{BT}	0,42698 Ω	Perdas no ferro	14,1 W
X_{eq_AT}	0,71 Ω	Perdas no cobre	115,0 W
L_{eq_AT}	1,88 mH	N_{AT}	610 espiras
g_c	32,46 μ S	N_{BT}	204 espiras
b_m	1,07 mS	L_m	2,97 H

6.4.2 O projeto com a massa e o rendimento otimizados

6.4.2.1 Seleção usual

A otimização multiobjetivo da massa e do rendimento do dispositivo eletromagnético de 2 kVA com a técnica de seleção utilizada até então em todos os problemas, isto é, amostragem determinística no centro e torneio nas extremidades da curva de Pareto, resultou em uma fronteira composta por dez soluções. Essa fronteira bem como os indivíduos dominados

são mostrados na Figura 6.24. Optou-se por escolher a sexta solução, destacada na Figura 6.25, porque o rendimento dessa solução está 0,1% abaixo do máximo obtido além de a massa ser em torno de 30% menor que a da solução cujo rendimento é máximo, o que também significa menor custo de fabricação. Os parâmetros e demais grandezas de tal solução são arredondados e usados num terceiro algoritmo, que recalcula todas as grandezas importantes, disponibilizadas na Tabela 6.21, para o projeto do agora transformador de 2 kVA. Quanto às demais soluções, podem ser consultadas no Anexo D. Por fim, $HR = 0,7090$ para as referências $r = (50; 92,00\%)$ e $p = (15; 96,00\%)$.

Tabela 6.21: Parâmetros e resultados do projeto ótimo do transformador de 2 kVA. Funções objetivo: $m_T \times \eta$. Solução 6.

Parâmetro	Valor Inicial	Grandeza	Valor Ótimo
D_C	67 mm	Rendimento	95,20%
h_W	118 mm	Massa do dispositivo	27,17 kg
b_W	42 mm	Massa do ferro	22,30 kg
B_M	1,41 T	Massa do cobre	4,87 kg
J	2,5 A/mm ²	Custo de fabricação	US\$ 31,46
Grandeza	Valor Ótimo	Custo com o ferro	US\$ 2,23
r_{AT}	1,5027 Ω	Custo com o cobre	US\$ 29,23
r_{BT}	0,2755 Ω	Perdas no ferro	26,6 W
X_{eq_AT}	0,4015 Ω	Perdas no cobre	73,9 W
L_{eq_AT}	1,07 mH	N_{AT}	377 espiras
g_c	61,45 μS	N_{BT}	126 espiras
b_m	2,05 mS	L_m	1,55 H

Das fronteiras de Pareto das Figuras 6.24 e 6.25, é perceptível que o rendimento se altera a depender da escolha dos parâmetros do projeto; até porque a diferença entre os rendimentos ótimos mínimo e máximo obtidos é de quase 3%. Portanto, em transformadores cuja potência está situada na faixa de 1 kVA a 10 kVA, a otimização multiobjetivo com o rendimento com uma das funções objetivos é tão válida quanto em dispositivos abaixo de 1000 VA.

Figura 6.24: População na 10ª geração com as curvas de Pareto na 1ª (verde) e 10ª (azul) geração – Transformador trifásico de 2 kVA – $m_T \times \eta$.

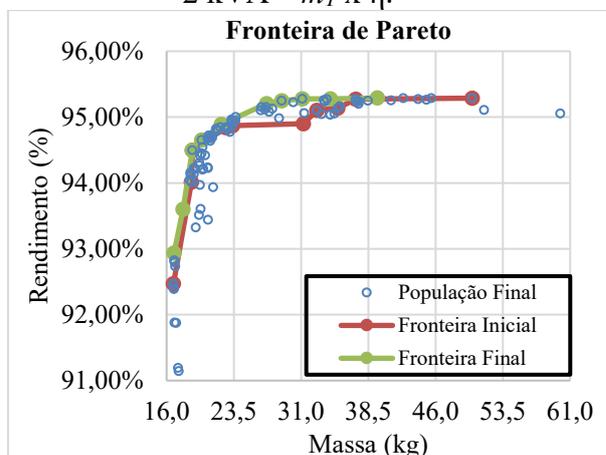
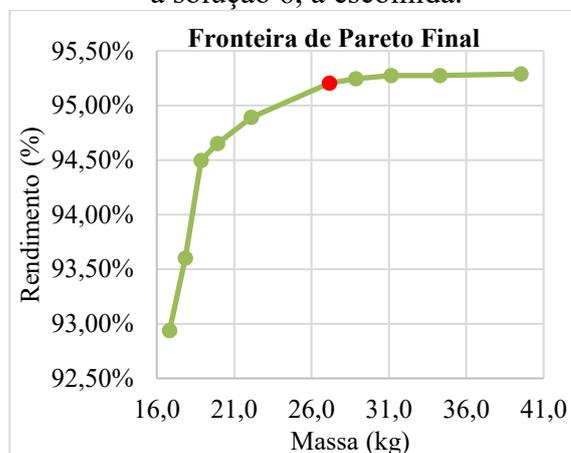


Figura 6.25: As sete soluções e a curva de Pareto na 10ª geração – Transformador trifásico de 2 kVA – $m_T \times \eta$. Destaque para a solução 6, a escolhida.



Acerca do projeto inicial e do otimizado, destaca-se que houve melhora de 1,41% com economia de 2,64 kg (8,9%) de massa para fabricar o dispositivo. Além disso, foram economizados US\$ 14,80 (32%) nos custos de fabricação, os quais são reduzidos, em grande parte, dado que a massa de ferro permaneceu quase inalterada, pela economia de cobre nos enrolamentos, o qual é bem mais caro que o ferro. Essa economia de massa desse material corresponde a 2,47 kg ou 34% a menos que a utilizada no projeto inicial.

6.4.2.2 Seleção por roleta

A otimização do referido transformador com a técnica de seleção por roleta no objetivo rendimento resultou em indivíduos não-dominados e em uma fronteira de Pareto composta por onze soluções, ambos mostrados na Figura 6.26. Optou-se por escolher a sétima solução, destacada na Figura 6.27 e resumidamente na Tabela 6.22, por ser semelhante à escolha anterior tanto nos valores dos parâmetros quanto nos dos objetivos. Quanto às demais soluções, são fornecidas no Anexo D. Por fim, houve uma melhora de 2,0% na razão de hiperárea, calculada em 0,7234.

Tabela 6.22: Parâmetros e resultados do projeto ótimo do transformador de 2 kVA com seleção por roleta no rendimento. Funções objetivo: $m_T \times \eta$. Solução 7.

Parâmetro	Valor Inicial	Grandeza	Valor Ótimo
D_C	67 mm	Rendimento	95,18%
hw	109 mm	Massa do dispositivo	27,19 kg
bw	49 mm	Custo de fabricação	US\$ 31,69
B_M	1,41 T	N_{AT}	380 espiras
J	2,5 A/mm ²	N_{BT}	127 espiras

Figura 6.26: População na 10ª geração com as curvas de Pareto na 1ª (verde) e 10ª (azul) geração – Transformador trifásico de 2 kVA – $m_T \times \eta$ – Seleção por roleta no rendimento.

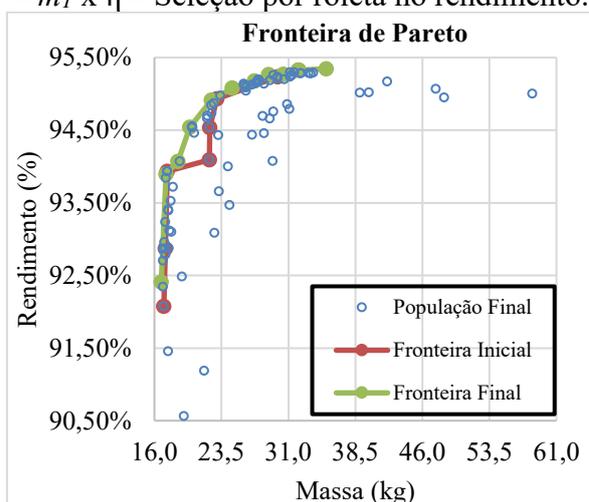
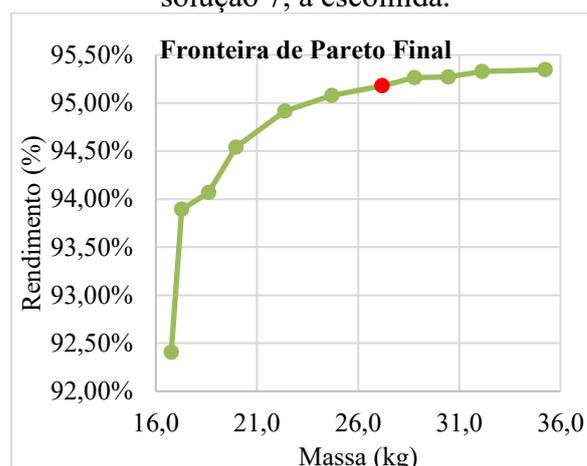


Figura 6.27: Curva de Pareto na 10ª geração após o agrupamento – Transformador trifásico de 2 kVA – $m_T \times \eta$ – Seleção por roleta no rendimento. Destaque para a solução 7, a escolhida.



Já a otimização com a seleção por roleta no objetivo massa total resultou em indivíduos não-dominados e em uma fronteira de Pareto composta também por dez soluções, ambos mostrados na Figura 6.28. Optou-se por escolher a oitava solução, destacada na Figura 6.29 e resumidamente na Tabela 6.23, por ser semelhante à escolha anterior tanto nos valores dos parâmetros quanto nos dos objetivos. Quanto às demais soluções, são fornecidas no Anexo D. Por fim, houve uma melhora de 0,7% na razão de hiperárea, calculada em 0,7143, em relação à seleção usual.

Tabela 6.23: Parâmetros e resultados do projeto ótimo do transformador de 2 kVA com seleção por roleta na massa. Funções objetivo: $m_T \times \eta$. Solução 8.

Parâmetro	Valor Inicial	Grandeza	Valor Ótimo
D_C	65 mm	Rendimento	95,17%
hw	113 mm	Massa do dispositivo	26,03 kg
bw	49 mm	Custo de fabricação	US\$ 32,14
B_M	1,41 T	N_{AT}	398 espiras
J	2,5 A/mm ²	N_{BT}	133 espiras

Figura 6.28: População na 10ª geração com as curvas de Pareto na 1ª (verde) e 10ª (azul) geração – Transformador trifásico de 2 kVA – $m_T \times \eta$ – Seleção por roleta na massa.

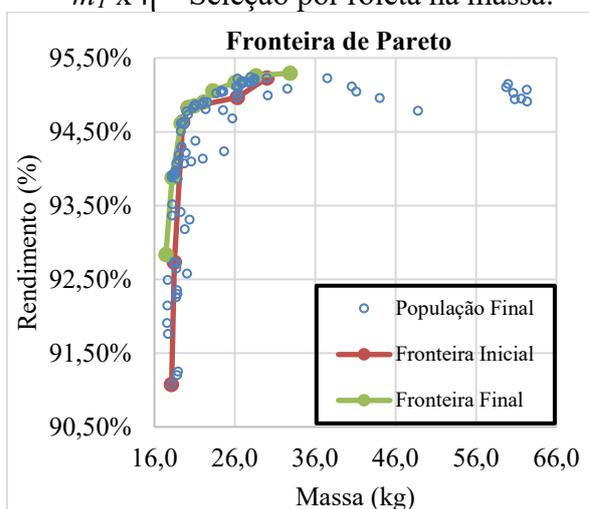
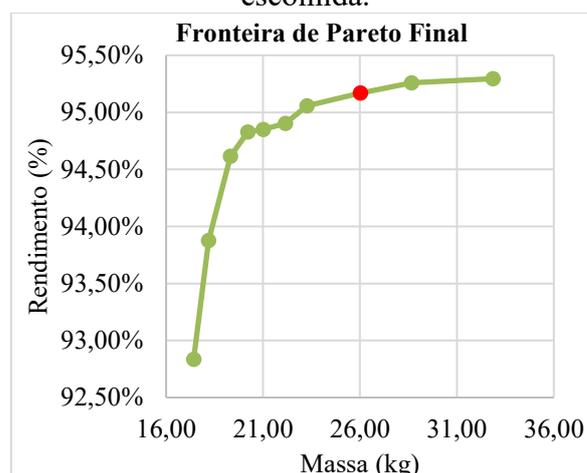


Figura 6.29: Curva de Pareto na 10ª geração após o agrupamento – Transformador trifásico de 2 kVA – $m_T \times \eta$ – Seleção por roleta na massa. Destaque para a solução 8, a escolhida.



Por fim, os parâmetros, os objetivos, o custo de fabricação e o número de espiras nos lados de alta e baixa tensão obtidos nas soluções selecionadas nas otimizações com as três diferentes formas de seleção são sintetizados na Tabela 6.24.

Dessa tabela, fica evidente, portanto, que, ao mudar o critério de seleção da amostragem determinística no centro da curva de Pareto mais os torneios nos melhores resultados de cada objetivo específico para a seleção por roleta seja na função objetivo massa seja na função objetivo rendimento, os resultados, logo as fronteiras de Pareto, obtidos por AGMULTI são semelhantes. Até mesmo as razões de hiperárea entre as três formas de seleção não são modificadas tanto, visto que o desvio máximo foi de 2,0%. Então, o algoritmo genético de otimização multiobjetivo continua robusto

Tabela 6.24: Parâmetros e grandezas obtidos nas soluções das otimizações multiobjetivos da massa e do rendimento do transformador de 2kVA com três critérios diferentes de seleção de indivíduos: por amostragem determinística no centro e torneio nas extremidades da fronteira de Pareto (usual), por roleta na função objetivo rendimento e por roleta na massa.

Usual		Roleta no rendimento		Roleta na massa	
Parâmetro	Valor Inicial	Parâmetro	Valor Inicial	Parâmetro	Valor Inicial
D_C	67 mm	D_C	67 mm	D_C	65 mm
hw	118 mm	hw	109 mm	hw	113 mm
bw	42 mm	bw	49 mm	bw	49 mm
B_M	1,41 T	B_M	1,41 T	B_M	1,41 T
J	2,5 A/mm ²	J	2,5 A/mm ²	J	2,5 A/mm ²
Grandeza	Valor Ótimo	Grandeza	Valor Ótimo	Grandeza	Valor Ótimo
Rendimento	95,20%	Rendimento	95,18%	Rendimento	95,17%
Massa do dispositivo	27,17 kg	Massa do dispositivo	27,19 kg	Massa do dispositivo	26,03 kg
Custo de fabricação	US\$ 31,46	Custo de fabricação	US\$ 31,69	Custo de fabricação	US\$ 32,14
N_{AT}	377 espiras	N_{AT}	380 espiras	N_{AT}	398 espiras
N_{BT}	126 espiras	N_{BT}	127 espiras	N_{BT}	133 espiras

6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS RESULTADOS

Dos resultados apresentados até então, conclui-se que:

- O AGMULTI é preciso e robusto com 100 indivíduos em 10 gerações quando as funções objetivo são a massa total, o custo de fabricação e o rendimento, conforme comparações com resultados de pesquisas de outros autores, como (AYALA et al., 2016; COELHO et al., 2013a). Contudo, quando o custo total é envolvido, pode requerer 1000 indivíduos em 20 gerações;
- Nos transformadores com potência nominal acima de 10 kVA, o rendimento quase não se altera tanto com mudanças abruptas nos parâmetros, pois, conforme, pôde ser conferido, a diferença entre o indivíduo menos eficiente com o mais eficiente não excede 1%. Portanto, é irrelevante, nesses casos, tornar o rendimento uma função objetivo no AGMULTI, pois a otimização se converte praticamente mono-objetivo ao

considerar o rendimento constante em 98,7% e 97,5% nos dispositivos de 300 kVA e 30 kVA respectivamente;

- A constatação acima é inválida para transformadores com potência abaixo de 10 kVA, conforme evidenciado pelos resultados do transformador monofásico e do trifásico de 2 kVA. Nesses casos, maximizar o rendimento ao mesmo tempo que se minimiza o custo de fabricação ou a massa é útil para fins de produção;
- As razões de hiperárea evidenciam boa distribuição e convergência satisfatória das fronteiras de Pareto dos dispositivos analisados, visto que elas estão mais próximas da unidade do que zero;
- O AGMULTI é uma ferramenta útil para auxiliar o projetista a escolher parâmetros que tornem o transformador mais leve e barato no curto e no longo prazo, isto é, na fabricação e no decorrer de sua vida útil. Essa afirmação é reforçada por dois fatos observados. O primeiro deles é as simulações obtidas no EFCAD, que evidenciam a precisão nos resultados otimizados no programa de elementos finitos. Já o segundo, é a constatação de as grandezas que são as funções objetivo atingirem os piores resultados no projeto inicial do transformador de 30 kVA em detrimento de qualquer outra solução otimizada estudada desse dispositivo.

Portanto, o algoritmo genético de otimização multiobjetivo desenvolvido nesta pesquisa é eficiente, robusto e preciso além de poder contribuir para o projeto e produção de transformadores mais leves, baratos e, no caso dos de potência abaixo de 10 kVA, eficientes.

Finalmente, dentre tantos códigos de AGMULTI dentre tantos dispositivos, fora os testes, apresenta-se um, no Anexo F, referente à otimização multiobjetivo da massa total e do custo de fabricação do transformador trifásico de distribuição de 300 kVA. Nesse anexo, também podem ser encontradas as demais funções computacionais utilizadas no código principal, tais como a de seleção, de reprodução, de elitismo, dos critérios de Pareto, da razão de hiperárea e dos cálculos do projeto do dispositivo eletromagnético.

7 CONCLUSÃO

O objetivo geral desta dissertação de mestrado foi cumprido, pois, conforme demonstram os capítulos 5 e 6, um transformador trifásico de distribuição de 300 kVA foi projetado com o auxílio do EFCAD e um algoritmo genético de otimização multiobjetivo foi desenvolvido no MATLAB, validado e utilizado nos quatro projetos analisados para minimizar os custos totais e de fabricação mais a massa além de maximizar o rendimento dos dispositivos eletromagnéticos.

Sobre o AGMULTI, foi constatado que ele atende às três boas práticas de programação, mencionadas no capítulo 2, para produzir bons algoritmos de otimização dados os modelos simplificados de projetos de transformadores adotados. Portanto, o AGMULTI é eficiente, porque realiza, para até mil indivíduos e até quarenta gerações, os processos iterativos em pouco tempo, sobretudo quando comparado com a análise por elementos finitos. O AGMULTI também é robusto como todo algoritmo de otimização de busca por populações deve ser, em virtude da boa performance com diferentes valores iniciais para as variáveis e, sobretudo, segundo amplamente testado nesta dissertação, a boa performance na resolução dos mais diversos problemas, os quais foram relatados nos capítulos 5 e 6. Por fim, o AGMULTI também produz resultados precisos, pois pouco erro é introduzido no processo e, conforme as análises do capítulo 6, há pouca variação (16% no máximo) nos valores das soluções propostas entre as simulações de mesmas funções objetivo. Além do que, a precisão e robustez nos resultados também pôde ser constatada por meio dos valores elevados das razões de hiperárea, mas também pela comparação com as simulações realizadas no EFCAD, as quais divergiram das do AGMULTI em menos de 9% com base em algumas considerações. Portanto, o AGMULTI pode ser utilizado como ferramenta de auxílio a projetistas que precisarem determinar os parâmetros geométricos e eletromagnéticos que otimizem o transformador o qual foram designados para desenvolver. Também pode ser utilizado por pesquisadores de campos do conhecimento distintos na otimização de processos de natureza diversa e em projetos de diferentes dispositivos.

Ademais, os objetivos específicos também foram cumpridos em vista da ampla revisão bibliográfica da física e projeto de transformadores, sobretudo os trifásicos de distribuição, somada à extensa revisão do estado da arte da otimização multiobjetivo, inclusive da aplicada aos dispositivos eletromagnéticos analisados. Através dessas leituras, foi possível identificar um método de otimização multiobjetivo estocástico de busca por populações baseado em

algoritmos genéticos e no critério de Pareto e que foi aplicado, e validado com o EFCAD, ao projeto do transformador trifásico de distribuição desta dissertação somado a outros trifásicos já projetados mais um monofásico, todos com suas devidas restrições geométricas, magnéticas e elétricas.

Apesar de todas essas qualidades, AGMULTI carece de testes para problemas de natureza distinta aos testados nesta dissertação. Também deve ser implementado para otimizar mais de duas funções objetivo simultaneamente. Ademais, mais métricas devem ser utilizadas com a finalidade de avaliar o algoritmo genético no que tange à cardinalidade e à convergência. Por fim, é preciso comparar o desempenho do algoritmo proposto com outros, de pesquisas mais recentes, a exemplo dos derivados do MOEA/D e dos modelos surrogados, a fim de alavancar as vantagens e desvantagens de AGMULTI de uma maneira mais exata.

