

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ADRIEL SENNA DE OLIVEIRA CANDIDO

PROJETO ÓTIMO DE MOTOR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL MONOFÁSICO
VALIDADO POR ELEMENTOS FINITOS

CURITIBA

2022

ADRIEL SENNA DE OLIVEIRA CANDIDO

PROJETO ÓTIMO DE MOTOR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL MONOFÁSICO
VALIDADO POR ELEMENTOS FINITOS

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof^a Dra. Juliana Almansa Malagoli

CURITIBA

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Candido, Adriel Senna de Oliveira

Projeto ótimo de motor de relutância variável monofásico validado por elementos finitos / Adriel Senna de Oliveira Candido. – Curitiba, 2022.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof^a Dra. Juliana Almansa Malagoli.

1. Método dos Elementos Finitos. 2. Algoritmos. 3. Otimização. I. Malagoli, Juliana Almansa. II. Universidade Federal do Paraná. Programa de pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ADRIEL SENNA DE OLIVEIRA CANDIDO** intitulada: **PROJETO ÓTIMO DE MOTOR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL MONOFÁSICO VALIDADO POR ELEMENTOS FINITOS.**

, sob orientação da Profa. Dra. JULIANA ALMANSA MALAGOLI, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 25 de Julho de 2022.

Assinatura Eletrônica

25/07/2022 17:42:40.0

JULIANA ALMANSA MALAGOLI

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

26/07/2022 10:48:00.0

ADELICIO MAXIMIANO SOBRINHO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS)

Assinatura Eletrônica

26/07/2022 11:53:46.0

ALEXANDRE RASI AOKI

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

26/07/2022 08:32:17.0

THELMA SOLANGE PIAZZA FERNANDES

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me direcionar e acompanhar a todo momento.

Aos meus pais Nilton Cesar de Oliveira Candido e Patricia Cristina Senna Oliveira Candido, pelo amor, esforço e incentivo nos desafios que me foram propostos durante a vida!

À minha amada esposa Iasmyn Caroline de Souza Candido e aos meus filhos Vicente Martins de Souza e Cecília Senna de Souza Candido por todo amor, carinho e compreensão durante a jornada.

À minha orientadora Profa. Dra. Juliana Almansa Malagoli que me orientou no presente trabalho. Obrigado por toda dedicação no desenvolvimento deste trabalho, por sempre encontrar meios de me desenvolver como pesquisador, pela compreensão e ajuda nos momentos difíceis.

À CAPES pelo apoio financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao PROAP pelo aporte financeiro para submissão de artigos em congressos.

À UFPR pelo ensino de qualidade e gratuito.

E por fim, aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPR por todo conhecimento transmitido.

“Pois tudo o que foi escrito no passado, foi escrito para nos ensinar, de forma que, por meio da perseverança e do bom ânimo procedentes das Escrituras, mantenhamos a nossa esperança”. (Bíblia Sagrada, Romanos 15, 4)

RESUMO

A utilização de motores de relutância variável é uma alternativa que tem ganhado espaço entre outros motores elétricos em aplicações que necessitam de variação de velocidade, alto rendimento e robustez, por sua construção simples e custo baixo. O motor de relutância variável é uma máquina elétrica que induz polos magnéticos não permanentes no ferromagnético do rotor, onde não possui enrolamentos. Este trabalho apresenta a fundamentação teórica e os procedimentos do projeto convencional do motor de relutância variável monofásico. Além disso foram desenvolvidos três estudos de aplicação e para cada estudo de aplicação há três projetos de motor de relutância variável monofásico, sendo, o projeto convencional feito a partir das equações construtivas, não otimizadas, o projeto ótimo com a aplicação do algoritmo evolucionário de Evolução Diferencial e outro projeto ótimo utilizando o algoritmo evolucionário de Otimização por Enxame de Partículas. O projeto do motor de relutância variável monofásico convencional é igual nos três estudos de aplicação, entretanto os projetos ótimos são diferentes. Cada estudo de aplicação tem seu objetivo em particular otimizado, sendo minimização das perdas de potência total nas bobinas, maximização da eficiência energética e a minimização do volume do motor, respectivamente. Os resultados obtidos dos projetos convencionais e dos projetos ótimos do mesmo estudo de aplicação são simulados e validados pelo *software* FEMM (*Finite Element Method Magnetics*) baseado na análise da densidade de fluxo magnético nos motores projetados. Finalmente os projetos desenvolvidos em cada estudo de aplicação são comparados entre eles. Em todas as comparações realizadas, constatou-se que o algoritmo de ED apresentou resultados ligeiramente melhores para as funções mono-objetivas propostas.

Palavras-chaves: Algoritmo Evolucionário. Evolução Diferencial. Método dos Elementos Finitos. Otimização por Enxame de Partículas. Projeto do Motor de Relutância Variável.

ABSTRACT

The use of variable reluctance motors is an alternative that has been gaining space among other electric motors in applications that require speed variation, high performance, and robustness, due to its simple construction and low cost. The variable reluctance motor is an electric machine that induces non-permanent magnetic poles in the ferromagnet of the rotor, where it has no windings. This paper presents the theoretical background and procedures of the conventional design of the single-phase variable reluctance motor. In addition, three application studies were developed and for each application study there are three designs of single phase variable reluctance motor, being, the conventional design made from the constructive equations, not optimized, the optimal design with the application of the evolutionary algorithm of Differential Evolution and another optimal design using the evolutionary algorithm of Particle Swarm Optimization. The design of the conventional single-phase variable reluctance motor is the same in all three application studies, however the optimal designs are different. Each application study has its particular goal optimized, being minimization of total power losses in the coils, maximization of energy efficiency, and minimization of motor volume, respectively. The results obtained from the conventional designs and the optimal designs of the same application study are simulated and validated by the FEMM (*Finite Element Method Magnetics*) based on the analysis of the magnetic flux density in the designed motors. Finally the designs developed in each application study are compared with each other. In all the comparisons performed, it was found that the ED algorithm showed slightly better results for the proposed single-objective functions.

Key-words: Evolutionary Algorithm. Differential Evolution. Finite Element Method. Particle Swarm Optimization. Variable Reluctance Motor Design.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Distribuição do consumo de energia.	17
FIGURA 2 – Consumo de energia entre 2011 a 2021.	21
FIGURA 3 – Um MRV totalmente desalinhado, 30°.	26
FIGURA 4 – Um MRV parcialmente desalinhado, 15°.	26
FIGURA 5 – Circuito equivalente MRVM.	27
FIGURA 6 – Dimensões de uma MRV (a) estator e (b) rotor.	29
FIGURA 7 – Curva de magnetização do aço silício M22.	30
FIGURA 8 – Ilustração do Ótimo Global e Local.	38
FIGURA 9 – Fundamentação teórica do algoritmo ED.	39
FIGURA 10 – Fluxograma do algoritmo de Evolução Diferencial	40
FIGURA 11 – Processo de cruzamento binomial $\alpha = 2$, $\beta = 4$ e $\gamma = N_p$	42
FIGURA 12 – Processo de cruzamento exponencial $\alpha = 2$, $\beta = 4$ e $\gamma = N_p$	43
FIGURA 13 – Fluxograma do processo de otimização utilizando PSO.	46
FIGURA 14 – Topologia das partículas: (a) Topologia global e (b) Topologia local.	48
FIGURA 15 – Diagrama de blocos das etapas do MEF.	50
FIGURA 16 – Tipos de elementos possíveis em uma malha.	51
FIGURA 17 – Exemplificação de densidade de malha de elementos finitos.	52
FIGURA 18 – Modelagem e cotas do MRVM do <i>software</i> AutoCAD.	55
FIGURA 19 – Interface gráfica do <i>software</i> FEMM.	56
FIGURA 20 – Malha de elementos finitos do <i>software</i> FEMM aplicada no projeto.	56
FIGURA 21 – Motor de referência para o 2° e 3° estudo de aplicação do MRVM.	57
FIGURA 22 – Fluxograma de projeto do MRVM.	59
FIGURA 23 – Valor da função objetivo de perdas totais ao longo das iterações nos algoritmos de ED e PSO.	62
FIGURA 24 – Seleção da parte resistiva para encontrar as perdas no cobre no <i>software</i> FEMM.	63
FIGURA 25 – Densidade de fluxo magnético no entreferro do MRVM convencional.	64
FIGURA 26 – Densidade de fluxo magnético no entreferro do MRVM usando ED.	65
FIGURA 27 – Densidade de fluxo magnético no entreferro do MRVM usando PSO.	65
FIGURA 28 – Dimensões antes da otimização usando Motor Convencional.	68
FIGURA 29 – Dimensões após otimização usando Motor ED.	68
FIGURA 30 – Dimensões após otimização usando Motor PSO.	69
FIGURA 31 – Densidade de fluxo magnético no entreferro do MRVM convencional.	69

FIGURA 32 – Densidade de fluxo magnético no entreferro do MRVM ótimo usando ED.	70
FIGURA 33 – Densidade de fluxo magnético no entreferro do MRVM ótimo usando PSO.	70
FIGURA 34 – Seleção das chapas para encontrar o volume ativo no <i>software</i> FEMM.	74
FIGURA 35 – Dimensões antes da otimização usando Motor Convencional. . .	74
FIGURA 36 – Dimensões após otimização usando Motor ED.	75
FIGURA 37 – Dimensões após otimização usando Motor PSO.	75
FIGURA 38 – Gráfico de cores para análise da densidade de fluxo magnético MRVM ED alinhado.	76
FIGURA 39 – Gráfico de cores para análise da densidade de fluxo magnético MRVM ED desalinhado.	76
FIGURA 40 – Gráfico de cores para análise da densidade de fluxo magnético MRVM PSO Alinhado.	76
FIGURA 41 – Gráfico de cores para análise da densidade de fluxo magnético MRVM PSO desalinhado.	77
FIGURA 42 – Gráfico de cores para análise da densidade de fluxo magnético MRVM convencional alinhado.	77
FIGURA 43 – Gráfico de cores para análise da densidade de fluxo magnético MRVM convencional desalinhado.	77

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Conjugado por Volume do Rotor.	30
TABELA 2 – Parâmetros utilizados no algoritmo de ED.	60
TABELA 3 – Parâmetros utilizados no algoritmo de PSO.	60
TABELA 4 – Características iniciais para o projeto do MRVM convencional. . .	60
TABELA 5 – Parâmetros e limites.	61
TABELA 6 – Resultados obtidos usando o algoritmo ED.	61
TABELA 7 – Resultados obtidos usando o algoritmo PSO.	61
TABELA 8 – Parâmetros do motor Convencional, ED E PSO.	63
TABELA 9 – Valores das perdas resistivas totais para corrente de saturação. .	64
TABELA 10 – Características iniciais para o projeto do MRVM convencional. . .	66
TABELA 11 – Variáveis, parâmetros e limites.	66
TABELA 12 – Resultados dos vetores nos testes com o algoritmo ED.	67
TABELA 13 – Resultados dos vetores nos testes com o algoritmo PSO.	67
TABELA 14 – Parâmetros Convencional, ED E PSO.	68
TABELA 15 – Comparação da eficiência energética dos projetos.	71
TABELA 16 – Características iniciais para o projeto do MRVM convencional. . .	72
TABELA 17 – Variáveis, parâmetros e limites.	72
TABELA 18 – Resultados dos vetores nos testes com o algoritmo ED.	72
TABELA 19 – Resultados dos vetores nos testes com o algoritmo PSO.	72
TABELA 20 – Parâmetros Convencional, ED E PSO.	73
TABELA 21 – Comparação do volume ativo.	75

LISTA DE ABREVIATURA E DE SIGLAS

- AE** Algoritmos Evolucionários
- CC** Corrente contínua
- CE** Computação Evolucionária
- ED** Evolução Diferencial
- EDO** Equações Diferenciais Ordinárias
- EDP** Equações Diferenciais Parciais
- EPE** Empresa de Pesquisa Energética
- FEM** Força Eléctromotriz
- FEMM** Finite Element Method Magnetics
- MEF** Método dos Elementos Finitos
- MRC** Motor de Relutância Chaveado
- MRV** Motor de Relutância Variável
- MRVM** Motor de Relutância Variável Monofásico
- MRVT** Motor de Relutância Variável Trifásico
- PSO** Particle Swarm Optimization
- RPM** Rotações por Minuto
- TRV** Conjugado por Volume do Rotor

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	Fluxo concatenado
i	Corrente no enrolamento
L	Indutância da fase
R_s	Resistência por fase
e	Força eletromagnética induzida
p_i	Potência instntânea na fase
t	Tempo
θ	Posição do rotor
ω_m	Velocidade
p_a	Potência no entreferro
T_e	Torque eletromagnético
β_s	Arco polar do estator
β_r	Arco polar do rotor
t_s	Largura do polo do estator
t_r	Largura do polo do rotor
Y_s	Culatra do estator
Y_r	Culatra do rotor
d_s	Altura do polo do estator
d_r	Altura do polo do rotor
D_{eix}	Diâmetro do eixo
D_r	Diâmetro do rotor
D_s	Diâmetro externo
C	Conjugado
A	Carregamento elétrico

L	Comprimento da máquina
g	Entreferro
D	Diâmetro interno do estator
V_a	Volume ativo
η	Rendimento do motor
P_s	Potência de saída
P_e	Potência de entrada
N_e	Número de espiras
I_p	Corrente de pico
B_{sat}	Densidade de fluxo magnética saturada
μ_0	Permeabilidade magnética no vácuo
q	Número de fases
A_c	Área de seção do fio condutor
N_{ps}	Número de polos do estator
J_c	Densidade de corrente máxima
l_m	Comprimento médio de espiras
R_f	Resistência elétrica
ρ	Resistividade no cobre
I_f	Corrente eficaz
I_{sat}	Corrente de saturação
P_{cobre}	Perdas no cobre para uma bobina
P_{total}	Perdas totais no cobre
$F(x)$	Função objetivo do problema
$H(x)$	Vetor de restrição de desigualdade
$G(x)$	Vetor de restrição de igualdade
$V^{(q+1)}$	Vetor doador

F_p	Fator perturbação
$X_s^{(q)}$	Vetor alvo
$U^{(q+1)}$	Vetor experimental
P_c	Probabilidade de cruzamento
$v_i(t)$	Velocidade anterior
$x_i(t)$	Posição anterior
$v_i(t + 1)$	Velocidade atualizada
$x_i(t + 1)$	Posição atualizada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
1.2	MOTIVAÇÕES	20
1.3	OBJETIVO	21
1.3.1	Objetivo Geral	21
1.3.2	Objetivos Específicos	21
1.4	JUSTIFICATIVAS	22
1.5	CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO	22
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	23
2	MOTORES DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL MONOFÁSICO	24
2.1	PARTICULARIDADES DO MRV	24
2.2	MRV MONOFÁSICO	25
2.3	CIRCUITO EQUIVALENTE	26
2.4	PROJETO DO MRVM 6X6	29
2.5	GRANDEZAS ELÉTRICAS PARA O PROJETO DO MRVM	34
2.6	APLICAÇÕES	36
3	TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO APLICADAS	37
3.1	EVOLUÇÃO DIFERENCIAL	39
3.1.1	Operadores da Evolução Diferencial	40
3.1.1.1	Mutação	41
3.1.1.2	Cruzamento	41
3.1.1.3	Seleção	42
3.2	OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS	43
3.2.1	Parâmetros	45
3.2.2	Inércia	46
3.2.3	Fator de aceleração	47
3.2.4	Topologia das partículas	48
4	VALIDAÇÃO PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	50
4.1	DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO	51
4.2	CONDIÇÕES DE CONTORNO	53
4.3	EQUAÇÕES DE MAXWELL	53
4.3.1	Modelagem magnetostática	54

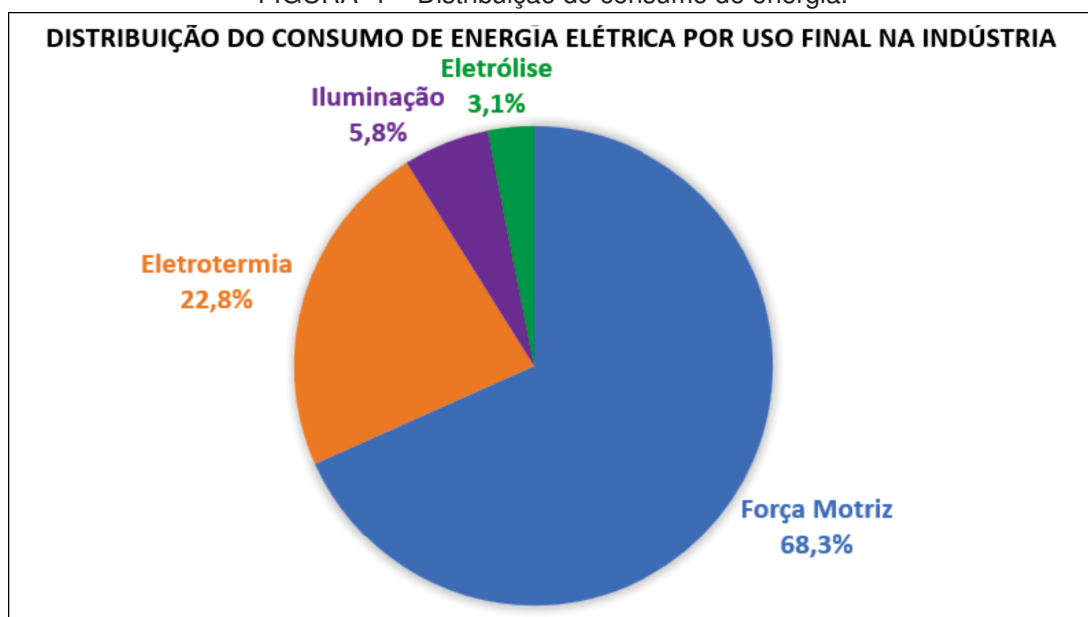
		16
4.4	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	55
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
5.1	METODOLOGIA DE PROJETO	57
5.2	SOLUÇÃO DOS PROJETOS DO MRVM	58
5.2.1	Parametrização dos algoritmos evolucionários	59
5.3	1º ESTUDO DE APLICAÇÃO: MINIMIZAÇÃO DAS PERDAS TOTAIS NO COBRE	60
5.3.1	Procedimentos Metodológicos	60
5.3.2	Análises dos Resultados	61
5.3.3	Considerações Finais	64
5.4	2º ESTUDO DE APLICAÇÃO: MAXIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENER- GÉTICA	66
5.4.1	Procedimentos Metodológicos	66
5.4.2	Análises dos Resultados	67
5.4.3	Considerações Finais	71
5.5	3º ESTUDO DE APLICAÇÃO: MINIMIZAÇÃO DO VOLUME ATIVO	71
5.5.1	Procedimentos Metodológicos	71
5.5.2	Análise dos Resultados	71
5.5.3	Considerações Finais	78
6	CONCLUSÕES	79
6.1	TRABALHOS FUTUROS	79
	REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

Dada a preocupação global a respeito do consumo de energia elétrica, busca-se melhorar a eficiência energética nas mais diversas frentes de estudo. Uma delas é o aprimoramento da eficiência de dispositivos e máquinas elétricas. Neste contexto, o Motor de Relutância Variável (MRV) se mostra uma opção interessante pelo fato de possuir uma construção simples em comparação aos motores de indução, todavia eficiente quando comparado aos motores de corrente contínua. Além disso, mesmo com algumas limitações, o MRV tem muitas vantagens em relação a outros tipos de motores: limite de potência até 150 kW; apresenta bom rendimento; baixa inércia; boa densidade de potência; baixo custo de fabricação e confiável de forma a manter sua operação mesmo com a perda de uma das fases (CARVALHO; SIGNORELLI, 2005).

A Figura 1 apresenta quatro processos que consomem energia elétrica na indústria brasileira sendo que, 60% a 70% dos mesmos é realizado por motores elétricos.

FIGURA 1 – Distribuição do consumo de energia.



Fonte: Adaptado de PROCEL e ELETROBRÁS. (2008).

O MRV é um dos motores elétricos mais antigos, sendo seu primeiro registro realizado em meados do século XIX na Escócia. As principais características de um MRV são: um estator com enrolamentos de excitação; rotor sem enrolamentos e sem ímãs permanentes; sem escovas ou comutadores; e robustez semelhante ao encontrada em motores de indução (MAMEDE, 2016). Deste modo, o conjugado é produzido pelo deslocamento da sua parte móvel (rotor) para a posição em que há maximização da indutância no enrolamento de excitação, sendo os polos estáticos

(estator). O rotor tende a se alinhar de forma a produzir uma relutância magnética mínima e, assim, uma densidade máxima de fluxo (MAMEDE; CAMACHO; ANDRADE, 2016).

Devido a sua forma construtiva, há algumas desvantagens como a sua conexão a rede, sendo que o MRV não pode ser conectado de forma direta à rede, necessitando de acionamento eletrônico e identificação instantânea da posição do rotor. Mas, considerando o avanço da eletrônica de potência nas últimas décadas, o controle e o acionamento do MRV deixou de ser um "empecilho" para sua utilização. Ademais, transformou-se em maiores possibilidades de pesquisas envolvendo o MRV. O motor tem sido fabricado em alguns países em escala industrial para diversas aplicações (em veículos elétricos, na aeronáutica, em motores de bombas e em alguns eletrodomésticos), principalmente, as que necessitam de modificação de velocidade, controle de posição e tração com alto conjugado (FITZGERALD; KINGSLEY., 2014).

O presente estudo consiste em projetar um Motor de Relutância Variável Monofásico (MRVM) através de um problema de otimização, cujos critérios de otimização são: redução das perdas no cobre, maximização da eficiência energética e redução de volume ativo, usando os algoritmos de Evolução Diferencial (ED) e *Particle Swarm Optimization* (PSO).

Neste contexto, os motores advindos da otimização através dos algoritmos evolucionários têm seus resultados comparados. Neste trabalho, os motores possuem seis polos no estator e seis polos no rotor, ou seja, denominado 6x6 e com o apoio do *software Finite Element Method Magnetics* (FEMM), que é uma ferramenta baseada no Método dos Elementos Finitos (MEF), é possível obter características estáticas do MRV com escopo em analisar a densidade de fluxo magnético.

1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os motores elétricos são máquinas elétricas que transformam energia elétrica em mecânica. O motor de relutância variável é um tipo de motor elétrico dentre dezenas apresentados na literatura. Alguns dos projetos do MRV são voltados para: formas de partida, controle, otimização do torque médio, otimização do torque médio por perda no cobre, redução do volume e aumento da eficiência energética. Nos projetista tem seu foco em alterar as dimensões da máquina, de forma que, o objetivo seja alcançado.

O MRV é uma escolha comum para aplicações de alta velocidade, sendo o principal motivo a robustez de seu rotor e alta densidade de potência (KRISHNAN; BHARADWAJ, 1991). Além disso, o MRV tem sua sensibilidade a variação de temperatura menor se comparados a motores de indução que contém ímã permanente e motores de corrente contínua sem escovas.

No desenvolvimento de veículos elétricos, o MRV ganhou muito espaço por suas características (RAHMAN, 2000).

O trabalho de (MAMEDE, 2016) tem por escopo apresentar uma metodologia de projeto para MRVM, onde foi realizado o equacionamento do projeto convencional do motor de relutância variável monofásico 4x4 e posteriormente sugeriu alterações no projeto convencional e então aplicou otimização multiobjetivo, sendo os objetivos redução da ondulação no torque, o aumento do torque médio e aumento da eficiência do motor através dos algoritmos evolucionários de Algoritmos Genéticos e Evolução Diferencial. Então foi validada pelo método dos elementos finitos utilizando o *FEMM*, onde os parâmetros investigados foram o arco polar do rotor, o entreferro, o número de espiras e o valor da corrente de fase. Na análise via MEF validou-se que o material ferromagnético não passou o nível de saturamento. Então constatou-se de forma válida que o torque médio no motor otimizado é 3,78% maior que o apresentado pelo projeto convencional. O projeto convencional adaptado, houve um aumento de 25,8% do torque médio, comparado ao projeto convencional. A partir do trabalho de (MAMEDE, 2016), despertou-se o interesse de trabalhar com um MRVM onde foi aplicado o algoritmo evolucionário de ED, e também de PSO. A escolha por estes algoritmos é dada pelo fato dos algoritmos possuir evolução baseado em métodos matemáticos e o outro com base em seleção natural respectivamente.

Seguindo a linha de projeto, construção e análise via MEF o trabalho de (DIAS, 2011) projetou dois motores de relutância variável com potência de 6 *cv* e velocidade de 1200 *rpm* sendo um motor monofásico 6x6 (MRVM) e o outro trifásico 6x4 (MRVT) e realizou comparações entre eles, a fim de verificar aspectos operacionais e a eficiência dessas máquinas. Além disso, foi projetado um conversor half-bridge para o acionamento dos respectivos motores.