7.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Com base no que foi desenvolvido e publicado nesta pesquisa de mestrado, são propostas as seguintes sugestões de trabalhos futuros:

- Aplicar um algoritmo de otimização mono-objetivo ao projeto dos enrolamentos AT e BT, em específico, dos transformadores trifásicos de distribuição a fim de: minimizar as perdas no cobre ou as dimensões deles e escolher as melhores quantidades de espiras com respeito à relação de transformação do dispositivo sem o uso de valores tabelados como os calculados e usados para as otimizações desta dissertação;
- Explorar outras funções objetivo na otimização de transformadores, como, por exemplo, as perdas, o custo e a massa de cada material de maneira isolada. Reforça-se que essa análise é interessante, porque lida diretamente com os materiais que os deixam mais pesados e caros isoladamente, que são o ferro e o cobre respectivamente;
- Aumentar, em AGMULTI, a quantidade de funções objetivo a serem otimizadas simultaneamente;
- Explorar mais o calor dissipado e a refrigeração em transformadores no AGMULTI;
- Validar os resultados em bancada de AGMULTI do transformador de 300 kVA ou o de menor potência;
- Aplicar o AGMULTI na otimização de outros dispositivos eletromagnéticos e eletroeletrônicos, tais como: geradores, motores, contadores, chaves de seccionamento de redes elétricas, conversores estáticos, módulos fotovoltaicos, entre outros;

-
- Aplicar o AGMULTI na otimização de um projeto de um pequeno sistema elétrico, tal como um que utilize o conjunto inversor mais motor elétrico ou módulo fotovoltaico mais conversor estático;
 - Aplicar o AGMULTI na otimização de processos e dispositivos de natureza diversa, tais como: termodinâmicos, fluidodinâmicos, acústicos, radioativos, químicos, biológicos, entre outros;
 - Desenvolver técnicas alternativas de seleção e de reprodução ao algoritmo genético desenvolvido e comparar os resultados com os atuais;
 - Comparar o desempenho de AGMULTI com modelos surrogados na otimização de transformadores;
 - Utilizar outras métricas para avaliar AGMULTI e comparar com outras meta-heurísticas além do problema ZDT do capítulo 5;
 - Comparar os métodos atuais de seleção com a TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*) e a PROMETHEE (*Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations*).

REFERÊNCIAS

ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. Circuitos com Acoplamento Magnético. In: **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5ª ed. [s.l.] McGraw Hill, 2012.

ALVES, B. DE S. **Projeto e Modelagem de Transformadores Utilizando a Técnica de Subproblemas Aplicada ao Método de Elementos Finitos**. [s.l.] Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2016.

ANSI; IEEE. An American National Standard IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents. **ANSI/IEEE Std C57.110-1986**, n. December, p. 0_1, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5440 - Transformadores para Redes Aéreas de Distribuição - Requisitos**. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2014.

AUDET, C. et al. Performance indicators in multiobjective optimization. **European Journal of Operational Research**, v. 292, n. 2, p. 397–422, 2021.

ÁVILA, S. L. **Algoritmos Genéticos Aplicados na Otimização de Antenas Refletores**. [s.l.] Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2002.

ÁVILA, S. L. **Otimização Multiobjetivo e Análise de Sensibilidade para Concepção de Dispositivos - Aplicação: Síntese de Antenas Refletores para Comunicação via Satélite**. [s.l.] Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2006.

AWADALLAH, M. A. et al. On the Effects of Solar Panels on Distribution Transformers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 31, n. 3, p. 1175–1185, 2016.

AYALA, H. V. H. et al. Harmony Search Approach Based on Ricker Map for Multi-Objective Transformer Design Optimization. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 51, n. 3, p. 1–4, 2015.

AYALA, H. V. H. et al. Multiobjective Wind Driven Optimization Approach Applied to Transformer Design. In: **2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)**. Vancouver, BC, Canadá: IEEE, 2016. p. 4642–4647.

BARANYAI, M. et al. **Optimal Design of Electrical Machines: State of the Art Survey**. Alexandru Ioan Cuza University of Iași, Romania: Springer, 2018.

BARBOSA, L. Z. **Técnicas de Otimização Baseadas no Paradigma de Exames de Partículas e sua Aplicação ao Projeto de Equipamentos Eletromagnéticos**. [s.l.] Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2012.

BARG, S. et al. An Improved Empirical Formulation for Magnetic Core Losses Estimation Under Nonsinusoidal Induction. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 32, n. 3, p. 2146–2154, 2017.

BARRERA, M. A. R.; CARPES JR, W. P. Particle swarm optimization for the design of square loop frequency selective surfaces considering a model of dielectric effective permittivity. **COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering**, v. 35, n. 5, p. 1643–1655, 2016.

BASTOS, J. P. A. **Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase-Estática**. 3ª ed. Florianópolis - SC: Editora UFSC, 2012.

BASTOS, J. P. A.; SADOWSKI, N. **Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods**. New York: Marcel Dekker, 2003.

BASTOS, J. P. A.; SADOWSKI, N. **Electromagnetic Fields Computer Aided Design - Manual Version 8.0**. 8ª ed. Florianópolis - SC: GRUCAD, UFSC, LEEL, 2008.

BASTOS, J. P. A.; SADOWSKI, N. **Magnetic Materials and 3D Finite Element Modeling**. Boca Ratón, FL, Estados Unidos: CRC Press, 2014.

BATISTA, L. D. S.; GUIMARÃES, F. G.; RAMIREZ, J. A. A distributed clonal selection algorithm for optimization in electromagnetics. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 45, n. 3, p. 1598–1601, 2009.

BATISTELA, N. J. **Caracterização e modelagem eletromagnética de lâminas de aço ao silício**. [s.l.] Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2001.

BAZARAA, M. S.; SHERALI, H. D.; SHETTY, C. M. **Nonlinear Programming – Theory and Algorithms**. New York: John Wiley & Sons, 1993.

BAZZO, T. DE P. **Projeto Ótimo Multidisciplinar de Geradores Síncronos de Ímãs Permanentes para Aerogeradores Considerando a Curva de Ocorrência do Vento**. [s.l.] Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2017.

BECKER, C. **Projeto Eletromagnético Ótimo de Gerador Síncrono de Ímãs Permanentes para Aplicações com Dispositivos com Ondas de Mar**. [s.l.] Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2016.

BIRBIL, Ş. I.; FANG, S. C. An electromagnetism-like mechanism for global optimization. **Journal of Global Optimization**, v. 25, n. 3, p. 263–282, 2003.

CARLSON, R.; WURTZ, F.; VOLTOLINI, H. Sizing and optimization models: Design of a set of two permanent magnet generators. In: **2012 20th International Conference on Electrical Machines**. Marselha, França: IEEE, 2012. p. 1358–1363.

CELESC. **Tarifas e taxas de energia**. Disponível em: <<https://www.celesc.com.br/tarifas-de-energia#tarifas-vigentes>>. Acesso em: 10 ago. 2020.

CHEN, T. et al. Artificial Searching Swarm Algorithm for Electromagnetic Devices Optimization. In: **2012 6th International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications, ICEF'2012**. Dalian, China: IEEE, 2012.

CHEN, T.; LUO, J.; YE, F. A Radar Signal Sorting Method Based On Immune Evolutionary Artificial Neural Network. In: **2008 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing**. Dalian, China: IEEE, 2008.

CHUN, J. S. et al. Shape optimization of electromagnetic devices using Immune Algorithm. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 33, n. 2 PART 2, p. 1876–1879, 1997.

COELHO, L. DOS S. et al. Novel Gamma Differential Evolution Approach for Multiobjective Transformer Design Optimization. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 49, n. 5, p. 2121–2124, 2013a.

COELHO, L. DOS S. et al. Multiobjective Cuckoo Search Algorithm Based on Duffing's Oscillator Applied to Jiles-Atherton Vector Hysteresis Parameters Estimation. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 49, n. 5, p. 1745–1748, 2013b.

COELHO, L. DOS S. et al. Bat-Inspired Optimization Approach Applied to Jiles-Atherton Hysteresis Parameters Tuning. In: **GECCO Comp '14: Proceedings of the Companion Publication of the 2014 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation**. Vancouver, BC, Canadá: Association for Computing Machinery, 2014. p. 1455–1456.

COELHO, L. DOS S. et al. Ant Lion Approach Based on Lozi Map for Multiobjective Transformer Design Optimization. In: **2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)**. Amalfi, Itália: IEEE, 2018a. p. 280–285.

COELHO, L. DOS S. et al. Multiobjective Lightning Search Applied to Jiles-Atherton Hysteresis Model Parameter Estimation. In: **2018 7th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAS)**. Thessaloniki, Grécia: IEEE, 2018b. p. 1–4.

COELHO, L. DOS S.; ALOTTO, P. Multiobjective Electromagnetic Optimization Based on a Nondominated. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 44, n. 6, p. 1078–1081, 2008.

COELHO, L. DOS S.; MARIANI, V. C.; LEITE, J. V. Differential evolution approaches applied to the Jiles-Atherton vector hysteresis parameters estimation. In: **Digests of the 2010 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation**. Chicago, IL, Estados Unidos: IEEE, 2010. v. 40p. 1.

COELHO, L. DOS S.; MARIANI, V. C.; LEITE, J. V. Solution of Jiles – Atherton vector hysteresis parameters estimation by modified Differential Evolution approaches. **Expert Systems with Applications**, v. 39, n. 2, p. 2021–2025, 2012.

DARWIN, C. Natural Selection. In: KNIGHT, D. (Ed.). **The evolution debate 1813-1870: On the origin of species by means of natural selection**. 2003 Repri ed. Londres: Routledge, Taylor & Francis Group, 1859. v. 5p. 81–132.

DEB, K. Multi-objective genetic algorithms: problem difficulties and construction of test problems. **Evolutionary Computation**, v. 7, n. 3, p. 205–230, 1999.

DEB, K.; JAIN, H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, Part I: Solving problems with box constraints. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 18, n. 4, p. 577–601, 2014.

DEL VECCHIO, R. M.; FEGHALI, B. P. P. T.; AHUJA, D. M. S. R. **Transformer Design Principles with Applications to Core-Form Power Transformers**. 2ª ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.

DIAS, A. H. F.; DE VASCONCELOS, J. A. Multiobjective genetic algorithms applied to solve optimization problems. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 38, n. 2, p. 1133–1136,

2002.

DIAS, G. A. D. **Harmônicas em Sistemas Industriais**. Rio Grande do Sul - Brasil: EDIPUCRS, 1998.

DICIONÁRIO ONLINE DE PORTUGUÊS. **geração**. Disponível em: <<https://www.dicio.com.br/geracao/>>. Acesso em: 7 jul. 2020.

DORIGO, M.; BIRATTARI, M.; STÜTZLE, T. Ant Colony Optimization. **IEEE Computational Intelligence Magazine**, v. 11, n. 4, p. 28–39, 2006.

FERRAZ, B. A. **Métodos Computacionais de Otimização**. [s.l.] Dissertação (Mestrado Profissional em Matemática), Programa de Pós-Graduação em Matemática, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro - SP, 2017.

FERREIRA JUNIOR, D. T. **Projeto de controle de um protótipo de suspensão ativa por realimentação de estados baseado em otimização multiobjetivo**. Belo Horizonte - MG: Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica), Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, 2017.

FIESC. **Santa Catarina Industrial**. Disponível em: <http://www2.fiescnet.com.br/web/pt/site_topo/pei/info/santa-catarina-industrial>. Acesso em: 28 jul. 2020.

HASANIEN, H. M. Particle swarm design optimization of transverse flux linear motor for weight reduction and improvement of thrust force. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 58, n. 9, p. 4048–4056, 2011.

HASANIEN, H. M.; ABD-RABOU, A. S.; SAKR, S. M. Design optimization of transverse flux linear motor for weight reduction and performance improvement using response surface methodology and genetic algorithms. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 25, n. 3, p. 598–605, 2010.

HERTZ, J. et al. Introduction to the Theory of Neural Computation. **Physics Today**, v. 44, n. 12, 1991.

HUANG, X.-H.; LUO, F. Electromagnetic interference test control based on hybrid immune particle swarm optimization. In: **Proceedings of the 2013 International Conference on Machine Learning and Cybernetics**. Tianjin, China.: IEEE, 2013. p. 14–17.

IBGE. **Produto Interno Bruto - PIB**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/pib.php>>. Acesso em: 28 jul. 2020.

JERONYMO, D. C. et al. Spiral Inductor Design Based on Fireworks Optimization Combined with Free Search. In: **2018 7th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST)**. Chicago, IL, Estados Unidos: IEEE, 2018. p. 1–4.

JIANG, S. et al. Consistencies and contradictions of performance metrics in multiobjective optimization. **IEEE Transactions on Cybernetics**, v. 44, n. 12, p. 2391–2404, 2014.

KASSICK, E. V. **Harmônicas em Sistemas Industriais de Baixa Tensão**. Florianópolis - SC: INEP, UFSC, 2008.

KÖLZER, J. F. **Projeto Ótimo Multidisciplinar de Geradores Síncronos com Ímãs Permanentes de Ferrite para Microgeração Eólica**. [s.l.] Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico,

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2017.

KULKARNI, S. V.; KHAPARDE, S. A. Transformer Fundamentals. In: **Transformer Engineering**. Indian Institute of Technology, Bombay, Mumbai, India: MARCEL DEKKER, INC., 2004.

LEI, G.; ZHU, J.; GUO, Y. **Multidisciplinary Design Optimization Methods for Electrical Machines and Drive Systems**. 1. ed. Berlim, Alemanha: Springer, 2016.

LEITE, J. V. et al. Real coded genetic algorithm for Jiles-Atherton model parameters identification. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 40, n. 2 II, p. 888–891, 2004.

LI, H.; CHEN, Z. Design optimization and site matching of direct-drive permanent magnet wind power generator systems. **Renewable Energy**, v. 34, n. 4, p. 1175–1184, 2009.

LIZ, E. A. A. H. DE. **Reconexão Automática de Ilhamentos Intencionais e Ajuste de Controladores com Algoritmos Genéticos**. [s.l.] Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica), Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2019.

MA, S. et al. Optimization Design of a New Type of Interior Permanent Magnet Generator for Electric Vehicle Range Extender. **Journal of Electrical and Computer Engineering**, v. 2019, 2019.

MARTIGNONI, A. **Transformadores**. 1ª ed. Porto Alegre: Alfonso Martignoni, 1973.

MARTÍN, J. C. et al. **Teoría, Cálculo y Construcción de Transformadores**. 5ª ed. Barcelona, Espanha: Editorial Labor, 1969.

MARTÍN, J. C. **Cálculo Óptimo de Transformadores**. 1ª ed. Barcelona: Universidad Politécnica de Barcelona, 1978.

NOCEDAL, J.; WRIGHT, S. J. **Numerical Optimization**. 5ª ed. New York City: Springer, 1999.

NÚCLEO DE ESTUDOS DE ECONOMIA CATARINENSE. **Participação no valor adicional bruto (2002-2017)**. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1KbAE6qMA0PljN87eRnb_OI7N0ShzU5Z/view>. Acesso em: 28 jul. 2020.

OKABE, T.; JIN, Y.; SENDHOFF, B. A critical survey of performance indices for multi-objective optimisation. In: **2003 Congress on Evolutionary Computation, CEC 2003 - Proceedings**. Canberra, ACT, Australia: IEEE, 2003. v. 2p. 878–885.

PANCHEVA, T.; ATANASSOV, K.; SHANNON, A. Modelling of a Roulette Wheel Selection Operator in Genetic Algorithms Using Generalized Nets. **BioAutomation**, v. 13, n. 4, p. 257–264, 2009.

PARETO, V. Cours D'Économie Politique. **The Economic Journal**, v. 7, n. 25, p. 91–94, 1897.

RESMINI, F. N. **Projeto e Otimização de Geradores Síncronos a Ímãs Permanentes e Introdução a Otimização de Gamas**. [s.l.] Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2013.

RIES, L. K. **Modelagem e Otimização de Transformadores Levando em Conta**

sua Vida Útil. [s.l.] Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2013.

RIQUELME, N.; LÜCKEN, C. VON; BARÁN, B. Performance metrics in multi-objective optimization. In: **2015 XLI Latin American Computing Conference**. Arequipa, Peru: IEEE, 2015. v. 1.

SADOWSKI, N. Teoria das Máquinas de Corrente Contínua. In: **Máquinas Elétricas - Transitório, Regime Permanente e Acionamento**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC: Nelson Sadowski, 2012.

SCHAFFER, J. D. **Some Experiments in Machine Learning using Vector Evaluated Genetic Algorithms.** [s.l.] Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Vanderbilt University, Nashville - TN, 1984.

SCHMITZ, C. **Projeto e Otimização de Motores BLDC de Ímãs Permanentes Superficiais.** [s.l.] Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2017.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. Apêndice B. In: **Santa Catarina em Números**. Florianópolis - SC: SEBRAE-SC, 2013. p. 126.

SIVANANDAM, S. N.; DEEPA, S. N. **Introduction to Genetic Algorithms**. Coimbatore, Índia: Springer, 2008.

SPROTTE, A. F. V. **Determinação das curvas e dos parâmetros de células e módulos fotovoltaicos sob diversas condições de temperatura e de irradiância por meio de um modelo computacional.** [s.l.] Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica), Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 14 jun. 2018.

TAN, J. D. et al. A new experiential learning electromagnetism-like mechanism for numerical optimization. **Expert Systems with Applications**, v. 86, p. 321–333, 2017.

TANG, S. et al. The Electromagnetic Field Distribution in Electrically Large Reflective Cavities. In: **2020 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization, NEMO 2020**. Hangzhou, China: IEEE, 2020.

TAO, F.; ZHANG, L.; LAILI, Y. Brief History and Overview of Intelligent Optimization Algorithms: Design and Practice in Manufacturing. In: **Configurable Intelligent Optimization Algorithm**. Pequim, China: Springer, 2015. p. 1–4.

TEDESCO, D. **Projeto Ótimo de um Gerador Síncrono de Polos Salientes.** [s.l.] Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2019.

TENAGLIA, G. C.; LEBENSZTAJN, L. A multiobjective approach of differential evolution optimization applied to electromagnetic problems. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 50, n. 2, p. 625–628, 2014.

TIAN, Y. et al. PlatEMO: A MATLAB Platform for Evolutionary Multi-Objective Optimization [Educational Forum]. **IEEE Computational Intelligence Magazine**, v. 12, n. 4,

p. 73–87, 2017.

TSILI, M. et al. A novel multiobjective lognormal-beta differential evolution approach for the transformer design optimization. **Engineering Computations**, v. 35, n. 2, p. 955–978, 2018.

WEG S.A. **MANUAL: TRANSFORMADOR A ÓLEO ATÉ 4000kVA**. Blumenau - SC: WEG, 2010.

XAVIER, C. R. et al. Genetic Algorithm for the History Matching Problem. **Procedia Computer Science**, v. 18, n. December, p. 946–955, 2013.

YING, X. et al. A Novel Artificial Immune Algorithm and Its Application to Microstrip Antenna Array Design. In: **Proceedings of the 2018 IEEE 7th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, APCAP 2018**. Auckland, Nova Zelândia: IEEE, 2018. p. 120–123.

ZAVVOS, A.; MCDONALD, A.; MUELLER, M. Optimisation tools for large permanent magnet generators for direct drive wind turbines. **IET Renewable Power Generation**, v. 7, n. 2, p. 163–171, 2013.

ZHANG, Q.; LI, H. MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 11, n. 6, p. 712–731, 2007.

ZITZLER, E. **Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization - Methods and Applications**. [s.l.] Tese (Doutorado em Ciências Técnicas), Eidgenössische Technische Hochschule Zürich Swiss (ETH), Zurique, Suíça, 1999.

ZITZLER, E.; DEB, K.; THIELE, L. Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: empirical results. **Evolutionary Computation**, v. 8, n. 2, p. 173–195, 2000.

APÊNDICE A – Classificações de Transformadores

Os transformadores possuem diversas aplicações em engenharia elétrica. Normalmente, são selecionados de acordo com o número de fases, a frequência, a potência e os níveis de tensão e de corrente dos circuitos. Neste apêndice, diferentes formas de classificações desses dispositivos são elucidadas.

A maioria deles recebe a classificação de acordo com a aplicação que exercem (KULKARNI; KHAPARDE, 2004). No entanto, não é esse o único critério de classificação, pois esses dispositivos eletromagnéticos também podem ser classificados de acordo com os critérios seguintes (DEL VECCHIO; FEGHALI; AHUJA, 2010; MARTIGNONI, 1973): número de fases do circuito elétrico, tipo e formato do núcleo, tipo dos enrolamentos, meio isolante, aplicações e finalidade.

I. NÚMERO DE FASES DO CIRCUITO ELÉTRICO

Pelo número de fases, os transformadores são classificados em monofásicos e em polifásicos, sendo os trifásicos os mais comuns dentre os polifásicos. Por sua vez, os circuitos polifásicos podem utilizar duas configurações distintas de transformadores. A primeira é o emprego do banco de transformadores, quando cada fase do circuito é constituída por um transformador monofásico, o qual deve ser igual para cada fase a fim de garantir o melhor funcionamento possível do sistema elétrico. Já a segunda configuração é a utilizada amplamente na engenharia. Nela, o núcleo é polifásico, ou seja, todas as fases do circuito elétrico compartilham o mesmo núcleo magnético. Neste caso, utiliza-se um transformador polifásico de fato.

II. TIPO E FORMATO DO NÚCLEO

Ao considerar o núcleo constituído por material ferromagnético, os transformadores são classificados como com núcleo: envolvente (*shell-form*) ou envolvido (*core-form*). Enquanto nos envolvente, os enrolamentos envolvem o circuito magnético ao mesmo tempo que são envolvidos por ele, nos envolvido somente as colunas do núcleo são envolvidas pelos enrolamentos. Tanto o núcleo envolvente quanto o envolvido pode ter o formato da seção

transversal retangular ou arredondado (DEL VECCHIO; FEGHALI; AHUJA, 2010; MARTIGNONI, 1973).

III. TIPO DOS ENROLAMENTOS

De acordo com esse critério, os transformadores dividem-se, basicamente, entre os com enrolamentos concêntricos ou tubulares (*layer coils*) e os com enrolamentos com bobinas alternadas ou de disco (*disk coils*). Demais detalhes sobre isso são discutidos no Apêndice B, com destaque à característica comum aos dois: o formato cilíndrico.

Por fim, uma ressalva para transformadores polifásicos: deve-se ter cuidado para não confundir o número de enrolamentos com o produto de cada sistema de bobinas pela quantidade de fase de todos os lados do transformador. Por exemplo, um transformador trifásico de dois enrolamentos tem, conforme sugere o nome, dois enrolamentos. Contudo, possui seis sistemas de bobinas: dois para cada enrolamento (lado do transformador) multiplicado pelas três fases.

IV. MEIO ISOLANTE

Os transformadores também são classificados de acordo com o meio isolante, isto é, o dielétrico no qual estão imersos. Três categorias são identificadas aqui: a dos transformadores a seco, impregnados com ar, a dos transformadores a óleo, impregnados por este fluido de origem mineral ou vegetal de maior rigidez dielétrica em relação ao ar e os transformadores especiais cujo meio isolante é o gás hexafluoreto de enxofre (SF₆), normalmente pressurizado, quando as alternativas anteriores se tornam inviáveis por questões construtivas, da aplicação ou do ambiente inserido. Além da função elétrica, o líquido oleoso também acumula a função térmica de refrigeração do dispositivo, sobretudo quando as perdas elevam a temperatura a patamares que podem comprometer o funcionamento adequado do transformador (DEL VECCHIO; FEGHALI; AHUJA, 2010; KULKARNI; KHAPARDE, 2004; MARTIGNONI, 1973).

V. APLICAÇÕES

Conforme já citado, os transformadores são classificados de acordo com as suas aplicações. Na Tabela A.1, são resumidos os principais tipos.

Tabela A.7.1: Tipos de transformadores de acordo com a aplicação.

Área	Classificação	Classificações Derivadas
Sistema Elétrico de Potência (SEP)	Transformadores de força	Transformadores auxiliares de unidade
		Transformadores de estação
		Transformadores de geração
		Transformadores de mudança de fase
		Transformadores de interconexão
		Transformadores de recepção
	Transformadores de aterramento	
	Transformadores de distribuição	-
Eletrônica de Potência	-	Transformadores de estado sólido (TES)
		Transformadores planares
Medição e proteção	Transformadores de corrente (TCs)	-
	Transformadores de potencial (TPs)	TPs Indutivos
		TPs Capacitivos
Sistemas de comunicação	Transformadores de casamento de impedância	-
Fundição	Transformadores de forno	-
Locomotivas	Transformadores de tração	-

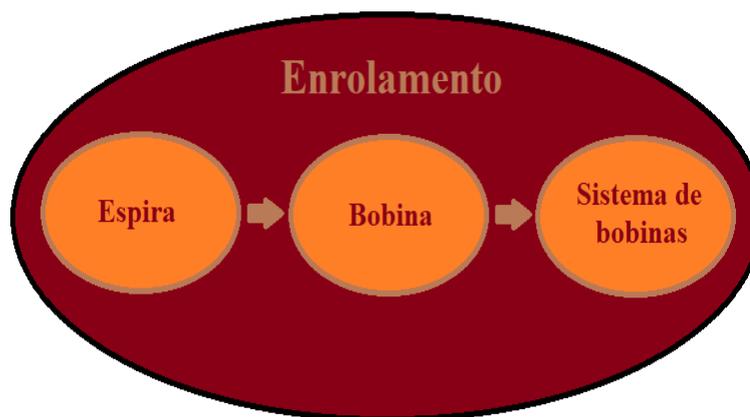
VI. FINALIDADE

De acordo com a finalidade, os transformadores são divididos em três categorias. A primeira corresponde aos transformadores de potência enquanto as outras duas correspondem aos transformadores de corrente e de potencial, empregados como elementos auxiliares na medição de corrente elétrica e potencial elétrico respectivamente.

APÊNDICE B – Técnicas na confecção de enrolamentos de transformadores industriais

Antes de desenvolver as técnicas empregadas na confecção de enrolamentos de transformadores industriais de médio e grande porte, isto é, acima de 10 kVA, é necessário elucidar um pouco a constituição dos enrolamentos do transformador. Enrolamentos são sempre formados por espiras enroladas nas colunas do núcleo. No entanto, a forma como são enroladas é que diferencia um enrolamento de outro. Nos transformadores, há enrolamentos que podem ser compostos por uma bobina cada um, a qual é um conjunto de espiras. Nos enrolamentos industriais, uma bobina pode ser insuficiente e, por isso, devem ser constituídos por um sistema de bobinas em ligação série, porém todas envoltas numa mesma coluna. Em resumo, a diferença entre espira, bobina, sistema de bobinas e enrolamento é esquematizada, da menor parte à maior na Figura B.1.

Figura B.7.1: Esquema de diferenciação das expressões: enrolamento, espira, bobina e sistema de bobinas

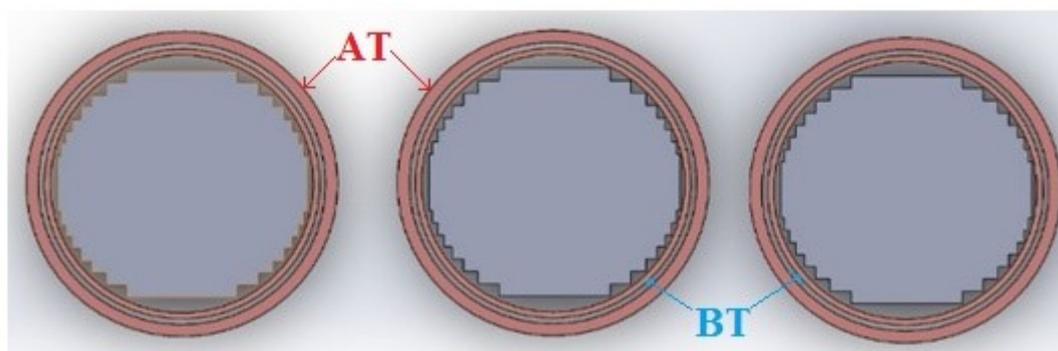


Em transformadores trifásicos de dois enrolamentos com relação de transformação não-unitária, os enrolamentos do lado de alta tensão (AT) e do lado de baixa tensão (BT) da mesma fase, geralmente fabricados com cobre ou alumínio, são normalmente colocados na mesma coluna. Já em monofásicos, comumente são postos em colunas distintas, porque, além de haver vaga, a superposição dos enrolamentos em uma mesma coluna aumentaria o fluxo disperso no ar (MARTIGNONI, 1973).

Como, nos trifásicos, a superposição é praticamente inevitável, engenheiros industriais desenvolveram técnicas de minimização de perdas por fluxo de dispersão através da montagem das bobinas as quais compõem os dois enrolamentos dos transformadores (MARTIGNONI,

1973). Dentre as mais usadas, destacam-se duas bobinas com formato cilíndrico: enrolamentos concêntricos ou tubulares e os com enrolamentos com bobinas alternadas ou de disco. Na primeira, representada em corte pela Figura B.2, os enrolamentos de alta e de baixa tensão são dispostos concêntricamente em cada coluna e são separados entre si por um material isolante.

Figura B.7.2: Corte das seções transversais das colunas de um transformador trifásico com enrolamentos concêntricos sem os diafragmas. Os AT são externos aos BT.



Já na segunda configuração, os enrolamentos são subdivididos em bobinas de comprimento axial pequeno, os discos, a fim de haver uma sobreposição alternada entre os discos do enrolamento AT com os do BT em uma coluna. A separação deles é realizada por meio de coroas isolantes (DEL VECCHIO; FEGHALI; AHUJA, 2010; MARTIGNONI, 1973).

Ainda pode haver casos, sobretudo no lado AT, que os enrolamentos precisem ser construídos através de um sistema de bobinas ligadas em série com a finalidade de se enquadrarem na janela, descontada a distância de isolamento até o núcleo. Seja qual for a situação, os enrolamentos tendem a cobrir todo o comprimento da coluna excetuado o espaço necessário ao isolamento com as travessas (MARTIGNONI, 1973).

Como, em geral, os lados possuem correntes nominais diferentes, a construção dos enrolamentos é realizada de maneiras distintas. No lado BT, o qual possui corrente maior, utilizam-se condutores de cobre de maior diâmetro. Em potências elevadas, as espiras podem ser separadas por diafragmas isolantes ou por cadarços feitos de papel ou algodão. Contudo, quando a espessura é superior ao padrão AWG, é comum serem confeccionadas em barras sólidas de cobre de seção retangular com camada de isolamento, feita com algodão ou papel, nas seções superficiais. Assim como nos fios, essas barras também podem ser dispostas em paralelo conforme a necessidade; há isolamento com tela ou papel presspan entre elas (MARTIGNONI, 1973).

Já no lado AT, é comum que, em transformadores de alta potência (acima de 10 kVA), os enrolamentos sejam confeccionados por meio de um sistema de bobinas sobrepostas conectadas em série. Cada bobina é disposta em camadas, contadas na direção radial, cada uma das quais com determinado número de espiras, contabilizadas na direção axial. No meio do eixo axial das bobinas, são divididas em duas partes por um diafragma isolante de modo a comporem duas bobinas menores cujos terminais internos são diretamente interconectados, conforme pode ser visto na Figura B.3. Além disso, se a diferença de potencial entre espiras adjacentes de camadas distintas for superior a 100 V, diafragmas de papel ou tela de linha devem ser interpostas entre as camadas de modo a diminuir o campo elétrico entre as espiras (MARTIGNONI, 1973).

Figura B.7.3: Detalhe da ligação série entre as bobinas AT de uma fase



APÊNDICE C – Harmônicas em Transformadores e *K-Rated Transformers*

Este apêndice visa apresentar com maiores detalhes os efeitos das harmônicas em transformadores, que foi brevemente discutido na subseção 3.4.2. Ainda que alimentados com sinais sinusoidais puros, devido às não-linearidades do núcleo magnético, os transformadores podem ser fontes de harmônicas nos sinais elétricos, conforme brevemente discutido na seção anterior quando no fenômeno de magnetização dessa parte do dispositivo. Além do que, quando inseridos em circuitos com cargas não-lineares no secundário, como eletrônicos e instalações residenciais com eletrodomésticos motorizados e dispositivos eletrônicos, os transformadores ficam sujeitos à recepção de harmônicas de tensão e de corrente a partir do secundário. Por isso, há três alternativas para atenuar a propagação dessas componentes: uso de filtros ativos junto ao secundário, além dos filtros de saída dos próprios dispositivos projetados com respeito a normas internacionais; projeto de transformadores reforçados para suportarem o conteúdo harmônico ou um misto dos dois (KASSICK, 2008). Recorda-se que a melhor alternativa é a que garante, com o menor custo possível, bom funcionamento do equipamento com pouca redução de vida útil.

A respeito dos impactos nos transformadores, as harmônicas de tensão e de corrente, além de gerarem ruído audível, acarretam em perdas extras, dependentes da frequência e da amplitude da componente, no núcleo (tensão) e pelo fluxo de dispersão e nos enrolamentos (corrente) com conseqüente elevação da temperatura em diversas partes do dispositivo, como o tanque, elementos estruturais além dos enrolamentos primários (AWADALLAH et al., 2016; KASSICK, 2008). Sobre os impactos delas nesses últimos, além de acarretarem queda de tensão, podem eventual ocasionar a deterioração desses enrolamentos, o que compromete a vida útil dos dispositivos eletromagnéticos. Nesses últimos, a temperatura nos enrolamentos pode aumentar, devido às correntes parasitas, as quais ocasionam queda de tensão, a tal ponto que comprometa as isolações utilizadas, o que resulta no encurtamento da vida útil do dispositivo devido a sua degradação precoce (AWADALLAH et al., 2016).

Em transformadores de distribuição, os utilizados para integrar a rede de distribuição às residências, ao projetar o enrolamento primário em delta e ao aterrar o neutro do enrolamento secundário em Y, evita-se que parte das harmônicas oriundas das cargas não-lineares e do dispositivo eletromagnético se propaguem no sistema elétrico. Isso ocorre, porque a conexão delta aprisiona as componentes triplas ou triplens, que são as harmônicas ímpares múltiplas de três, nos enrolamentos primários, o que justifica o isolamento extra para evitar a deterioração

deles (KASSICK, 2008). Além de reforçar os enrolamentos primários, as harmônicas acarretam adequações no enrolamento secundário; a primeira refere-se à bitola do condutor do neutro enquanto a segunda no uso de condutores múltiplos, isolados e trançados a fim de diminuir o efeito pelicular que ocasiona perdas por efeito Joule extras (KASSICK, 2008). O projetista também pode buscar materiais magnéticos com melhor desempenho para a confecção do núcleo dos transformadores com a finalidade de diminuir as perdas da componente fundamental no núcleo, o que impacta na redução das perdas geradas pelas demais componentes.

Ademais, segundo a norma ANSI/IEEE C57.110-1986, sob corrente nominal em regime permanente, a taxa de distorção harmônica total (THD) de corrente em transformadores deve se limitar a 5% ao mesmo tempo que as sobretensões devem ser inferiores a 5% e a 10% em carga nominal e a vazio respectivamente (ANSI; IEEE, 1988; AWADALLAH et al., 2016; KASSICK, 2008). Essa mesma norma é a que determina o superdimensionamento em potência de transformadores utilizados em circuitos com cargas predominantemente não-lineares, ao assumir que esse tipo de carga corresponde a 100% do total das alimentadas pelo dispositivo eletromagnético. Para tanto, é estabelecido um fator K, o qual indica quantas vezes o calor gerado pela distorção harmônica de corrente é maior em relação ao valor eficaz da onda sinusoidal pura (KASSICK, 2008). Em resumo, o fator K determina quantas vezes a mais de calor o transformador aguenta em relação a um equivalente que alimenta apenas cargas lineares.

Transformadores projetados em consonância com essa parte da norma são denominados *K-rated transformers*, cujo fator de multiplicação pode variar de 1 (transformadores convencionais – cargas lineares) a 40 a depender da gravidade da distorção harmônica. A Tabela C.1 serve como indicativo do fator K a ser utilizado no projeto de transformadores de acordo com a carga presente no circuito. No entanto, (KASSICK, 2008) recomenda um estudo detalhado do conteúdo harmônico das cargas que compõem a instalação a fim de aumentar a exatidão, deixar o dispositivo mais eficiente e menos caro.

Por fim, são apresentadas as fórmulas que determinam o valor do fator K (equação C.1) bem como do valor da corrente total máxima admissível por unidade (pu – $I_{max(pu)}$) – equação C.2) se o transformador não for superdimensionado com o emprego do fator K, ou seja, quanto de corrente nominal da componente fundamental o dispositivo aguentaria se não for redimensionado (KASSICK, 2008).

Tabela C.7.2: Fator K em correspondência à carga do circuito elétrico.

Carga	Fator K
Iluminação incandescente (sem controle de luminosidade com <i>dimmers</i>)	K-1
Aquecimento resistivo (sem controle de temperatura com conversores estáticos)	K-1
Motores CA (sem acionamento por conversor estático)	K-1
Iluminação com lâmpadas de descarga	K-4
UPS com filtro de entrada	K-4
Equipamentos para soldagem a arco	K-4
Equipamento para aquecimento indutivo	K-4
CLP's e controladores eletrônicos (exceto acionamentos com veloc. Variável)	K-4
Equipamento de telecomunicações	K-13
UPS sem filtro de entrada	K-13
Instalações elétricas (tomadas) em hospitais, clínicas, escolas...	K-13
Instalações elétricas (tomadas) para setores de inspeção ou teste de produtos em linha de produção (montagem) industrial	K-13
Computadores de grande porte e periféricos	K-20
Acionamentos em velocidade variável	K-20
Instalações elétricas (tomadas) em áreas críticas (centros cirúrgicos, UTI's)	K-20
Instalações elétricas (tomadas) em laboratórios industriais, médicos, escolares	K-30
Instalações elétricas (tomadas) em ambientes comerciais (bancos, escritórios)	K-30
Mini e microcomputadores	K-30
Cargas conhecidas como grandes geradoras de harmônicas (sobretudo de ordem elevada)	K-40

Fonte: (KASSICK, 2008)

$$K = \sum_{h=1}^{\infty} I_{h(\text{pu})}^2 h^2 \quad (\text{C.1})$$

$$I_{\text{max}(\text{pu})} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_{h(\text{pu})}^2} = \sqrt{\frac{1+P_{EC-R(\text{pu})}}{1+KP_{EC-R(\text{pu})}}} \quad (\text{C.2})$$

Onde:

- h – Ordem da harmônica;
- $I_{h(\text{pu})}$ – Componente Harmônica de Corrente no Secundário em Relação à Fundamental [pu];
- $I_{\text{max}(\text{pu})}$ – Corrente Total Máxima Admissível no Secundário [pu];
- K – Fator K;
- $P_{EC-R(\text{pu})}$ – Perdas por Correntes Parasitas no Cobre sob Condições Nominais [pu].

Quanto à potência de base das referidas perdas, é em relação às perdas por condução no cobre da onda fundamental. A respeito dos valores das perdas por correntes parasitas nos enrolamentos sob condições nominais, podem ser determinados via cálculos indicados pela norma ANSI/IEEE C57.110-1986 a partir de dados do projeto ou de ensaios. Ou, ainda, por valores tabelados extraídos da Tabela 3.1, reproduzida abaixo.

Tabela 3.1: Valores típicos de $P_{EC-R(\text{pu})}$ para transformadores de potência.

Tipo	Potência Aparente [MVA]	Tensão	$P_{EC-R(\text{pu})}$
Seco	$S < 1$	AT: 5 kV	0,03 a 0,08
Seco	$S > 1,5$	AT: 5 kV	0,12 a 0,20
Seco	$S < 1,5$	AT: 15 kV	0,09 a 0,15
Óleo	$S < 2,5$	BT: 480 V	0,01
Óleo	$2,5 \leq S \leq 5$	BT: 480 V	0,01 a 0,05
Óleo	$S > 5$	BT: 480 V	0,09 a 0,15

Fonte: Adaptado de (DIAS, 1998; KASSICK, 2008)

Portanto, com a devida blindagem de componentes como o tanque e estruturas, as perdas introduzidas pelas harmônicas de corrente em transformadores que devem ser motivo de preocupação para o projetista são as perdas devido às correntes parasitas nos enrolamentos (P_{EC}), as quais podem ser previstas por meio da equação C.3 se o projetista conhece o conteúdo harmônico da corrente elétrica

$$P_{EC} = P_{EC-R} \sum_{h=1}^{h=h_{\text{max}}} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^2 \quad (\text{C.3})$$

Onde:

- I_R – Corrente Eficaz Sinusoidal Nominal na Carga [A];
- P_{EC} – Perdas Nominais por Correntes Parasitas no Cobre sob Onda Não-Sinusoidal [W];
- P_{EC-R} – Perdas Nominais por Correntes Parasitas no Cobre [W].

Quanto às perdas no núcleo, são bem mais complexas de serem determinadas analiticamente e mesmo com o uso do método dos elementos finitos (BARG et al., 2017). (BATISTELA, 2001) demonstra que é possível determiná-las empiricamente, quando se conhece a forma de onda da indução em função do tempo assim como seu conteúdo harmônico proveniente das harmônicas de tensão da rede. No entanto, quando essa informação é desconhecida, o que é o caso desta pesquisa, normalmente, as perdas no núcleo são calculadas juntas com o conteúdo componente da fundamental através de fórmulas empíricas baseadas na equação de Steinmetz (C.3) tal que alguns dos parâmetros γ , θ e β , não são fornecidos pelos fabricantes, ou seja, precisam ser estimados em laboratórios por estarem relacionados com a curva de histerese dos materiais (BARG et al., 2017).

$$P_{St} = \gamma f^\theta B_M^\beta v \quad (C.4)$$

Onde:

- B_M – Indução magnética máxima [T];
- f – Frequência fundamental da rede [Hz];
- P_{St} – Perdas no núcleo segundo a equação Steinmetz [W];
- v – Volume [m³].

APÊNDICE D – Resfriamento de Transformadores

Conforme discutido na seção 3.4 do capítulo 3, a maior parte das perdas emitidas pelos transformadores provêm dos enrolamentos e do núcleo magnético. Em vista disso, alguns desses dispositivos eletromagnéticos podem requerer técnicas de resfriamento com a finalidade de garantir as condições adequadas de funcionamento e, assim, proteger a vida útil deles. Essas condições estão atreladas à manutenção da temperatura de operação abaixo da máxima a fim de evitar tanto a degradação das propriedades eletromagnéticas do núcleo, o que acarreta mal funcionamento dos circuitos elétricos onde estão inseridos, quanto sobreaquecimento do dispositivo, o que ocasiona risco de incêndio.

Então, na maioria dessas técnicas de resfriamento, o transformador é posto num tanque onde é imerso em líquido refrigerante dielétrico, normalmente o óleo, o qual realiza convecção natural e deve ficar isento de umidade – isenção garantida por um dispositivo desumidificador – e poder facilmente penetrar entre as espiras para impregnar os separadores. Por isso que os separadores devem ser constituídos de materiais aderentes ao óleo, como algodão, papel e presspan, e não de borracha e derivados (MARTIGNONI, 1973). Ademais, como esse líquido também é um bom isolante elétrico, possibilita diminuir as distâncias de isolamento entre as partes do dispositivo, o que resulta, então, em transformadores com volumes menores.