O trabalho apresentado por (PAULA, 1993) trás o projeto detalhado de um motor de relutância chaveada capaz de desenvolver 0,5 *N.m* a 3000 *rpm*. Um protótipo foi desenvolvido com base no projeto e os resultados práticos ficaram próximos aos analíticos confirmando a efetividade do estudo proposto. Para avaliar o projeto e potencial de desempenho do motor, foi aplicado o método dos elementos finitos, por ser uma técnica bastante confiável. Através do MEF validou o trabalho e apontou pontos de melhorias.

Os trabalhos apresentados nesta seção, trazem projetos e bases de cálculo para motores de relutância onde o presente trabalho baseou-se. Para análise, avaliação e validação dos projetos, foi aplicado o método dos elementos finitos, e em todas as aplicações trouxe satisfação no resultado apresentado, encorajando o presente trabalho a replicar a utilização da técnica.

A motor projetado por (PAULA, 1993) é um Motor de Relutância Chaveado

(MRC), que tem diferenças sutis em relação ao Motor de Relutância Variável (MRV). Basicamente a diferença fica por conta das distintas formas de onda de torque estático que são obtidas conforme as dimensões e materiais utilizados na construção do circuito ferromagnético.

1.2 MOTIVAÇÕES

O consumo de energia elétrica tem sido pauta mundial nas últimas décadas, gerando incentivos governamentais a fim de reduzir o consumo em todas as esferas. Além disso, parte da geração da energia mundial é obtida através de combustível fóssil, forma esta que traz problema de aquecimento global causado pelos gases emitidos, causando o efeito estufa (ZOBAA; BOSE, 2011). Com isso, nos últimos anos ocorreu um aumento na quantidade de pesquisas voltadas à eficiência energética (ALTOÉ et al., 2017).

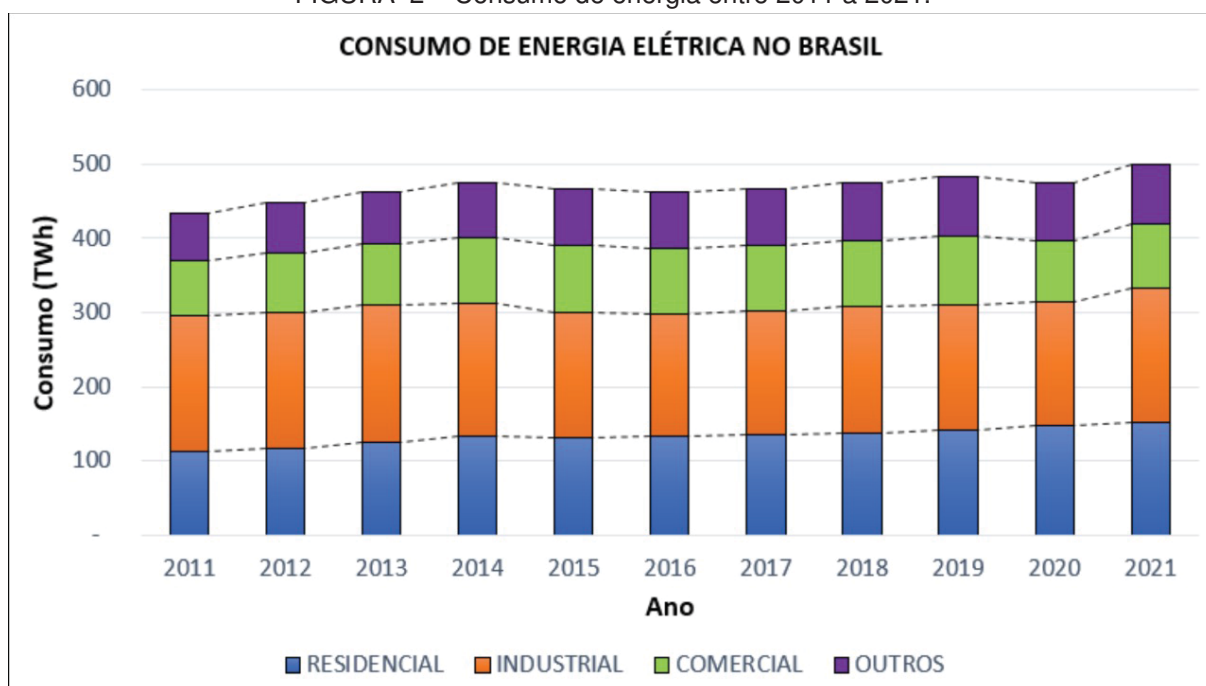
Quando aborda-se a questão do consumo de energia elétrica no Brasil, constata-se uma evolução significativa de 2011 à 2021 segundo o Anuário Estatístico de Consumo Nacional de Energia Elétrica na Rede pela Empresa de Pesquisa Energética, conforme mostra a Figura 2. Percebe-se que de 2011 para 2014 houve um aumento de 19,063% no consumo de energia. Nota-se também que há uma queda no consumo em 2015 e 2016, queda esta gerada pelo setor industrial, justificada pelo decréscimo econômico do Brasil neste biênio. Porém, em 2017 passou a ser crescente novamente o consumo de energia elétrica em todos os setores até o ano de 2019, mas, em 2020 houve um decréscimo no consumo onde a maior queda ocorreu no setor comercial, ocorrido por consequência das medidas restritivas impostas pelo governo devido à pandemia mundial do COVID-19.

Entretanto, com o início da vacinação no combate a COVID-19 no ano de 2021 os governos "aliviaram" as restrições e conseqüentemente, os setores voltaram ao seu consumo nominal. Desta forma, é notório que a maior parte da energia elétrica consumida no Brasil, é advindo do setor produtivo, ou seja, setor industrial.

Nota-se também que a maior parte da energia elétrica consumida no Brasil, é advindo do setor produtivo, ou seja, setor industrial. Em 2019, o setor industrial correspondeu à 34,725% do consumo total de energia elétrica no Brasil segundo a (EPE, 2021), e aproximadamente 70% da energia consumida no setor industrial são de motores elétricos, ou seja, considerando estas informações para o ano de 2019, os motores elétricos industriais foram responsáveis por aproximadamente 24,30% do consumo de energia elétrica no Brasil (EPE, 2021).

Neste contexto, com o alto do consumo de energia dos motores elétricos industriais, este trabalho propõe desenvolver um MRVM otimizando as perdas totais

FIGURA 2 – Consumo de energia entre 2011 a 2021.



no cobre, do volume e da eficiência energética, usando os algoritmos ED e PSO. Um dos motivos para a escolha do MRVM é sua versatilidade, que atende diversas demandas da indústria, podendo substituir outros tipos de motores elétricos desde que seja acionado eletronicamente.

1.3 OBJETIVO

1.3.1 Objetivo Geral

Poder contribuir com o desenvolvimento de pesquisas de MRV, assim como sua otimização através de técnicas de AE. Desta forma, contribuir com a área de sistemas de potência voltado a máquinas elétricas.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Avaliar na literatura as equações para construção do motor de relutância variável monofásico;
- Pesquisar os algoritmos evolutivos de Evolução Diferencial e Otimização por Enxame de Partículas;
- Analisar a modelagem magnetostática usada no Método dos Elementos Finitos;
- Validar os desenhos de MRVM antes e após a otimização através de simulações computacionais usando o *software* FEMM;

- Comparar o projeto convencional com o projeto ótimo advindo dos algoritmos e das simulações.

1.4 JUSTIFICATIVAS

A metodologia tradicional de projeto do MRV tem como finalidade minimizar a ondulação do torque ou maximizar o torque médio através de um projeto com a geometria e dimensões ótimas para a máquina. Entretanto, ao melhorar um parâmetro de desempenho pode resultar na piora significativa de outras características importantes. Consequentemente, o projetista precisa procurar soluções que sejam viáveis para todos os parâmetros de desempenho. Portanto, há um interesse crescente no sentido da aplicação de técnicas de otimização para resolver problemas de otimização de projeto de MRV.

Além disso, na maioria dos trabalhos a escolha dos limites e dos parâmetros que participam do processo de otimização são definidos por testes e deduções. Portanto, a metodologia proposta no trabalho, apresenta um modelo matemático para a construção do MRVM 6x6 replicável. Além do mais, justificam-se as escolhas dos parâmetros que fazem parte do processo de otimização do motor, como os limites propostos para cada estudo de aplicação. Neste sentido, as empresas que fabricam máquinas elétricas, podem usar o projeto como base para o desenvolvimento de novos motores de relutância variável com melhor rendimento.

1.5 CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

As contribuições da dissertação de mestrado são:

- Disseminação das técnicas de otimização por meio de algoritmos de Computação Evolucionária (CE) aplicadas aos projetos de máquinas elétricas, trazendo uma visão completa na melhoria das dimensões dos parâmetros de construção;
- Minimização das perdas totais no cobre, redução de volume e maximização da eficiência energética usando os algoritmos de Evolução Diferencial (ED) e Otimização por Enxame de Partículas (PSO), mostrando a aplicabilidade dos resultados dos dois algoritmos;
- Comparação dos resultados obtidos antes e após a otimização, utilizando simulações computacionais para validar os projetos dos motores elétricos.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação de mestrado está construída, conforme a estruturação dos capítulos a seguir:

- Capítulo 1 - É apresentada uma breve introdução, motivações, objetivos gerais, objetivos específicos, justificativas e as contribuições da dissertação;
- Capítulo 2 - É mostrado sobre o Motor de Relutância Variável Monofásico 6x6, circuito equivalente e equações de projeto;
- Capítulo 3 - É demonstrado os algoritmos de Evolução Diferencial e Otimização por Enxame de Partículas adotados para o problema;
- Capítulo 4 - É apresentado o método usado para validar as técnicas de otimização com a metodologia adotada na construção do motor;
- Capítulo 5 - É analisado e mostrado os resultados das simulações computacionais e comparações dos motores antes e após a otimização;
- Capítulo 6 - É apresentado a conclusão do trabalho e os trabalhos futuros.

2 MOTORES DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL MONOFÁSICO

O Motor de Relutância Variável (MRV) tem seu princípio semelhante a outros tipos de motores elétricos, onde a primícia é a conversão de energia elétrica em energia mecânica (DIAS, 2011). Por definição, o MRV produz conjugado através do deslocamento do polo rotor para a bobina de maior indutância presente no polo estator, tendenciando o alinhamento entre os polos. Entretanto, para que o polo rotor gire é necessário que os enrolamentos dos polos estatores sejam magnetizados e controlados eletronicamente, assim tornando-os aplicáveis.

Neste capítulo, é apresentado as características construtivas do motor de relutância variável monofásico 6x6. Além disso, é mostrado o circuito equivalente e as equações de projeto pertinentes para construção do motor. Por fim, destaca-se os desenhos com as cotas que são apresentados para melhor entendimento do projetista.

2.1 PARTICULARIDADES DO MRV

O motor de relutância variável contém dupla saliência sendo a parte móvel (rotor) e a parte estática (estator). Dentre as características marcantes do MRV estão a não utilização de ímãs permanentes, comutadores e escovas (CARVALHO; SIGNORELLI, 2005). Outras particularidades podem ser citadas como: a estrutura simples e o baixo custo de fabricação se comparado a outros motores elétricos (MAMEDE, 2016). Entre outras características do MRV estão:

- Alto rendimento;
- Tolerância a falta de fase, pelo fato das bobinas serem separadas e com indutância independente;
- Velocidade variável quando em operação;
- Possui rotor com volume menor se comparado a outras máquinas elétricas, que por consequência proporciona melhor aceleração;
- Não possui escovas;
- Não contém enrolamentos no rotor, reduzindo as perdas Joule;
- Capacidade de operação em alta velocidade;
- Permite alimentação de uma fonte de corrente contínua, com sentido unidirecional;
- Construção robusta, opera em ambientes de alta temperatura e vibração;

- Enrolamento em torno dos polos estatores e simples laminação.

As principais desvantagens do MRV estão listadas a seguir:

- Vibração intensificada;
- Geração de ruídos acústicos;
- Alta ondulação no torque;
- Perdas de atrito em alta velocidade gerada pela saliência estrutural do rotor;
- Operação ocorre necessariamente com a utilização de dispositivos eletrônicos de potência.
- Identificação da posição do rotor é necessário para seu controle, sendo feito por sensores.

Apesar das desvantagens apresentadas, o MRV é válido para muitas aplicações e suas desvantagens podem ser minimizadas com projetos específicos, como exemplo, um projeto acústico para anulação dos ruídos gerados pelo MRV, assim como controle de corrente na excitação das fase para evitar picos na ondulação no torque.

2.2 MRV MONOFÁSICO

Normalmente, os MRVMs são máquinas elétricas em que o número de polos no estator é igual ao número de polos rotor, desta forma, há apenas um perfil de indutância, sendo um motor monofásico. (DIAS, 2011). Os projetos mais comuns são 2x2, 4x4, 6x6 e 8x8 polos estatores e rotores, subsequentemente (KRISHNAN, 2001).

Quando o MRVM é acionado e sua posição inicial é de totalmente desalinhado, 30° da posição de alinhamento (Figura 3), a máquina se energizará, assim a corrente fluirá no enrolamento. A energização ocorrerá até o período em que restar 15° para o alinhamento (Figura 4), ou seja, metade do percurso até o alinhamento completo. Neste momento, ocorre a desenergização das bobinas e a energia contida nas nelas retorna a fonte.

Portanto, devido a está lógica de magnetização, os MRVMs necessitam obrigatoriamente de um acionador eletrônico de potência para realizar os disparos (abertura e fechamento) de magnetização nas bobinas.

FIGURA 3 – Um MRV totalmente desalinhado, 30°.

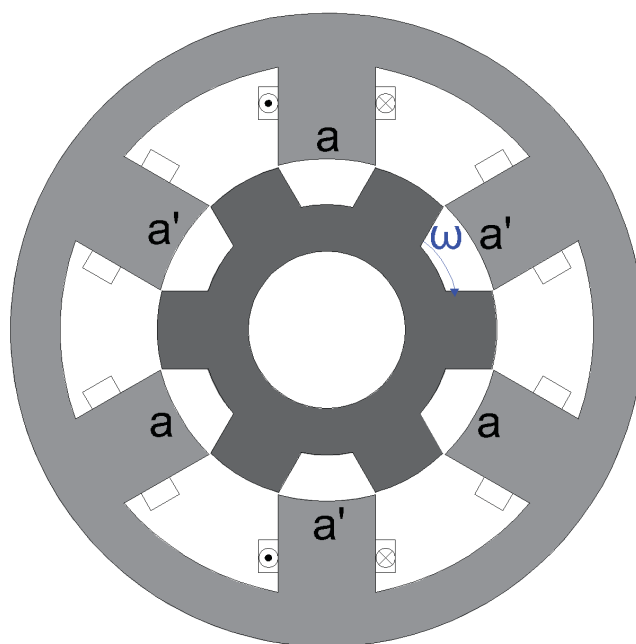
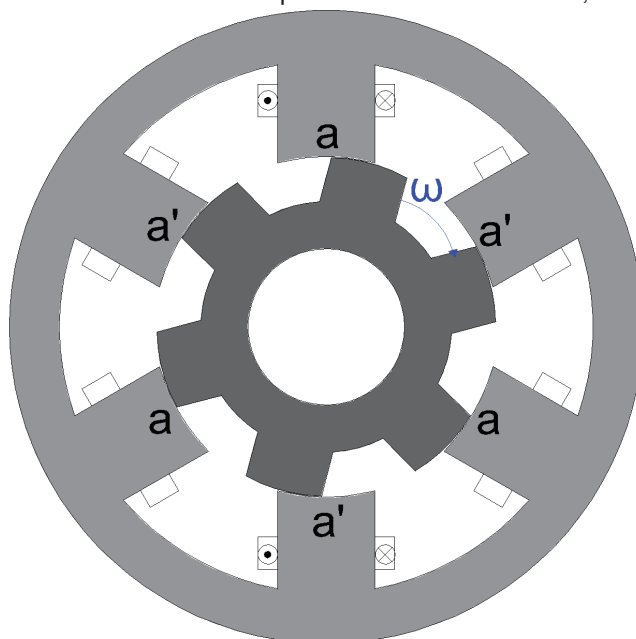


FIGURA 4 – Um MRV parcialmente desalinhado, 15°.

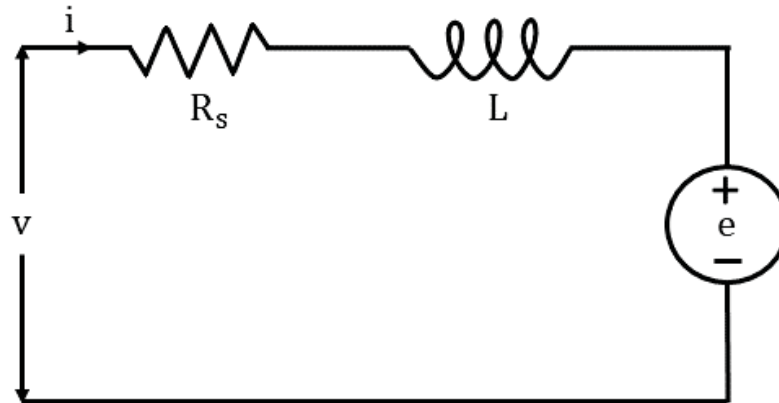


2.3 CIRCUITO EQUIVALENTE

Na situação em que o circuito magnético de um indutor contém uma parte móvel capaz de variar a indutância de uma bobina, sempre que ocorrer uma excitação na bobina, o circuito magnético tenderá para a situação em que a energia magnética armazenada é mínima, ou seja, a situação de relutância mínima, sendo o momento de maior estabilidade.

Desta maneira, desconsiderando a saturação magnética, espreitamento de fluxo nas bordas do polo, fluxo disperso e acoplamento mútuo entre as fases, obtém-se o circuito equivalente de um MRVM, conforme mostra a Figura 5 e a Equação que define o circuito é (2.1).

FIGURA 5 – Circuito equivalente MRVM.



Fonte: Reproduzido de KRISHNAN (2001).

$$V = R_s i + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (2.1)$$

$$\lambda = iL(\theta, i) \quad (2.2)$$

Onde:

v é a tensão terminal;

λ é o fluxo concatenado;

θ é a posição angular do rotor;

i é a corrente no enrolamento;

L é a indutância da fase;

R_s é a resistência por fase.

A indutância dependente da corrente e da posição angular do rotor, como mostrado na Equação 2.3.

$$v = R_s i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{d\theta}{dt} \frac{dL(\theta, i)}{d\theta}$$

$$v = R_s i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i\omega \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (2.3)$$

Na Equação 2.3 de tensão para uma fase, os três últimos termos representam a queda de tensão na resistência, a queda de tensão na indutância e a força eletromagnética induzida, respectivamente (MAMEDE, 2016). Note que o resultado é similar

à equação de tensão do motor Corrente Contínua (CC) série. A FEM induzida, e , é obtida como:

$$e = \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega_m i \quad (2.4)$$

Desta maneira, a potência instantânea na fase é encontrada a partir da multiplicação da corrente da fase, como mostrado na Equação 2.3.

$$p_i = vi = R_s i^2 + i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} + L(\theta, i) i \frac{di}{dt} \quad (2.5)$$

Nesta Equação 2.5 a última parte não é possível explicar fisicamente, desta forma, a fim de trazer uma inferência em termos físicos, será acrescentado variáveis conhecidas da seguinte forma:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) = L(\theta, i) i \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (2.6)$$

Substituindo (2.5) em (2.6):

$$p_i = R_s i^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (2.7)$$

Na Equação 2.5, o p_i é a potência instantânea de entrada, que é encontrada a partir da soma das perdas resistivas, dada por $R_s i^2$, a taxa de mudança da energia armazenada no campo é dada por $p[L(\theta, i) i^2 / 2]$, e a potência no entreferro, sendo p_a , identificada pelo termo $[i^2 p L(\theta, i)] / 2$, onde $p = d/dt$ (KRISHNAN, 2001), (MAMEDE, 2016).

O tempo é dado pela posição do rotor e velocidade conforme Equação 2.8:

$$t = \frac{\theta}{\omega_m} \quad (2.8)$$

E substituindo na expressão da potência, obtém-se:

$$p_a = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega_m \quad (2.9)$$

Por fim, a potência no entreferro é a multiplicação da velocidade do rotor e o torque eletromagnético, ou seja,

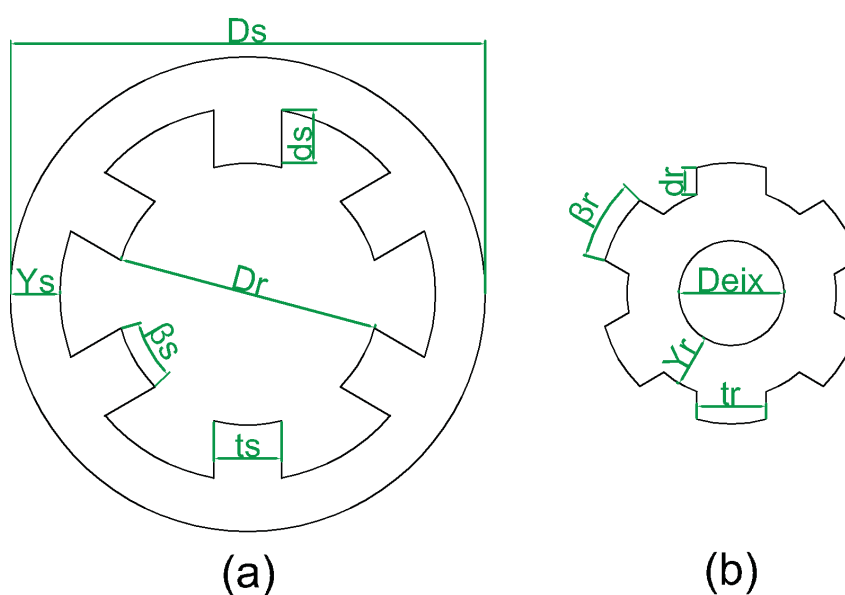
$$p_a = \omega_m T_e \quad (2.10)$$

O estudo desta seção define as equações para validar o torque eletromagnético, a potência no entreferro, e a potência de entrada em operações permanentes, assim como em estado dinâmico.

2.4 PROJETO DO MRVM 6X6

A Figura 6 apresenta todas as dimensões que devem ser determinadas para a construção de uma MRV e que serão descritas a seguir.

FIGURA 6 – Dimensões de uma MRV (a) estator e (b) rotor.



Fonte: O autor (2022).

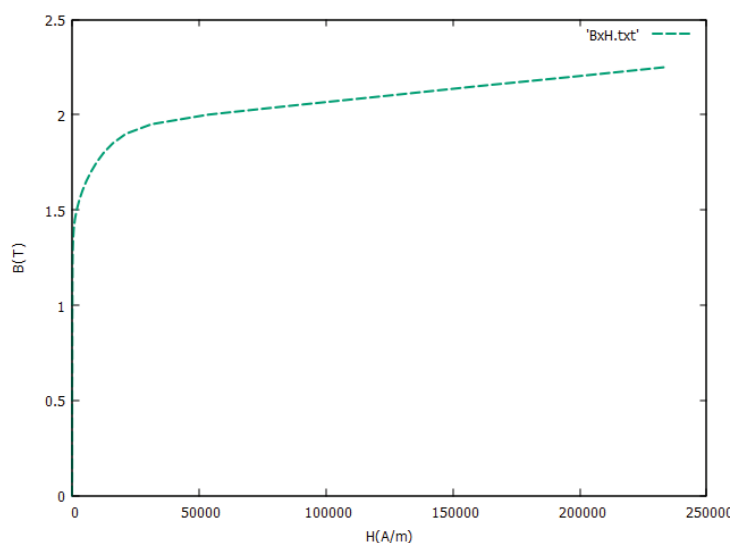
Pode-se definir os parâmetros do motor, como: β_s é o arco polar do estator (graus); β_r é o arco polar do rotor (graus); t_s é a largura do polo do estator (mm); t_r é a largura do polo do rotor (mm); Y_s é a culatra do estator (mm); Y_r é a culatra do rotor (mm); d_s é a altura do polo do estator (mm); d_r é a altura do polo do rotor (mm); D_{eix} é o diâmetro do eixo (mm); D_r é o diâmetro do rotor (mm) e D_s é o diâmetro externo (mm).

Outro ponto importante, é a Densidade de Fluxo Magnético encontrada através da curva $B \times H$ do aço magnético M22 utilizado no projeto. A Figura 7 mostra o ponto de saturação do material, sendo $B_{sat} = 2,2T$.

Para iniciar o projeto do MRVM, deve-se definir a constante de conjugado por volume do rotor (TRV - do inglês *torque per rotor volume*) que tem seu valor definido através do tipo do motor ou aplicação.

A Tabela 1 apresenta os valores típicos de TRV para os vários tipos de motores e aplicações. Para o projeto referido, foi utilizado TRV de motores para aplicações

FIGURA 7 – Curva de magnetização do aço silício M22.



Fonte: O autor (2022).

TABELA 1 – Conjugado por Volume do Rotor.