Conforme aumenta a potência do dispositivo eletromagnético, a convecção natural pode ser insuficiente para manter a temperatura do óleo abaixo da máxima definida pelo projetista. Portanto, faz-se uso, primeiramente, de radiadores, os quais auxiliam a dissipar o calor por condução e convecção térmicas devido ao aumento da superfície de contato com o ar externo. Caso os radiadores sejam insuficientes, pode-se também fazer uso de umas das seguintes opções. A primeira é deixar passar uma tubulação de água fria no óleo de modo a resfriá-lo. Já a segunda é fazer uso de um sistema de convecção forçada, no qual o óleo quente é bombeado para uma estrutura externa ao tanque, onde troca calor com uma tubulação de água fria. O óleo resfriado deve, então, ter pressão suficiente para retornar ao tanque naturalmente (MARTIGNONI, 1973). Por fim, uma terceira opção é utilizar ventiladores verticalmente montados para resfriar as paredes do tanque (DEL VECCHIO; FEGHALI; AHUJA, 2010).

Segundo o que foi discutido no último parágrafo da seção 3.2 (página 21), alguns projetos de núcleos magnéticos podem requerer isolantes térmicos ou canais de refrigeração, por onde flui o óleo, entre as lâminas ou pacotes dessas com a finalidade de transferir calor do

interior do núcleo para o exterior. Essa engenharia permite que a diferença de temperatura entre esses extremos fique numa faixa de 15°C a 20°C (KULKARNI; KHAPARDE, 2004). Quanto ao resfriamento próximo à região dos enrolamentos, o projeto de isolamento elétrica tende a entrar em conflito com o de transferência de calor. Isso ocorre, porque os isolantes utilizados, discutidos na seção 3.3, também são mal condutores de calor, o que reduz o volume necessário para a energia térmica fluir entre os enrolamentos AT e BT e entre o mais interno e o núcleo. Por isso, o projeto dessa isolamento elétrica costuma ser realizado de forma a minimizar a isolamento térmica entre os enrolamentos e entre esses e o núcleo ao mesmo tempo que maximiza a isolamento elétrica (KULKARNI; KHAPARDE, 2004). Outra técnica utilizada é o aumento da espessura dos enrolamentos, o que favorece a transferência de calor do cobre por condução (KULKARNI; KHAPARDE, 2004). Além dessas possibilidades, pode-se criar um duto de refrigeração, por onde flui o líquido refrigerante, entre as espiras ou, quando o uso de óleo e ar forem inviáveis, trocar o fluido pelo gás hexafluoreto de enxofre (SF₆) (DEL VECCHIO; FEGHALI; AHUJA, 2010; KULKARNI; KHAPARDE, 2004).

Por fim, deve-se ajustar todo esse sistema de refrigeração a cada mil metros de altitude acima do nível do mar. Esse ajuste deve ser feito, porque as normas técnicas de fabricação de transformadores, tanto as nacionais quanto as internacionais nas quais são baseadas, levam em consideração as propriedades termodinâmicas dos fluidos abaixo daquela altitude. Para tanto, pode-se utilizar a fórmula de recorrência da seção 3.3 e as tabelas 1 e 2 para a readequação de projeto, todas a três contidas em (WEG S.A., 2010), as quais não serão transcritas nesta dissertação, porque se supõe que o transformador projetado opere em altitude próxima ao nível do mar.

APÊNDICE E – Os Limites dos Parâmetros dos Transformadores Trifásicos

Conforme discutido na seção 4.3 do capítulo 4, os limites dos parâmetros dos transformadores trifásicos são estimados conforme a equação (E.1), mas também por (3.6) e (3.7), reproduzidas a seguir.

$$D_C = \sqrt{\frac{2\sqrt{2}V_{fAT}}{\pi^2 f B_M N_{AT} K_f}} \quad (E.1)$$

$$hw = \frac{k_w N_{AT} I_{AT}}{a} \quad (3.6)$$

$$bw = \frac{2k_w N_{AT} A_{AT}}{f_{Cu} hw} \quad (3.7)$$

Onde:

- A_{AT} – Área da Seção Transversal de Cobre do Enrolamento de Alta Tensão [mm^2];
- a – Constante para Transformadores Isolados a Óleo [A.esp/cm];
- B_M – Módulo da Indução Magnética Máxima no Núcleo do Transformador [T];
- bw – Largura da Janela do Transformador [mm];
- D_C – Diâmetro da Coluna Idealmente Circular do Transformador [mm];
- f – Frequência da Rede [Hz];
- f_{Cu} – Fator de Preenchimento do Cobre;
- hw – Altura da Janela do Transformador [mm];
- I_{AT} – Corrente Elétrica Eficaz de Linha do Enrolamento de Alta Tensão [A];
- K_f – Coeficiente de Enchimento (Fator de Empilhamento) das Lâminas;
- k_w – Fator de Preenchimento da Janela;
- N_{AT} – Número de Espiras no Enrolamento de Alta Tensão;
- V_{fAT} – Tensão Elétrica Eficaz de Fase do Enrolamento de Alta Tensão [V];

Para estimar os parâmetros geométricos é necessário fazer duas considerações. A primeira, válida para as dimensões das janelas, é analisar os cenários extremos, o que é determinado unicamente pelo número de espiras AT, visto que é a única variável nas equações (3.6) e (3.7). Então, ao verificar os casos em que essa variável é mínima e máxima, obtêm-se, respectivamente, os limites inferior e superior pelas equações (3.6) – altura da janela – e (3.7) – largura da janela.

Em relação à segunda consideração, válida para os diâmetros das colunas dos transformadores, nota-se que a única variável é a indução magnética máxima no núcleo, que, por sua vez, é o parâmetro magnético. Por isso, considera-se que os intervalos indicados no capítulo 4 não são altos o suficiente para saturar o dispositivo nem baixos o suficiente para causar o mal funcionamento dele. Então, os diâmetros das colunas podem ser estimados com base nessas limitações magnéticas pela equação (E.1).

ANEXO A: Soluções de Pareto de AGMULTI para o Transformador Monofásico

Situação A: Massa x Rendimento

Tabela A.7.3: Parâmetros das 16 soluções quando os objetivos são m_T e η .

Solução	c (cm)	t (cm)	hw (cm)	bw (cm)	B_M (T)	J (A/mm ²)
1	2,233	1,716	10,2279	3,29124	1,2870	3
2	2,202	1,836	10,2102	3,26506	1,2803	3
3	2,286	1,834	11,0907	3,03127	1,2790	3
4	2,087	2,321	10,1428	3,17591	1,2539	3
5	2,027	2,565	10,1079	3,12915	1,2405	3
6	1,869	3,104	10,0236	2,98801	1,2090	3
7	1,806	3,618	10	2,97365	1,2	3
8	2,422	2,654	10,4049	2,78702	1,2426	3
9	2,578	2,513	11,7818	2,45399	1,2648	3
10	2,523	2,654	14,8059	1,90942	1,2548	3
11	2,721	2,880	12,4346	2,09047	1,2541	3
12	2,774	3,015	12,6750	1,9566	1,2502	3
13	2,834	3,170	12,9543	1,80245	1,2456	3
14	2,880	3,264	12,8963	1,74338	1,2435	3
15	2,912	3,347	13,0541	1,66126	1,2414	3
16	2,982	3,508	13,1935	1,52557	1,2376	3

Tabela A.7.4: **Objetivos** m_T e η e outras grandezas das 16 soluções.

Solução	η (%)	m_T (kg)	m_{Fe} (kg)	m_{Cu} (kg)	C_{fab} (US\$)	Fe_s (US\$)	Cu_s (US\$)
1	85,83	4,25	2,11	2,14	13,05	0,21	12,84
2	86,33	4,25	2,21	2,04	12,47	0,22	12,25
3	86,85	4,33	2,40	1,94	11,85	0,24	11,61
4	87,81	4,35	2,59	1,76	10,80	0,26	10,54
5	88,31	4,41	2,75	1,66	10,25	0,28	9,97
6	89,05	4,50	2,97	1,53	9,47	0,30	9,17
7	89,64	4,73	3,32	1,41	8,80	0,33	8,47
8	89,67	4,93	3,55	1,38	8,65	0,35	8,29
9	89,97	5,15	3,84	1,31	8,23	0,38	7,84
10	90,52	5,64	4,46	1,18	7,55	0,45	7,10
11	90,92	5,89	4,79	1,10	7,06	0,48	6,59
12	91,18	6,20	5,16	1,03	6,72	0,52	6,21
13	91,44	6,58	5,62	0,97	6,38	0,56	5,82
14	91,56	6,80	5,87	0,94	6,20	0,59	5,61
15	91,67	7,03	6,13	0,90	6,04	0,61	5,43
16	91,83	7,47	6,62	0,85	5,77	0,66	5,11

Situação B: Custo de Fabricação x RendimentoTabela A.7.5: Parâmetros das 8 soluções quando os objetivos são C_{fab} e η .

Solução	c (cm)	t (cm)	hw (cm)	bw (cm)	B_M (T)	J (A/mm ²)
1	2,981	4	20	1,9703	1,3	3
2	2,812	3,927	20	1,8582	1,3	3
3	2,765	3,865	20	1,8355	1,3	3
4	2,721	3,801	19,9884	1,7897	1,2974	3
5	2,681	3,744	19,9807	1,77403	1,2955	3
6	2,726	3,807	19,4852	1,80109	1,2641	3
7	2,611	3,646	19,8288	1,72279	1,2614	3
8	2,652	3,703	18,9803	1,75220	1,2274	3

Tabela A.7.6: **Objetivos** C_{fab} e η e outras grandezas das 8 soluções.

Solução	η (%)	m_T (kg)	m_{Fe} (kg)	m_{Cu} (kg)	C_{fab} (US\$)	Fe_s (US\$)	Cu_s (US\$)
1	90,75	10,97	10,19	0,78	5,72	1,02	4,70
2	90,93	10,09	9,29	0,81	5,77	0,93	4,84
3	90,97	9,77	8,95	0,82	5,82	0,89	4,93
4	91,01	9,45	8,62	0,84	5,88	0,86	5,02
5	91,04	9,18	8,33	0,85	5,93	0,83	5,10
6	91,07	9,35	8,49	0,86	5,99	0,85	5,14
7	91,08	8,69	7,80	0,90	6,16	0,78	5,38
8	91,13	8,73	7,82	0,91	6,22	0,78	5,44

Situação C: Massa x Custo de FabricaçãoTabela A.7.7: Parâmetros das 16 soluções quando os objetivos são m_T e C_{fab} .

Solução	c (cm)	t (cm)	hw (cm)	bw (cm)	B_M (T)	J (A/mm ²)
1	1,195	2,917	12,5180	2,87889	1,2528	3
2	1,242	2,954	12,4679	2,84283	1,2518	3
3	1,293	2,993	12,4188	2,79989	1,2504	3
4	1,349	3,031	12,4038	2,75055	1,2491	3
5	1,425	3,090	12,3266	2,69006	1,2474	3
6	1,495	3,121	12,4315	2,62050	1,2472	3
7	1,578	3,189	12,3033	2,54846	1,2431	3
8	1,667	3,257	12,2250	2,47491	1,2410	3
9	1,777	3,344	12,0655	2,38513	1,2368	3
10	1,896	3,456	11,9632	2,32671	1,2431	3
11	2,029	3,564	11,5260	2,24816	1,2288	3
12	2,253	3,414	11,8045	1,92730	1,2024	3
13	2,256	3,754	11,1923	2,01835	1,2200	3
14	2,352	3,831	11,0563	1,94185	1,2168	3
15	2,422	3,890	11,0198	1,89645	1,2184	3
16	2,480	3,960	11,4795	1,95707	1,2553	3

Tabela A.7.8: **Objetivos** m_T e C_{fab} e outras grandezas das 16 soluções.

Solução	$\eta(\%)$	m_T (kg)	m_{Fe} (kg)	m_{Cu} (kg)	C_{fab} (US\$)	Fe_s (US\$)	Cu_s (US\$)
1	86,19	3,99	1,90	2,09	12,74	0,19	12,55
2	86,63	4,00	2,00	2,00	12,23	0,20	12,03
3	87,08	4,02	2,11	1,92	11,71	0,21	11,50
4	87,53	4,06	2,23	1,83	11,20	0,23	10,97
5	88,08	4,13	2,41	1,72	10,56	0,24	10,32
6	88,52	4,21	2,58	1,63	10,06	0,26	9,80
7	89,02	4,31	2,77	1,54	9,50	0,28	9,23
8	89,48	4,45	3,00	1,45	8,97	0,30	8,67
9	89,98	4,62	3,27	1,35	8,41	0,33	8,08
10	90,46	4,87	3,62	1,24	7,83	0,36	7,47
11	90,84	5,11	3,95	1,17	7,39	0,39	7,00
12	91,18	5,39	4,29	1,10	7,03	0,43	6,60
13	91,48	5,62	4,59	1,03	6,63	0,46	6,17
14	91,68	5,86	4,88	0,98	6,38	0,49	5,89
15	91,80	6,07	5,12	0,95	6,20	0,51	5,69
16	91,84	6,43	5,53	0,90	5,98	0,55	5,43

ANEXO B: Soluções de Pareto de AGMULTI - Transformador Trifásico de 300 kVA

Massa x Rendimento

Tabela B.7.9: Parâmetros, N_{AT} e N_{BT} das 10 soluções quando os objetivos são m_T e η .

Solução	D_c (mm)	hw (mm)	bw (mm)	B_M (T)	J (A/mm ²)	N_{AT}	N_{BT}
1	195,3254	497,2905	155	1,406011	2,6	1380	22
2	197,3925	501,2183	150	1,449513	2,6	1316	21
3	200,4866	498,8052	155	1,494241	2,6	1258	20
4	200,9314	528,8528	150	1,457666	2,6	1258	20
5	204,2618	499,9998	160	1,484819	2,6	1194	19
6	210,5565	488,847	190	1,478553	2,6	1132	18
7	218,2213	485,28	155	1,449819	2,6	1070	17
8	223,063	509,848	150	1,478227	2,6	1006	16
9	235,0707	509,7483	160	1,407928	2,6	944	15
10	242,2357	497,9886	155	1,328683	2,6	944	15

Tabela B.7.10: Objetivos m_T e η e outras grandezas das 10 soluções.

Solução	η (%)	m_T (kg)	m_{Fe} (kg)	m_{Cu} (kg)	C_{tot} (US\$)	C_{fub} (US\$)	Fes (US\$)	Cus (US\$)
1	98,73	708,06	638,94	69,12	16.842,74	478,60	63,89	414,70
2	98,76	722,99	653,31	69,68	17.288,49	483,43	65,33	418,10
3	98,76	746,87	680,41	66,46	18.085,11	466,78	68,04	398,74
4	98,77	764,46	698,24	66,22	17.805,84	467,12	69,82	397,30
5	98,80	779,64	716,66	62,98	18.146,46	449,54	71,67	377,87
6	98,80	849,76	788,52	61,24	18.935,85	446,30	78,85	367,45
7	98,81	879,69	821,41	58,28	18.841,48	431,83	82,14	349,69
8	98,82	934,07	878,47	55,60	19.905,39	421,44	87,85	333,59
9	98,84	1061,11	1006,12	54,99	20.194,46	430,53	100,61	329,92
10	98,84	1120,85	1064,32	56,53	19.547,89	445,61	106,43	339,18

Massa x Custo TotalTabela B.7.11: Parâmetros, N_{AT} e N_{BT} das 6 soluções quando os objetivos são m_T e C_{tot} .

Solução	D_c (mm)	hw (mm)	bw (mm)	B_M (T)	J (A/mm ²)	N_{AT}	N_{BT}
1	194,74	482	150	1,268042	2,6	1572	25
2	195,6551	484,4055	150	1,255455	2,6	1572	25
3	195,5794	492,6767	160	1,38528	2,6	1572	25
4	199,757	497,8995	155	1,193087	2,6	1572	25
5	202,9097	503,4969	150	1,155289	2,6	1572	25
6	205,0929	509,2418	150	1,125156	2,6	1572	25

Tabela B.7.12: **Objetivos** m_T e C_{tot} e outras grandezas das 6 soluções.

Solução	η (%)	m_T (kg)	m_{Fe} (kg)	m_{Cu} (kg)	C_{tot} (US\$)	C_{fab} (US\$)	Fe_s (US\$)	Cu_s (US\$)
1	98,64	704,54	622,06	82,48	16.138,16	557,08	62,21	494,88
2	98,64	711,85	629,37	82,48	16.080,28	557,81	62,94	494,88
3	98,64	724,32	641,84	82,48	16.028,66	559,06	64,18	494,88
4	98,63	758,16	673,65	84,51	15.958,86	574,43	67,37	507,06
5	98,62	783,87	698,27	85,60	15.890,34	583,41	69,83	513,58
6	98,62	806,12	719,80	86,32	15.825,56	589,90	71,98	517,92

Massa x Custo de FabricaçãoTabela B.7.13: Parâmetros, N_{AT} e N_{BT} das 10 soluções quando os objetivos são m_T e C_{fab} .

Solução	D_c (mm)	hw (mm)	bw (mm)	B_M (T)	J (A/mm ²)	N_{AT}	N_{BT}
1	195,2094	482,7090	155	1,434435	2,6	1380	22
2	195,0792	543,4749	170	1,480829	2,6	1316	21
3	200,1399	503,2006	190	1,476663	2,6	1258	20
4	204,0761	505,1077	165	1,485017	2,6	1194	19
5	210,2993	532,7235	155	1,483247	2,6	1132	18
6	215,3257	502,5687	160	1,496410	2,6	1070	17
7	221,5487	526,6551	160	1,498222	2,6	1006	16
8	227,9605	511,5199	160	1,499015	2,6	944	15
9	240,6909	483,6726	155	1,459230	2,6	882	14
10	239,5323	507,0860	165	1,452935	2,6	882	14

Tabela B.7.14: **Objetivos** m_T e C_{fab} e outras grandezas das 10 soluções.

Solução	η (%)	m_T (kg)	m_{Fe} (kg)	m_{Cu} (kg)	C_{tot} (US\$)	C_{fab} (US\$)	Fes (US\$)	Cus (US\$)
1	98,73	698,59	629,47	69,12	17.069,96	477,65	62,95	414,7
2	98,74	744,45	676,83	67,62	18.017,06	473,39	67,68	405,71
3	98,75	775,76	710,14	65,62	18.302,23	464,72	71,01	393,71
4	98,80	784,44	721,74	62,70	18.199,03	448,40	72,17	376,23
5	98,80	844,63	784,66	59,97	18.965,63	438,32	78,47	359,85
6	98,81	870,49	812,80	57,69	19.407,38	427,39	81,28	346,11
7	98,81	943,39	888,24	55,15	20.406,35	419,73	88,82	330,91
8	98,83	991,51	937,84	53,66	20.846,49	415,76	93,78	321,98
9	98,82	1.087,61	1035,97	51,64	21.482,77	413,45	103,60	309,85
10	98,82	1.105,66	1055,48	50,18	21.618,36	406,63	105,55	301,08

ANEXO C: Soluções de Pareto de AGMULTI - Transformador Trifásico de 30 kVA

Massa x RendimentoTabela C.7.15: Parâmetros, N_{AT} e N_{BT} das 9 soluções quando os objetivos são m_T e η .

Solução	D_c (mm)	hw (mm)	bw (mm)	B_M (T)	J (A/mm ²)	N_{AT}	N_{BT}
1	100,3067	256,9307	120	1,364642	2,3	2782	51
2	100,7452	253,0361	120	1,361392	2,3	2726	50
3	107,7074	246,0307	120	1,299388	2,3	2510	46
4	126,7399	212,8488	105	1,106286	2,3	2510	46
5	116,1484	226,8831	115	1,220477	2,3	2300	42
6	118,263	216,7561	110	1,118547	2,3	2454	45
7	121,1329	222,6673	110	1,153416	2,3	2236	41
8	122,7786	223,2917	105	1,122171	2,3	2236	41
9	122,6884	228,109	110	1,154170	2,3	2182	40

Tabela C.7.16: **Objetivos** m_T e η e outras grandezas das 9 soluções.

Solução	η (%)	m_T (kg)	m_{Fe} (kg)	m_{Cu} (kg)	C_{tot} (US\$)	C_{fab} (US\$)	Fes (US\$)	Cus (US\$)
1	97,78	113,55	95,45	18,11	4.015,20	118,19	9,54	106,64
2	97,81	113,87	96,14	17,73	3.999,09	116,00	9,61	106,39
3	97,83	127,35	110,25	17,10	4.084,06	113,62	11,02	102,59
4	97,83	140,29	122,00	18,29	3.617,85	121,95	12,20	109,75
5	97,86	142,71	126,13	16,58	4.082,57	112,11	12,61	99,50
6	97,87	146,06	127,96	18,10	3.729,09	121,37	12,80	108,58
7	97,87	153,78	136,99	16,79	4.004,08	114,46	13,70	100,76
8	97,88	157,30	140,25	17,05	3.929,72	116,30	14,03	102,28
9	97,90	158,93	142,28	16,65	4.072,35	114,12	14,23	99,89

Massa x Custo TotalTabela C.7.17: Parâmetros, N_{AT} e N_{BT} das 5 soluções quando os objetivos são m_T e C_{tot} .

Solução	D_c (mm)	hw (mm)	bw (mm)	B_M (T)	J (A/mm ²)	N_{AT}	N_{BT}
1	100	254,1323	115	1,362285	2,3	2782	51
2	100,0573	256,0538	120	1,332548	2,3	2835	52
3	100,1359	258,6915	120	1,291728	2,3	2945	54
4	100	261,6317	115	1,224922	2,3	3108	57
5	100,2117	288,7005	115	1,1	2,3	3436	63

Tabela C.7.18: **Objetivos** m_T e C_{tot} e outras grandezas das 5 soluções.