Tipos de Motores	$k.N.m/m^3$
Motores pequenos totalmente fechados	2,5 - 7
Motores para aplicações industriais	7 - 30
Servomotores de alta-performance	15 - 50
Motores para aplicações aeroespaciais	30 - 75
Motores grandes, refrigeração com líquidos	100 - 250

industriais.

Inicialmente, encontra-se a potência P que é dada pelo trabalho T realizado em um período.

$$P = \frac{T}{\Delta t} \quad (2.11)$$

Desta forma, o trabalho é igual ao produto da força F e do deslocamento angular $\Delta\theta$:

$$T = F.\Delta\theta \quad (2.12)$$

Substituindo, a Equação 2.12 em 2.11, tem-se:

$$P = \frac{F.\Delta\theta}{\Delta t} \quad (2.13)$$

Onde:

$\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \omega$ em rad/s, que é a velocidade angular;

F é a força rotativa na forma que se encontra nas equações anteriores, assim $F = C$, ou seja, a potência desenvolvida no eixo da máquina é proporcional a sua velocidade angular e ao conjugado C (DIAS, 2011).

Desta forma, a potência passa a ser:

$$P = C.\omega (W) \quad (2.14)$$

O conjugado tem origem nas interações eletromagnéticas que ocorrem no rotor do MRVM. Além disso, pode-se equacionar as grandezas eletromagnética F e B com as grandezas geométricas do MRV Dr e L . Assim,

$$F = A.B.\pi.Dr.L \quad (2.15)$$

Com a força definida, multiplica-se ao raio do rotor, que por sua vez é dado como $(Dr/2)$ e então é dado o conjugado C . O conjugado é dado da seguinte maneira:

$$C = \frac{1}{2}.B.A.\pi.Dr^2.L \quad (2.16)$$

Genericamente, a Equação 2.16, é acrescida da constante k que nada mais é do que uma relação proporcional ao carregamento elétrico (A) e do carregamento eletromagnético (B), relaciona também o conjugado por volume do rotor (TRV) dado em $(N.m/m^3)$ (MILLER, 1993). Então, pode-se calcular k :

$$k = \frac{TRV.\pi}{4} \quad (2.17)$$

Sendo, o valor de k conhecido, remodelá-se a Equação 2.16 do conjugado (C), sendo agora expressa da seguinte forma:

$$C = k.Dr^2.L \quad (2.18)$$

A Equação 2.18 apresenta o conjugado da máquina, assim, para adquirir a potência do MRVM, deve-se multiplicar essa expressão pela velocidade angular (ω). Desta forma, obtêm-se:

$$P = k.Dr^2.L.\omega \quad (2.19)$$

Além disso, a constante k_1 é a relação entre L e Dr , assim:

$$k_1 = \frac{L}{Dr} \quad (2.20)$$

Onde, k_1 é a denotação de qual será o formato do MRVM, mostrando a relação entre o comprimento e o diâmetro. Deste modo, pode-se escrever a Equação 2.20 da seguinte forma:

$$L = k_1 \cdot Dr \quad (2.21)$$

Substituindo a Equação 2.21 na Equação 2.19 e isolando Dr , obtêm-se:

$$Dr = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot P}{TRV \cdot \pi \cdot k_1 \cdot \omega}} \quad (2.22)$$

Na Equação 2.22 apresenta o diâmetro do rotor (Dr) que contem em seu equacionamento os parâmetros k_1 e TRV . Para o referido trabalho usou-se $k_1 = 1,4363$, o parâmetro TRV é vindouro da Tabela 1. Ademais, adotou-se o parâmetro TRV com valor 16000 para motores industriais (DIAS, 2011).

Com os valores do diâmetro do rotor Dr e o comprimento da máquina L encontrados, segue-se uma rotina de expressões para encontrar os outros parâmetros necessários para a construção do MRVM. Está rotina está presente em (MILLER, 1993) e (MAMEDE, 2016). A experiência em projetos de máquinas de relutância variável é importante, pois, há escolhas de algumas contantes por faixas de valores tabelados, como as recomendações bibliográficas.

Segundo (MILLER, 1993) o valor do entreferro (g) deve ser próximo a 0,5% do diâmetro do rotor (Dr). Para aumentar o fluxo, o entreferro foi considerado foi o menor valor possível, sendo em ordem de 0,25% do diâmetro do rotor (Dr), então:

$$g = 0,0025 \cdot Dr \quad (2.23)$$

Então, o ângulo máximo do estator (β_s) é onde a fase pode chegar a produzir conjugado diferente de zero, ou seja:

$$\beta_s = \frac{180}{N_s} \quad (2.24)$$

Para determinar a largura do polo do estator (ts), é necessário conhecer o ângulo do polo estator (β_s), o diâmetro do rotor (Dr) e o entreferro (g) (DIAS, 2011). Desta maneira, pode ser calculado como:

$$ts = 2 \cdot \left(\frac{Dr + 2 \cdot g}{2} \right) \cdot \text{sen} \left(\frac{\beta_s}{2} \right) \quad (2.25)$$

Já a largura mínima que a culatra do estator (Y_s) pode assumir é a metade da largura do polo do estator (ts), assim, a culatra deve estar no intervalo:

$$0,5 \cdot ts \leq Y_s < ts \quad (2.26)$$

Para o presente trabalho, o valor definido é de $0,5.t_s$. Além disso, para encontrar o valor do diâmetro externo do estator (D_s), (MILLER, 1993), apresenta uma relação com o diâmetro do rotor (D_r), conforme Equação 2.27:

$$0,4 \leq \frac{D_r}{D_s} < 0,7 \quad (2.27)$$

A Equação 2.28 apresenta a forma como o diâmetro do estator foi calculado na referida dissertação:

$$D_s = \frac{D_r}{0,55} \quad (2.28)$$

A largura do polo do rotor (tr) deve ser maior que a largura do polo do estator (ts) para haver aumento da permeância quando o MRVM estiver em posição de completo alinhamento entre os polos do estator e do rotor (MAMEDE, 2016). Então, a largura do polo do rotor tr pode ser da seguinte forma:

$$tr = ts + 2g \quad (2.29)$$

Sabendo a largura do polo do rotor (tr) e o diâmetro do rotor (D_r), pode-se definir o ângulo do polo do rotor (β_r):

$$\beta_r = 2 \cdot \arcsen \left(\frac{tr}{D_r} \right) \quad (2.30)$$

De forma prática, a altura do polo do rotor (dr) deve ser a metade da largura do polo estator (ts),

$$dr = \frac{ts}{2} \quad (2.31)$$

Para obter o valor da culatra do polo rotor (Y_r), deve-se respeitar a primícia de que a densidade de fluxo magnético da mesma, não seja maior que a do polo rotor. O fluxo magnético que flui nos polos do rotor se dividem na culatra do polo rotor (Y_r). Neste sentido, a altura mínima que a culatra do polo rotor pode assumir é de metade da largura do dente do rotor (tr). Por (MILLER, 1993), recomenda-se um acréscimo entre 20% e 40% sobre este valor.

$$Y_r = \frac{tr}{2} \quad (2.32)$$

Para este trabalho o acréscimo definido é de 20%. Então, a expressão da culatra do polo rotor (Y_r) passa a ser:

$$Yr = 1,2 \cdot \frac{tr}{2} \quad (2.33)$$

Com os parâmetros encontrados, equaciona-se o diâmetro do eixo do motor (*Deix*) da seguinte maneira:

$$Deix = Dr - 2(dr + Yr) \quad (2.34)$$

O diâmetro interno do estator (*D*) é expresso pela Equação 2.35:

$$D = D_s - (2 \cdot Y_s) \quad (2.35)$$

Sendo conhecido o valor do diâmetro interno do estator (*D*), pode-se encontrar volume ativo (*V_a*), conforme Equação 2.36:

$$V_a = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L \quad (2.36)$$

Por fim, a altura do polo do estator (*ds*) é definida através dos parâmetros encontrados, sendo:

$$ds = \frac{1}{2}(D_s - Dr - 2g - 2Y_s) \quad (2.37)$$

2.5 GRANDEZAS ELÉTRICAS PARA O PROJETO DO MRVM

A partir da potência de saída (*P_s*) e o rendimento do motor (*η*), pode-se definir a potência de entrada (*P_e*), conforme apresentado na Equação 2.38:

$$P_s = P_e \cdot \eta \quad (2.38)$$

Já para o rendimento do motor (*η*), recomenda-se usar entre 80% e 90%. Deste modo, é necessário encontrar o número de espiras em cada polo do estator, ou seja:

A Equação 2.39 apresenta a corrente de pico (*I_p*):

$$I_p = (1,707 * I_n) \quad (2.39)$$

Com o valor da corrente de pico (*I_p*), é possível definir o número de espiras (*N_e*) a partir da Equação 2.40:

$$N_e = \frac{2 \cdot g \cdot B_{sat}}{I_p \cdot \mu_0} \quad (2.40)$$

Além disso, a área da seção do fio condutor (A_c) depende da definição do número de fases (q), onde por (MAMEDE, 2016), é dado conforme Equação 2.41:

$$q = \frac{N_{ps}}{2} \quad (2.41)$$

Para aplicação em projeto de uma máquina de relutância monofásico adota-se $q = 1$

Onde: N_{ps} é o número de polos no estator;

Com (q) definido, pode-se encontrar (A_c) através da seguinte expressão:

$$A_c = \frac{I_p}{J_c \cdot \sqrt{q}} \cdot 10^{-6} \quad (2.42)$$

Sendo, J_c é a densidade de corrente máxima permitida por bobina. O valor de J_c é determinado pela relação da corrente de pico com a seção do condutor, onde para o presente caso definiu-se o valor de $J_c = 6,0(A/mm^2)$.

Então, o comprimento médio de espiras (l_m) deve ser definido para que mais adiante seja utilizado para compor a expressão das perdas no cobre. A Equação 2.43 apresenta (l_m):

$$l_m = 2L + \frac{6\pi Dr}{N_{ps}} - 0,15 \quad (2.43)$$

Assim, pode-se calcular a resistência elétrica:

$$R_f = \frac{\rho \cdot l_m \cdot N_e}{A_c} \quad (2.44)$$

Onde: ρ é a constante de resistividade no cobre.

A corrente de saturação (I_{sat}) é dada por:

$$I_{sat} = \frac{B_{sat} \cdot g}{\mu_0 \cdot N_e} \quad (2.45)$$

E a corrente eficaz (I_{ef}), pode ser encontrada conforme Equação 2.46:

$$I_{ef} = \frac{I_{sat}}{\sqrt{2}} \quad (2.46)$$

O valor de (I_{sat}) é a corrente onde o material satura, gerando (B_{sat}). A perda de potência no cobre (P_{cobre}) para uma bobina é dada a partir da Equação 2.47.

$$P_{cobre} = R_f \cdot I_{ef}^2 \quad (2.47)$$

Portanto, a perda no cobre total (P_{total}), nada mais é que (P_{cobre}) multiplicado pelo número de polos no estator, onde estão presentes as bobinas, conforme apresenta a Equação 2.48.

$$P_{total} = P_{cobre} \cdot N_{ps} \quad (2.48)$$

2.6 APLICAÇÕES

Nesta seção são apresentadas algumas aplicações dos motores de relutância variável, com o intuito de exemplificar o uso prático e a versatilidade do MRV. O MRV tem êxito em aplicações de até 5 kW , com crescente popularidade e alto número de vendas anuais. Um exemplo de aplicação em larga escala foi a empresa Hewlett-Packard que desenvolveu um MRV como servo-motor para uma impressora que produz cerca de $0,1275 \text{ N.m}$ de torque a 4000 rpm e entrega uma potência máxima de 53 W . Para tal utilizaram uma topologia incomum, um motor de relutância trifásico com seis polos no estator e oito polos no rotor. A empresa Assa Abloy Entrance Systems produz um atuador de porta tendo a força motriz partindo de um motor trifásico 12/8 entregando 5 N.m a 300 rpm , é um sistema que controla a posição que trabalha em baixa velocidade e alta precisão.

Quando trata-se de aplicações em média potência são aquelas até 300 kW , a montadora BMW desenvolveu um carro elétrico, o modelo i3, que utiliza o motor elétrico MRV com potência de $125,035 \text{ kW}$ e torque de 250 N.m a 4300 rpm . A British Jeffrey Diamond tem MRVs trifásicos desenvolvidos para atender o seguimento de mineração, com potencia de 150 a 300 kW a 1500 rpm , sendo a configuração 12/8.

Para a categoria de alta potência, define-se máquinas elétricas de 300 kW a 1000 kW . Entretanto, para está categoria não há muitas aplicações efetivas, há mais estudos voltados a aplicações em bombas e ventiladores de alta potência.

A seguir, será apresentado a fundamentação teórica, as definições e os conceitos das técnicas de otimização utilizadas no trabalho.

3 TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO APLICADAS

Um problema para otimização é definido a partir de um modelo matemático de fenômenos físicos, pelo qual, deseja-se valores mínimos e máximos de uma função que representa uma grandeza do sistema. O processo de otimização é muito particular, e tem variação com a modelagem e objetivos adotados. As variáveis do problema devem ser contínuas, discretas, ou inteiras, assim trazendo uma maior variedade de algoritmos que podem ser aplicados para determinar uma solução ótima ao problema de otimização (LUENBERGER; YE, 2016).

A otimização nada mais é que um processo que utiliza métodos computacionais para encontrar a melhor combinação de valores para as variáveis do problema, levando em consideração os objetivos propostos e as restrições (SUN; YUAN, 2006). De forma geral, um problema de otimização pode ser definida pelas Equações 3.1, 3.2 e 3.3,

$$\text{Min } F(x) \text{ ou } \text{Max } F(x) \quad (3.1)$$

$$H_{min} \leq H(x) \leq H_{max} \quad (3.2)$$

$$G(x) = G_c \quad (3.3)$$

Onde:

$F(x)$: é a função objetivo do problema;

$H(x)$: é o vetor de restrição de desigualdade;

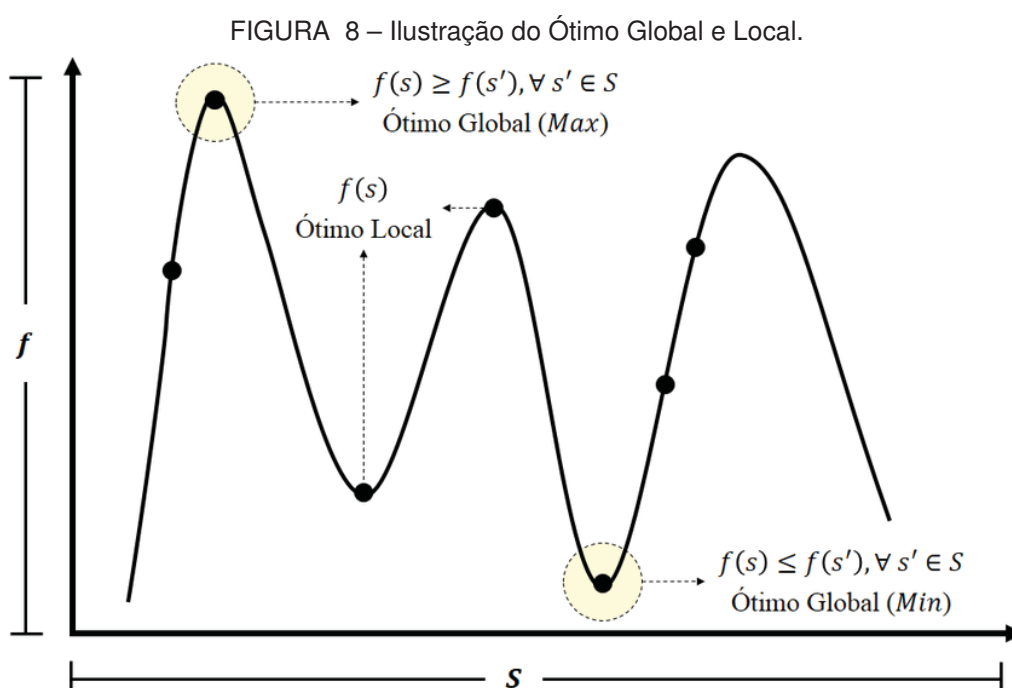
$G(x)$: é o vetor de restrição de igualdade.

Quando aplica-se restrição no problema como nas Equações 3.2 e 3.3, há uma limitação no espaço de busca por um ótimo global. Esta limitação respeita as restrições e assim, gera-se subespaços de busca e as soluções encontradas são chamadas de soluções factíveis.

Apesar dos vários métodos existentes, há um objetivo em comum, todos buscam por um ótimo global na função objetivo do problema, sempre respeitando a faixa de valores permitidas pelas restrições aplicadas. Além disso, um problema de otimização sem restrições aplicadas, tem seu espaço de busca infinito, porém, não se aplica a problemas irrestritos, e a tendência da solução é apresentar um mínimo ou máximo local indesejado e relativamente grande em algumas situações.

A Figura 8 ilustra graficamente na forma bidimensional o comportamento da busca pelo ótimo global, sendo assim, encontra-se a melhor solução para o respectivo problema.

O principal ponto pelo qual foi definido a utilização dos algoritmos de ED e PSO em meio a tantos outros existentes, foi uma distinção na forma idealizada e construtiva que há nos algoritmos. O algoritmo de ED é baseado em uma estratégia matemática de diferença vetorial, sendo assim não tem referência na evolução de espécies, ou seja, não é um algoritmo bio inspirado, diferente do algoritmo de PSO que tem sua inspiração no comportamento de um bando de pássaros, sendo um algoritmo bio inspirado.



Nota-se a existência de possíveis ótimos locais, ou seja, o ótimo local é a melhor solução de uma parte da função, geralmente, uma solução "próxima" do ótimo global, que em casos reais, tende a ser representativa (FERNANDES, 2019).

Há muitas técnicas de solução para problemas de otimização, desde técnicas matemáticas, que em parte necessitam de cálculos de derivadas como também há técnicas evolucionárias ou Algoritmos Evolucionários (AE), sendo as presentes nesta dissertação Evolução Diferencial (ED) e Otimização por Enxame de Partículas (PSO - do inglês *Particle Swarm Optimization*). A maioria das técnicas de AE se inspiram nos processos de evolução da natureza, assim utilizam de operações vetoriais ou operações matemáticas condicionais para sua evolução afim de definir o mais adaptado.

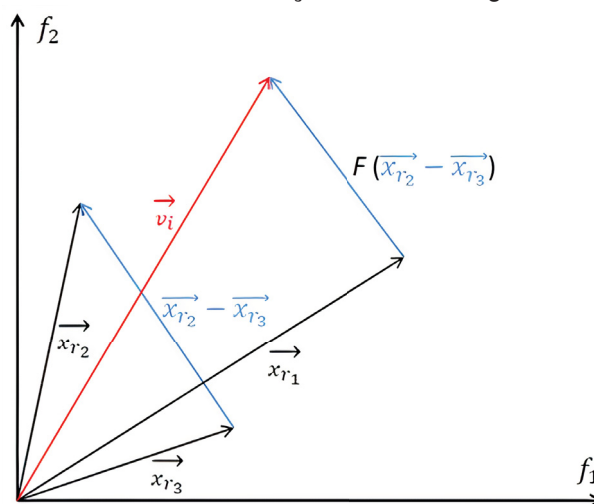
3.1 EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

O algoritmo de Evolução Diferencial (ED) foi desenvolvido por Storn e Prince na década de noventa e originou-se das tentativas de solução de um problema de ajuste polinomial Chebychev (STORN; PRICE, 1997). A ED baseia-se nos mecanismos de seleção natural e na genética de populações, usa-se operadores de mutação, cruzamento e seleção para gerar novos indivíduos em busca do mais adaptado (ROCHA; SARAMAGO, 2011).

Algumas das importantes características da ED é sua simplicidade e facilidade de implementação, *performance* relativamente alta em (velocidade de convergência, precisão e robustez) e possui poucos parâmetros de controle sendo (F , Cr e N_P). A definição por utilizar o algoritmo de ED, tem por base as seguintes características (COELHO, 2003):

- O algoritmo busca uma solução ótima global manipulando uma população de soluções;
- É um algoritmo de busca estocástica, originado da seleção natural;
- Os parâmetros de entrada e de saída são manipulados como números;
- É eficaz na solução de problemas de otimização com função objetivo descontínua, pois não requer informações sobre suas derivadas;
- Apresenta uma concepção totalmente matemática, com base em operações vetoriais, sendo por este motivo considerada uma abordagem estrutural.

FIGURA 9 – Fundamentação teórica do algoritmo ED.



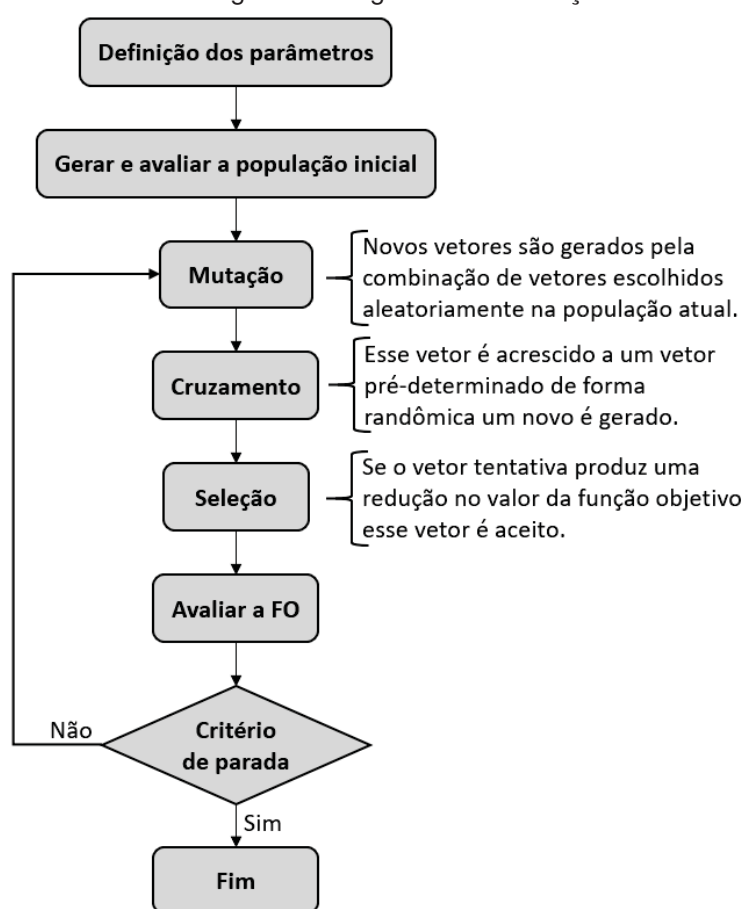
Fonte: Reproduzido de (LOBATO, 2008)

Conforme a Figura 9, a partir dos vetores \vec{x}_{r1} , \vec{x}_{r2} e \vec{x}_{r3} entre eles, dois são selecionados de forma aleatória, na situação, (\vec{x}_{r2} e \vec{x}_{r3}), os escolhidos são subtraídos.

O resultado da subtração é multiplicado por um escalar F resultando em um vetor com módulo diferente da subtração inicial. O novo vetor é então, somado ao vetor não selecionado inicialmente, no caso \vec{x}_{r1} originando um novo vetor \vec{v}_i . O vetor \vec{v}_i indicará uma nova posição no espaço, isto é, em termos do algoritmo ED, um novo indivíduo é gerado (LOBATO, 2008). Após a geração do novo indivíduo, no caso \vec{v}_i há uma mistura de seus componentes com os de outro indivíduo escolhido aleatoriamente, resultando no vetor tentativa.

Para melhor compreensão do algoritmo de Evolução Diferencial, na Figura 10, há a representação do algoritmo em forma de fluxograma.

FIGURA 10 – Fluxograma do algoritmo de Evolução Diferencial



Fonte: Adaptado de (MALAGOLI, 2016)

3.1.1 Operadores da Evolução Diferencial

Os operadores da evolução diferencial tem como base o princípio da evolução natural pelo qual os objetivos são manter a diversidade da população, a evolução da população, evitar convergências prematuras e obter a solução ótima.

3.1.1.1 Mutação

Na mutação considera-se os vetores $X_\alpha^{(q)}$, $X_\beta^{(q)}$ e $X_\gamma^{(q)}$ distintos entre si e escolhidos aleatoriamente em uma população com N_p indivíduos, desta forma, obtêm-se o vetor doador $V^{(q+1)}$. O valor de N_p deve ser maior ou igual a 4 para ter uma garantia de quantidade suficiente de indivíduos para execução do método.

Nos vetores são encontrados os índices aleatórios $\alpha, \beta, \gamma \in \{1, \dots, N_p\}$ são valores inteiros e distintos entre si. Quando aplica-se o par de vetores (X_β, X_γ) da n -ésima geração, define-se o vetor diferença $(X_\beta - X_\gamma)$, onde esta diferença é multiplicada por F_p , sendo denotada a diferença vetorial ponderada ou somente a diferença ponderada e será usada para perturbar o terceiro vetor X_α . O fator de perturbação F_p pertence aos números reais, positivo e controla a amplitude do vetor diferença (OLIVEIRA, 2006). O processo de mutação pode ser escrito como:

$$V^{(q+1)} = X_\alpha^{(q)} + F_p(X_\beta^{(q)} - X_\gamma^{(q)}) \quad (3.4)$$

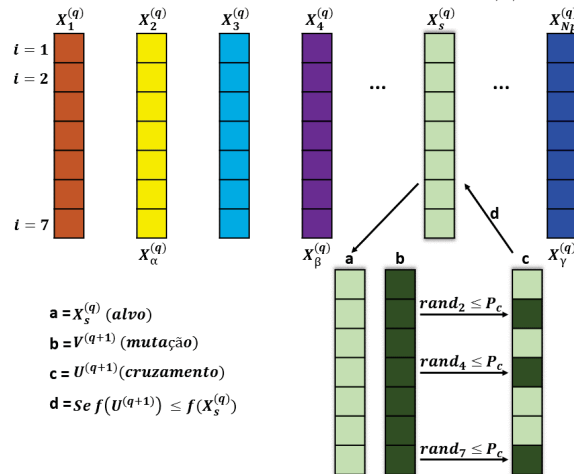
3.1.1.2 Cruzamento

A operação cruzamento é aplicada para aumentar a diversidade dos indivíduos que passaram por mutação. Assim, leva-se em consideração que para cada vetor alvo $X_s^{(q)}$, $s \in \{1, \dots, N_p\}$ e diferente dos índices α, β e γ foi gerado um vetor doador. Desta forma, quando utiliza-se o vetor doador e o vetor alvo, é escolhido a composição do vetor experimental $U^{(q+1)}$, conforme a seguinte comparação (OLIVEIRA, 2006):

$$u(i)^{(q+1)} = \begin{cases} v(i)^{(q+1)}, & \text{se } rand_i \leq P_c \\ x_s(i)^{(q)}, & \text{se } rand_i > P_c, i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (3.5)$$

Onde: $v(i)^{(q+1)}$ é a representação da $(q+1)$ -ésima componente do vetor doador $V^{(q+1)}$; $x_s(i)$ é a representação do componente do vetor alvo $X_s^{(q)}$; $rand_i$ um número gerado aleatoriamente no intervalo $[0, 1]$; $P_c \in [0, 1]$ é a representação da probabilidade do cruzamento, sendo a possibilidade do vetor experimental receber os valores das variáveis do vetor doador, sendo necessariamente fornecido pelo usuário. Exemplificando, quando $P_c = 0$, todas as componentes do vetor experimental serão herdadas do vetor alvo $X_s^{(q)}$. Quando $P_c = 1$ todas as componentes do vetor experimental serão herdadas do vetor doador $V^{(q+1)}$.

Segundo (STORN; PRICE, 1995), este tipo de cruzamento é denominado operador cruzamento binomial (devido aos experimentos independentes), executado na variável sempre que um número aleatório $rand \in [0, 1]$ ser menor que a probabilidade de cruzamento P_c . A Figura 11 apresenta o cruzamento binomial para uma função de 7 variáveis.

FIGURA 11 – Processo de cruzamento binomial $\alpha = 2$, $\beta = 4$ e $\gamma = N_p$.

Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA, 2006)

Em busca de aprimoramento do algoritmo, (STORN; PRICE, 1997) desenvolveram o operador cruzamento exponencial, em que criou-se uma condição, onde o cruzamento é executado nas variáveis, enquanto, o número aleatório $rand \in [0, 1]$ ser menor que a probabilidade de cruzamento P_c , assim, a primeira vez em que o número aleatório ultrapassar o valor de P_c , não será executado cruzamento e as variáveis restantes ficam intactas, deste modo:

$$\left\{ \begin{array}{l} rand_i \leq P_c, u(i)^{(q+1)} = u(i)^{(q+1)} \\ rand_i > P_c, u(j)^{(q+1)} = x_s(j)^{(q)}, j = (i + 1), \dots, n \end{array} \right. \quad (3.6)$$

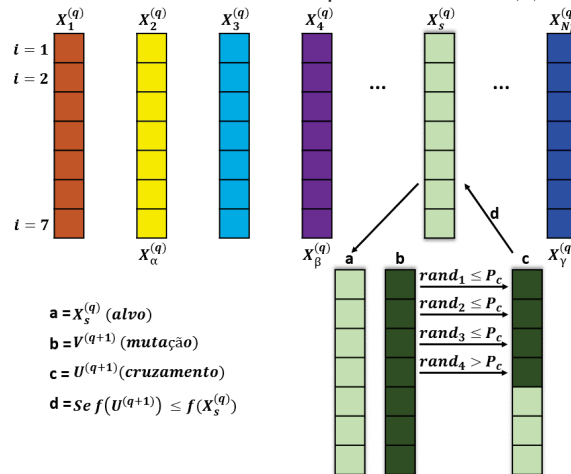
Se posteriormente ao cruzamento um ou mais componentes do vetor experimental estiver fora da região de busca, definida pelas restrições laterais das variáveis de projeto, aplica-se as seguintes correções (OLIVEIRA, 2006):

$$\left\{ \begin{array}{l} Se u(i) < x(i)^{inf}, \text{ entao faz } u(i) = x(i)^{inf} \\ Se u(i) > x(i)^{sup}, \text{ entao faz } u(i) = x(i)^{sup}, i = 1, \dots, n. \end{array} \right. \quad (3.7)$$

A Figura 12 apresenta o cruzamento exponencial para uma função de 7 variáveis.

3.1.1.3 Seleção

Denomina-se seleção o processo de produzir descendentes melhores. É calculado o custo do vetor experimental $U^{(q+1)}$ e então comparado com o custo do vetor $X_s^{(q)}$. Se o custo do vetor exponencial ser menor que o custo do vetor alvo, o próximo vetor alvo da próxima geração será o vetor experimental. Quando não, o vetor alvo da próxima geração será o vetor alvo atual (OLIVEIRA, 2006).

FIGURA 12 – Processo de cruzamento exponencial $\alpha = 2$, $\beta = 4$ e $\gamma = N_p$.

Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA, 2006)

$$\begin{cases} Se f(U^{(q+1)}) \leq f(X_s^{(q)}) \text{ entao } X_s^{(q+1)} = U^{(q+1)} \\ Se f(U^{(q+1)}) > f(X_s^{(q)}) \text{ entao } X_s^{(q+1)} = X_s^{(q)} \end{cases} \quad (3.8)$$

O procedimento apresentado na Equação 3.8, é finalizado através de algum critério de parada, sendo necessário estabelecer o número máximo de geração. Normalmente, o desempenho do algoritmo de ED é dependente da população N_p , da região de busca, da taxa de cruzamento e também do fator de perturbação F_p (OLIVEIRA, 2006), (LOBATO, 2008) e (MALAGOLI, 2016).

3.2 OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

A Otimização por Enxame de Partículas (PSO - do inglês *Particle Swarm Optimization*) tem por base a análise comportamental, como a forma de agir natural dos pássaros quando procuram alimentos (EBERHART; KENNEDY, 1995). Por analogia, quando a procura por alimento todo o indivíduo (partícula) adquire experiência dos membros do grupo (enxame)(POMEROY, 2003).

Além disso, é um algoritmo evolutivo, que simula o comportamento social, com foco em trabalhar uma população potencial de soluções em um espaço de busca, onde as soluções são submetidas a comparação e competição. Quando esse algoritmo é aplicado em problemas de otimização, encontra-se uma solução ótima global. Algumas das características marcantes do PSO é um algoritmo simples, fácil implementação e grande robustez.

Neste contexto, os indivíduos denominados partículas trafegam pelo espaço de busca multidimensional e neste processo ocasionalmente é encontrada uma solução. Os indivíduos em um enxame de partículas tem comportamento relativamente simples, onde um individuo tenta copiar o sucesso de seus vizinhos. Entretanto, alterações na

posição de uma partícula dentro do enxame são influenciadas pela experiência de seus vizinhos, desta forma, os comportamentos sociais guia as partículas estocasticamente a regiões promissoras descobertas no espaço de busca (ENGELBRECHT, 2007).

Deste modo, gera-se uma população inicial de partículas de forma aleatória em um espaço de busca, onde, cada partícula possui uma posição x_i e uma velocidade v_i . As partículas também possuem valores de aptidão, que se deslocam em um espaço do problema D dimensional, aprendendo com o histórico de informações de todas as partículas. Com a informação coletada no processo de busca, as partículas têm a tendência de deslocar-se em direção a melhor área durante o processo (CARVALHO, 2014). A expressão da velocidade v_i é apresentado na Equação 3.9.

$$v_i(t + 1) = v_i(t) + c_1 * r_1(x_{pbest} - x_i) + c_2 * r_2(x_{gbest} - x_i) \quad (3.9)$$

A Equação 3.9, é composta também pela função r_1 e r_2 que gera números aleatórios entre 0 e 1, pelos parâmetros de confiança c_1 e c_2 que indicam o quanto a partícula confia em sua experiência e pelos termos de aceleração $(x_{pbest_i} - x_i)$ que representam a distância entre a melhor posição atual da mesma partícula, e $(x_{gbest} - x_i)$, que representam a distância entre a melhor posição de todas as partículas do enxame e a posição da partícula i . As variáveis $v_i(t)$ e $x_i(t)$ são, respectivamente, a velocidade e a posição atualizada da partícula.

Desta maneira, para gerar uma nova posição, soma-se a posição atual com a nova velocidade adquirida, conforme:

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1) \quad (3.10)$$

No momento em que as partículas percorrem seu espaço de busca, geram novas informações, que são alocadas em vetores, como: $X_i = (x_1, x_2, x_3, x_4 \dots x_n)$. E para as velocidades das partículas, tem-se: $V_i = (v_1, v_2, v_3, v_4 \dots v_n)$. Para a melhor posição adquirida de cada partícula, obtém-se: $X_{Pbest_i} = (x_{pbest_1}, x_{pbest_2}, x_{pbest_3}, x_{pbest_4} \dots x_{pbest_n})$. Além de n indicar o tamanho do enxame (RIZZI et al., 2016).

O conjunto inicial de partículas x_i é gerado aleatoriamente e espelhado pelo espaço de busca (CARVALHO, 2014):

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, \quad i = 1, \dots, n \quad (3.11)$$

Na Equação 3.11 x_i^L e x_i^U possuem os limites inferior e superior respectivamente das posições das partículas, e n é o número de partículas. As dimensões das partículas são determinadas pelo problema a ser otimizado, de acordo com o número de variáveis de projeto (CARVALHO, 2014).

A estrutura base do pseudocódigo da PSO pode seguir a seguinte lógica:

- Criar uma população aleatória de partículas, denominada enxame;
- Inicializar população com posições e velocidades aleatórias;
- Repetir para cada partícula i ;
- Calcular a função objetivo $fitness$;
- Comparar o novo valor resultante da $fitness$ da partícula i . Se o valor for melhor que o valor do x_{pbest} da partícula i , atualizar o x_{pbest} com o novo valor da $fitness$;
- Comparar o novo valor resultante de $fitness$ da partícula i com o valor do x_{gbest} . Se o valor da $fitness$ da partícula i for melhor que o valor do x_{gbest} , atualizar o valor do x_{gbest} com este novo valor;
- Alterar a posição e a velocidade da partícula i até que a condição de parada seja satisfeita.

Durante o processo de exploração, a melhor posição chamada ($fitness$) encontrada entre todas as partículas do enxame, é representado pelo x_{gbest} . A Figura 13 mostra o fluxograma da PSO.

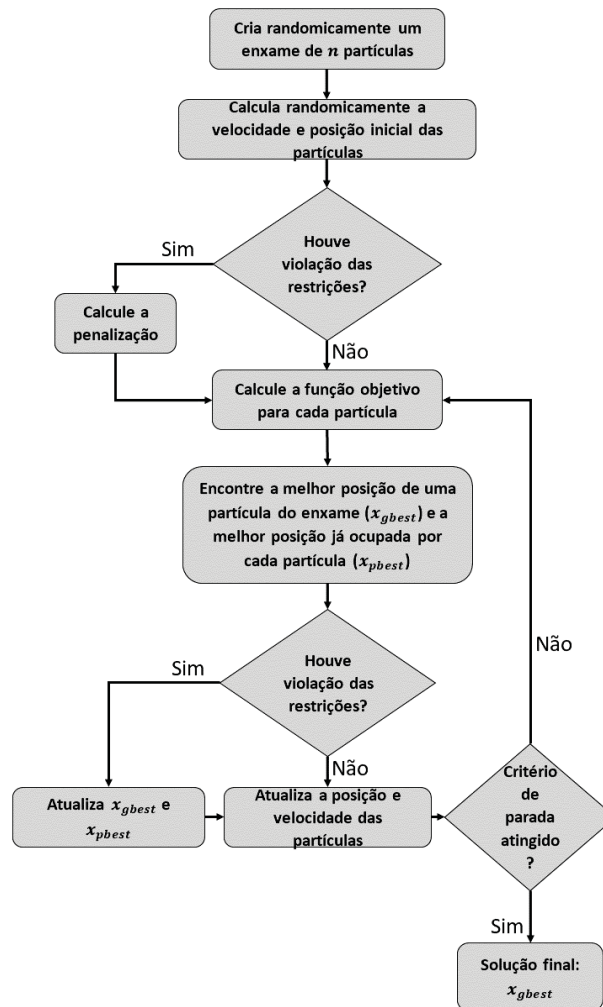
A seguir é apresentado os parâmetros, a inércia, o fator de aceleração e a topologia das partículas da otimização por enxame de partículas.

3.2.1 Parâmetros

A PSO básica possui um número relativamente pequeno de parâmetros a serem definidos pelo usuário. As constantes c_1 e c_2 são parâmetros que podem alterar drasticamente o comportamento do algoritmo, podendo provocar uma possível instabilidade. Estes parâmetros, geralmente, são definidos com o valor 2. Define-se como critério de parada o número máximo de iterações (MARCHIORI et al., 2017).

A partícula tem sua velocidade limitada por uma velocidade máxima denominada v_{max} . Se v_{max} é grande, facilita a exploração global, porém, se v_{max} for pequeno, facilita a exploração local. Segundo (SHI; EBERHART, 1998), a velocidade máxima pode ser eliminada do algoritmo, pois, apresenta problemas significativos. A velocidade máxima ideal é particular do problema e nenhuma regra específica é conhecida, sendo assim, dois novos parâmetros denominados inércia e fator de aceleração, foram introduzidos ao algoritmo com o propósito de amenizar tais problemas (CARVALHO, 2014).

FIGURA 13 – Fluxograma do processo de otimização utilizando PSO.



Fonte: Adaptado de (MARCHIORI et al., 2017)

3.2.2 Inércia

Com o desejo de realizar um controle mais fino, a exploração global e local reduzir a importância da v_{max} ou elimina completamente. Desta maneira, foi proposto um parâmetro denominado inércia w , que quando define-se o valor de forma devida, possibilita um equilíbrio entre a exploração global e a local, e resulta em uma quantidade de iterações menores para encontrar uma solução satisfatória (SHI; EBERHART, 1998). Deste modo, leva-se o parâmetro de inércia w na Equação 3.9, obtém-se a Equação 3.12:

$$v_i(t + 1) = w * v_i(t) + c_1 * r_1(x_{pbest} - x_i) + c_2 * r_2(x_{gbest} - x_i) \quad (3.12)$$

Como o vetor de velocidade é iniciado aleatoriamente, inicia-se o algoritmo com valores maiores para w que será reduzido gradativamente, possibilitando as partículas a encontrarem uma solução mais rápida. Além disso, na Equação 3.13 usa-se a variação

linear da inércia com valor inicial em 0,9 e final de 0,4 (CARVALHO, 2014), (EBERHART; SHI, 2000):

$$w_i = (w_{ini} - w_{fim}) \frac{(N - i)}{N} + w_{fim} \quad (3.13)$$

Onde:

w_{ini} é o valor inicial;

w_{fim} o valor final;

N é o número total de iterações;

i é a iteração atual.

Anos mais tarde (RATNAWEERA; HALGAMUGE; WATSON, 2004) aprimoraram a proposta de (EBERHART; SHI, 2000), fazendo os coeficientes c_1 e c_2 variarem ao longo da iteração. A formulação desta proposta são apresentadas nas Equações 3.14 e 3.15.

$$c_{1i} = (c_{1final} - c_{1inicial}) \frac{i}{N} + c_{1inicial} \quad (3.14)$$

$$c_{2i} = (c_{2final} - c_{2inicial}) \frac{i}{N} + c_{2inicial} \quad (3.15)$$

A alteração realizada nos coeficientes trouxeram ganhos no desempenho do algoritmo. Outras estratégias foram acrescentadas para ajustar o valor da inércia. Neste contexto, há uma estratégia muito utilizada que objetiva em melhorar a velocidade de convergência do algoritmo e refinar a busca no espaço (CHATTERJEE; SIARRY, 2006), estratégia presente na Equação 3.16:

$$w_i = \left[\frac{(N-i)^q}{N^q} \right] (w_{ini} - w_{fim}) + w_{fim} \quad (3.16)$$

Onde:

q é o expoente de não linearidade;

w_{ini} o valor inicial;

w_{fim} o valor final;

N é o número total de iterações;

i é a iteração atual.

3.2.3 Fator de aceleração

O fator de aceleração foi introduzido ao algoritmo com o objetivo de controlar a convergência das partículas e eliminar o parâmetro v_{max} (EBERHART; KENNEDY, 1995). O fator de aceleração é representado por k conforme apresentado na Equação 3.17:

$$k = \frac{2}{\phi - 2 + \sqrt{\phi^2 - 4\phi}} \quad (3.17)$$

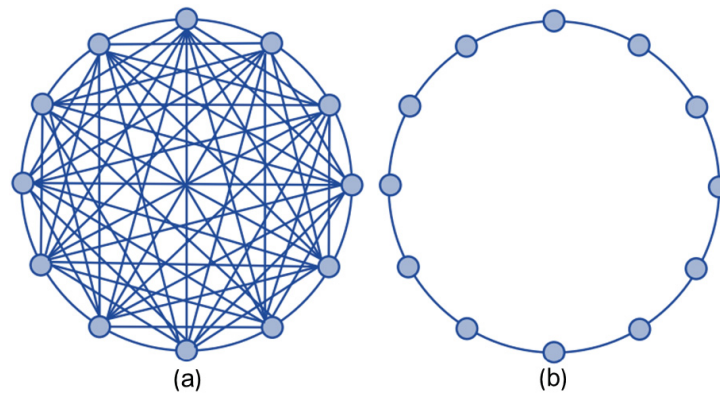
Sendo, $\phi > 4$. É habitual determinar ϕ com o valor de 4.1 e desta forma, k é aproximadamente 0,7298. Este fator pode ser implementado de diversas formas e uma das maneiras mais simples é multiplicando k por outros parâmetros (CARVALHO, 2014), como mostra a Equação 3.18:

$$v_i(t + 1) = k * (v_i(t) + c_1 * r_1(x_{pbest} - x_i) + c_2 * r_2(x_{gbest} - x_i)) \quad (3.18)$$

3.2.4 Topologia das partículas

Dentro da estrutura da PSO, o tópico topologia das partículas tem grande importância pelo fato de influenciar diretamente no desempenho do algoritmo, pois trata-se da comunicação entre as partículas. A topologia de comunicação determina como as partículas do enxame trocam informações entre si, o que influencia diretamente na avaliação da velocidade dessas partículas. Há duas topologias principais, sendo (global) e (local) 14. A Figura 14 mostra as duas topologias.

FIGURA 14 – Topologia das partículas: (a) Topologia global e (b) Topologia local.



Fonte: Adaptado de (CARVALHO, 2014)

A topologia global, também denominada *gbest* tem por características que todas as partículas são conectadas entre si. Possui uma convergência mais rápida, pelo motivo da informação da melhor posição ser difundida mais rapidamente entre todas as partículas do enxame. Entretanto, não garante qualidade na solução da função objetivo, pois há uma tendência maior das partículas prender-se em mínimos locais (CARVALHO, 2014).

Já na topologia local, também denominada *lbest* o enxame tem por característica estar organizado em formato de anel e geralmente cada partícula possui dois vizinhos. Nesta topologia a troca de informação entre as partículas é mais lenta do

que a global, porém traz uma melhor qualidade de solução da função objetivo em comparação com a global (CARVALHO, 2014).

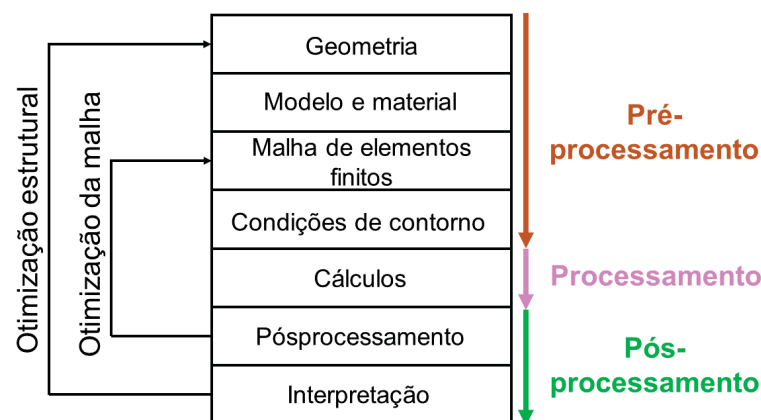
Por fim, destaca-se ainda que existem outros tipos de topologias que podem ser utilizadas como: roda, árvore, grafos, Von Neumann, entre outras. (CARVALHO, 2014).

4 VALIDAÇÃO PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um conjunto de diferentes métodos numéricos que aproximam a solução de problemas solucionados por Equações Diferenciais Parciais (EDP) ou Ordinárias (EDO) através da subdivisão da geometria em elementos menores conhecidos como elementos finitos, sendo a aproximação da solução exata dessas equações resolvida através interpolação de uma solução aproximada (LUZ, 2003), (MALAGOLI, 2016). Desta maneira, é aplicado em etapas o MEF começa com um Pré-processamento, onde os limites e propriedades são definidos, como a geometria, os materiais usados e a malha de elementos finitos. Além disso, durante o Processamento as equações são resolvidas, e por fim, no Pós-processamento os resultados são compilados gerando gráficos e valores analíticos.

O método propõe que o número infinito de variáveis desconhecidas, sejam substituídas por um número limitado de elementos de comportamento bem definido. Essas divisões podem apresentar diferentes formas, tais como a triangular, quadrilateral, entre outras, em função do tipo e da dimensão do problema. Como são elementos de dimensões finitas, são chamados de “elementos finitos” – termo que nomeia o método (COOK; PLESHA, 1989). A precisão do Método dos Elementos Finitos depende da quantidade de nós e elementos, do tamanho e dos tipos de elementos da malha. Ou seja, quanto menor for o tamanho e maior for o número deles em uma determinada malha, maior a precisão nos resultados da análise. A Figura 15 apresenta o diagrama de bloco das etapas do MEF.

FIGURA 15 – Diagrama de blocos das etapas do MEF.

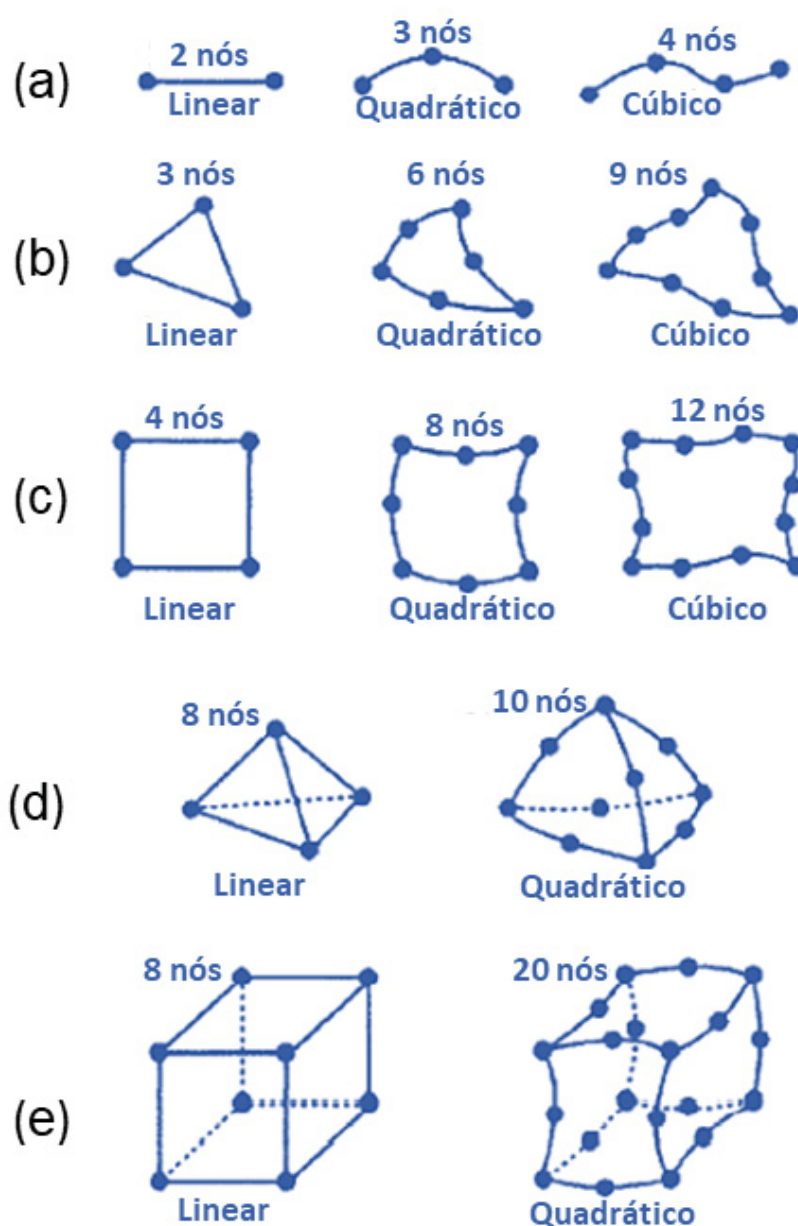


Fonte: Adaptado de (TSCIPTSCHIN, 2011).