Solução	η (%)	m_T (kg)	m_{Fe} (kg)	m_{Cu} (kg)	C_{tot} (US\$)	C_{fab} (US\$)	Fe_s (US\$)	C_{us} (US\$)
1	97,82	111,02	93,07	17,95	3.924,94	117,01	9,31	107,70
2	97,80	112,88	94,52	18,36	3.874,60	119,59	9,45	110,13
3	97,79	114,19	95,08	19,11	3.773,64	124,15	9,51	114,64
4	97,70	114,49	94,24	20,24	3.624,90	130,89	9,42	121,47
5	97,61	121,52	98,90	22,61	3.433,79	145,58	9,89	135,69

Massa x Custo de FabricaçãoTabela C.7.19: Parâmetros, N_{AT} e N_{BT} das 6 soluções quando os objetivos são m_T e C_{fab} .

Solução	D_c (mm)	hw (mm)	bw (mm)	B_M (T)	J (A/mm ²)	N_{AT}	N_{BT}
1	110,3220	203,3925	105	1,261302	2,3	2454	45
2	111,8813	208,3371	110	1,285835	2,3	2344	43
3	113,1404	217,5742	125	1,318707	2,3	2236	41
4	115,6896	237,8437	115	1,400209	2,3	2018	37
5	118,9975	253,2046	110	1,455048	2,3	1854	34
6	123,9038	230,2165	140	1,456051	2,3	1690	31

Tabela C.7.20: **Objetivos** m_T e C_{fab} e outras grandezas das 6 soluções.

Solução	$\eta(\%)$	m_T (kg)	m_{Fe} (kg)	m_{Cu} (kg)	C_{tot} (US\$)	C_{fab} (US\$)	Fes (US\$)	Cus (US\$)
1	97,85	121,92	104,86	17,06	3.818,19	112,87	10,49	102,38
2	97,89	126,97	110,51	16,46	3.989,14	109,80	11,05	98,75
3	97,83	135,59	119,69	15,91	4.362,80	107,41	11,97	95,44
4	97,79	142,11	127,44	14,67	4.917,19	100,77	12,74	88,02
5	97,71	152,04	138,09	13,95	5.520,11	97,50	13,81	83,69
6	97,59	169,39	156,22	13,18	6.097,85	94,68	15,62	79,06

ANEXO D: Soluções de Pareto de AGMULTI - Transformador Trifásico de 2 kVA

Massa x Rendimento – Seleção Usual

Tabela D.7.21: Parâmetros, N_{AT} e N_{BT} das 10 soluções por seleção usual.

Solução	D_c (mm)	h_w (mm)	b_w (mm)	B_M (T)	J (A/mm ²)	N_{AT}	N_{BT}
1	37,00311	188,8611	54,55511	1,477275	2,5	1170	391
2	42,18969	179,9409	51,04143	1,436127	2,5	927	310
3	50,26779	111,0911	63,65081	1,436342	2,5	652	218
4	52,45528	110,0654	66,52100	1,438839	2,5	598	200
5	57,57589	109,7106	58,05561	1,403438	2,5	509	170
6	66,70288	118,1578	42,01461	1,406869	2,5	377	126
7	69,04930	120,8751	40,52825	1,427838	2,5	347	116
8	72,25906	124,0656	35,81595	1,438160	2,5	314	105
9	76,91434	114,8523	33,83498	1,433245	2,5	278	93
10	81,7904	101,8572	43,45161	1,203848	2,5	293	98

Tabela D.7.22: **Objetivos** m_T e η e outras grandezas das 10 soluções por seleção usual.

Solução	η (%)	m_T (kg)	m_{Fe} (kg)	m_{Cu} (kg)	C_{fab} (US\$)	Fes (US\$)	CuS (US\$)
1	92,94	16,83	7,53	9,30	56,56	0,75	55,81
2	93,60	17,85	9,68	8,17	49,97	0,97	49,00
3	94,50	18,87	12,23	6,64	41,04	1,22	39,82
4	94,65	19,92	13,63	6,29	39,12	1,36	37,76
5	94,89	22,12	16,33	5,79	36,38	1,63	34,74
6	95,20	27,17	22,30	4,87	31,46	2,23	29,23
7	95,25	28,87	24,27	4,60	30,05	2,43	27,62
8	95,28	31,16	26,83	4,33	28,64	2,68	25,96
9	95,28	34,28	30,21	4,07	27,44	3,02	24,42
10	95,29	39,52	35,03	4,49	30,44	3,50	26,94

Massa x Rendimento – Seleção por Roleta no RendimentoTabela D.7.23: Parâmetros, N_{AT} e N_{BT} das 11 soluções por seleção por roleta no η .

Solução	D_c (mm)	hw (mm)	bw (mm)	B_M (T)	J (A/mm ²)	N_{AT}	N_{BT}
1	34,90154	197,261	45,57285	1,446215	2,5	1343	449
2	45,33670	99,5822	69,2633	1,374730	2,5	838	280
3	48,35007	122,4501	54,6695	1,335312	2,5	760	254
4	51,50699	146,5997	46,09769	1,418027	2,5	628	210
5	57,76238	128,7637	46,6515	1,409379	2,5	503	168
6	62,76210	114,4266	46,47161	1,374377	2,5	437	146
7	66,58333	109,3239	49,30666	1,406543	2,5	380	127
8	69,26202	104,2976	50,37711	1,407086	2,5	350	117
9	72,83560	87,01690	47,71340	1,272500	2,5	350	117
10	75,55619	83,07990	46,94054	1,265522	2,5	329	110
11	78,64730	86,4788	48,8609	1,317300	2,5	290	97

Tabela D.7.24: **Objetivos** m_T e η e outras grandezas das 11 soluções por seleção por roleta no η .

Solução	η (%)	m_T (kg)	m_{Fe} (kg)	m_{Cu} (kg)	C_{fab} (US\$)	Fe_s (US\$)	Cu_s (US\$)
1	92,41	16,76	6,55	10,22	61,96	0,65	61,31
2	93,89	17,28	9,47	7,81	47,81	0,95	46,87
3	94,07	18,61	11,14	7,47	45,96	1,11	44,85
4	94,54	19,97	13,46	6,50	40,35	1,35	39,00
5	94,91	22,37	16,65	5,72	36,00	1,67	34,33
6	95,08	24,71	19,36	5,35	34,01	1,94	32,08
7	95,18	27,19	22,38	4,91	31,69	2,23	29,46
8	95,26	28,78	24,14	4,64	30,27	2,41	27,86
9	95,27	30,45	25,57	4,88	31,85	2,56	29,30
10	95,33	32,12	27,42	4,70	30,96	2,74	28,22
11	95,35	35,23	30,94	4,29	28,86	3,09	25,77

Massa x Rendimento – Seleção por Roleta na MassaTabela D.7.25: Parâmetros, N_{AT} e N_{BT} das 10 soluções por seleção por roleta na m_T .

Solução	D_c (mm)	hw (mm)	bw (mm)	B_M (T)	J (A/mm ²)	N_{AT}	N_{BT}
1	38,93790	147,4846	69,34219	1,359522	2,5	1149	384
2	45,06047	143,2994	61,31262	1,405619	2,5	829	277
3	51,34136	119,0177	59,29951	1,455738	2,5	616	206
4	55,58483	120,7557	36,89454	1,390841	2,5	550	184
5	56,93520	118,9621	38,38841	1,394541	2,5	524	175
6	57,37504	116,1656	56,66841	1,443289	2,5	500	167
7	59,87714	126,9446	46,11994	1,466051	2,5	452	151
8	64,78691	113,0377	48,80977	1,413632	2,5	398	133
9	69,08855	102,8191	51,83329	1,427849	2,5	347	116
10	75,66860	93,9533	47,2042	1,44858	2,5	284	95

Tabela D.7.26: **Objetivos** m_T e η e outras grandezas das 10 soluções por seleção por roleta na m_T .

Solução	η (%)	m_T (kg)	m_{Fe} (kg)	m_{Cu} (kg)	C_{fab} (US\$)	Fe_s (US\$)	Cu_s (US\$)
1	92,84	17,42	7,89	9,53	57,96	0,79	57,17
2	93,88	18,20	10,47	7,73	47,41	1,05	46,36
3	94,62	19,32	12,94	6,38	1,29	38,26	39,55
4	94,83	20,21	14,14	6,07	37,84	1,41	36,43
5	94,85	21,02	15,06	5,96	37,27	1,51	35,77
6	94,90	22,16	16,47	5,69	35,78	1,65	34,13
7	95,06	23,28	17,98	5,30	33,58	1,80	31,78
8	95,17	26,03	21,03	5,00	32,14	2,10	30,03
9	95,26	28,66	24,06	4,60	30,02	2,41	27,62
10	95,30	32,87	28,76	4,11	27,53	2,88	24,65

ANEXO E: Tabela de Diâmetros e Seções Retas de Fios Padrão AWG

Tabela E.26: Tabela de diâmetros e seções retas de fios padrão AWG

A.W.G	Diâmetro (mm)	Seção reta (mm²)	A.W.G	Diâmetro (mm)	Seção reta (mm²)
1	7.348	42.41 mm ²	21	0.723	0.410 mm ²
2	6.544	33.63 mm ²	22	0.644	0.326 mm ²
3	5.827	26.67 mm ²	23	0.573	0.258 mm ²
4	5.189	21.15 mm ²	24	0.511	0.205 mm ²
5	4.621	16.77 mm ²	25	0.455	0.162 mm ²
6	4.115	13.30 mm ²	26	0.405	0.129 mm ²
7	3.665	10.55 mm ²	27	0.361	0.102 mm ²
8	3.264	8.366 mm ²	28	0.321	0.081 mm ²
9	2.906	6.634 mm ²	29	0.286	0.064 mm ²
10	2.588	5.261 mm ²	30	0.255	0.051 mm ²
11	2.305	4.172 mm ²	31	0.227	0.040 mm ²
12	2.053	3.309 mm ²	32	0.202	0.032 mm ²
13	1.828	2.624 mm ²	33	0.180	0.025 mm ²
14	1.628	2.081 mm ²	34	0.160	0.020 mm ²
15	1.450	1.650 mm ²	35	0.143	0.016 mm ²
16	1.291	1.309 mm ²	36	0.127	0.013 mm ²
17	1.150	1.038 mm ²	37	0.113	0.010 mm ²
18	1.024	0.823 mm ²	38	0.101	0.008 mm ²
19	0.912	0.653 mm ²	39	0.090	0.006 mm ²
20	0.812	0.518 mm ²	40	0.080	0.005 mm ²

Fonte: PLUS AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL. **O que significa AWG em cabos elétricos?** Disponível em: <http://blog.plusautomacaoindustrial.com.br/o-que-significa-awg-em-cabos-eletricos/>. Acesso em: 18/02/2021.

ANEXO F: Códigos da Otimização dos Transformadores Trifásicos – 300 kVA

Principal – Código Fonte

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Algoritmo Genético de Otimização Multiobjetivo de Trafo Trifásico      %%
%% Mestrado em Engenharia Elétrica - Eletromagnetismo                    %%
%% Engenheiro André Felipe Vitorio Sprotte                               %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Com cluster, que é utilizado apenas na fronteira final
%Com elitismo (darwin_mp_v2.m)
%Funções objetivo: Massa total e custo de fabricação
%Cost of metals:
https://www.dailymetalprice.com/metalpricecharts.php?c=cu&u=kg&d=2400

clear all
close all
clc
tic
%% Parte da Otimização: Definição dos parâmetros, funções objetivos e
critérios de parada
caso = 'min';
%caso = 'max';
%caso = 'minmax';

k = 1;
j = 1;
N = 100;
m = 5; %Quantidade de parâmetros

maxrun = 30; %Quantidade de vezes que o algoritmo é simulado
pareto_by_run = NaN*ones(N,15,maxrun);
popdom_by_run = NaN*ones(N,15,maxrun);
popreal_by_run = NaN*ones(N,15,maxrun);
popfinal_by_run = NaN*ones(N,15,maxrun);

%Limites
%[Dc,hw,bw,B_M,J]
S = 300;
if S==300
%300k
    pmin = [194.74,482,145,1.1,2.6];
    pmax = [245.74,563,200,1.5,2.6];
    ref_point = [1300 650];
    ref_point_obj = [690 390];

elseif S==30
%30k
    pmin = [100,200,100,1.1,2.3];
    pmax = [250,300,150,1.5,2.3];
    ref_point = [250 150];
    ref_point_obj = [100 85];

end

%% Operadores Genéticos Constantes

```

```

%Para não se incomodar com a checagem de Pareto, colocar n>>m da função
randi(m), mais de 10 vezes
maxgen = 10; %Número de gerações
%nbind = round(0.01*N);
nbind = 10;
Ndomax = N; %Limita a quantidade de soluções dominadas em Ndomax
popsolutions(1:nbind,1:m+10,1:maxgen) = NaN; %Matriz com as soluções em
cada geração.
% É necessário iniciar a matriz desse jeito, para evitar erro no algoritmo,
após possíveis eliminações
% de parâmetros, obtidos na reprodução, os quais tornam a execução do
projeto do trafo inviável
sel = 0; %Seleção = 1 => Roleta; Senão é por amostragem determinística +
torneio
i = 1;

for run= 1:maxrun
    n = N;
    p = rand(n,m) .* repmat(pmax-pmin, n, 1) + repmat(pmin, n, 1);

%% Otimização Multiobjetivo
for generation = 1:maxgen
    if generation==1 %Na 1ª Geração
        if S==300 %300k
            [func p] = otimiza_tritrafo_bobs_price(p,m,size(p,1));
        elseif S==30 %30k
            [func p] = otimiza_tritrafo_30k_bobs_price(p,m,size(p,1));
        end
        popreal = [p,func];
    end

    switch caso
        case 'min'
for i=1:size(popreal,1)
    f1lim = min(popreal(:,m+1)); %Encontra o mínimo de f1
    f2lim = min(popreal(:,m+2)); %Encontra o mínimo de f2

    if (popreal(i,m+1) == f1lim)
        f2_f1lim(j) = popreal(i,m+2); %Valor de f2 quando f1 é mínimo;
        j = j+1;
    end
    if (popreal(i,m+2) == f2lim)
        f1_f2lim(k) = popreal(i,m+1); %Valor de f1 quando f2 é mínimo;
        k = k+1;
    end
end
end

f2_f1lim = min(f2_f1lim); %Seleciona o menor valor de f2 dentre os
encontrados quando f1 é mínimo
f1_f2lim = min(f1_f2lim); %Seleciona o menor valor de f1 dentre os
encontrados quando f2 é mínimo

        case 'max'
for i=1:size(popreal,1)
    f1lim = max(popreal(:,m+1)); %Encontra o máximo de f1
    f2lim = max(popreal(:,m+2)); %Encontra o máximo de f2

    if (popreal(i,m+1) == f1lim)
        f2_f1lim(j) = popreal(i,m+2); %Valor de f2 quando f1 é máximo;

```

```

    j = j+1;
end
if (popreal(i,m+2) == f2lim)
    f1_f2lim(k) = popreal(i,m+1); %Valor de f1 quando f2 é máximo;
    k = k+1;
end
end

f2_f1lim = max(f2_f1lim); %Seleciona o maior valor de f2 dentre os
encontrados quando f1 é máximo
f1_f2lim = max(f1_f2lim); %Seleciona o maior valor de f1 dentre os
encontrados quando f2 é máximo

    case 'minmax'
for i=1:size(popreal,1)
    f1lim = min(popreal(:,m+1)); %Encontra o mínimo de f1
    f2lim = max(popreal(:,m+2)); %Encontra o máximo de f2

if (popreal(i,m+1) == f1lim)
    f2_f1lim(j) = popreal(i,m+2) ; %Valor de f2 quando f1 é mínimo;
    j = j+1;
end
if (popreal(i,m+2) == f2lim)
    f1_f2lim(k) = popreal(i,m+1); %Valor de f1 quando f2 é máximo;
    k = k+1;
end
end

f2_f1lim = min(f2_f1lim); %Seleciona o maior valor de f2 dentre os
encontrados quando f1 é mínimo
f1_f2lim = max(f1_f2lim); %Seleciona o maior valor de f1 dentre os
encontrados quando f2 é máximo
    end

[popndom, popdom idom] = pareto_mp(popreal,m,N,caso);
optimum_flag = isempty(popndom);

if optimum_flag == 1
    fprintf('Não há ponto ou região ótima para os intervalos
selecionados!\n')
    fprintf('Por favor, redefina os intervalos de análise!\n')
    break
end

popsel = limitpop_mp(popndom,popdom,idom,nbind); %limitar população

if generation==1
    popndom_gen1 = popndom;
end
%% ROTINA PARA SELEÇÃO E REPRODUÇÃO
if generation<maxgen
    if sel==1
        popsel = sel_roulette_mp(popsel,m,popndom,nbind,caso);
    else
        popsel = selection_mp_v2(popsel,m,popndom,nbind,caso);
    end
    param_r = reproduction_mp(popsel,m,pmin,pmax);
%reproduction: crossover and mutation
    if S==300 %300k

```

```

        [fo_r param_r] =
otimiza_tritrafo_bobs_price(param_r,m,size(param_r(:,1),1));
        elseif S==30 %30k
        [fo_r param_r] =
otimiza_tritrafo_30k_bobs_price(param_r,m,size(param_r(:,1),1));
        end

%% Substituição de indivíduos na população
poprep = [param_r fo_r];
popsolutions(1:size(poprep,1),:,generation) = poprep; %Armazena
soluções da reprodução de cada geração
popreal(size(popreal,1)+1:size(popreal,1)+size(poprep,1),:)= poprep;
popreal = darwin_mp_v2(popreal,popdom,idom,m,N,caso); %Elitismo:
elimina os piores indivíduos, conserva a população inicial N
end

end

%% RESULTADOS
popsol_tot = popndom_gen1; %Junta todas as soluções da reprodução inclusive
a inicial, antes da reprodução na primeira geração
for i=1:maxgen-1
    popsol_tot = [popsol_tot; popsolutions(:, :, i)];
    popsol_tot = unique(popsol_tot, 'rows'); %Elimina linhas repetidas
end

popsol_tot = sortrows(popsol_tot);
popsol_tot = unique(popsol_tot, 'rows'); %Elimina linhas repetidas
popsol_tot(~any(~isnan(popsol_tot), 2), :)=[];
popfinal = pareto_mp(popreal,m,Ndomax,caso);

HV(run,:) =
hypervolume_AFVS_v2(popfinal(:,m+1:m+2),ref_point,ref_point_obj,caso);
t = size(popsol_tot);
for r=1:t
    pareto_by_run(r,:,run) = popsol_tot(r,:);
end
t = size(popfinal_d);
for r=1:t
    popdom_by_run(r,:,run) = popfinal_d(r,:);
end
t = size(popreal);
for r=1:t
    popreal_by_run(r,:,run) = popreal(r,:);
end
t = size(popfinal);
for r=1:t
    popfinal_by_run(r,:,run) = popfinal(r,:);
end
end

[HV_max index] = max(HV);
pf = pareto_by_run(:, :, index);
pf(~any(~isnan(pf), 2), :)=[]; %Elimina NaNs
popdom = popdom_by_run(:, :, index);
popdom(~any(~isnan(popdom), 2), :)=[]; %Elimina NaNs
popreal = popreal_by_run(:, :, index);
popreal(~any(~isnan(popreal), 2), :)=[]; %Elimina NaNs
popfinal = popfinal_by_run(:, :, index);
popfinal(~any(~isnan(popfinal), 2), :)=[]; %Elimina NaNs

```

```

figure(1)
hold on
plot(popdom(:,m+1),popdom(:,m+2),'ro')
plot(pf(:,m+1),pf(:,m+2),'mo') %Pontos rosas são soluções da reprodução
(não dominadas e dominadas)
xlabel('Massa do dispositivo (kg)');
ylabel('Custo de fabricação ($USD)');
grid
pf = pareto_mp(pf,m,Ndomax, caso);
%Tracejado da Curva de Pareto inicial
plot(pf(:,m+1),pf(:,m+2),'b','LineWidth',1.5) %Tracejado da Curva de Pareto
definitiva (conjunto de soluções não-dominadas)
title('Fronteira de Pareto');

figure(2)
hold on
plot(pf(:,m+1),pf(:,m+2),'b','LineWidth',1.5) %Tracejado da Curva de Pareto
definitiva (conjunto de soluções não-dominadas)
plot(popfinal(:,m+1),popfinal(:,m+2),'r','MarkerFaceColor','red') %Soluções
não-dominadas após cluster
xlabel('Massa do dispositivo (kg)');
ylabel('Custo de fabricação ($USD)');
title('Fronteira de Pareto');
grid

figure(3)
hold on
plot(popreal(:,m+1),popreal(:,m+2),'mo') %Pontos rosas são soluções da
população (não dominadas e dominadas)
xlabel('Massa do dispositivo (kg)');
ylabel('Custo de fabricação ($USD)');
grid
%Tracejado da Curva de Pareto inicial
plot(popfinal(:,m+1),popfinal(:,m+2),'b','LineWidth',1.5) %Tracejado da
Curva de Pareto definitiva (conjunto de soluções não-dominadas)
title('Fronteira de Pareto');

%INÍCIO CLUSTER
if S==300
for i=1:size(pf,1)
    for j=1:size(pf,1)
        auxfo1 = abs(pf(i,m+1)-pf(j,m+1));
        auxfo2 = abs(pf(i,m+2)-pf(j,m+2));
        if (((auxfo1>0)&&(auxfo1<5)) || ((auxfo2>0)&&(auxfo2<5))) %Tolerância
entre os pontos de cluster nas duas dimensões
            pf(j,:) = NaN;
        end
    end
end
for i=1:size(popfinal,1)
    for j=1:size(popfinal,1)
        auxfo1 = abs(popfinal(i,m+1)-popfinal(j,m+1));
        auxfo2 = abs(popfinal(i,m+2)-popfinal(j,m+2));
        if (((auxfo1>0)&&(auxfo1<5)) || ((auxfo2>0)&&(auxfo2<5))) %Tolerância
entre os pontos de cluster nas duas dimensões
            popfinal(j,:) = NaN;
        end
    end
end

```