4.1 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO

A aplicação do MEF é muito abrangente, dando grande liberdade sobre a discretização no domínio de estudo, sendo que diversos tipos de elementos podem ser executados. A escolha dos tipos de elementos que formam a malha que discretiza o domínio tem relação com o formato do domínio de estudo (KASPER, 2021) e (LUZ, 2003). Além disso, o usuário do MEF deve ser claro sobre qual tipo de elemento tende a reduzir o erro de discretização cometido pela malha (BASTOS; SADOWSKI, 2003). A Figura 16 apresenta alguns elementos possíveis em uma malha.

FIGURA 16 – Tipos de elementos possíveis em uma malha.

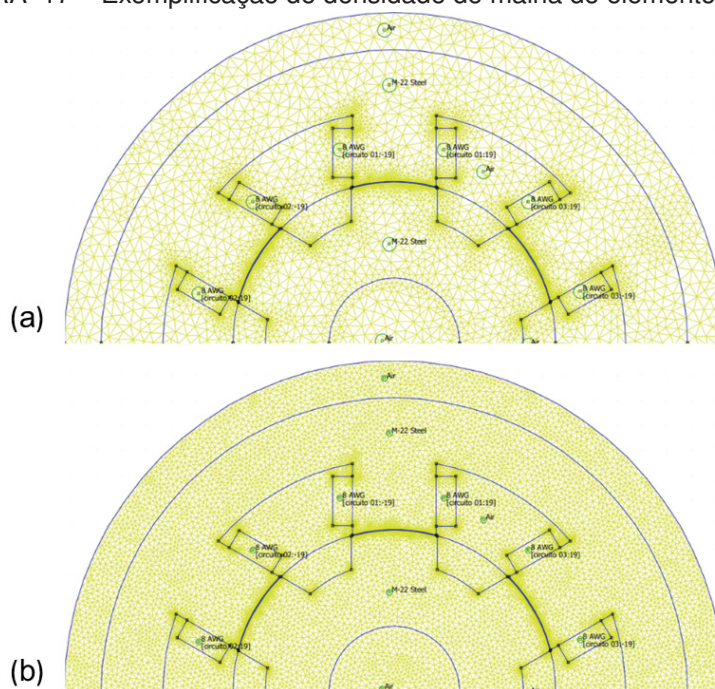


Nota-se elementos com diversas funções que melhora significativa a aproximação do domínio, sendo que, podem originar elementos curvos, permitindo um ajuste mais adequado. Em detalhes, descata-se da Figura 16:

- (a) elementos unidimensionais, consideram-se elementos lineares, quadráticos e cúbicos. Essas características estão relacionadas a função de interpolação quadráticas e cúbicas;
- (b) elementos bidimensionais, sendo o elemento nas formas triangulares;
- (c) elementos bidimensionais, sendo o elemento nas formas quadrilaterais;
- (d) elementos finitos volumétricos, conhecidos como elementos tetraédricos;
- (e) elementos finitos volumétricos, conhecidos como elementos cúbicos.

A solução aproximada entregue via MEF possui uma diferença em relação à solução exata, vinculada à discretização espacial. Para reduzir tal diferença, utilizam-se de elementos menores e formando uma malha de discretização mais densa, em compensação ocorre um aumento no custo computacional envolvido na solução (MALAGOLI, 2016) e (KASPER, 2021). A Figura 17(a) mostra uma malha de elementos finitos lineares na forma triangular com área maior, porém, menor quantidade quando comparado a Figura 17 (b). Já a Figura 17(b) apresenta as mesmas formas triangulares, porém, menores e em maior quantidade sendo uma malha mais densa.

FIGURA 17 – Exemplificação de densidade de malha de elementos finitos.



Fonte: O autor (2022).

Os valores de densidade de fluxo magnético são mais confiáveis quando a modelagem é feita através da malha da Figura 17(b). Com a malha mais densa, a solução em cada elemento fica melhor, fazendo com que a solução do MEF seja mais próxima da solução exata.

4.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO

As condições de contorno são aplicadas na fronteira do domínio, que garante a singularidade da solução. Existem três tipos de condições de contorno que são utilizadas (LUZ, 2003), (MALAGOLI, 2016), (KASPER, 2021) e (BASTOS; SADOWSKI, 2003):

- *Dirichlet*: conhecida como condição de contorno fixa, delimita a fronteira do domínio onde as variáveis de estudo nos nós são conhecidas e impostas à formulação do problema, reduzindo a dimensão das equações algébricas;
- *Periodicidade*: aplicada em regiões onde há repetição da estrutura, em caso de máquinas elétricas trifásicas simétricas, podem ser encontradas para cada polo do dispositivo;
- *Neumann*: conhecida como condição de contorno de simetrias, não atribui valores às variáveis dos nós, porém, fornecem a direção dos campos eletromagnéticos.

4.3 EQUAÇÕES DE MAXWELL

Os fenômenos eletromagnéticos são descritos por equações clássicas de *Maxwell*, as mesmas fazem parte de um sistema de (EDP) que conectam os fenômenos magnéticos aos fenômenos elétricos e que unificam todos os princípios do eletromagnetismo (MALAGOLI, 2016), são dadas na forma diferencial pelas Equações 4.1 a 4.4:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (4.1)$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (4.2)$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (4.3)$$

$$\text{div } \mathbf{D} = \rho_v \quad (4.4)$$

Onde:

\mathbf{H} é o campo magnético (A/m);

\mathbf{J} é a densidade superficial de corrente (A/m^2);

\mathbf{D} é a indução elétrica (C/m^2);

\mathbf{B} é a indução magnética (T);

\mathbf{E} é o campo elétrico (V/m);

ρ_v é a densidade volumétrica de carga elétrica (C/m^3).

As Equações 4.1, 4.2, 4.3 e 4.3 são os modelos genéricos da *Lei de Ampère*, *Lei de Gauss Magnética*, *Lei de Faraday* e a *Lei de Gauss Elétrica*. Juntas representam os modelos matemáticos do campo magnético (LUZ, 2003) e (MALAGOLI, 2016). Há também equações construtivas, que dão forma ao comportamento dos campos elétricos e magnéticos no elemento (BASTOS; SADOWSKI, 2003). Sendo das Equações 4.5 a 4.7:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} \quad (4.5)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (4.6)$$

$$\mathbf{J} = \sigma_0 \mathbf{E} \quad (4.7)$$

Onde:

ε_0 é a permissividade elétrica do material (F/m);

μ_0 é a permeabilidade magnética do material ($T.m/A$);

σ_0 é a condutividade elétrica do material ($1/\Omega.m$).

4.3.1 Modelagem magnetostática

O presente modelo estuda os fenômenos magnéticos em regime estacionário. As equações base de *Maxwell* e a lei de comportamento são (LUZ, 2003).

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (4.8)$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (4.9)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (4.10)$$

Nas Equações 4.8, 4.9 e 4.10 o campo elétrico passa a ser conservativo e o campo magnético é invariante no tempo, então, as fontes geradoras dos campos

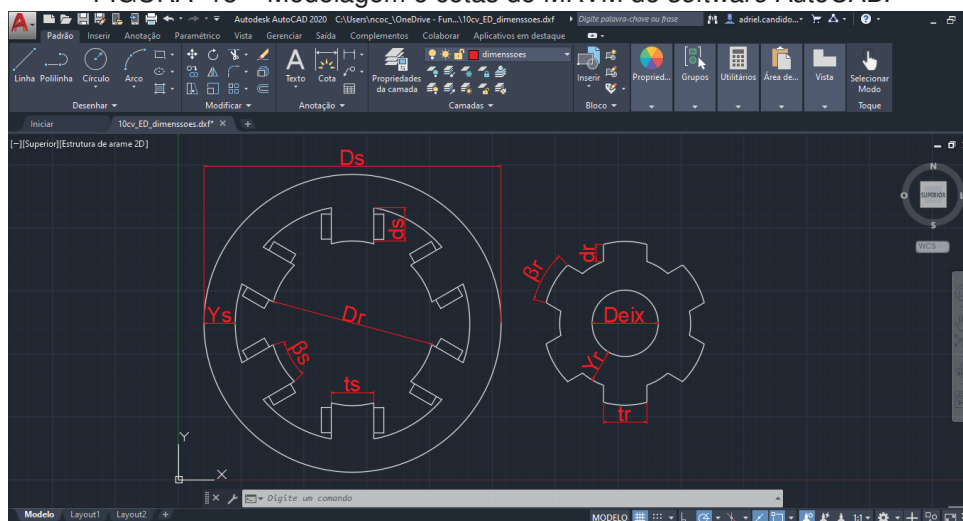
magnetostático são as correntes elétricas estacionárias ou campos magnéticos com origem em materiais magnetizados (MALAGOLI, 2016).

4.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A construção do projeto do MRVM foi realizado através do *AutoCAD 2020* na versão estudante, sendo um *software* do tipo (CAD) *Computer Aided Design*, criado e comercializado pela *Autodesk* tendo sua primeira versão em 1982. Além disso, para a simulação e análise dos resultados foi usado o *software* gratuito FEMM (*Finite Element Method Magnetics*) na versão 4.2 criado por (MEEKER, 2014), onde traz um conjunto de programas para soluções de problemas de baixa frequência em domínios bidimensionais.

Inicialmente, o usuário deve conhecer os parâmetros do projeto do MRVM. Na Figura 18 é mostrado o MRVM 6x6 com as cotas modelado no *software* AutoCAD.

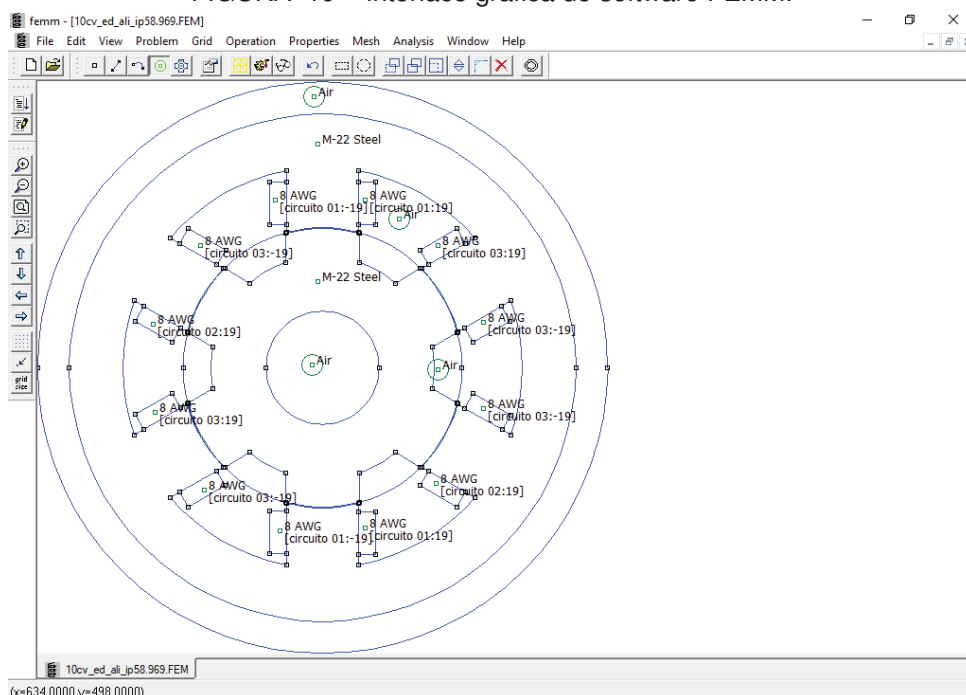
FIGURA 18 – Modelagem e cotas do MRVM do *software* AutoCAD.



Fonte: O autor (2022).

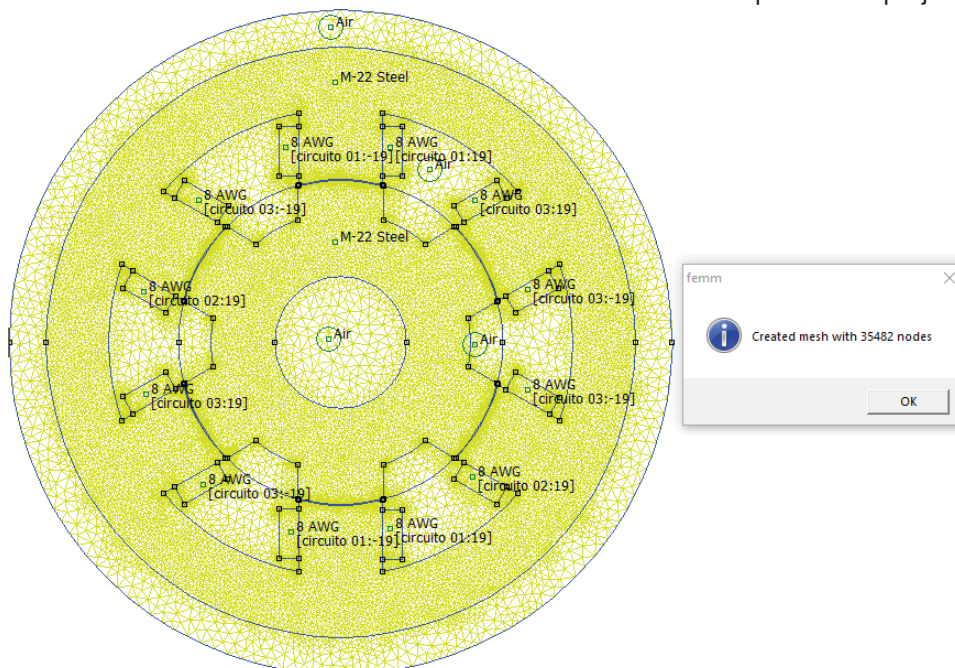
Assim que o projeto do MRVM for finalizado, deve-se salvar como arquivo *.dxf* (*Drawing Interchange Format*) que é uma representação binária ou ASCII de um arquivo de desenho. Subsequentemente, o arquivo *.dxf* gerado é importado para o *software* FEMM para acrescentar dados ao motor como: materiais, circuitos, profundidade, frequência, espiras da bobina, condições de fronteira e discretização do domínio.

A Figura 19 apresenta a interface gráfica de edição do *software* FEMM. Desta maneira, o tamanho da malha de elementos finitos pode ser definida pelo usuário ou de forma automática pelo programa. Nas análises apresentadas neste trabalho, onde ficou um tamanho maior no material "Ar" e no eixo do motor, onde a permeabilidade magnética desses materiais é baixa. Além disso, não influenciam na atividade do MRVM, assim, elementos maiores aumentam a velocidade do processo da simulação, diminuindo o domínio computacional usado.

FIGURA 19 – Interface gráfica do *software* FEMM.

Fonte: O autor (2022).

Na Figura 20 observa-se que a malha de tamanho menor foi atribuído às bobinas, estator e rotor, sendo estes elementos condutores e o foco das análises.

FIGURA 20 – Malha de elementos finitos do *software* FEMM aplicada no projeto.

Fonte: O autor (2022).

Portanto, forma elementos menores, resultando em maior precisão nos resultados. Em pontos críticos do problema, ou regiões onde a geometria é mais estreita, o FEMM automaticamente torna os elementos menores, para uma análise com mais detalhes (MAMEDE, 2016).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O projeto do MRV referido neste trabalho, foi desenvolvido a partir de fórmulas matemáticas, levando em consideração sua geometria para o desenvolvimento da solução ótima. Deste modo, ocorre também que para as restrições elétricas e para o dimensionamento da máquina foi usado restrições de igualdade e desigualdade variando com os parâmetros definidos.

5.1 METODOLOGIA DE PROJETO

Esta seção tem como foco principal apresentar os procedimentos estabelecidos para o desenvolvimento deste trabalho.

Com o objetivo de trazer mais clareza aos procedimentos utilizados, os passos do processo aplicados são separados em tópicos sequencialmente.

- Inicialmente foi utilizado um motor indutivo de referência escolhido de forma aleatória dentro das potências viáveis para aplicação de um motor monofásico conforme apresenta a Figura 21.

FIGURA 21 – Motor de referência para o 2° e 3° estudo de aplicação do MRVM.

60Hz - 4 Polos

Potência		Carcaça	rpm	Corrente Nominal In (a) 220V	Conjugado Nominal (kgf.m)	Rendimento η (%)	Fator de Potência (Cos ϕ)	Fator de Serviço
cv	kW					Potência nominal 100%		
10	7,5	132M	1770	51,1	4,10	81,9	0,80	1,15

Fonte: Adaptado de Nova Motores

Os dados extraídos do motor de referência para início do projeto são: potência de saída, Rotações por Minuto (RPM), conjugado nominal, número de fases e rendimento.

- Para o desenvolvimento do projeto convencional foram definidos alguns parâmetros pelo projetista, sendo: número de polos no estator, número de polos no rotor, material utilizado nas chapas do estator e do rotor;
- Com os dados iniciais vindos do motor de indução de referência mais os dados do projetista, iniciou-se a etapa de cálculo das dimensões do MRVM convencional. Para os cálculos foi desenvolvido um algoritmo onde inseriu-se os dados iniciais como constantes e aplicou-as nas equações citadas no seção 2.4, apresentando como resposta as dimensões necessárias para o projeto do MRVM convencional.

- O projeto do MRVM ganhou forma após o conhecimento das dimensões. Foi desenhada as chapas do estator e do rotor do MRVM no *software AutoCAD* e gerou-se um arquivo como apresentado na seção 4.4;
- O arquivo gerado é importado para o *software FEMM*, então é adicionado informações ao projeto, como citado na seção 4.4 do presente trabalho;
- Após a simulação, coletou-se os dados gerados para análise e criação de gráficos, afim de estudar e avaliar o comportamento dos motores;

Até a presente etapa, relatou-se os passos para gerar um projeto convencional do MRVM. As próximas etapas será de como obter o projeto ótimo do MRVM.

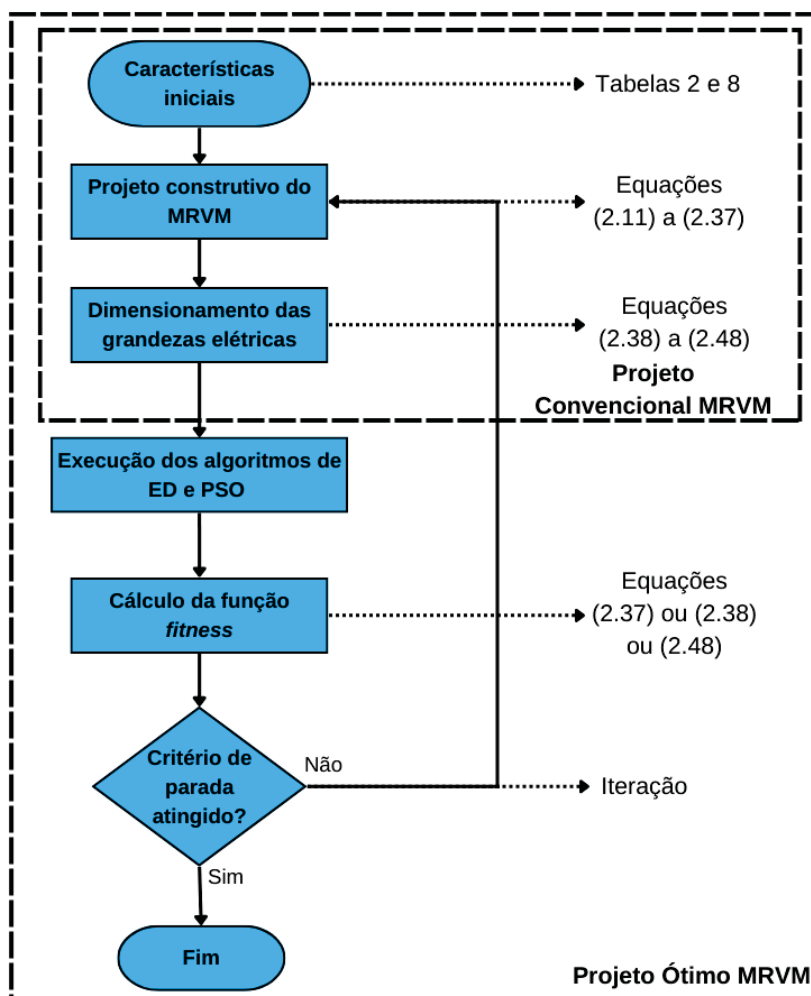
- Com o projeto convencional do MRVM finalizado, o foco passa a ser o projeto ótimo do MRVM. Inicialmente desenvolveu-se os algoritmos evolutivos (ED e PSO);
- Acrescentou-se aos algoritmos evolucionários o algoritmo das equações das dimensões convencionais;
- Definiu-se a função objetivo dos algoritmos evolucionários;
- Para os três estudos de aplicação, definiu-se os vetores sendo iguais as variáveis que atuam diretamente nas equações das funções objetivos, buscando melhores resultados;
- Executou-se os algoritmos evolutivos de ED e PSO cinco vezes cada e tirou a média dos resultados obtidos, sendo os parâmetros e da função objetivo. Desta forma aumentou-se a fidelidade dos resultados;
- A média encontrada dos resultados dos algoritmos de ED e PSO são inseridas como constantes no algoritmo das equações das dimensões e então executou-se o algoritmo que retornou como resposta as dimensões para o projeto ótimo.
- Com as dimensões dos projetos ótimos encontradas a sequencia do processo é igual ao do motor convencional, onde é projetado via *software AutoCAD* e então é analisado e validado via *software FEMM*.

De forma simplista e objetiva, a Figura 22 apresenta o fluxograma do projeto do MRVM.

5.2 SOLUÇÃO DOS PROJETOS DO MRVM

A abordagem dos problemas foram separadas em três estudos de aplicação, sendo:

FIGURA 22 – Fluxograma de projeto do MRVM.



Fonte: O autor (2022).

- 1ª Aplicação: Construção do MRVM 6x6 com sua potência de saída $P_s \cong 6875(W)$ e otimização mono-objetiva de minimização das perdas totais no cobre $P_{totalis}$ via ED e PSO;
- 2ª Aplicação: Construção do MRVM 6x6 com sua potência de saída $P_s \cong 7500(W)$ e otimização mono-objetiva da maximização do rendimento η via ED e PSO.
- 3ª Aplicação: Construção do MRVM 6x6 com sua potência de saída $P_s \cong 7500(W)$ e otimização mono-objetiva da minimização do volume ativo V_a via ED e PSO.

5.2.1 Parametrização dos algoritmos evolucionários

Para os três estudos de aplicação foram realizadas as mesmas parametrizações de execução dos algoritmos de ED e também para o algoritmo de PSO.

- Parâmetros do algoritmo de ED.
- Parâmetros do algoritmo de PSO.

TABELA 2 – Parâmetros utilizados no algoritmo de ED.

Parâmetro	Valor
Tamanho da população	100
Número de iterações	50
Taxa de perturbação)	0,8
Probabilidade de cruzamento	0,8
Estratégia	7

Fonte: O autor (2022)

TABELA 3 – Parâmetros utilizados no algoritmo de PSO.

Parâmetro	Valor
Tamanho da população	100
Número de iterações	50
Coefficiente de inércia	1
Relação de amortecimento do coeficiente de inércia	0.99
Coefficiente de aceleração pessoal	1,5
Coefficiente de aceleração social	2

Fonte: O autor (2022)

5.3 1º ESTUDO DE APLICAÇÃO: MINIMIZAÇÃO DAS PERDAS TOTAIS NO COBRE

Este estudo de aplicação tem como Função Objetivo (FO) a Equação 2.48, onde minimizou as perdas totais de cobre no motor elétrico, resultando no melhor valor viável.

5.3.1 Procedimentos Metodológicos

As características iniciais para o projeto do MRVM deste estudo de aplicação são expressas na Tabela 4.

TABELA 4 – Características iniciais para o projeto do MRVM convencional.

Parâmetro	Valor
Potência (kW)	6,875
Velocidade nominal (rpm)	1760
Corrente nominal (A)	31,25
Corrente de pico (A)	53,343
Tensão nominal (V)	220
Conjugado (N.m)	29,929
Material magnético do núcleo	M22
Número de polos estator	6
Número de polos rotor	6
Densidade de Fluxo Magnético (T)	2,20

Fonte: O autor (2022)

Já a Tabela 5 mostra as variáveis, os parâmetros e os limites do vetor para minimizar a FO expressa pela Equação 5.1 do MRVM. Deste modo, são usados os

algoritmos de ED e PSO. Por fim, serão comparados os resultados entre os dois algoritmos nas mesmas condições.

$$FO = \text{Minimizar}\{P_{\text{totais}}(X)\} \quad (5.1)$$

TABELA 5 – Parâmetros e limites.

Parâmetros	Mínimo	Máximo
$Dr (m)$	0,1	0,2
$Ds (m)$	0,20	0,23
$Deix (m)$	0,03	0,05
$Ys (m)$	0,014	0,020
$Yr (m)$	0,016	0,022
$g (m)$	0,0003	0,0005

Fonte: O autor (2022)

5.3.2 Análises dos Resultados

As Tabelas 6 e 7 apresentam os resultados dos valores de mínimos e máximos das variáveis, que deu base para a execução do algoritmo gerando cinco resultados para ED e para PSO, respectivamente. Neste contexto, realizou-se a média dos parâmetros do vetor encontrados em cada algoritmo e projetou-se o MRVM ótimo de ED e PSO. Além disso, são mostrados os resultados obtidos com os algoritmos ED e PSO para diferentes sementes (S) e com a média dos resultados (M).

TABELA 6 – Resultados obtidos usando o algoritmo ED.

S	Dr	Ds	$Deix$	Ys	Yr	g	FO
1	0,1000	0,2272	0,0321	0,0161	0,0167	0,0003	36,8545
2	0,1000	0,2210	0,0365	0,0186	0,0200	0,0003	36,8535
3	0,1000	0,2136	0,0349	0,0153	0,0181	0,0003	36,8557
4	0,1000	0,2154	0,0375	0,0173	0,0193	0,0003	36,8589
5	0,1000	0,2226	0,0326	0,0184	0,0177	0,0003	36,8532
M	0,1000	0,2200	0,0347	0,0171	0,0184	0,0003	36,8552

Fonte: O autor (2022)

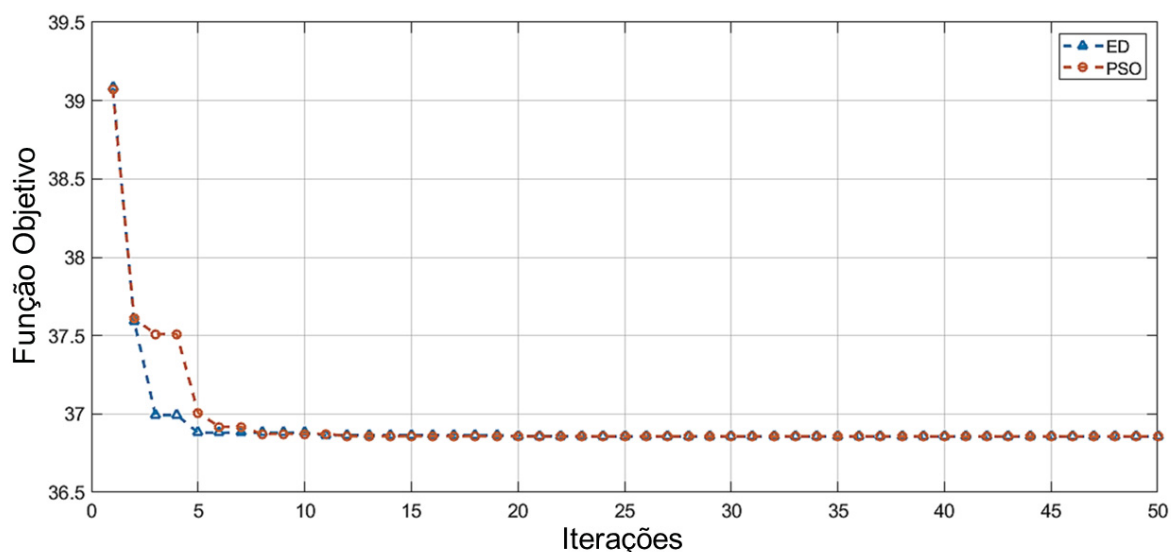
TABELA 7 – Resultados obtidos usando o algoritmo PSO.

S	Dr	Ds	$Deix$	Ys	Yr	g	FO
1	0,1000	0,2093	0,0341	0,0171	0,0165	0,0003	36,8521
2	0,1000	0,2229	0,0380	0,0195	0,0179	0,0003	36,8596
3	0,1000	0,2227	0,0389	0,0179	0,0191	0,0003	36,8582
4	0,1000	0,2138	0,0354	0,0200	0,0165	0,0003	36,8546
5	0,1000	0,2300	0,0416	0,0191	0,0171	0,0003	36,8558
M	0,1000	0,2197	0,0376	0,0187	0,0174	0,0003	36,8561

Fonte: O autor (2022)

Comparando as Tabelas 6 e 7, percebe-se que os resultados dos algoritmos são muito parecidos. Como a Função é mono-objetivo, considera-se um estudo relativamente simples. A Figura 23 apresenta o avanço dos valores médios das iterações encontrados da Função Objetivo através dos dois algoritmos.

FIGURA 23 – Valor da função objetivo de perdas totais ao longo das iterações nos algoritmos de ED e PSO.



Fonte: O autor (2022).

Desta maneira, os parâmetros para o projeto ED são provenientes da média dos valores gerados das simulações, da mesma forma ocorre-se no algoritmo PSO. A decisão de usar o valor médio foi pelo fato de cada iteração da FO apresentar valores diferentes, porém, aproximados. Então, os valores das variáveis ótimas são substituídos no algoritmo principal das dimensões (motor convencional), e assim, encontraram-se os novos valores das variáveis construtivas do MRVM. Portanto, projetou-se e simulou-se o MRVM através do *software* FEMM usando o método dos elementos finitos. A Tabela 8 apresenta os valores dos parâmetros do MRVM nos três projetos (Convencional, ED e PSO) advindos das simulações.

Para analisar as perdas totais no cobre utilizou-se o *software* gratuito *Finite Element Method Magnetics* (FEMM), onde após a simulação do MRVM, foram selecionadas as bobinas e posteriormente, habilitou-se a função de perdas resistivas como mostrado na Figura 24, ou seja, a seleção das bobinas do motor elétrico (área verde).

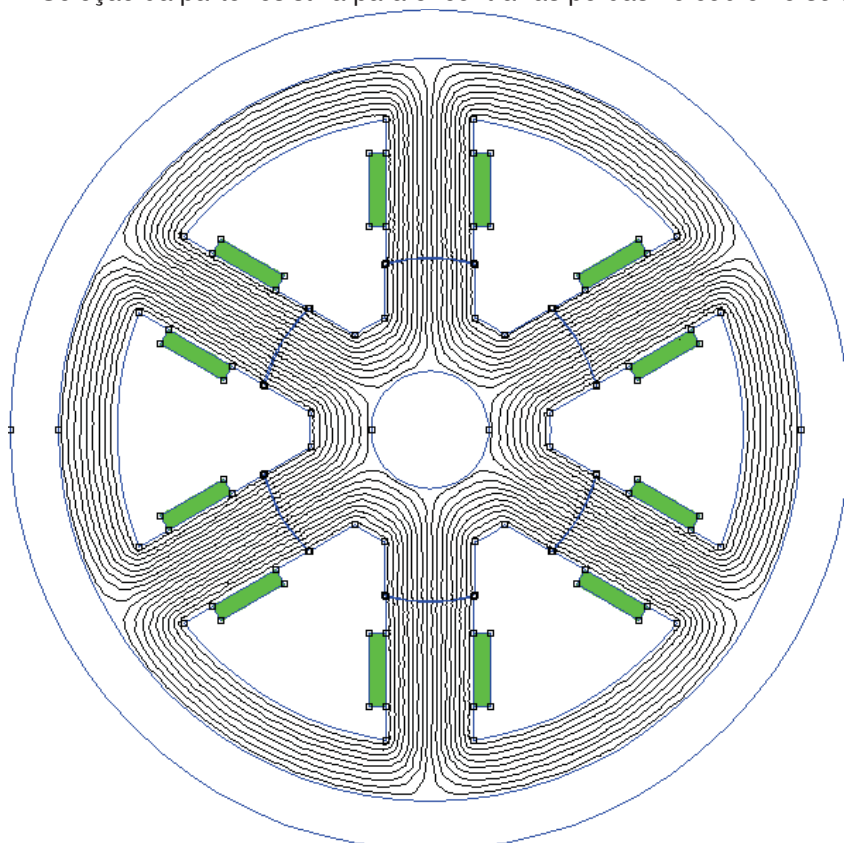
Assim, analisou-se a perda resistiva total que foi definida como a função objetivo deste trabalho, percebe-se que tanto o algoritmo de ED quanto de PSO atingiram o mesmo valor ótimo de 33,294 (W) para a corrente de saturação de 26,69 (A). No entanto, ao simular com os parâmetros definidos pelos algoritmos, verificou-se que

TABELA 8 – Parâmetros do motor Convencional, ED E PSO.

Parâmetros	Convencional	ED	PSO
Diâmetro Externo(mm)	220,0	220,0	219,77
Diâmetro do Rotor(mm)	118,36	100,0	100,0
Diâmetro do Eixo(mm)	49,90	34,70	37,62
Comprimento(mm)	170,00	143,63	143,63
Número Espiras	19	19	19
Culatra do Estator(mm)	16,93	17,10	18,70
Culatra do Rotor(mm)	18,83	18,40	17,40
Largura do Polo Estator(mm)	30,78	26,04	26,65
Largura do Polo Rotor(mm)	31,34	26,64	26,65
Altura do Polo Estator(mm)	35,19	44,24	45,56
Altura do Polo Rotor(mm)	15,39	14,09	15,26
Ângulo do Polo Estator(graus)	30	30	30
Ângulo do Polo Rotor(graus)	30,75	30,91	30,91
Entreferro(mm)	0,30	0,32	0,36

Fonte: O autor (2022)

FIGURA 24 – Seleção da parte resistiva para encontrar as perdas no cobre no *software* FEMM.



Fonte: O autor (2022).

os resultados de PSO estão mais próximos do encontrado analiticamente conforme apresentado na Tabela 9.

O MRVM do projeto convencional e também de ED e PSO mantém seu funcionamento conhecido e adequado. Além disso, o material usado nas chapas do motor

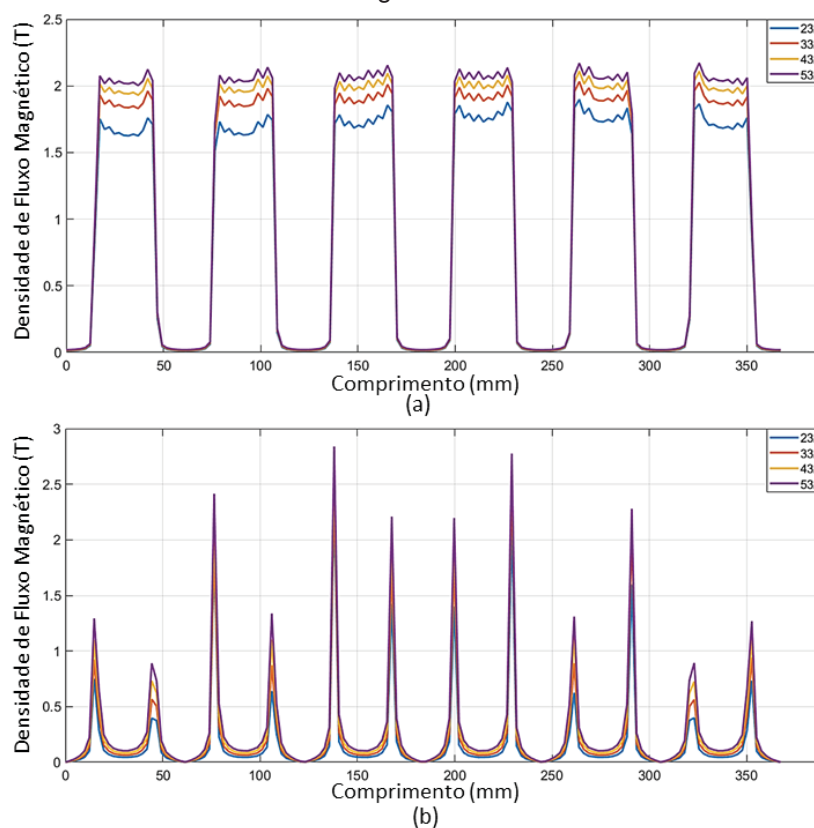
TABELA 9 – Valores das perdas resistivas totais para corrente de saturação.

Projeto	Cálculo Analítico	Simulado	Erro
Motor ED	41,92	41,10	1,95%
Motor PSO	41,92	41,13	1,89%
Motor Convencional	49,62	48,65	1,95%

Fonte: O autor (2022)

foi o aço-silício M22 que satura em torno de $2.2 (T)$. Nas Figuras 25, 26 e 27, estão presentes o valor das densidades de fluxo magnético no entreferro para os projetos convencional, ED e PSO nas posições (a) alinhada e (b) desalinhada dos motores projetados, respectivamente. As correntes aplicadas são: 23A, 33A, 43A e 53A.

FIGURA 25 – Densidade de fluxo magnético no entreferro do MRVM convencional.

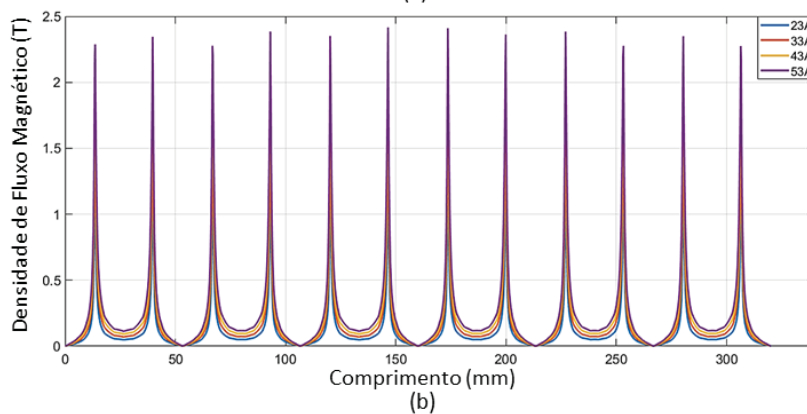
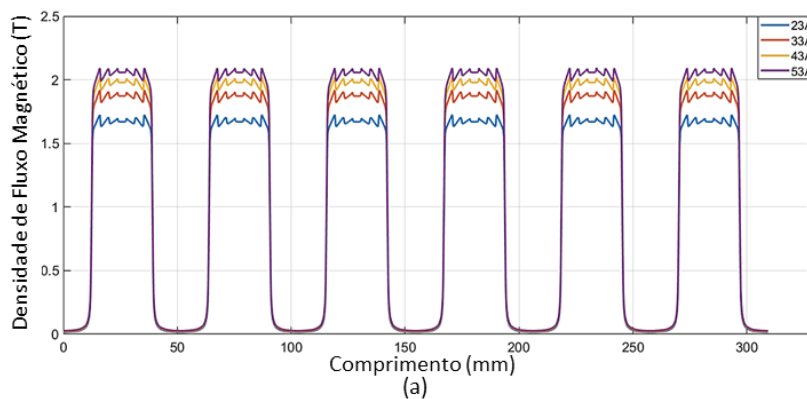


Fonte: O autor (2022).

5.3.3 Considerações Finais

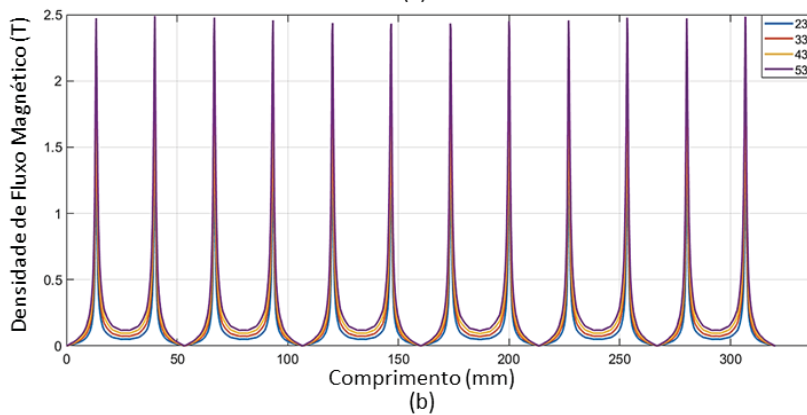
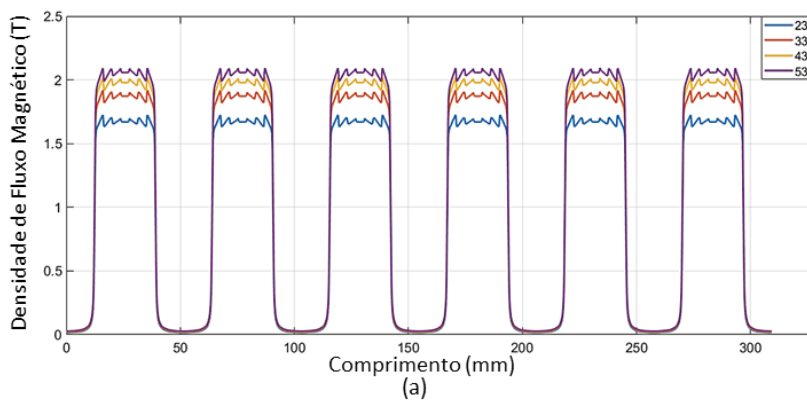
Nota-se que o valor da densidade de fluxo magnético do MRVM convencional e dos algoritmos ED e PSO foram semelhantes. Entretanto, na posição de desalinhamento o algoritmo PSO resultou em picos mais elevados. Diante dos resultados apresentados, constatou-se que o algoritmo de ED obteve as perdas totais menor que o algoritmo PSO em ordem de $0,077 (W)$. Sendo assim, a ED mostrou mais eficaz para a minimização da função objetivo. Portanto, o erro percentual em ED foi minimamente menor que a de PSO.

FIGURA 26 – Densidade de fluxo magnético no entreferro do MRVM usando ED.



Fonte: O autor (2022).

FIGURA 27 – Densidade de fluxo magnético no entreferro do MRVM usando PSO.



Fonte: O autor (2022).

5.4 2º ESTUDO DE APLICAÇÃO: MAXIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A Função Objetivo (FO) é dada pela Equação 2.38, neste estudo de aplicação, onde será maximizada a eficiência de um MRVM 6x6 com a potência de saída $P_s \cong 7500W$. Desta forma, são usados algoritmos de ED e PSO para manter viável sua construção e capacidade de operação.

5.4.1 Procedimentos Metodológicos

As características iniciais para o projeto do MRVM deste estudo de aplicação estão expressas na Tabela 10. Já a Tabela 11 mostra as variáveis, os parâmetros e os limites do vetor para minimizar a FO expressa pela Equação 5.2 do MRVM. Deste modo, são usados os algoritmos de ED e PSO. Por fim, serão comparados os resultados entre os dois algoritmos nas mesmas condições.

TABELA 10 – Características iniciais para o projeto do MRVM convencional.

Parâmetro	Valor
Potência (kW)	7,5
Velocidade nominal (rpm)	1770
Corrente nominal (A)	41,62
Corrente de pico (A)	71,05
Tensão nominal (V)	220
Conjugado (N.m)	40,207
Material magnético do núcleo	M22
Número de polos estator	6
Número de polos rotor	6
Densidade de Fluxo Magnético (T)	2,20

Fonte: O autor (2022)

$$FO = \text{Maximizar}\{\eta(X)\} \quad (5.2)$$

TABELA 11 – Variáveis, parâmetros e limites.

Parâmetros	Mínimo	Máximo
$J_c (A/mm^2)$	3	6
$Deix (m)$	0,040	0,060
$Ys (m)$	0,015	0,030
$Yr (m)$	0,018	0,032
$g (m)$	0,0003	0,0004
$P_e (m)$	7600	10000

Fonte: O autor (2022)

5.4.2 Análises dos Resultados

Aplicando os algoritmos evolutivos foi definido uma estratégia para apresentar resultados mais precisos. Basicamente, executou-se o algoritmo cinco vezes e realizou-se a média dos vetores e das FOs apresentadas nas Tabelas 12 e 13.

TABELA 12 – Resultados dos vetores nos testes com o algoritmo ED.

S	J_c	$Deix$	Y_s	Y_r	g	P_e	FO
1	6,0000	0,04000	0,02907	0,02666	0,000352	7600	0,98683
2	5,0650	0,05090	0,01956	0,03085	0,000309	7600	0,98686
3	3,0000	0,05543	0,02568	0,03026	0,000346	7600	0,98684
4	4,5459	0,05945	0,02141	0,01800	0,000351	7600	0,98684
5	5,4390	0,05742	0,02860	0,02287	0,000309	7600	0,98681
M	4,8100	0,05264	0,02486	0,02572	0,000333	7600	0,986836

Fonte: O autor (2022)

TABELA 13 – Resultados dos vetores nos testes com o algoritmo PSO.

S	J_c	$Deix$	Y_s	Y_r	g	P_e	FO
1	4,2535	0,05444	0,02035	0,02547	0,000378	7600	0,98687
2	5,8608	0,05315	0,02180	0,02881	0,000321	7600	0,98689
3	4,7594	0,05265	0,01858	0,02692	0,000319	7600	0,98686
4	4,7194	0,04822	0,02330	0,02096	0,000363	7600	0,98689
5	5,6530	0,04032	0,02163	0,02344	0,000325	7600	0,98684
M	4,8473	0,049756	0,021132	0,025120	0,000341	7600	0,98687

Fonte: O autor (2022)

As Tabelas 12 e 13 apresentam as soluções executadas, que nada mais é que a quantidade de vezes que os algoritmos de ED e PSO foram executados respectivamente. Os vetores estão atribuídos de $x(1) \dots x(6)$, FO é a função objetivo resultante e "M" é a média dos resultados dos 5 testes.

Após a execução dos algoritmos de ED e PSO, incluiu-se no algoritmo de dimensionamento do MRVM como constantes para gerar todos os parâmetros necessários para a construção. Vale ressaltar que os vetores definidos como constantes são parâmetros necessários para a construção do MRVM. A Tabela 14 apresenta os parâmetros construtivos definidos dos projetos do MRVM (convencional, ED e PSO).

A Figura 28 mostra a dimensão do MRVM convencional, ou seja, antes das otimizações. Já as Figuras 29 e 30 apresentam as dimensões após otimização por ED e PSO, respectivamente. Além disso, o MRVM convencional é o que tem maior dimensão e o MRVM ótimo usando ED é o que apresenta menores dimensões.

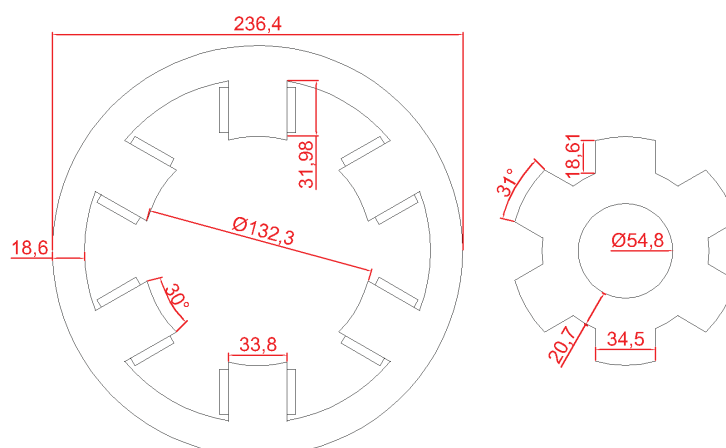
As Figuras 31, 32 e 33 mostram as densidades de fluxo magnético no entreferro do MRVM para o motor convencional, ED e PSO, respectivamente. Além disso, destacam-se as posições dos rotores (a) alinhado e (b) desalinhado. Por fim, as correntes aplicadas são: $i_{ef} = 21,72$ A, $i_n = 34,54$ A e $i_p = 58,96$ A.

TABELA 14 – Parâmetros Convencional, ED E PSO.