```

end
elseif S==30
for i=1:size(pf,1)
    for j=1:size(pf,1)
        auxfo1 = abs(pf(i,m+1)-pf(j,m+1));
        auxfo2 = abs(popf(i,m+2)-pf(j,m+2));
        if (((auxfo1>0)&&(auxfo1<5)) || ((auxfo2>0)&&(auxfo2<2))) %Tolerância
entre os pontos de cluster nas duas dimensões
            pf(j,:) = NaN;
        end
    end
end
for i=1:size(popfinal,1)
    for j=1:size(popfinal,1)
        auxfo1 = abs(popfinal(i,m+1)-popfinal(j,m+1));
        auxfo2 = abs(popfinal(i,m+2)-popfinal(j,m+2));
        if (((auxfo1>0)&&(auxfo1<5)) || ((auxfo2>0)&&(auxfo2<2))) %Tolerância
entre os pontos de cluster nas duas dimensões
            popfinal(j,:) = NaN;
        end
    end
end
end
pf(~any(~isnan(pf),2),:)=[]; %Elimina NaNs
popfinal(~any(~isnan(popfinal),2),:)=[]; %Elimina NaNs

%FIM CLUSTER

figure(1)
plot(pf(:,m+1),pf(:,m+2),'bo','MarkerFaceColor','blue') %Soluções não-
dominadas após cluster
legend(['Soluções Dominadas GEN ' num2str(generation)], 'Soluções
Finais', 'Pareto Final')

disp('#####
#####')
disp('                               Melhores Resultados ')
disp(' ')
k = size(pf,1);
fprintf('   Foram encontradas %d soluções!\n',k);
for i=1:k
    disp(' ')
    disp(['Solução ', num2str(i), ':']);
    disp([' ', num2str(pf(i,1:m))]);
    fprintf('Massa do dispositivo: %.2f kg\n', pf(i,m+1));
    fprintf('Massa do ferro: %.2f kg\n', pf(i,m+3));
    fprintf('Massa do cobre: %.2f kg\n', pf(i,m+4));
    fprintf('Custo total ($USD): %.2f\n', pf(i,m+10));
    fprintf('Custo de fabricação ($USD): %.2f\n', pf(i,m+2));
    fprintf('Rendimento: %.2f%%\n', (100*pf(i,m+9)));
    fprintf('Custo com o ferro ($USD): %.2f\n', pf(i,m+7));
    fprintf('Custo com o cobre ($USD): %.2f\n', pf(i,m+8));
    fprintf('N_AT: %d\n', pf(i,m+5));
    fprintf('N_BT: %d\n', pf(i,m+6));
end

figure(3)
plot(pf(:,m+1),pf(:,m+2),'bo','MarkerFaceColor','blue') %Soluções não-
dominadas após cluster

```

```

legend('Soluções Finais','Pareto Final')
figure(2)
plot(popfinal(:,m+1),popfinal(:,m+2),'ro','MarkerFaceColor','red')
%Soluções não-dominadas após cluster
plot(pf(:,m+1),pf(:,m+2),'bo','MarkerFaceColor','blue') %Soluções não-
dominadas após cluster
title('Fronteira de Pareto');

figure(4)
x = pf(:,m+1)';
y = pf(:,m+2)';
poly = polyfit(x,y,3);
yy = polyval(poly,x);
plot(x,y,'ro',x,yy,'r','MarkerFaceColor','red')
xlabel('Massa do dispositivo (kg)');
ylabel('Custo de fabricação ($USD)');
title('Fronteira de Pareto');
grid
toc

```

otimiza_tritrafo_bobs_price

```

function [fobs par] = otimiza_tritrafo_bobs_price(par,m,N)
%Núcleo envolvido Delta-Y

%Dc = 215;           %Diâmetro de uma coluna [mm]
%hw = 532;          %Altura da Janela [mm]
%bw = 175;          %Largura da Janela [mm]
%B_M = 1.3;         %Indução máxima no núcleo do projeto. Deve ser escolhido
entre 1,1T e 1,5T
%J = 2.6;           %Densidade de corrente para trafo de 300 kVA a óleo
[A/mm^2]

%Parâmetros geométricos
Dc = par(:,1);     %Diâmetro de uma coluna [mm]
hw = par(:,2);     %Altura da Janela [mm]
bw = par(:,3);     %Largura da Janela [mm]
%Parâmetros eletromagnéticos
B_M = par(:,4);
J = par(:,5);

%Rotina para arredondar a largura da janela - INÍCIO
bw = round(bw,-1); %Arredondamento da largura da janela
bwaux = par(:,3)-bw;
for i=1:N
    if bwaux(i)>0
        bw(i) = bw(i)+5;
    end
    par(i,3) = bw(i);
end

%Demais parâmetros constantes
S = 300000;        %Potência aparente e ativa do trafo,
cos(phi) = 1 [VA]
f = 60;           %Frequência da rede [Hz]
Vl_AT = 13800;    %Tensão fase-fase eficaz primária (AT -
delta) [V]

```

```

Vl_BT = 380; %Tensão fase-fase eficaz secundária (BT -
Y) [V]
W_Cu = 3700; %Perdas permitidas no cobre para trafo de
300 kVA a óleo [W]
W_Fe = 1100; %Perdas permitidas no ferro para trafo de
300 kVA a óleo [W]
resistiv_Cu = 2.16e-8; %Resistividade do cobre recozido a 75°C
[Ohm.m]
me_Cu = 8920; %Massa específica do cobre [kg/m^3]
pe_Cu = (J*1e6).^2*resistiv_Cu/me_Cu; %Perda específica no cobre [W/kg]

%Núcleo chapas/lâminas JFE Steel Corporation, modelo JFE G-CORE, bitola com
0,35 mm de espessura, Grade M-6; 1,5T.
%Typical magnetic properties table. Página 9 do catálogo.

pe_Fe = 1.34; %Perda específica no ferro para condições
acima [W/kg]
B_tabela = 1.5; %[T]
pe_Fe = pe_Fe*(B_M/B_tabela).^2; %[W/kg]

%% CÁLCULO DA SEÇÃO DO NÚCLEO

C = 38; %Valor da constante C em núcleos de transformadores trifásicos
envolvidos por bobinas circulares. Fig. 223
A_mag = C*sqrt((S*pe_Cu/pe_Fe)/(10000*B_M*(J*1e-2)*f*W_Cu/W_Fe)); % Área
da seção magnética do núcleo [cm^2]
Kf = 0.87; %Coeficiente de enchimento
A_geo = pi*(Dc*0.1).^2/4; %Área geométrica prática (círculo
circunscrito à coluna) - PROJETO
A_mag = Kf*A_geo; %Área magnética prática (círculo
circunscrito à coluna) - PROJETO
flux = (A_mag*1e-4).*B_M; %Fluxo magnético no núcleo

%% BOBINA BT
Vf_BT = Vl_BT/sqrt(3); %Tensão de fase no secundário (BT - Y)
[V]
N_BT = round(Vf_BT./(4.44*f.*flux)); %Número de espiras no secundário
I_BT = S/(sqrt(3)*Vl_BT); %Corrente nominal secundária [A]
fc = 1.05; %Fator de correção da densidade de
corrente nos enrolamentos
J_BT = J*fc; %Densidade de corrente no secundário
[A/mm^2]
A_BTtot = I_BT./J_BT; %Área da seção transversal a corrente
no cobre do secundário [mm^2]

%Área grande demais para fiação. Projetar com barramento

%% BOBINA AT
Vf_AT = Vl_AT; %Tensão de fase no primário (AT -
Delta) [V]
N_AT = round(N_BT*Vf_AT/Vf_BT); %Número de espiras no primário
I_AT = S/(sqrt(3)*Vl_AT); %Corrente nominal primária [A]
J_AT = J*fc; %Densidade de corrente no primário
[A/mm^2]
A_ATTot = I_AT./J_AT; %Área da seção transversal a corrente
no cobre no primário [mm^2]

```

```

A_AT = 5.2620; % EM AT, UTILIZAR BITOLA AWG-10

%% NÚCLEO - INÍCIO
%Equações de LISANDRA para dimensionamento da colunas

Krup = 15000; %Tensão de ruptura do óleo mineral
[kv/m]. Fonte: BASTOS, Eletromagnetismo para engenharia. K_rup_AR = 3100
kv/m
cs = 5; %Coeficiente de segurança
e_cBT = Vl_BT*cs/Krup; %Comprimento de isolamento entre a coluna
do núcleo e o enrolamento de BT (interno) [mm]
e_BTAT = (Vl_BT+Vl_AT)*cs/Krup; %Comprimento de isolamento entre os
enrolamentos de BT e AT (externo) [mm]
e_ATexmin = Vl_AT*cs/Krup; %Comprimento mínimo de isolamento entre o
enrolamento AT e as extremidades do núcleo ou do enrolamento da outra
coluna [mm]
%Dc = 1000*sqrt((2*sqrt(2)*Vf_AT)/(pi^2*f*B_M*N_AT*Kf)); %Diâmetro de uma
coluna [mm]

%Como a mudança nas áreas mag e geo tiveram impacto desprezível no cálculo
%do fluxo resultante, então não é necessário usar métodos iterativos entre
%essas três grandezas. Seguem-se os cálculos!

bn = round(sqrt(Kf)*Dc); %Base da travessa
% BOBINAS DEVEM PASSAR POR PROCESSO ITERATIVO PARA VERIFICAR POSSIBILIDADE
DE EXECUÇÃO E PROJETO? SIM
%% FUNÇÃO E ROTINA DE BOBINAGEM DE ACORDO COM O NÚMERO DE ESPIRAS
% FAZER OTIMIZAÇÃO DE ESPAÇO PARA CADA PAR DE BOBINAS NO FUTURO?
MINIMIZAÇÃO DO COMPRIMENTO E MAXIMIZAÇÃO DA ALTURA

% DEFINIÇÕES E DIMENSIONAMENTOS DA BOBINA BT
[N_AT N_BT A_BT l_CuBT l_CuAT l_BTesp l_ATesp Xeq_AT par bn] =
bobs(par,bn,N_BT,N_AT,A_BTtot,e_cBT,e_BTAT,e_ATexmin,f);
%Recálculos
Dc = par(:,1); %Diâmetro de uma coluna [mm]
hw = par(:,2); %Altura da Janela [mm]
bw = par(:,3); %Largura da Janela [mm]
B_M = par(:,4); %Indução máxima no núcleo do projeto. Deve ser escolhido
entre 1,1T e 1,5T
A_geo = pi*(Dc*0.1).^2/4; %Área geométrica prática (círculo
circunscrito à coluna) - PROJETO
A_mag = Kf*A_geo; %Área magnética prática (círculo
circunscrito à coluna) - PROJETO
pe_Fe = 1.34; %Perda específica no ferro para condições
acima [W/kg]
pe_Fe = pe_Fe*(B_M/B_tabela).^2; %[W/kg]
%% COBRE
l_3CuBT = 3*l_CuBT; %Comprimento dos três
enrolamentos BT [m]
l_3CuAT = 3*l_CuAT; %Comprimento
total de todas as bobinas AT das três fases [mm]

M_CuBT = me_Cu.*A_BT.*l_3CuBT*1e-6; %Massa de cobre no enrolamento BT
[kg]
M_CuAT = me_Cu.*A_AT.*l_3CuAT*1e-6; %Massa de cobre no enrolamento AT
[kg]
M_Cu = M_CuBT + M_CuAT; %Massa total de cobre [kg]
Cu_cot = 6; %Cotação do cobre em $USD/kg
Cup = Cu_cot*M_Cu; %Preço do cobre em $USD

```

```

%% NÚCLEO - CONTINUAÇÃO
h = bn;
[A f_Cu] = martignoni(S); %A é uma constante da Fig. 225 com interpolação.
f_Cu é o fator de preenchimento do cobre via Fig. 229 com interpolação
%hw = round(2*N_AT*I_AT/A); %Altura da janela [mm]
kw = 2; %Fator de preenchimento da janela (ALVES)
A_Cu = 2*(kw*N_AT.*A_AT); %Área total ocupada pelo cobre na janela [mm^2]
%bw = A_Cu/(f_Cu*hw); %Largura da janela [mm]
l_Fe = 3*bn+2*bw; %Comprimento do núcleo [mm]
h_Fe = 2*bn+hw; %Altura do núcleo [mm]
me_Fe = 7650; %Massa específica do ferro dada pelo
fabricante [kg/m^3]
M_Fe = me_Fe.*A_mag.*(3*hw+4*bw+6*bn)*1e-7; %Massa do ferro [kg]
Fe_cot = 0.1; %Cotação do ferro em $USD/kg
Fep = Fe_cot*M_Fe; %Preço do ferro em $USD
%% PERDAS E CUSTO
M_tot = M_Fe + M_Cu; %Massa total [kg]
% rBT = resistiv_Cu*l_CuBT./(A_BT*1e-6); %Resistência equivalente no
enrolamento BT
% rAT = resistiv_Cu*l_CuAT./(A_AT*1e-6); %Resistência equivalente no
enrolamento AT
rBT = 1e-3*resistiv_Cu.*l_BTesp.*N_BT./(A_BT*1e-6); %Resistência
equivalente no enrolamento BT
rAT = 1e-3*resistiv_Cu.*l_ATesp.*N_AT./(A_AT*1e-6); %Resistência
equivalente no enrolamento AT
P_Cu = 3*(rAT.*I_AT.^2+rBT.*I_BT.^2); %Perdas no cobre [W]
P_Fe = pe_Fe.*M_Fe; %Perdas no ferro [W]
P_ECR = 0.01*P_Cu; %Perdas no cobre devido a
harmônicas (1% para trafos a óleo <2,5 MVA) [W]
P_Cu_tot = P_Cu+P_ECR; %Perdas totais no cobre [W]
P_tot = P_Cu_tot+P_Fe; %Perdas totais [W]

soma = 0;
u = 30; %Vida útil em anos
i = 0.05; %Taxa de juros
C_kWh = 0.46978; %Preço da energia elétrica da
CELESC [R$/kWh]
cambio = 5.3; %Câmbio: US$1,00 = R$5,30
C_kWh = C_kWh/cambio; %Preço da energia elétrica da
CELESC [$USD/kWh]
C_fab = Fep+Cup; %Custo com o material em $USD
for k=1:u
    soma = soma + 1/(1+i)^k;
end
C_PCu = 0.2*8760*(0.001*P_Cu_tot)*C_kWh*soma; %Custo com as perdas no
cobre sobre a vida útil em $USD
C_PFe = 8760*(0.001*P_Fe)*C_kWh*soma; %Custo com as perdas no
cobre sobre a vida útil em $USD
C_tot = C_fab+C_PCu+C_PFe; %Custo total em $USD

%Tanto as perdas no cobre quanto no ferro são inferiores ao 110% do
permitido.
%Portanto, pode-se dar sequência ao projeto.

u0 = 4*pi*10^-7; %Permeabilidade magnética do vácuo
ou ar
ur = 1000; %Permeabilidade relativa
eff = S./(S+P_Fe+P_Cu+P_ECR); %Eficiência do dispositivo

```

```

Req_AT = rAT + rBT.*(N_AT./N_BT).^2;      %Resistência equivalente dos
enrolamentos visto do lado AT
Zeq_AT = sqrt(Req_AT.^2+Xeq_AT.^2);      %Impedância equivalente dos
enrolamentos visto do lado AT
gc = P_Fe./(3*Vf_AT^2);                  %Condutância equivalente do núcleo
referida ao enrolamento AT
% relu_col = (e_ATexmin+0.5*(h_AT+h_BT)+Dc)./(A_mag.*u0*ur); %Relutância
equivalente de uma coluna do núcleo
% relu_tra = (2*(e_cBT+l_BT+e_BTAT+l_AT+e_ATex)+Dc)./(A_mag.*u0*ur);
%Relutância equivalente de uma travessa do núcleo
% relu_eq = relu_col+(2*relu_tra+relu_col)/2; %Relutância equivalente do
núcleo
% Lm = N_AT.^2./relu_eq;                  %Indutância magnetizante referida ao
enrolamento AT
% xm = 2*pi*f*Lm;                          %Reatância magnetizante referida ao
enrolamento AT
% bm = 1/xm;                                %Susceptância magnetizante referida ao
enrolamento AT quando gc é muito pequena

V_CC = Zeq_AT.*I_AT;                       %Tensão de curto-circuito
V_CCper = V_CC./Vf_AT;                      %Porcentagem da tensão de curto-circuito
em relação à tensão nominal

%% REGULAÇÃO
IRper = P_Cu./S;
IXper = sqrt(V_CCper.^2-IRper.^2);

k = 1;                                     %Fator de carga
phi1 = acos(1);
phi2 = acos(0.8);

Reg1 = k*(IRper*cos(phi1)+IXper*sin(phi1)+(IRper*cos(phi1)-
IXper*sin(phi1)).^2/200);
Reg2 = k*(IRper*cos(phi2)+IXper*sin(phi2)+(IRper*cos(phi2)-
IXper*sin(phi2)).^2/200);

fobs = [M_tot,C_fab,M_Fe,M_Cu,N_AT,N_BT,Fep,Cup,eff,C_tot];
end

```

bobs

```

function [N_AT N_BT A_BT l_CuBT l_CuAT l_BTesp l_ATesp Xeq_AT par bn] =
bobs(par,bn,N_BT,N_AT,A_BTtot,e_cBT,e_BTAT,e_ATexmin,f)
hw = par(:,2);      %Altura da Janela [mm]
bw = par(:,3);      %Largura da Janela [mm]
Nind = size(hw,1); %Número de indivíduos
NBT = unique(N_BT);
NAT = unique(N_AT);
z = size(NBT,1);    %Número de combinações de pares de espiras AT/BT
hlim = hw-2*e_ATexmin; %Limite máximo permitido da altura das bobinas
blim = 0.5*(bw-e_ATexmin); %Limite máximo permitido do raio do conjunto
bobinas e isolações

%% Parâmetros imutáveis das bobinas
%BT
l_isolat = 0.2;      %Isolamento lateral do bloco [mm]
lbH = 0.1;           %Isolamento entre blocos na horizontal [mm]
lbV = 0.1;           %Isolamento entre blocos na vertical [mm]

```

```

blH = 2; %Quantidade de blocos
lV = (hlim-(N_BT-1).*lbV-2*N_BT*l_isolat)./N_BT;
%lV = round(lV,2); %Comprimento vertical do bloco [mm]
lV = floor(lV);
A_BT = round(A_BTtot,-1);
lH = A_BT./(lV*blH); %Comprimento horizontal do bloco [mm]
lH = round(lH,1);

%AT
e_int = 0.1; %Isolamento entre espiras [mm]
e_borda = 0.3; %Isolamento na borda da bobina [mm]
e_div = 0.4; %Divisória vertical interna [mm]
diso = 2.73; %Diâmetro do fio de cobre AWG 10 com isolamento [mm]

%% PARTE VARIÁVEL
for j=1:Nind %Conta até o último indivíduo
    for i=1:z
        if NBT(i)==N_BT(j)
            break
        end
    end
    switch NBT(i) %Inicia os casos de pares de bobina
        case 13
            %NBT = 13; NAT = 818 => 816
            %6 bobinas de 136 espiras = 816 espiras
            N_AT(j,:) = 816; %Atualiza o número de espiras AT
            n_bobAT(j,:) = 6; %Número total de bobinas de AT por fase
            n_bobATex(j,:) = 0; %Número total de bobinas nas extremidades de AT
            por fase
            N_ATex(j,:) = 0; %Número de espiras das bobinas das extremidades
            %Cada bobina de 136 espiras é composta por 17 linhas de espiras e 8 colunas
            de espiras.
            nlinhas(j,:) = 17; %Número de linhas de espiras em uma bobina de 136
            ncolunas(j,:) = 8; %Número de colunas de espiras em uma bobina de 136
            N(j,:) = 0;
            for k=1:ncolunas(j,:)
                N(j,:) = N(j,:)+k;
            end
        case 14
            %NBT = 14; NAT = 881 => 882
            %6 bobinas de 147 espiras = 882 espiras
            N_AT(j,:) = 882; %Atualiza o número de espiras AT
            n_bobAT(j,:) = 6; %Número total de bobinas de AT por fase
            n_bobATex(j,:) = 0; %Número total de bobinas nas extremidades de AT
            por fase
            N_ATex(j,:) = 0; %Número de espiras das bobinas das extremidades
            %Cada bobina de 147 espiras é composta por 21 linhas de espiras e 7 colunas
            de espiras.
            nlinhas(j,:) = 21; %Número de linhas de espiras em uma bobina de 147
            ncolunas(j,:) = 7; %Número de colunas de espiras em uma bobina de 147
            N(j,:) = 0;
            for k=1:ncolunas(j,:)
                N(j,:) = N(j,:)+k;
            end
        case 15
            %NBT = 15; NAT = 944
            %4 bobinas de 150 espiras = 600 espiras
            %2 bobinas de 172 espiras = 344 espiras

```