Parâmetros	Convencional	ED	PSO
Diâmetro Externo(mm)	236,4	236,4	236,4
Diâmetro do Rotor(mm)	132,3	130,65	132,17
Diâmetro do Eixo(mm)	54,8	52,64	49,78
Comprimento(mm)	186,8	186,8	186,8
Número Espiras	17	19	19
Culatra do Estator(mm)	18,6	24,86	21,13
Culatra do Rotor(mm)	20,7	25,73	25,12
Largura do Polo Estator(mm)	33,8	33,8	33,8
Largura do Polo Rotor(mm)	34,5	34,5	34,5
Altura do Polo Estator(mm)	31,98	26,47	29,48
Altura do Polo Rotor(mm)	18,61	13,56	16,51
Ângulo do Polo Estator(graus)	30	30	30
Ângulo do Polo Rotor(graus)	31	31	31

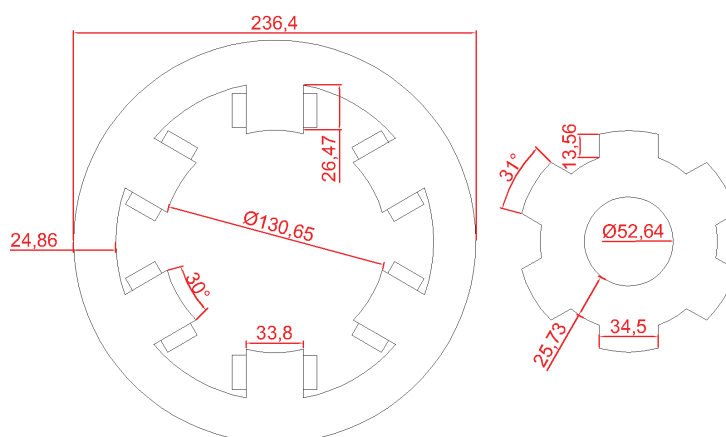
Fonte: O autor (2022)

FIGURA 28 – Dimensões antes da otimização usando Motor Convencional.



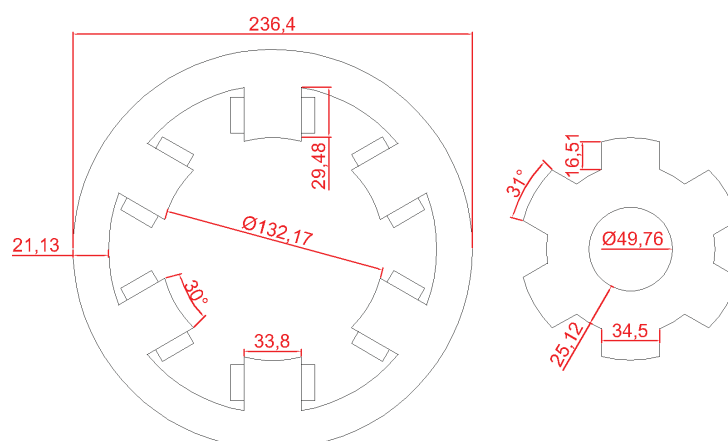
Fonte: O autor (2022).

FIGURA 29 – Dimensões após otimização usando Motor ED.



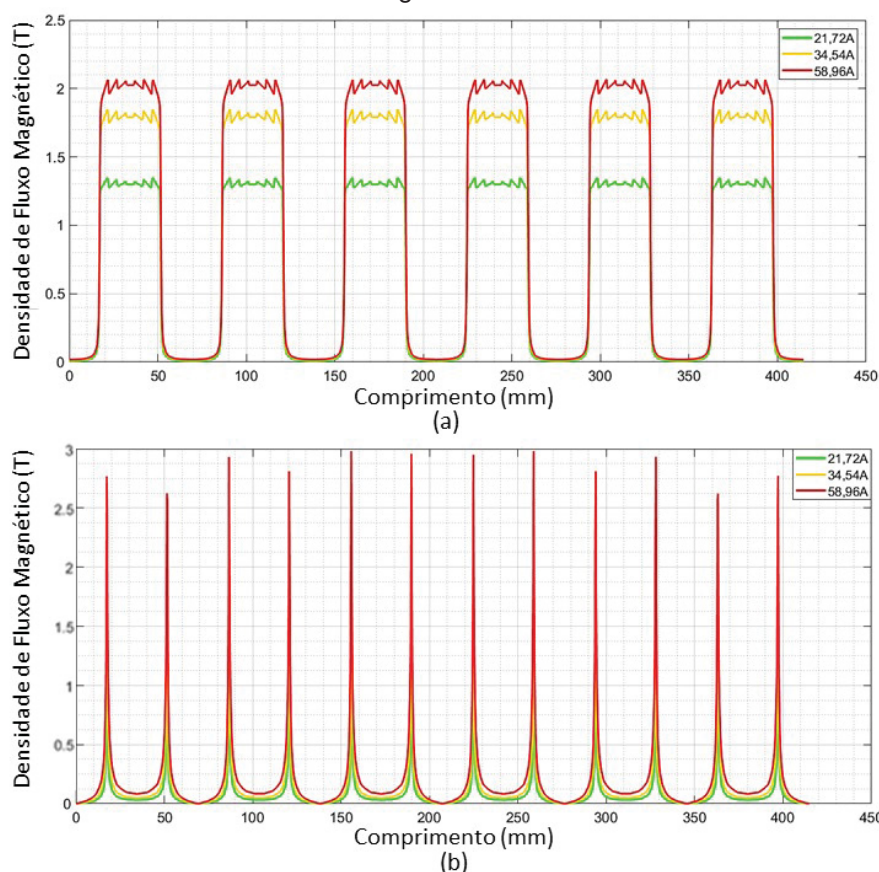
Fonte: O autor (2022).

FIGURA 30 – Dimensões após otimização usando Motor PSO.



Fonte: O autor (2022).

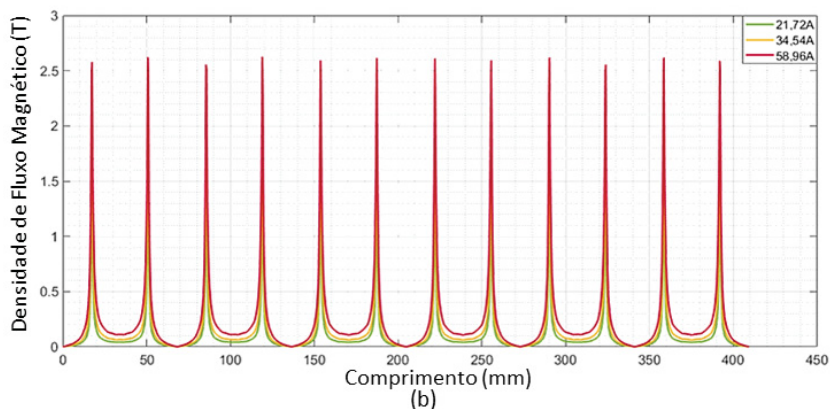
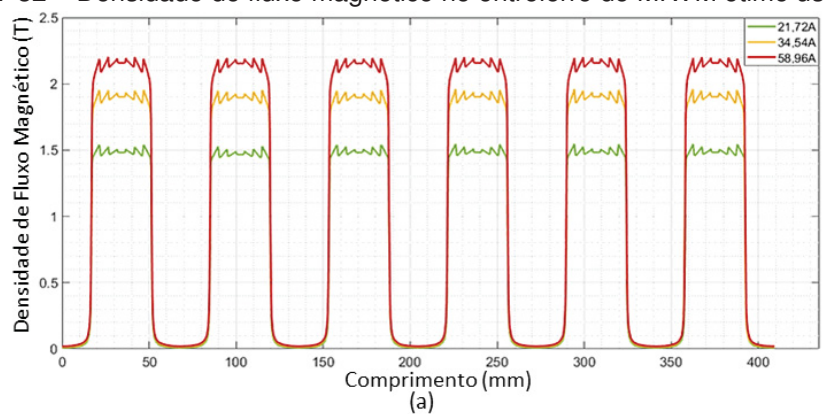
FIGURA 31 – Densidade de fluxo magnético no entreferro do MRVM convencional.



Fonte: O autor (2022).

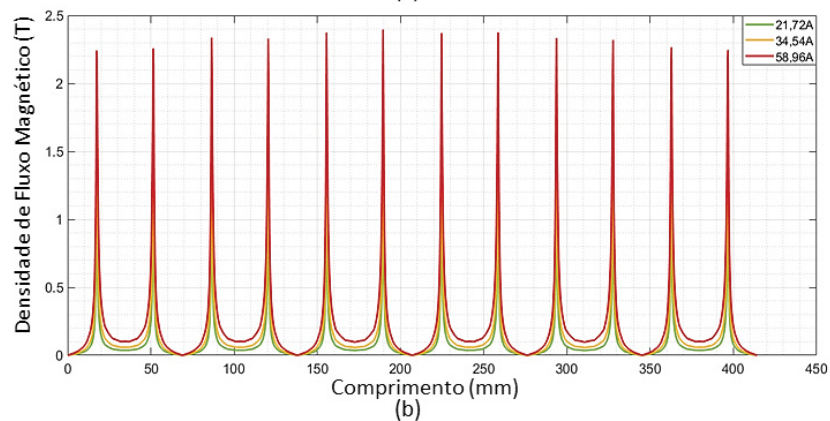
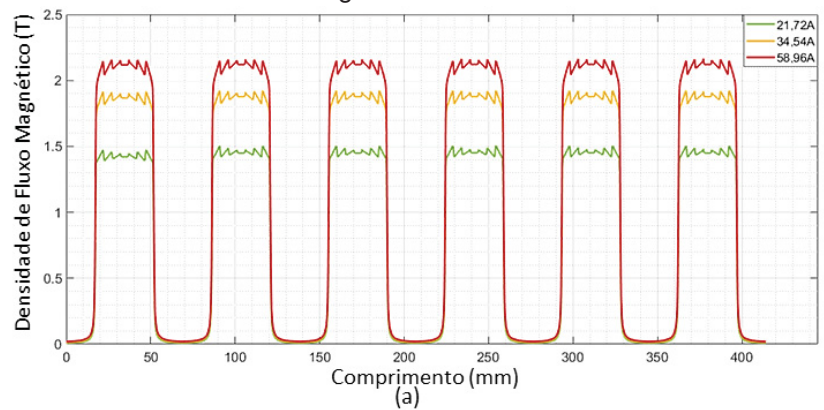
Com os MRVMs construídos, foi necessário realizar a simulação computacional via *software* FEMM, onde o material usado aço-silício M22 satura em torno de 2,2 T. A partir dos gráficos, nota-se que não houve saturação em nenhum dos casos, assim, o motor trabalha de forma linear, sem interferência no desempenho. Porém, nas Figuras 33(b) e 32(b) ambos os gráficos tem picos de densidade de fluxo magnético maior que (2, 2T) pois é o ponto de total desalinhamento entre os polos, tendo então a maior relutância. Deste modo, não interferiu-se no funcionamento do motor elétrico. Os picos

FIGURA 32 – Densidade de fluxo magnético no entreferro do MRVM ótimo usando ED.



Fonte: O autor (2022).

FIGURA 33 – Densidade de fluxo magnético no entreferro do MRVM ótimo usando PSO.



Fonte: O autor (2022).

ocorrem na posição de maior relutância, sendo que quanto maior o desalinhado entre os polos, maior é a relutância.

A Tabela 15 apresenta a eficiência energética para os três casos (Convencional, ED e PSO). Neste contexto, o motor convencional foi o que apresentou menor rendimento dentre todos, sendo $\eta = 83,58\%$. Era esperado que o MRVM convencional fosse o menor resultado já que não foi aplicada nenhuma técnica de otimização. Nota-se que o melhor rendimento obtido é do motor ED, sendo $\eta = 98,35\%$ e subseqüentemente, do motor PSO com o valor $\eta = 96,98\%$.

TABELA 15 – Comparação da eficiência energética dos projetos.

Projeto do MRVM	P_s Analítico(W)	P_s Simulado(W)	η Rendimento(%)
Motor ED	7500	7475,07	98,35
Motor PSO	7500	7370,80	96,98
Motor Convencional	7500	6352,12	83,58

Fonte: O autor (2022)

5.4.3 Considerações Finais

Com a constatação que os projetos do MRVM convencional e os otimizados por ED e PSO estão aptos nos aspectos construtivos e de magnetização, necessitou-se extrair da simulação os dados relevantes para o rendimento η do motor.

5.5 3º ESTUDO DE APLICAÇÃO: MINIMIZAÇÃO DO VOLUME ATIVO

Com a Função Objetivo (FO) de minimizar a Equação 2.36 de um MRVM 6x6 com potência de saída de $P_s \cong 7500W$, o presente estudo apresenta os resultados obtidos desta minimização através dos algoritmos de ED e PSO. Estes resultados são consolidados pela densidade de fluxo magnético simulado pelo FEMM.

5.5.1 Procedimentos Metodológicos

As características iniciais para o projeto do MRVM do presente estudo está descrita na Tabela 16. As variáveis, parâmetros e limites para minimizar FO expressa pela Equação 5.3 são apresentadas na Tabela 17.

$$FO = \text{Minimizar}\{V_a(X)\} \quad (5.3)$$

5.5.2 Análise dos Resultados

Para resultados mais precisos, foi executado os algoritmos evolucionários cinco vezes cada e então realizou-se a média dos respectivos vetores e das FOs. Este procedimento está presente nas Tabelas 18 e 19.

TABELA 16 – Características iniciais para o projeto do MRVM convencional.

Parâmetro	Valor
Potência (kW)	7,5
Velocidade nominal (rpm)	1770
Corrente nominal (A)	41,62
Corrente de pico (A)	71,05
Tensão nominal (V)	220
Conjugado (N.m)	40,207
Material magnético do núcleo	M22
Número de polos estator	6
Número de polos rotor	6
Densidade de Fluxo Magnético (T)	2,20

Fonte: O autor (2022)

TABELA 17 – Variáveis, parâmetros e limites.

Parâmetros	Mínimo	Máximo
D_r (A/mm^2)	0,1100	0,1500
Y_s (m)	0,015	0,030
Y_r (m)	0,018	0,032
L (m)	0,1700	0,1900

Fonte: O autor (2022)

TABELA 18 – Resultados dos vetores nos testes com o algoritmo ED.

S	D_r	Y_s	Y_r	L	FO
1	0,14637	0,03000	0,02499	0,17000	0,0045652
2	0,11631	0,03000	0,02501	0,19000	0,0045652
3	0,11533	0,02935	0,01800	0,17774	0,0046379
4	0,13891	0,02972	0,02205	0,17548	0,0045962
5	0,11246	0,03000	0,02909	0,18221	0,0045651
M	0,12588	0,02981	0,02383	0,17909	0,0045860

Fonte: O autor (2022)

TABELA 19 – Resultados dos vetores nos testes com o algoritmo PSO.

S	D_r	Y_s	Y_r	L	FO
1	0,13459	0,03000	0,01890	0,18763	0,0045652
2	0,11616	0,02931	0,02373	0,17534	0,0046369
3	0,12145	0,02920	0,03060	0,17628	0,0046484
4	0,12120	0,02962	0,02161	0,18344	0,0046046
5	0,13817	0,03000	0,02262	0,17533	0,0045652
M	0,12631	0,02963	0,02349	0,17960	0,0046041

Fonte: O autor (2022)

Nas Tabelas 18 e 19, os vetores estão atribuídos de $x(1) \dots x(4)$, FO é a função objetivo resultante e "M" é a média dos resultados dos 5 testes.

Incluiu-se os resultados dos algoritmos de ED e PSO no algoritmo de dimensionamento do MRVM como constantes para gerar todos os parâmetros necessários para

construção. A Tabela 20 apresenta os parâmetros construtivos definidos dos projetos do MRVM sendo convencional, ED e PSO respectivamente.

TABELA 20 – Parâmetros Convencional, ED E PSO.

Parâmetros	Convencional	ED	PSO
Diâmetro Externo(mm)	236,4	228,9	229,7
Diâmetro do Rotor(mm)	132,3	125,9	126,3
Diâmetro do Eixo(mm)	54,8	45,5	46,5
Comprimento(mm)	186,8	179,1	179,6
Número Espiras	17	16	16
Culatra do Estator(mm)	18,6	29,8	29,6
Culatra do Rotor(mm)	20,7	23,8	23,5
Largura do Polo Estator(mm)	33,8	32,7	32,9
Largura do Polo Rotor(mm)	34,5	33,4	33,5
Altura do Polo Estator(mm)	31,98	21,40	21,70
Altura do Polo Rotor(mm)	18,61	16,4	16,4
Ângulo do Polo Estator(graus)	30	30	30
Ângulo do Polo Rotor(graus)	31	31	31

Fonte: O autor (2022)

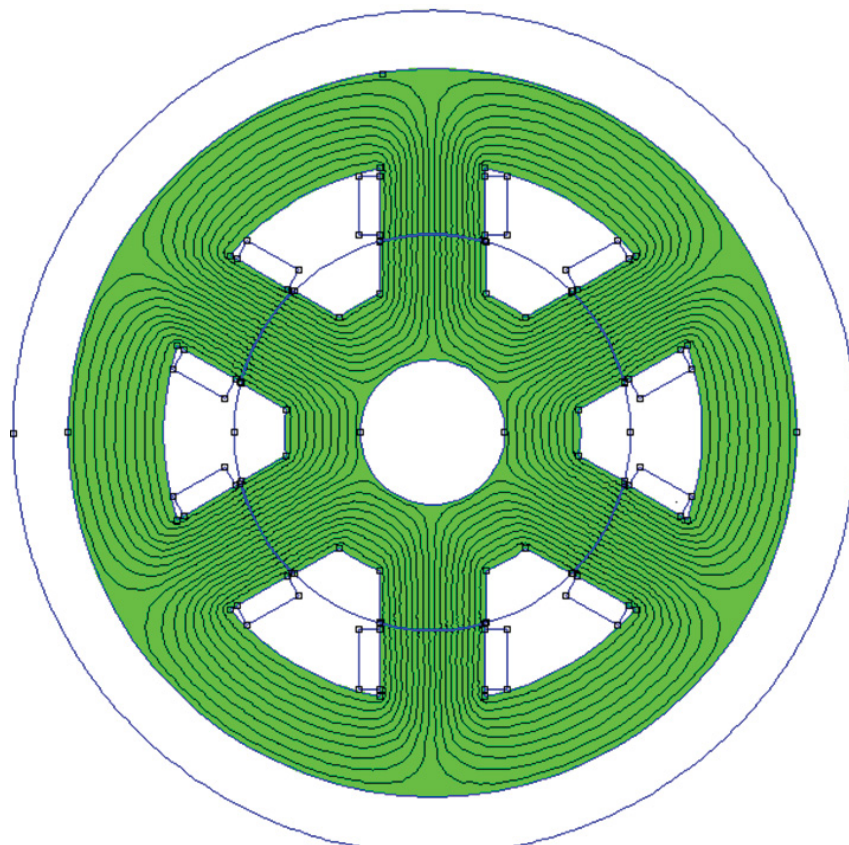
Para realizar a análise do volume ativo (v_a) utilizou-se o *software* gratuito *Finite Element Method Magnetics* (FEMM), onde após a simulação do MRVM, foram selecionadas às chapas do estator e do rotor e então, habilitou-se a função do volume ativo como mostrado na Figura 34, ou seja, a seleção das chapas do motor elétrico (área verde).

As dimensões dos projetos convencional, ED e PSO são apresentadas nas Figuras 35, 36 e 37 respectivamente. A análise da densidade de fluxo magnético foi realizada de forma diferente aos demais estudos de aplicação, a análise foi feita com gráficos de cores, onde cada cor representa uma faixa de valor da densidade.

As Figuras 38, 40 e 42 apresentam os gráficos de cores com a corrente de pico I_p para análise da densidade de fluxo magnético dos projetos de ED, PSO e convencional respectivamente na posição de completo alinhamento. Já as Figuras 39, 41 e 43 apresentam os gráficos de cores com a corrente de pico I_p para análise da densidade de fluxo magnético dos projetos de ED, PSO e convencional respectivamente na posição de completo desalinhamento.

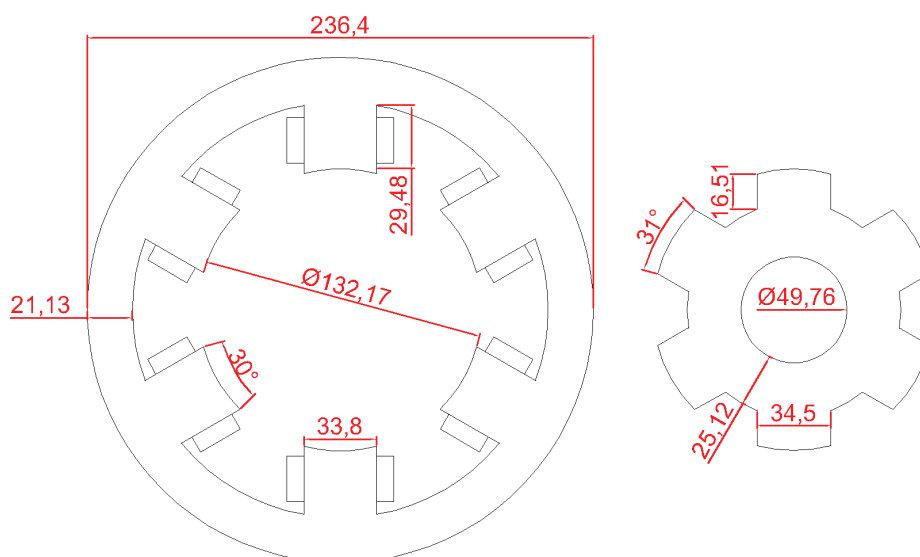
Analisando os gráficos, percebeu-se que o comportamento da densidade de fluxo magnético no material ferromagnético M22 que compõe as chapas do estator e do rotor estão dentro do limite de saturação $2, 2T$, tendo pequenos picos acima do valor de saturação. Isso ocorre quando submetido a corrente de pico I_p , porém, o valor é relativamente próximo do valor de saturação e não interfere no desempenho do motor.

FIGURA 34 – Seleção das chapas para encontrar o volume ativo no *software* FEMM.



Fonte: O autor (2022).

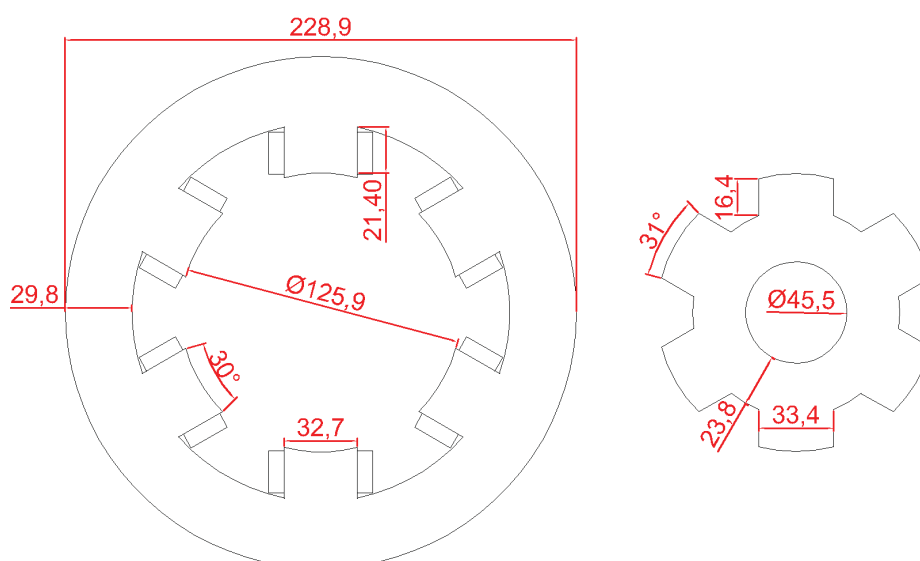
FIGURA 35 – Dimensões antes da otimização usando Motor Convencional.



Fonte: O autor (2022).

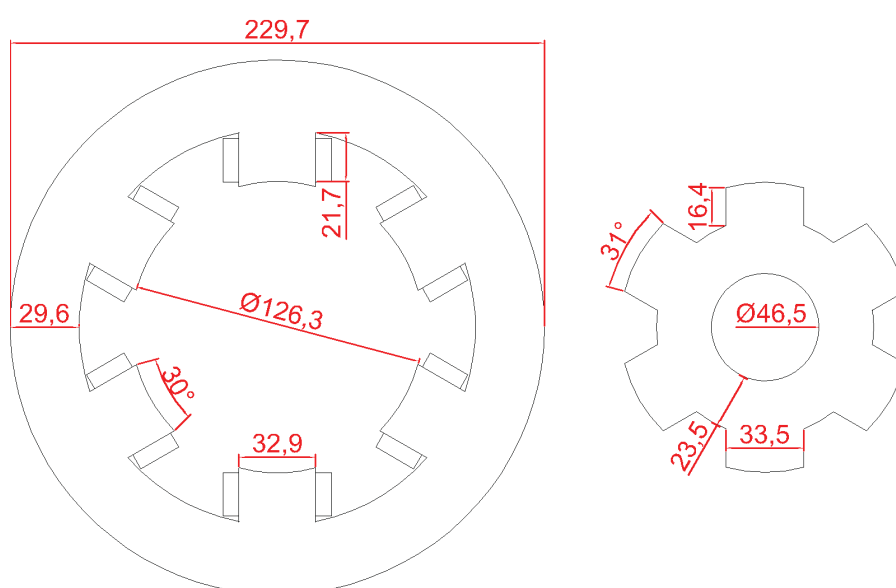
A Tabela 21 apresenta uma comparação dos valores do volume ativo (v_a) analítico, simulados e o erro entre os valores para cada projeto desenvolvido.

FIGURA 36 – Dimensões após otimização usando Motor ED.



Fonte: O autor (2022).

FIGURA 37 – Dimensões após otimização usando Motor PSO.



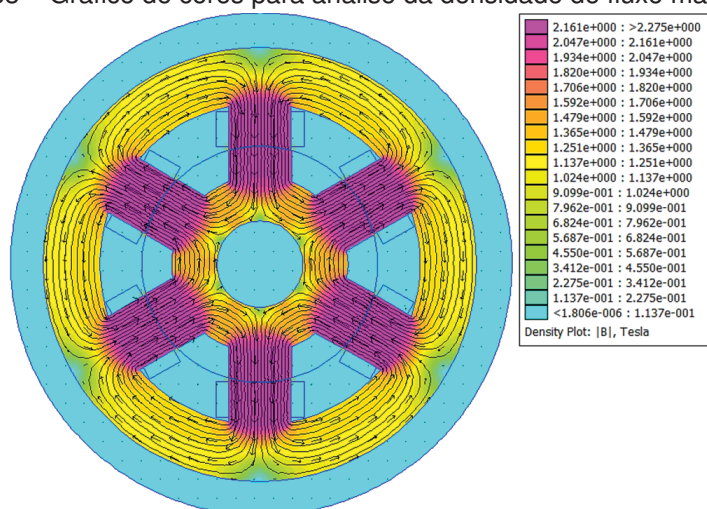
Fonte: O autor (2022).

TABELA 21 – Comparação do volume ativo.

Projeto do MRVM	V_a Analítico(m ³)	V_a Simulado(m ³)	Erro(%)
Motor ED	0,00400	0,00412	3,00
Motor PSO	0,00410	0,00414	1,09
Motor Convencional	0,00580	0,00526	9,29

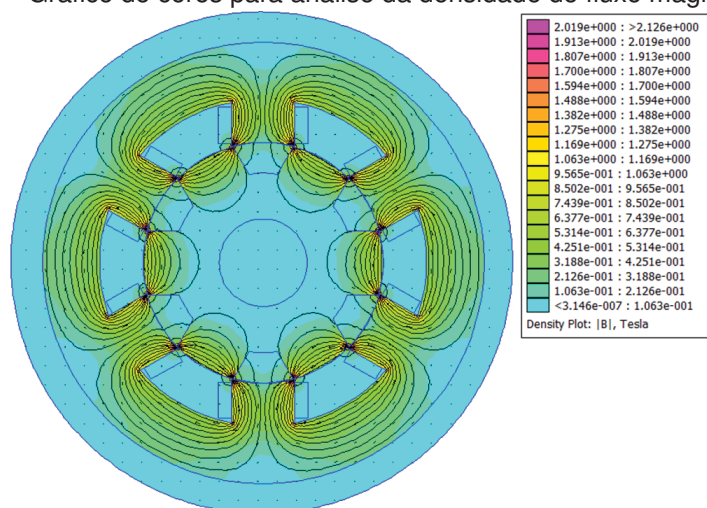
Fonte: O autor (2022)

FIGURA 38 – Gráfico de cores para análise da densidade de fluxo magnético MRVM ED alinhado.



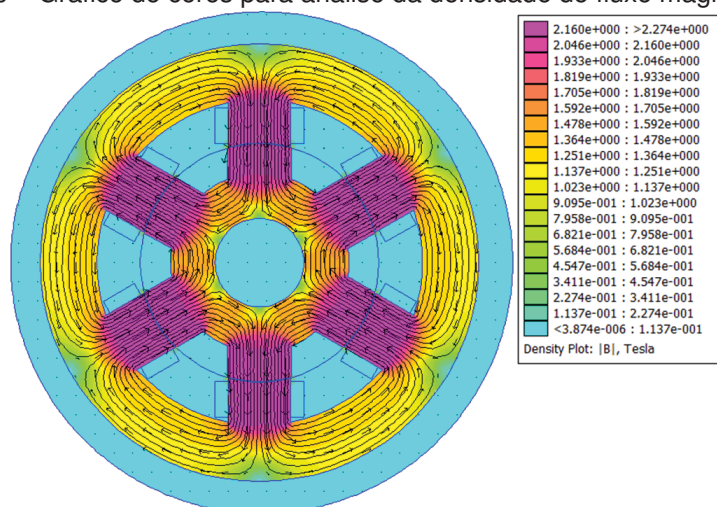
Fonte: O autor (2022).

FIGURA 39 – Gráfico de cores para análise da densidade de fluxo magnético MRVM ED desalinhado.



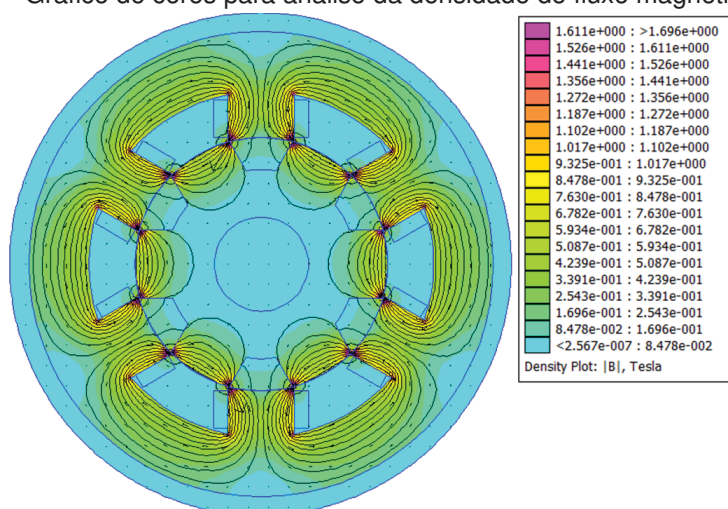
Fonte: O autor (2022).

FIGURA 40 – Gráfico de cores para análise da densidade de fluxo magnético MRVM PSO Alinhado.



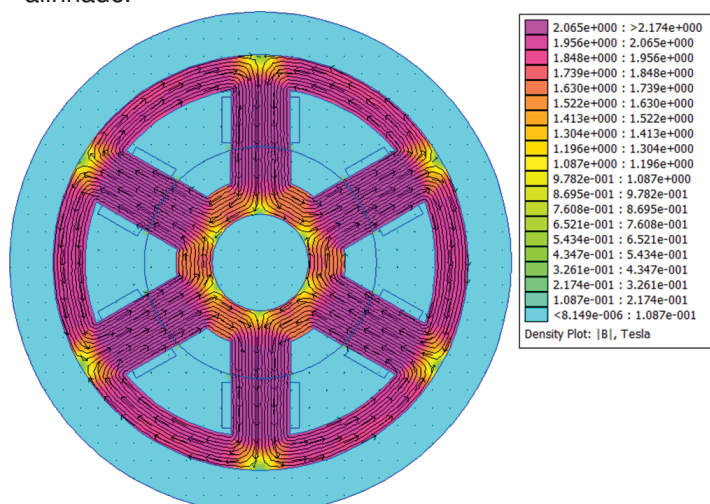
Fonte: O autor (2022).

FIGURA 41 – Gráfico de cores para análise da densidade de fluxo magnético MRVM PSO desalinhado.



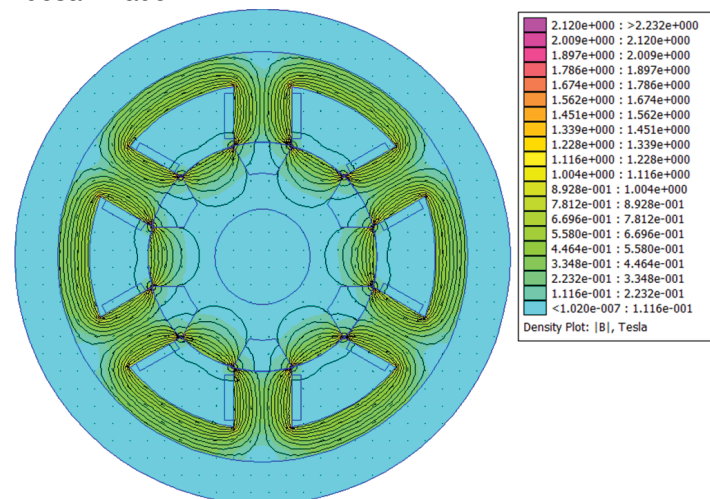
Fonte: O autor (2022).

FIGURA 42 – Gráfico de cores para análise da densidade de fluxo magnético MRVM convencional alinhado.



Fonte: O autor (2022).

FIGURA 43 – Gráfico de cores para análise da densidade de fluxo magnético MRVM convencional desalinhado.



Fonte: O autor (2022).

5.5.3 Considerações Finais

Efetivamente notou-se que o projeto do motor convencional tem seu volume ativo maior que os encontrados nos projetos ótimos, sendo também o mais distante do valor ótimo. Quando comparou-se os dados analíticos ao simulado, notou-se que os valor do erro está dentro do aceitável para projetos simulados via método dos elementos finitos, onde o erro tolerável é de até 10%.

Na análise da densidade de fluxo magnético, percebeu-se que quando o motor é submetido corrente nominal o material fica distante do valor de saturação do material. Já com a corrente de pico aplicada, na maior parte das chapas do motor os valores são abaixo do valor de saturação do material, entretanto, a poucos pontos que a densidade de fluxo magnético excede minimamente a saturação de $2, 2T$, mas não há interferência prática no momento da aplicação. Sendo assim, o presente estudo de aplicação é finalizado com ED apresentando os melhores resultados analíticos e simulados sendo o mais viável para está aplicação.

6 CONCLUSÕES

A pesquisa a partir das revisões bibliográficas sobre o funcionamento do motor de relutância variável, saturação do motor, modelos construtivo do MRVM monofásico e trifásico, as simulações computacionais em diversos *softwares* diferentes, direcionaram-se para a modelagem dos MRVM e para otimização das funções objetivos de minimização das perdas totais no cobre e maximização do rendimento. Os resultados dos problemas de otimização deram respaldo à escolha das variáveis participantes do problema de otimização, além da definição dos limites.

Nota-se que as dimensões ótimas encontradas nos três estudos de aplicação são viáveis para o objetivo das otimizações. Para o primeiro estudo de aplicação, o algoritmo aumentou ao máximo possível a seção transversal do fio condutor das bobinas e apresentou pouca redução do comprimento do fio condutor, para obter a menor perda de potência no cobre. No segundo estudo de aplicação, onde a função objetivo era a maximização do rendimento, os algoritmos elevaram o número de espiras no motor, assim, elevou-se a tensão induzida e alcançou-se uma potência de saída mais elevada. Já no terceiro estudo de aplicação, onde a função objetivo é a minimização do volume ativo, foi notada a tendência do algoritmo em reduzir o comprimento do motor e também a altura dos polos. Contrapartida aumentou a culatra do estator e do rotor.

Ao trabalhar com os algoritmos de evolução diferencial e otimização por enxames de partículas nos estudos de aplicação do presente trabalho, percebeu-se que o algoritmo de evolução diferencial obteve ligeira vantagem nos resultados, se mostrando mais viável para as aplicações neste seguimento. Já as simulações computacionais com *software* baseado em elementos finitos permitiram apresentar resultados mais precisos, com o "artifício" das simulações numéricas. Além de permitir a visualização de grandezas elétricas como a densidade de fluxo magnético, potência de saída entre outras.

Enfim, a modelagem convencional e o projeto ótimo utilizando algoritmos de ED e de PSO para um MRVM, cujos resultados simulados apresentaram coerência se comparados ao analítico.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Pode-se destacar alguns trabalhos para desenvolvimento futuro, como: a alteração da tipologia de MRV, Função multi-objetivo e aplicação de outros algoritmos evolutivos, então, algumas das propostas são descritas a seguir:

- Projetar e simular um MRVM 6x6 com às funções multi-objetivos de minimização das perdas no cobre e maximização do rendimento;
- Modelar Motores de Relutância Variável Trifásico de potências semelhantes aos apresentado no presente trabalho e otimizá-los com as funções objetivos semelhantes as apresentadas e comparar os comportamentos na simulação;
- Otimizar os mesmos MRVM, porém, considerando outros algoritmos evolutivos;
- Estudo comparativo entre motor de relutância variável (MRV) e motor de relutância comutado (MRC);
- Analisar o custo de produção do MRVM otimizado por ED e PSO e comparar.

REFERÊNCIAS

- ALTOÉ, LEANDRA et al. Políticas públicas de incentivo à eficiência energética. **Estudos Avançados**, v. 31, n. 4, p. 285–297, 2017. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/317042842_Políticas_publicas_de_incentivo_a_eficiencia_energetica>>. Citado 1 vez na página 20.
- BASTOS, J. P. A.; SADOWSKI, N. **Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods**. Florianópolis: Marcel Dekker, Inc, Único, 2003. Citado 3 vezes nas páginas 51, 53, 54.
- CARVALHO, CELSO FERREIRA; SIGNORELLI, MAURO HENRIQUE ALVES. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E ACIONAMENTO DO MOTOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL. In: UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA. **IV CONFERÊNCIA DE ESTUDOS EM ENGENHARIA ELÉTRICA (IV CEEL)**. Uberlândia: [s.n.], 2005. P. 1–4. Citado 2 vezes nas páginas 17, 24.
- CARVALHO, ÉRICA COSTA REIS. **Solução de problemas de otimização com restrições usando estratégias de penalização adaptativa e um algoritmo do tipo PSO**. Curso de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Universidade Federal de Juiz de Fora. 148 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Uberlândia, 2014. [S.l.], 2014. Disponível em: <<<https://repositorio.ufjf.br/jspui/bitstream/ufjf/3506/1/ericadacostareiscarvalho.pdf>>>. Citado 9 vezes nas páginas 44, 45, 47–49.
- CHATTERJEE, A.; SIARRY, P. Nonlinear inertia weight variation for dynamic adaptation in particle swarm optimization. In: COMPUTERS E OPERATIONS RESEARCH, 2006, 3. **IEEE TRANSACTIONS ON**. [S.l.: s.n.], 2006. v. 33, p. 859–871. Citado 1 vez na página 47.
- COELHO, L. S. **Fundamentos, potencialidades e aplicações de algoritmos evolutivos**. 2^a. ed. São Paulo: Notas em Matemática Aplicada, 2003. Citado 1 vez na página 39.
- COOK, R. D.; PLESHA, M. E. **Concepts and Applications of Finite Element Analysis**. Madison, 1989. Citado 1 vez na página 50.
- DIAS, RENATO JAYME. **Motores a relutância Variável 6x4 e 6x6. Estudo comparativo de Operação e Desempenho**. Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011. [S.l.], 2011. Disponível em: <<<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14358>>>. Citado 6 vezes nas páginas 19, 24, 25, 30, 32.

EBERHART, R. C.; SHI, Y. Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization. In: **EVOLUTIONARY COMPUTATIONS**, 2000. **PROCEEDINGS OF THE 2000 CONGRESS ON**. [S.l.: s.n.], 2000. v. 1, p. 84–88. Citado 2 vez na página 47.

EBERHART, RUSSELL; KENNEDY, JAMES. Particle swarm optimization. In: **IEEE-INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS**, 1995. **PROCEEDINGS OF ICNN'95 - INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS**. Perth: [s.n.], 1995. v. 4, p. 1942–1948. Citado 2 vezes nas páginas 43, 47.

ENGELBRECHT, A. P. **Computational Intelligence: An Introduction**. 2^a. ed. [S.l.]: John Wiley e Sons, 2007. Citado 1 vez na página 44.

EPE. **Consumo de Energia Elétrica**. Brasília: EPE, 2021. Disponível em: <<<https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/consumo-de-energia-el%5C%C3%5C%A9trica>>>. Citado 2 vezes nas páginas 20, 21.

FERNANDES, FELIPE RICARDO DOS SANTOS. **Uma Nova Abordagem para o Problema da Patrulha Escolar: Formulação Matemática e Metaheurísticas**: 124 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação - associação ampla entre a Universidade do Estado do Rio Grande do Norte e a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/333782800_Uma_nova_abordagem_para_o_Problema_da_Patrulha_Escolar_formulacao_matematica_e_metaheuristicas/link/5d1817c0a6fdcc2462b0d80c/download>>. Citado 1 vez na página 38.

FITZGERALD; KINGSLEY. **Máquinas Elétricas**. Porto Alegre: AMGH, 2014. Disponível em: <<<http://www.drb-m.org/mqeletr/Maquinas-Eletricas-Livro.pdf>>>. Citado 1 vez na página 18.

KASPER, JOÃO VITOR GEREVINI. **PROJETO ÓTIMO DE GERADORES SÍNCRONOS DE ÍMÃS PERMANENTES USANDO ELEMENTOS FINITOS**. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2021. [S.l.], 2021. Citado 3 vezes nas páginas 51–53.

KRISHNAN, R. **Switched reluctance motor drives**. [S.l.], 2001. Disponível em: <<<https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/consumo-de-energia-el%5C%C3%5C%A9trica>>>. Citado 2 vezes nas páginas 25, 27, 28.

KRISHNAN, R.; BHARADWAJ, A. A comparative study of various motor drive systems for aircraft applications. In: **INSTITUTE OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). CONFERENCE RECORD OF THE 1991 IEEE INDUSTRY APPLICATIONS SOCIETY ANNUAL MEETING**. [S.l.: s.n.], 1991. Citado 1 vez na página 18.

LOBATO, FRAN SÉRGIO. **Otimização Multi-objetivo para o Projeto de Sistemas de Engenharia**: 402 f. Tese (Doutorado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, [s.l.], 2008. Disponível em:

<<<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14677>>>. Citado 2 vezes nas páginas 39, 40, 43.

LUENBERGER, D.; YE, Y. **Linear and Nonlinear Programming**. 4^a. ed. Palo Alto: Springer International Publishing, v.Único, 2016. Citado 1 vez na página 37.

LUZ, MAURICIO VALENCIA FERREIRA DA. **Desenvolvimento de um software para cálculo de campos eletromagnéticos 3D utilizando elementos de aresta, levando em conta o movimento e o circuito de alimentação**: Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. 91 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, [s.l.], 2003.

Disponível em: <<<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/86095/196033.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>>. Citado 5 vezes nas páginas 50, 51, 53, 54.

MALAGOLI, JULIANA ALMANSA. **Otimização Multiobjetivo aplicada aos motores de indução validada via Elementos Finitos**: Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia. 91 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, [s.l.], 2016. Disponível em: <<<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14358>>>. Citado 7 vezes nas páginas 40, 43, 50, 52–55.

MAMEDE, ANA CAMILA FERREIRA; CAMACHO, JOSÉ ROBERTO; ANDRADE, DARIZON ALVES. Design Procedures and Analysis for Single-Phase Variable Reluctance Motors. In: EUROPEAN ASSOCIATION FOR THE DEVELOPMENT OF RENEWABLE ENERGIES, ENVIRONMENT e POWER QUALITY (EA4EPQ). **INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGIES AND POWER QUALITY (ICREPQ'16)**. Madrid: [s.n.], 2016. v. 16, p. 1–6. Citado 1 vez na página 18.

MAMEDE, ANA CAMILA FERREIRA. **Projeto Iterativo, Simulação, Análise e Otimização de Máquina a Relutância Variável Monofásica**: Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, [s.l.], 2016. Disponível em: <<<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/17586/1/ProjetoIterativoSimulacao.pdf>>>.

Citado 10 vezes nas páginas 17, 19, 24, 27, 28, 32, 33, 35, 56.

MARCHIORI, ISABELA NIEDO et al. AVALIAÇÃO DE FUNÇÕES DE PENALIZAÇÃO PARA O DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA. In: SEMNI. **CONGRESO DE MÉTODOS NUMÉRICOS EN INGENIERÍA**. Valência: [s.n.], 2017. v. 1, p. 1–14. Citado 1 vez nas páginas 45, 46.

MEEKER, D. **Finite Element Method Magnetics - User's Manual.**, 2014. Citado 1 vez na página 55.

MILLER, T. J. E. **Switched reluctance motors and their control.** [S.l.], 1993. Disponível em: <<h>>. Citado 5 vezes nas páginas 31–33.

OLIVEIRA, GIOVANA TRINDADE DA SILVA. **Estudo e Aplicação da Evolução Diferencial:** Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006. [S.l.], 2006. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14999/1/GTSOliveiraDISSPRT.pdf>>. Citado 5 vezes nas páginas 41–43.

PAULA, PEDRO PEREIRA DE. **ANÁLISE E PROJETO DE UM MOTOR DE RELUTÂNCIA CHAVEADO COM O AUXÍLIO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.** Curso de Pós-Graduação em Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993. [S.l.], 1993. Citado 2 vez na página 19.

POMEROY, P. An Introduction to Particle Swarm Optimization, 2003. Disponível em: <<http://www.adaptativeview.com/articles/ipsoprnt.html>>. Citado 1 vez na página 43.

PROCEL; ELETROBRÁS. **Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso - Classe Industrial - Alta Tensão Relatório Brasil.** Rio de Janeiro - Brasil, 2008. Citado 0 vez na página 17.

RAHMAN, K. M. Advantages of switched reluctance motor applications to ev and hev: design and control issues. In: COMPUTERS E OPERATIONS RESEARCH, 2006, 1. **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS.** [S.l.: s.n.], 2000. v. 36, p. 111–121. Citado 1 vez na página 19.

RATNAWEERA, A.; HALGAMUGE, S. K.; WATSON, H. C. Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients. In: EVOLUTIONARY COMPUTATIONS, 2004, 3. **IEEE TRANSACTIONS ON.** [S.l.: s.n.], 2004. v. 8, p. 240–255. Citado 1 vez na página 47.

RIZZI, MARLIZE et al. Método do Enxame de Partículas para Otimização de Modelos de Regressão Multivariada Empregados na Determinação de Biodiesel em Blendas Biodiesel/Óleo Vegetal/Diesel. **Revista Virtual de Química**, Revista Virtual de Química, v. 8, n. 6, p. 1877–1892, 2016. Disponível em: <<http://static.sites.s bq.org.br/rvq.s bq.org.br/pdf/v8n6a09.pdf>>. Citado 1 vez na página 44.

ROCHA, NATÁLIA CAIXETA; SARAMAGO, SEZIMÁRIA FÁTIMA PPEREIRA. Estudo de algumas Estratégias da Evolução Diferencial. In: SBMAC. **ANAIS DO I CONGRESSO DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL**. São Carlos: [s.n.], 2011. v. 1, p. 13–15. Citado 1 vez na página 39.

SHI, Y.; EBERHART, R. C. A modified particle swarm optimizer. In: IEEE-INTERNATIONAL CONFERENCE ON EVOLUTIONARY COMPUTATION PROCEEDINGS, 1998. **IEEE WORLD CONGRESS ON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE**. [S.l.: s.n.], 1998. P. 69–73. Citado 2 vezes nas páginas 45, 46.

STORN, RAINER; PRICE, KENNETH. Differential evolution - A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. **Journal of global optimization**, Springer, v. 11, n. 4, p. 341–359, 1997. Disponível em: <<<https://link.springer.com/article/10.1023/A:1008202821328>>>. Citado 2 vezes nas páginas 39, 42.

_____. Differential evolution: a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces. **International Computer Science Institute**, v. 12, p. 1–16, 1995. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/246648860_Differential_Evolution_A_Simple_and_Efficient_Adaptive_Scheme_for_Global_Optimization_Over_Continuous_Spaces/link/5cd69383299bf14d9589ce5e/download>>. Citado 1 vez na página 41.

SUN, W.; YUAN, Y.X. **Optimization Theory and Methods: Nonlinear Programming**. 1ª. ed. Nova York: Springer International Publishing, v.Único, 2006. Citado 1 vez na página 37.

TSCHIPTSCHIN, ANDRÉ PAULO . **Método de Elementos Finitos Aplicado à Seleção de Materiais**. São Paulo: USP/PMT, 2011. Disponível em: <<http://www.pmt.usp.br/pmt2501/Elementos%5C%20finitos_final.pdf>>. Citado 0 vez na página 50.

ZOBAA, AHMED FAHEEM; BOSE, BIMAL KUMAR. Renewable Energy, Global Warming Problem and Impact of Power Electronics (Invited Paper). In: EUROPEAN ASSOCIATION FOR THE DEVELOPMENT OF RENEWABLE ENERGIES, ENVIRONMENT e POWER QUALITY (EA4EPQ). **INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGIES AND POWER QUALITY (ICREPQ'11)**. Las Palmas de Gran Canaria: [s.n.], 2011. v. 11, p. 1–10. Citado 1 vez na página 20.