```

%Total: 6 bobinas e 944 espiras
n_bobAT(j,:) = 6;           %Número total de bobinas de AT por fase
n_bobATex(j,:) = 2;        %Número total de bobinas nas extremidades de AT
por fase
N_ATex(j,:) = 172;         %Número de espiras das bobinas das extremidades
%Cada bobina de 150 espiras é composta por 25 linhas de espiras e 6 colunas
de espiras. No caso das bobinas de 172
%espiras, o isolamento entre as espiras é maior para conservar as dimensões
em relação às bobinas maiores.
nlinhas(j,:) = 25;         %Número de linhas de espiras em uma bobina de 150
ncolunas(j,:) = 6;         %Número de colunas de espiras em uma bobina de 150
N(j,:) = 0;
for k=1:ncolunas(j,:)
    N(j,:) = N(j, :)+k;
end
    case 16
%NBT = 16; NAT = 1006
%4 bobinas de 200 espiras = 800 espiras
%2 bobinas de 103 espiras = 206 espiras
%Total: 6 bobinas e 1006 espiras
n_bobAT(j,:) = 6;           %Número total de bobinas de AT por fase
n_bobATex(j,:) = 2;        %Número total de bobinas nas extremidades de AT por
fase
N_ATex(j,:) = 103;         %Número de espiras das bobinas das extremidades
%Cada bobina de 200 espiras é composta por 25 linhas de espiras e 8 colunas
de espiras. No caso das bobinas de 103
%espiras, o isolamento entre as espiras é maior para conservar as dimensões
em relação às bobinas maiores.
nlinhas(j,:) = 25;         %Número de linhas de espiras em uma bobina de 200
ncolunas(j,:) = 8;         %Número de colunas de espiras em uma bobina de 200
N(j,:) = 0;
for k=1:ncolunas(j,:)
    N(j,:) = N(j, :)+k;
end
    case 17
%NBT = 17; NAT = 1069 => 1070
%4 bobinas de 200 espiras = 800 espiras
%2 bobinas de 135 espiras = 270 espiras
%Total: 6 bobinas e 1070 espiras
N_AT(j,:) = 1070;         %Atualiza o número de espiras AT
n_bobAT(j,:) = 6;           %Número total de bobinas de AT por fase
n_bobATex(j,:) = 2;        %Número total de bobinas nas extremidades de AT
por fase
N_ATex(j,:) = 135;         %Número de espiras das bobinas das extremidades
%Cada bobina de 200 espiras é composta por 25 linhas de espiras e 8 colunas
de espiras. No caso das bobinas de 135
%espiras, o isolamento entre as espiras é maior para conservar as dimensões
em relação às bobinas maiores.
nlinhas(j,:) = 25;         %Número de linhas de espiras em uma bobina de 200
ncolunas(j,:) = 8;         %Número de colunas de espiras em uma bobina de 200
N(j,:) = 0;
for k=1:ncolunas(j,:)
    N(j,:) = N(j, :)+k;
end
    case 18
%NBT = 18; NAT = 1132
%4 bobinas de 200 espiras = 800 espiras
%2 bobinas de 166 espiras = 332 espiras
%Total: 6 bobinas e 1132 espiras

```

```

n_bobAT(j,:) = 6;           %Número total de bobinas de AT por fase
n_bobATex(j,:) = 2;        %Número total de bobinas nas extremidades de AT
por fase
N_ATex(j,:) = 166;         %Número de espiras das bobinas das extremidades
%Cada bobina de 200 espiras é composta por 25 linhas de espiras e 8 colunas
de espiras. No caso das bobinas de 166
%espiras, o isolamento entre as espiras é maior para conservar as dimensões
em relação às bobinas maiores.
nlinhas(j,:) = 25;         %Número de linhas de espiras em uma bobina de 200
ncolunas(j,:) = 8;         %Número de colunas de espiras em uma bobina de 200
N(j,:) = 0;
for k=1:ncolunas(j,:)
    N(j,:) = N(j, :)+k;
end
    case 19
%NBT = 19; NAT = 1195 => 1194
%4 bobinas de 200 espiras = 800 espiras
%2 bobinas de 197 espiras = 394 espiras
%Total: 6 bobinas e 1132 espiras
N_AT(j,:) = 1194;         %Atualiza o número de espiras AT
n_bobAT(j,:) = 6;         %Número total de bobinas de AT por fase
n_bobATex(j,:) = 2;       %Número total de bobinas nas extremidades de AT
por fase
N_ATex(j,:) = 197;        %Número de espiras das bobinas das extremidades
%Cada bobina de 200 espiras é composta por 25 linhas de espiras e 8 colunas
de espiras. No caso das bobinas de 197
%espiras, o isolamento entre as espiras é maior para conservar as dimensões
em relação às bobinas maiores.
nlinhas(j,:) = 25;         %Número de linhas de espiras em uma bobina de 200
ncolunas(j,:) = 8;         %Número de colunas de espiras em uma bobina de 200
N(j,:) = 0;
for k=1:ncolunas(j,:)
    N(j,:) = N(j, :)+k;
end
    case 20
%NBT = 20; NAT = 1258
%4 bobinas de 250 espiras = 1000 espiras
%2 bobinas de 129 espiras = 258 espiras
%Total: 6 bobinas e 1258 espiras
n_bobAT(j,:) = 6;         %Número total de bobinas de AT por fase
n_bobATex(j,:) = 2;       %Número total de bobinas nas extremidades de AT
por fase
N_ATex(j,:) = 129;        %Número de espiras das bobinas das extremidades
%Cada bobina de 250 espiras é composta por 25 linhas de espiras e 10
colunas de espiras. No caso das bobinas de 129
%espiras, o isolamento entre as espiras é maior para conservar as dimensões
em relação às bobinas maiores.
nlinhas(j,:) = 25;         %Número de linhas de espiras em uma bobina de 250
ncolunas(j,:) = 10;        %Número de colunas de espiras em uma bobina de 250
N(j,:) = 0;
for k=1:ncolunas(j,:)
    N(j,:) = N(j, :)+k;
end
    case 21
%NBT = 21; NAT = 1321 => 1316
%4 bobinas de 250 espiras = 1000 espiras
%2 bobinas de 158 espiras = 316 espiras
%Total: 6 bobinas e 1316 espiras
N_AT(j,:) = 1316;         %Atualiza o número de espiras AT

```

```

n_bobAT(j,:) = 6;           %Número total de bobinas de AT por fase
n_bobATex(j,:) = 2;        %Número total de bobinas nas extremidades de AT
por fase
N_ATex(j,:) = 158;         %Número de espiras das bobinas das extremidades
%Cada bobina de 250 espiras é composta por 25 linhas de espiras e 10
colunas de espiras. No caso das bobinas de 158
%espiras, o isolamento entre as espiras é maior para conservar as dimensões
em relação às bobinas maiores.
nlinhas(j,:) = 25;         %Número de linhas de espiras em uma bobina de 250
ncolunas(j,:) = 10;        %Número de colunas de espiras em uma bobina de 250
N(j,:) = 0;
for k=1:ncolunas(j,:)
    N(j,:) = N(j, :)+k;
end
    case 22
%NBT = 22; NAT = 1384 =>1380
%6 bobinas de 230 espiras = 1380 espiras
%Total: 6 bobinas e 1380 espiras
N_AT(j,:) = 1380;         %Atualiza o número de espiras AT
n_bobAT(j,:) = 6;         %Número total de bobinas de AT por fase
n_bobATex(j,:) = 0;       %Número total de bobinas nas extremidades de AT por
fase
N_ATex(j,:) = 0;         %Número de espiras das bobinas das extremidades
%Cada bobina de 230 espiras é composta por 23 linhas de espiras e 10
colunas de espiras.
nlinhas(j,:) = 23;         %Número de linhas de espiras em uma bobina de 230
ncolunas(j,:) = 10;        %Número de colunas de espiras em uma bobina de 230
N(j,:) = 0;
for k=1:ncolunas(j,:)
    N(j,:) = N(j, :)+k;
end
    case 23
%NBT = 23; NAT = 1447 =>1442
%4 bobinas de 250 espiras = 1000 espiras
%2 bobinas de 221 espiras = 442 espiras
%Total: 6 bobinas e 1442 espiras
N_AT(j,:) = 1442;         %Atualiza o número de espiras AT
n_bobAT(j,:) = 6;         %Número total de bobinas de AT por fase
n_bobATex(j,:) = 2;       %Número total de bobinas nas extremidades de AT por
fase
N_ATex(j,:) = 221;        %Número de espiras das bobinas das extremidades
%Cada bobina de 250 espiras é composta por 25 linhas de espiras e 10
colunas de espiras. No caso das bobinas de 221
%espiras, o isolamento entre as espiras é maior para conservar as dimensões
em relação às bobinas maiores.
nlinhas(j,:) = 23;         %Número de linhas de espiras em uma bobina de 250
ncolunas(j,:) = 10;        %Número de colunas de espiras em uma bobina de 250
N(j,:) = 0;
for k=1:ncolunas(j,:)
    N(j,:) = N(j, :)+k;
end
    case 24
%NBT = 24; NAT = 1510 => 1512
%6 bobinas de 252 espiras = 1512 espiras
%Total: 6 bobinas e 1512 espiras
N_AT(j,:) = 1512;         %Atualiza o número de espiras AT
n_bobAT(j,:) = 6;         %Número total de bobinas de AT por fase
n_bobATex(j,:) = 0;       %Número total de bobinas nas extremidades de AT por
fase

```

```

N_ATex(j,:) = 0;           %Número de espiras das bobinas das extremidades
%Cada bobina de 252 espiras é composta por 28 linhas de espiras e 9 colunas
de espiras.
nlinhas(j,:) = 28;        %Número de linhas de espiras em uma bobina de 252
ncolunas(j,:) = 9;        %Número de colunas de espiras em uma bobina de 252
N(j,:) = 0;
for k=1:ncolunas(j,:)
    N(j,:) = N(j, :)+k;
end
    case 25
%NBT = 25; NAT = 1573 => 1572
%6 bobinas de 270 espiras = 1080 espiras
%2 bobinas de 246 espiras = 492 espiras
%Total: 6 bobinas e 1572 espiras
N_AT(j,:) = 1572;         %Atualiza o número de espiras AT
n_bobAT(j,:) = 6;         %Número total de bobinas de AT por fase
n_bobATex(j,:) = 2;      %Número total de bobinas nas extremidades de AT por
fase
N_ATex(j,:) = 246;       %Número de espiras das bobinas das extremidades
%Cada bobina de 270 espiras é composta por 27 linhas de espiras e 10
colunas de espiras. No caso das bobinas de 246
%espiras, o isolamento entre as espiras é maior para conservar as dimensões
em relação às bobinas maiores.
nlinhas(j,:) = 27; %18    %Número de linhas de espiras em uma bobina de
270
ncolunas(j,:) = 10;%15    %Número de colunas de espiras em uma bobina de
270
N(j,:) = 0;
for k=1:ncolunas(j,:)
    N(j,:) = N(j, :)+k;
end
    case 26
%NBT = 26; NAT = 1635 =>1630
%4 bobinas de 300 espiras = 1200 espiras
%2 bobinas de 215 espiras = 430 espiras
%Total: 6 bobinas e 1630 espiras
N_AT(j,:) = 1630;         %Atualiza o número de espiras AT
n_bobAT(j,:) = 6;         %Número total de bobinas de AT por fase
n_bobATex(j,:) = 2;      %Número total de bobinas nas extremidades de AT por
fase
N_ATex(j,:) = 215;       %Número de espiras das bobinas das extremidades
%Cada bobina de 300 espiras é composta por 20 linhas de espiras e 15
colunas de espiras. No caso das bobinas de 215
%espiras, o isolamento entre as espiras é maior para conservar as dimensões
em relação às bobinas maiores.
nlinhas(j,:) = 20;        %Número de linhas de espiras em uma bobina de 300
ncolunas(j,:) = 15;       %Número de colunas de espiras em uma bobina de 300
N(j,:) = 0;
for k=1:ncolunas(j,:)
    N(j,:) = N(j, :)+k;
end
    case 27
%NBT = 27; NAT = 1698 => 1694
%4 bobinas de 300 espiras = 1200 espiras
%2 bobinas de 247 espiras = 494 espiras
%Total: 6 bobinas e 1694 espiras
N_AT(j,:) = 1694;         %Atualiza o número de espiras AT
n_bobAT(j,:) = 6;         %Número total de bobinas de AT por fase

```

```

n_bobATex(j,:) = 2;      %Número total de bobinas nas extremidades de AT por
fase
N_ATex(j,:) = 247;      %Número de espiras das bobinas das extremidades
%Cada bobina de 300 espiras é composta por 20 linhas de espiras e 15
colunas de espiras. No caso das bobinas de 247
%espiras, o isolamento entre as espiras é maior para conservar as dimensões
em relação às bobinas maiores.
nlinhas(j,:) = 20;      %Número de linhas de espiras em uma bobina de 300
ncolunas(j,:) = 15;     %Número de colunas de espiras em uma bobina de 300
N(j,:) = 0;
for k=1:ncolunas(j,:)
    N(j,:) = N(j, :)+k;
end
    case 28
%NBT = 28; NAT = 1761 => 1764
%6 bobinas de 294 espiras = 1764 espiras
%Total: 6 bobinas e 1764 espiras
N_AT(j,:) = 1764;      %Atualiza o número de espiras AT
n_bobAT(j,:) = 6;      %Número total de bobinas de AT por fase
n_bobATex(j,:) = 0;    %Número total de bobinas nas extremidades de AT por
fase
N_ATex(j,:) = 0;      %Número de espiras das bobinas das extremidades
%Cada bobina de 294 espiras é composta por 21 linhas de espiras e 14
colunas de espiras.
nlinhas(j,:) = 21;     %Número de linhas de espiras em uma bobina de 294
ncolunas(j,:) = 14;    %Número de colunas de espiras em uma bobina de 294
N(j,:) = 0;
for k=1:ncolunas(j,:)
    N(j,:) = N(j, :)+k;
end
    case 29
%NBT = 29; NAT = 1824 => 1818
%4 bobinas de 350 espiras = 1400 espiras
%2 bobinas de 209 espiras = 418 espiras
%Total: 6 bobinas e 1818 espiras
N_AT(j,:) = 1818;      %Atualiza o número de espiras AT
n_bobAT(j,:) = 6;      %Número total de bobinas de AT por fase
n_bobATex(j,:) = 2;    %Número total de bobinas nas extremidades de AT por
fase
N_ATex(j,:) = 209;     %Número de espiras das bobinas das extremidades
%Cada bobina de 350 espiras é composta por 25 linhas de espiras e 14
colunas de espiras. No caso das bobinas de 209
%espiras, o isolamento entre as espiras é maior para conservar as dimensões
em relação às bobinas maiores.
nlinhas(j,:) = 25;     %Número de linhas de espiras em uma bobina de 350
ncolunas(j,:) = 14;    %Número de colunas de espiras em uma bobina de 350
N(j,:) = 0;
for k=1:ncolunas(j,:)
    N(j,:) = N(j, :)+k;
end
    case 30
%NBT = 30; NAT = 1887 => 1880
%4 bobinas de 350 espiras = 1400 espiras
%2 bobinas de 240 espiras = 480 espiras
%Total: 6 bobinas e 1880 espiras
N_AT(j,:) = 1880;      %Atualiza o número de espiras AT
n_bobAT(j,:) = 6;      %Número total de bobinas de AT por fase
n_bobATex(j,:) = 2;    %Número total de bobinas nas extremidades de AT por
fase

```

```

N_ATex(j,:) = 240;           %Número de espiras das bobinas das extremidades
%Cada bobina de 350 espiras é composta por 25 linhas de espiras e 14
colunas de espiras. No caso das bobinas de 209
%espiras, o isolamento entre as espiras é maior para conservar as dimensões
em relação às bobinas maiores.
nlinhas(j,:) = 25;          %Número de linhas de espiras em uma bobina de 350
ncolunas(j,:) = 14;        %Número de colunas de espiras em uma bobina de 350
N(j,:) = 0;
for k=1:ncolunas(j,:)
    N(j,:) = N(j,:)+k;
end
end %Encerra os casos de pares de bobina
end %Conta até o último indivíduo

%% EQUAÇÕES BT
A_BT = blH.*lH.*lV;        %Área da seção transversal do condutor [mm^2]
l_BT = blH.*lH+(blH-1).*lbH+2*blH.*l_isolat; %Comprimento horizontal da
bobina [mm]
h_BT = N_BT.*lV+(N_BT-1).*lbV+2*N_BT.*l_isolat; %Comprimento vertical da
bobina [mm]
h_BTEx = 0.5*(hw-h_BT);    %Comprimento entre as bobinas
externas BT e a barra magnética [mm]
l_BTesp = 2*pi*(0.5*bn+e_cBT+0.5*l_BT);    %Comprimento de uma espira do
enrolamento BT [mm]
l_CuBT = N_BT.*l_BTesp*1e-3;    %Comprimento do enrolamento BT
[m]

%% EQUAÇÕES AT
% HORIZONTAL

l_AT = ncolunas.*diso+(ncolunas-1).*e_int+2*e_borda; %Comprimento
horizontal de uma bobina [mm]
l_ATesp = 2*pi*(0.5*bn+e_cBT+l_BT+e_BTAT+0.5*l_AT); %Comprimento médio de
uma espira AT [mm]
l_CuAT = 2*pi*(0.5*bn+e_cBT+l_BT+e_BTAT+nlinhas.*N.*0.5.*diso)*1e-3;
%Comprimento de uma bobina AT entre as extremidades [mm]
for i=1:Nind
    if N_ATex(i,)==0
        l_CuATex(i,:) = 0;
    else
        l_CuATex(i,:) =
2*pi*(0.5*bn(i)+e_cBT+l_BT(i)+e_BTAT+N_ATex(i)*0.5*l_AT(i))*1e-3;
    end %Comprimento de uma bobina AT das extremidades [mm]
end
l_CuAT = (n_bobAT-n_bobATex).*l_CuAT+n_bobATex.*l_CuATex; %Comprimento
total de todas as bobinas AT de uma fase [mm]

%VERTICAL

h_bob = nlinhas.*diso+(nlinhas-1).*e_int+2*e_borda+e_div; %Comprimento
vertical de uma bobina [mm]
h_AT = n_bobAT.*h_bob; %Comprimento vertical
total de AT (sem espaçamento entre as bobinas) [mm]

%% POSSIBILIDADE DE EXECUÇÃO
Rb = e_cBT+e_BTAT+e_ATexmin+l_AT+l_BT; %Raio do conjunto bobinas e
eisolações
j = 1;
k = 1;

```

```

a = 1;
b = 1;
c = 1;
for i=1:Nind
%   if ((h_AT(i)>hlim(i)) || (h_BT(i)>hlim(i)) || (Rb(i)>blim(i)))
%       fprintf('%d Dimensão não permitida (%d)!\n',j,i);
%       j = j+1;
%   end
    if h_AT(i)>hlim(i)
        fprintf('%d Dimensão não permitida (indivíduo %d)! h_AT (caso
%d).\n',j,i,c);
        par(i,:) = NaN;
        j = j+1;
        c = c+1;
    elseif h_BT(i)>hlim(i)
        fprintf('%d Dimensão não permitida (indivíduo %d)! h_BT (caso
%d).\n',j,i,k);
        par(i,:) = NaN;
        j = j+1;
        k = k+1;
    elseif Rb(i)>blim(i)
        fprintf('%d Dimensão não permitida (indivíduo %d)! Largura (caso
%d).\n',j,i,b);
        par(i,:) = NaN;
        j = j+1;
        b = b+1;
    elseif A_BT(i)<=A_BTtot(i)
        fprintf('%d Dimensão não permitida (indivíduo %d)! Área BT (caso
%d).\n',j,i,a);
        par(i,:) = NaN;
        j = j+1;
        a = a+1;
    end
end
hw = par(:,2);      %Altura da Janela [mm]
d_bob_bob = ((hw-2.*e_ATexmin)-h_AT)./(n_bobAT-1);    %Espaçamento entre as
bobinas [mm]
h_AT = h_AT+(n_bobAT-1).*d_bob_bob;                    %Comprimento vertical
total de AT (com espaçamento entre as bobinas) [mm]
h_ATex = 0.5*(hw-h_AT);                                %Comprimento entre as
bobinas externas AT e a barra magnética [mm]
e_ATex = 0.5*bw-l_BT-l_AT-e_BTAT-e_cBT; %Comprimento de isolamento projetado
entre o enrolamento AT e as extremidades do núcleo ou do enrolamento da
outra coluna [mm]

for i=1:Nind
    j = isnan(hw(i,:));
    if j==1
        l_CuAT(i,:) = NaN;
        l_CuBT(i,:) = NaN;
        h_BT(i,:) = NaN;
        h_AT(i,:) = NaN;
        l_ATesp(i,:) = NaN;
        l_BTesp(i,:) = NaN;
        Rb(i,:) = NaN;
        N_AT(i,:) = NaN;
        N_BT(i,:) = NaN;
        A_BT(i,:) = NaN;
        bn(i,:) = NaN;
    end
end

```

```

end
end
%% Reatância vista do lado AT
l_Cu = 0.5*(l_ATesp+l_BTesp); %Comprimento médio dos enrolamentos
de cobre
K = 1-(1/(2*pi)*(2*e_BTAT+l_BT+l_AT)./(0.5*(h_AT+h_BT)));
Xeq_AT = 1e-
9*7.9*f.*l_Cu.*N_AT.^2.*K.*(e_BTAT+(l_AT+l_BT)/3)./(0.5*(h_AT+h_BT));
%Reatância equivalente dos enrolamentos visto do lado AT

%%ELIMINAÇÃO DE INDIVÍDUOS PROIBIDOS
par(~any(~isnan(par),2),:)=[];
l_CuAT(~any(~isnan(l_CuAT),2),:)=[];
l_CuBT(~any(~isnan(l_CuBT),2),:)=[];
h_AT(~any(~isnan(h_AT),2),:)=[];
h_BT(~any(~isnan(h_BT),2),:)=[];
l_ATesp(~any(~isnan(l_ATesp),2),:)=[];
l_BTesp(~any(~isnan(l_BTesp),2),:)=[];
Rb(~any(~isnan(Rb),2),:)=[];
N_AT(~any(~isnan(N_AT),2),:)=[];
N_BT(~any(~isnan(N_BT),2),:)=[];
A_BT(~any(~isnan(A_BT),2),:)=[];
Xeq_AT(~any(~isnan(Xeq_AT),2),:)=[];
bn(~any(~isnan(bn),2),:)=[];
end

```

pareto_mp

```

function [ndom dom idom] = pareto_mp(data,m,n,caso)
%Determina a Fronteira de Pareto;
%x e y são as funções objetivos 1 e 2 respectivamente, p e q são os
parâmetros
%Ordena vetor x e y, se y1<=y*<=y2 para x1<=x*<=x2 quando a função é
crescente
%Elimina os pontos igualando os que não respeitam a condição a NaN e depois
eliminando-os

%FUNCIONA!
f = data;
f = sortrows(f,m+1); %Reagrupa as linhas com base na ordem crescente dos
elementos da primeira coluna
t = size(f,1);
i = 1;
dom = [];
idom = [];

%% Fronteira de Pareto

switch caso
case 'min'
forl = f(1,m+1); %Valor de referência da função objetivo fo1 (x)
for2 = f(1,m+2); %Valor de referência da função objetivo fo2 (y)
for j=2:t

```

```

        if (f(j,m+2)<for2) && (f(j,m+1)==for1) %Enquanto o valor de
referência de fo1 não mudar,
            for2 = f(j,m+2); %avaliar pontos em fo2, se
fo2<for2, atualizar yc
        elseif (f(j,m+2)>for2) && (f(j,m+1)>=for1) %Enquanto o valor de
referência de fo1 não mudar,
            dom(i,:) = f(j,:); %avaliar pontos em
fo2, se fo2>for2, igualar o ponto a NaN
            f(j,:) = NaN;
            i = i+1;
        elseif ((f(j,m+1)>for1) && (f(j,m+2)<for2)) %Mudou o valor de
referência de fo1, então atualizar as referências
            for1 = f(j,m+1);
            for2 = f(j,m+2);
        end
    end
    case 'max'
        for1 = f(t,m+1); %Valor de referência da função objetivo fo1 (x)
        for2 = f(t,m+2); %Valor de referência da função objetivo fo2 (y)
        j = t-1;
        while j>=1
            if (f(j,m+2)>for2) && (f(j,m+1)==for1) %Enquanto o valor de
referência de fo1 não mudar,
                for2 = f(j,m+2); %avaliar pontos em fo2, se
fo2>for2, atualizar yc
            elseif (f(j,m+2)<for2) && (f(j,m+1)<=for1) %Enquanto o valor de
referência de fo1 não mudar,
                dom(i,:) = f(j,:); %avaliar pontos em
fo2, se fo2<for2, igualar o ponto a NaN
                f(j,:) = NaN;
                i = i+1;
            elseif ((f(j,m+1)<for1) && (f(j,m+2)>for2)) %Mudou o valor de
referência de fo1, então atualizar as referências
                for1 = f(j,m+1);
                for2 = f(j,m+2);
            end
            j = j-1;
        end
    case 'minmax'
        for1 = f(1,m+1); %Valor de referência da função objetivo fo1 (x)
        for2 = f(1,m+2); %Valor de referência da função objetivo fo2 (y)
        for j=2:t
            if (f(j,m+2)>for2) && (f(j,m+1)==for1) %Enquanto o valor de
referência de fo1 não mudar,
                for2 = f(j,m+2); %avaliar pontos em fo2, se
fo2>for2, atualizar yc
            elseif (f(j,m+2)<for2) && (f(j,m+1)>=for1) %Enquanto o valor de
referência de fo1 não mudar,
                dom(i,:) = f(j,:); %avaliar pontos em
fo2, se fo2<for2, igualar o ponto a NaN
                f(j,:) = NaN;
                i = i+1;
            elseif ((f(j,m+1)>for1) && (f(j,m+2)>for2)) %Mudou o valor de
referência de fo1, então atualizar as referências
                for1 = f(j,m+1);
                for2 = f(j,m+2);
            end
        end
    end
end

```

```

end

f(~any(~isnan(f),2),:)=[]; %Elimina NaNs
ndom = f;

lnd = size(ndom,1);
ld = size(dom,1);
j = 1;
for k=1:ld
    for i=1:lnd
        switch caso
            case 'min'
                if ((dom(k,m+1)>ndom(i,m+1)) && (dom(k,m+2)>ndom(i,m+2)))
                    idom(k) = j;
                    j = j+1;
                end
            case 'max'
                if ((dom(k,m+1)<ndom(i,m+1)) && (dom(k,m+2)<ndom(i,m+2)))
                    idom(k) = j;
                    j = j+1;
                end
            case 'minmax'
                if ((dom(k,m+1)>ndom(i,m+1)) && (dom(k,m+2)<ndom(i,m+2)))
                    idom(k) = j;
                    j = j+1;
                end
            end
        end
    end
    j = 1;
end
idom = idom';

while size(dom,1)>n
    %if size(dom,1)>n
        [value index] = max(idom);
        idom(index,:) = NaN;
        dom(index,:) = NaN;
        idom(~any(~isnan(idom),2),:)=[];
        dom(~any(~isnan(dom),2),:)=[]; %Elimina NaNs
    end
end
end

```

limitpop_mp

```

function [popsel] = limitpop_mp(ndom,dom,idom,nbind)
%Limita a seleção de indivíduos de acordo com os critérios de Sérgio Ávila.
i = size(ndom,1);
%j = length(dom);
%k=(i+1);
k = 1;
l = 1;
i_idom = 1; %Variável que identifica número de vezes que solução é dominado
em IDOM. Valor inicial é 1
popsel = ndom;
%lpopdom = floor(nbind/4);
lpopdom = nbind/4;

```

```

if (i+lpopdom<nbind) %Se a quantidade de indivíduos não-dominados e nbind/4
dos dominados for inferior a nbind, selecionar dominados até a população
for igual a nbind
    lpopdom = nbind-i;
end

if (isempty(dom)==0) && (size(dom,1)>1) %ALTERAÇÃO CASO NÃO HAJA SOLUÇÕES
DOMINADAS
while k<=lpopdom
    for j=1:size(dom,1)
        if idom(j,:) == i_idom
            if k<=lpopdom
                popsel(k+i,:) = dom(l,:);
            else
                break
            end
            k = k+1;
            l = l+1;
        end
    end
    i_idom = i_idom+1;
end
end
end

```

selection_mp_v2

```

function [popsel] = selection_mp_v2(popreal,m,ndom,nbind,caso)
%Seleção por amostragem determinística no meio e torneios nas pontas
%popndom selecionado para priorizar extremos da fronteira de Pareto, não
mais de popreal
%popreal = sortrows(popreal);

ntrn = ceil(nbind/4); %Número de amostras do torneio de cada função
objetivo (25% cada)
navg = nbind-2*ntrn; %Número de amostras da amostragem determinística
(50%)
i = 1;

%Parte do torneio
%CUIDADO PARA NÃO REPETIR RESULTADOS DA AMOSTRA DETERMINÍSTICA
popfo1 = popreal(:,m+1);
popfo2 = popreal(:,m+2);

% popfo1 = sortrows(popreal(:,m+1));
% popfo2 = sortrows(popreal(:,m+2));
% popfo1 = popfo1(1:ntrn);
% popfo2 = popfo2(1:ntrn);

for j=1:ntrn
    switch caso
        case {'min','minmax'}
            [minfo ind] = min(popfo1);

```

```

        case 'max'
            [maxfo ind] = max(popfo1);
        end
        popstrn1(j,:) = popreal(ind,:);
        popreal(ind,:) = NaN;
        popfo1(ind,:) = NaN;
        popfo2(ind,:) = NaN;
        popreal(~any(~isnan(popreal),2),:)=[];
        popfo1(~any(~isnan(popfo1),2),:)=[];
        popfo2(~any(~isnan(popfo2),2),:)=[];
    end

for j=1:ntrn
    switch caso
        case 'min'
            [minfo ind] = min(popfo2);
        case {'max','minmax'}
            [maxfo ind] = max(popfo2);
        end
        popstrn2(j,:) = popreal(ind,:);
        popreal(ind,:) = NaN;
        popfo1(ind,:) = NaN;
        popfo2(ind,:) = NaN;
        popreal(~any(~isnan(popreal),2),:)=[];
        popfo1(~any(~isnan(popfo1),2),:)=[];
        popfo2(~any(~isnan(popfo2),2),:)=[];
    end

    %Parte da amostragem determinística - Mudada para mediana para evitar
    %muitas repetições
    avg = median(popreal);
    avg = median(avg(m+1:m+2));
    avgfo = (popreal(:,m+1)+popreal(:,m+2))/2;
    la_min = 0.95*avg;
    la_max = 1.05*avg;
    %avgn = popreal./avg;
    %avgn = 100*abs(popreal-avg)./avg
    i = 1;
    j = 0;
    %Parte da amostragem determinística (OK por ora!)
    while j<size(popreal,1)
        j = j+1;
        if ((avgfo(j))>=la_min)&&(avgfo(j)<=la_max)
            if i>navg
                break
            end
            popsavg(i,:) = popreal(j,:);
            i = i+1;
        end
        if ((j==size(popreal,1))&&(i<=navg))
            j = 0;
            la_min = 0.95*la_min;
            la_max = 1.05*la_max;
            i = 1;
        end
    end

    %popsel = zeros(nbind,m+2);
    popsel(1:navg,:) = popsavg;

```

```

popssel(navg+1:navg+ntrn,:) = popstrn1;
popssel(navg+ntrn+1:navg+2*ntrn,:) = popstrn2;
%popssel = sortrows(popssel);
end

```

reproduction_mp

%Código implementado com base em 3.10.2 e 3.10.3 do livro "Introduction to Genetic Algorithms" e na tese de Ávila

```

function [poprep] = reproduction_SLA_mp(popssel,m,xmin,xmax) %PUT pr AS THE
SECOND INPUT PARAMETER
b = 0.9; %b é o alfa_pol da equação 3.5 da tese
limits_a = [-0.1 1.1];

N = size(popssel,1); %Quantidade de indivíduos selecionados para reprodução
T = floor(N/2); %Quantidade de pares selecionados para reprodução. Se
nº de indivíduos for ímpar, ele não irá se reproduzir
pcross = rand(T,1); %Probabilidade de cruzamento em 80%
lcross = 0.2; %Valor padrão para cruzamento. Se a probabilidade de
cruzamento do par for abaixo disso, não há cruzamento
popssel = popssel(:,1:m);
poprep = zeros(2*T,m); %Matriz destino dos filhotes, 2T para evitar o ponto
(0,0) quando T for ímpar

for i=1:T
    %CROSSOVER
    r1 = randi(N);%random position #1
    r2 = randi(N);%random position #2
    while r2==r1
        r2 = randi(N);%random position #2
    end
    chil = 2*i-1; %child #1 position, first born
    chi2 = 2*i; %child #2 position, second born
    if pcross(i)>=lcross %Se a probabilidade de cruzamento do par for maior
que o padrão, gerarão descendentes.
        poprep(chil,:) = b*popssel(r1, :)+(1-b)*popssel(r2, :); %Eq. 3.5 da
tese de Ávila
        x = rand(1);
        a = (limits_a(2) - limits_a(1))*x; %a é o alfa da equação 3.6
da tese
        poprep(chi2,:) = (1-a)*popssel(r1, :)+a*popssel(r2, :); %Eq. 3.6 da
tese de Ávila
    else %Se a probabilidade de cruzamento do par for menor que o padrão,
os descendentes serão clones dos pais, reprodução assexuada
        poprep(chil,:) = popssel(r1, :);
        poprep(chi2,:) = popssel(r2, :);
    end
    popssel(r1,:) = NaN;
    popssel(r2,:) = NaN;
    popssel(~any(~isnan(popssel),2),:)=[];
    N = N-2; %Decrementa quantidade de indivíduos selecionáveis
end
popcross = poprep;
N = length(poprep);

%MUTATION

```

```

lmut = 0.05;
pmut = rand(N,1);
Npmut = size(pmut,1);
%c = randinterval_v2(-1,1,0.1,N);
%c = randinterval_v2(-0.05,0.05,0.01,N); %Problema: gera 0, que muda nada.
c = rand(Npmut,1).*repmat(2*lmut,Npmut,1)+repmat(-lmut,Npmut,1);
for i=1:N
    if pmut(i)<=lmut
        %poprep(i,:) = 0.05.*c(i).*poprep(i,:);
        %poprep(i,:) = (0.05+c(i)).*poprep(i,:); %Eq.3.11 adaptada à
situação
        poprep(i,:) = (1+c(i)).*poprep(i,:); %Eq.3.11 adaptada à situação
    end
end
%Rotina de saturação dos limites, quando houver extrapolação
for i=1:N
    for j=1:m
        if poprep(i,j)<xmin(j)
            poprep(i,j) = xmin(j);
        elseif poprep(i,j)>xmax(j)
            poprep(i,j) = xmax(j);
        end
    end
end

poprep = sortrows(poprep); %Organiza em ordem crescente em relação ao
primeiro parâmetro os indivíduos gerados na reprodução.
end

```

darwin_mp_v2

```

function [popreal] = darwin_mp_v2(popreal,dom,idom,m,N,caso)
%darwin_mp_v2 elimina os indivíduos da população menos aptos a
%sobreviverem.
%FUNCIONA
popreal = unique(popreal,'rows');
%[ndom dom idom] = pareto_mp(popreal,m,50,caso);
check = isempty(idom);
Nplus = size(popreal,1);
dN = Nplus-N;

if Nplus>=N %Se a população for maior ou igual a N (FUNCIONA PARA TODAS AS
SITUAÇÕES)

if check==0 %Se houver soluções dominadas desde o início
    while size(popreal,1)>N
        j = 1;
        bigdom = max(idom);
        for i=1:size(dom,1)
            if idom(i)==bigdom
                popsel(j,:) = dom(i,:);
                idom(i) = NaN;
                dom(i,:) = NaN;
                j = j+1;
            end
        end
        end
        idom(~any(~isnan(idom),2),:)=[]; %Elimina NaNs
        dom(~any(~isnan(dom),2),:)=[]; %Elimina NaNs
        Nsel = size(popsel,1);

```

```

if Nsel>dN
    for j=1:Nsel
        switch caso
            case 'max'
                [max_fol i] = max(popsel(:,m+1));
            otherwise
                [min_fol i] = min(popsel(:,m+1));
        end
        popsel(i,:) = [];
        n = size(popsel,1);
        if n<=dN
            break %OK!
        end
    end
    Nsel = n;
end
n=Nplus-N;
for j=1:Nsel %MEXER AQUI
    if (j==n+1)
        break
    end
    for i=1:Nplus
        if popsel(j,)==popreal(i,:)
            popreal(i,:) = NaN;
        end
    end
end
popsel = [];
popreal(~any(~isnan(popreal),2),:)=[]; %Elimina NaNs
Nplus = size(popreal,1);
check = isempty(idom);
%ERRO: QUANDO CHECK = 1, MAS SIZE(POPREAL)>50
if check==1
    break
end
end
if (check==1)&&(Nplus>50) %Se as soluções dominadas acabaram, mas se
popreal ainda for maior que N
    for j=1:dN
        switch caso
            case 'max'
                [max_fol i] = min(popreal(:,m+1));
            otherwise
                [min_fol i] = max(popreal(:,m+1));
        end
        popreal(i,:) = [];
        n = size(popreal,1);
        if n<=N
            break %OK!
        end
    end
end
end

else %Se não houver soluções dominadas desde o início (só soluções não-
dominadas no início) %ALTERNATIVA: CLEARING POR ITERAÇÃO PODE MELHORAR OS
RESULTADOS
    for j=1:dN
        switch caso
            case 'max'

```

```

        [max_fo1 i] = min(popreal(:,m+1));
    otherwise
        [min_fo1 i] = max(popreal(:,m+1));
    end
    popreal(i,:) = [];
    n = size(popreal,1);
    if n<=N
        break %OK!
    end
end
end

else %Se a população for menor que N (FUNCIONA)
    j = 1;
    littledom = min(idom);
    for i=1:size(dom,1)
        if idom(i)==littledom
            popsel(j,:) = dom(i,:);
            idom(i) = NaN;
            dom(i,:) = NaN;
            j = j+1;
        end
    end
    idom(~any(~isnan(idom),2),:)=[]; %Elimina NaNs
    dom(~any(~isnan(dom),2),:)=[]; %Elimina NaNs
    Nsel = size(popsel,1);
    n=N-Nplus;
    for j=1:Nsel
        switch caso
            case 'max'
                [max_fo1 i] = max(popsel(:,m+1));
            otherwise
                [min_fo1 i] = min(popsel(:,m+1));
        end
        popsel(i,:) = [];
        nsel = size(popsel,1);
        if nsel==n
            break
        end
    end
    popreal=[popreal;popsel];
end

end

```

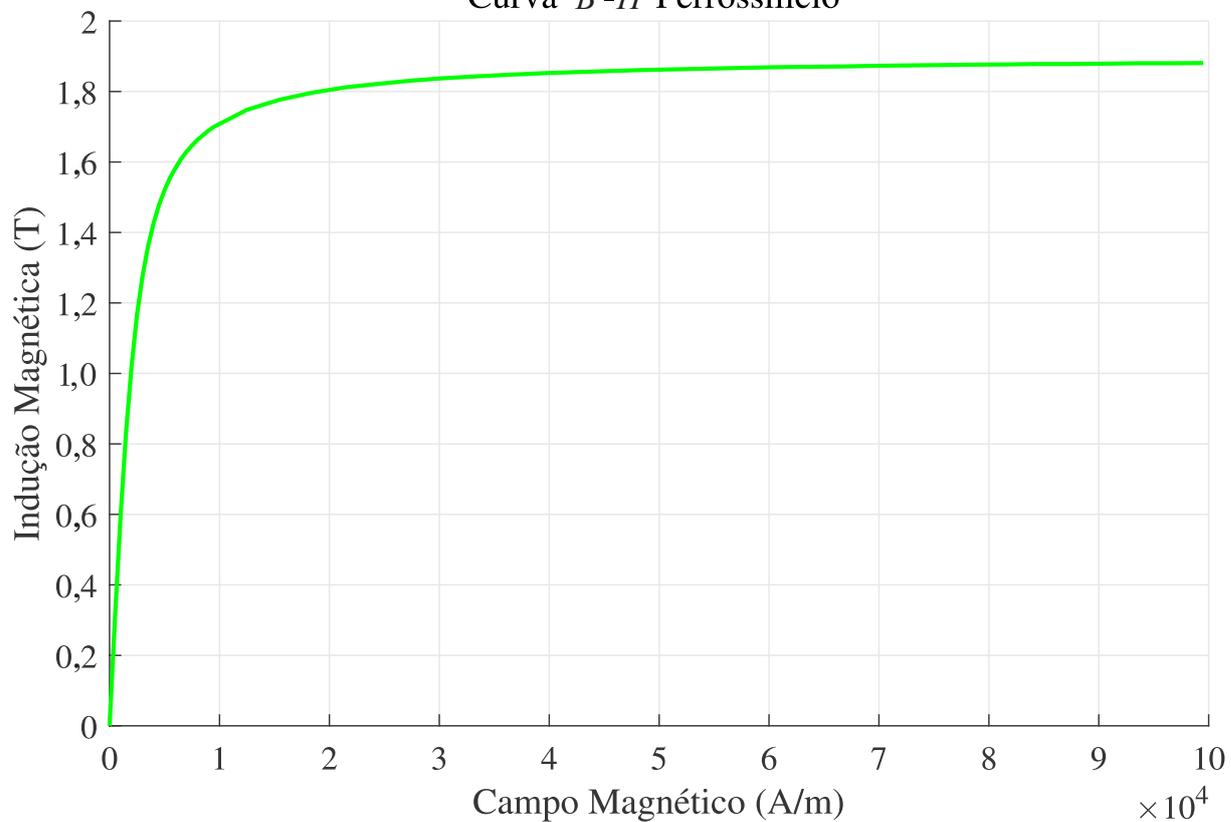
ANEXO G: Curva $B-H$ do material ferromagnético do núcleoFigura G.7.4: Curva $B-H$ do ferrossilício.
Curva $B-H$ Ferrossilício

Tabela G.7.27: Pontos da curva $B-H$ do ferrosilício.

Ponto	Indução Magnética – B (T)	Campo Magnético – H (A/m)
1	0	0
2	0,31150	500
3	0,59480	1.000
4	0,83240	1.500
5	1,0210	2.000
6	1,1660	2.500
7	1,2760	3.000
8	1,3610	3.500
9	1,4260	4.000
10	1,4780	4.500
11	1,5200	5.000
12	1,5550	5.500
13	1,5830	6.000
14	1,6080	6.500
15	1,6290;	7.000
16	1,6470	7.500
17	1,6630	8.000
18	1,6760	8.500
19	1,6890	9.000
20	1,7000	9.500
21	1,7480	12.500
22	1,7770	15.500
23	1,7970	18.500
24	1,8120	21.500
25	1,8220	24.500
26	1,8310	27.500
27	1,8380	30.500
28	1,8430	33.500
29	1,8480	36.500
30	1,8520	39.500

31	1,8550	42.500
32	1,8580	45.500
33	1,8610	48.500
34	1,8630	51.500
35	1,8650	54.500
36	1,8670	57.500
37	1,8690	60.500
38	1,8700	63.500
39	1,8710	66.500
40	1,8730	69.500
41	1,8740	72.500
42	1,8750	75.500
43	1,8760	78.500
44	1,8770	81.500
45	1,8780	84.500
46	1,8780	87.500
47	1,8790	90.500
48	1,8800	93.500
49	1,8800	96.500
50	1,8810	99.500