

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA
ENGENHARIA ELÉTRICA

Guilherme Felipe dos Santos

Novos métodos para a concepção e fabricação de máquinas elétricas: caracterização magnética de materiais manufaturados aditivamente e otimização de máquinas síncronas a ímãs permanentes com modelo analítico baseado em conceitos de carregamento

Florianópolis
2021

Guilherme Felipe dos Santos

Novos métodos para a concepção e fabricação de máquinas elétricas: caracterização magnética de materiais manufaturados aditivamente e otimização de máquinas síncronas a ímãs permanentes com modelo analítico baseado em conceitos de carregamento

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Nelson Sadowski, Dr.

Florianópolis
2021

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

dos Santos, Guilherme Felipe
Novos métodos para a concepção e fabricação de máquinas
elétricas : caracterização magnética de materiais
manufaturados aditivamente e otimização de máquinas
síncronas a ímãs permanentes com modelo analítico baseado em
conceitos de carregamento / Guilherme Felipe dos Santos ;
orientador, Nelson Sadowski, 2021.
153 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Manufatura aditiva. 3.
Caracterização magnética. 4. Máquinas elétricas. 5.
Otimização. I. Sadowski, Nelson. II. Universidade Federal
de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. III.
Título.

Guilherme Felipe dos Santos

Novos métodos para a concepção e fabricação de máquinas elétricas: caracterização magnética de materiais manufaturados aditivamente e otimização de máquinas síncronas a ímãs permanentes com modelo analítico baseado em conceitos de carregamento

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica” e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora.

Florianópolis, 18 de maio de 2021.



Documento assinado digitalmente
Jean Viane Leite
Data: 20/05/2021 14:41:54-0300
CPF: 003.474.909-80
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Jean Viane Leite, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente
Nelson Sadowski
Data: 18/05/2021 13:43:53-0300
CPF: 311.384.389-87
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Nelson Sadowski, Dr.
Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente
Nelson Jhoe Batistela
Data: 18/05/2021 17:12:02-0300
CPF: 504.929.939-04
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.
Avaliador

Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente
Walter Pereira Carpes Junior
Data: 18/05/2021 13:49:20-0300
CPF: 572.566.599-20
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Walter Pereira Carpes Junior, Dr.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Muitos foram os que participaram de minha trajetória ao longo da graduação e sou grato a todos, pois cada contato durante esse período, por mais breve que fosse, deixou sua marca. Como não se pode citar todos, agradeço especialmente:

Ao meu pai, cujo suporte foi essencial não só para a realização da graduação e deste trabalho, mas para tudo que sou hoje.

À minha mãe, pelo incentivo e contribuição para que pudesse descobrir e seguir meus interesses.

À minha irmã mais velha, pelas experiências trocadas e aprendizados.

À minha irmã mais nova, pelo afeto e alegria contagiante.

À minha namorada, pela parceria, compreensão e motivação.

Ao professor Nelson Jhoe Batistela, pela oportunidade de fazer parte do GRUCAD e ter me acompanhado durante toda a graduação.

À equipe e colegas do GRUCAD, pelo ambiente agradável e contribuições para minha formação pessoal, acadêmica e profissional.

Ao meu orientador, Nelson Sadowski, por ter tornado possível minha participação em um projeto de cooperação internacional e a realização deste trabalho.

À equipe do Laplace, em especial ao pesquisador Yvan Lefèvre, pelo exemplo profissional e ensinamentos.

RESUMO

Este trabalho, no contexto de desenvolvimento de novas técnicas para produção de máquinas elétricas, explorou técnicas para manufaturar materiais magnéticos aditivamente. Atuou-se, na prática, com amostras produzidas com a tecnologia de Fusão Seletiva por Laser sob diferentes condições de impressão 3D, as quais foram caracterizadas magneticamente para explorar o comportamento de suas permeabilidades e perdas. A finalidade dos ensaios era contribuir para o entendimento desse processo emergente e fornecer subsídios iniciais para nortear a definição da melhor relação entre os parâmetros de impressão. Ao final das análises, foi possível indicar critérios para a manipulação dos parâmetros de impressão de maneira mais consistente e colaborar com a investigação da necessidade do processo de recozimento para a aplicação em questão. Outro ramo do trabalho abordou uma nova abordagem de concepção de máquinas síncronas a ímãs permanentes, onde adaptou-se um modelo baseado em conceitos de carregamento, que demonstrou utilidade prática em trabalhos recentes, para que se otimizasse a potência mássica de uma máquina, visando determinar a maior potência mássica realizável com as tecnologias de resfriamento disponíveis atualmente. O problema de otimização foi concebido de várias maneiras, cada uma com sua versão do programa de otimização, testando-se múltiplas abordagens para cada um dos dois *softwares* utilizados, MATLAB® e AMPL®, além de variados métodos de otimização, como o método do ponto interior e da programação quadrática sequencial. As versões do programa de otimização foram comparadas extensivamente para determinar as melhores, variando-se também alguns parâmetros de execução, de maneira a determinar até que ponto seria vantajoso aumentar o esforço computacional do programa com relação aos resultados obtidos. Os resultados foram validados com um programa que realiza os cálculos relativos à máquina de maneira direta a partir de parâmetros de projeto. Por fim, foi possível determinar os limites teóricos de potência mássica para três faixas de velocidade de operação da máquina, fazendo-se considerações a respeito dos resultados e das limitações do modelo utilizado.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. Caracterização magnética. Otimização. Máquina Síncrona a Ímãs Permanentes. Potência mássica.

ABSTRACT

This work, in the scope of developing new techniques for production of electric machines, explored techniques to manufacture magnetic materials additively. Experimentally, samples produced with Selective Laser Melting were characterized magnetically to explore the behavior of their permeabilities and losses. The tests aimed to help the understanding of this emerging process and to supply initial subsidies to guide the definition of the best relation between the printing parameters. At the end of the analyses, it was possible to indicate criteria to better manipulate the printing parameters and to contribute to the investigation on the annealing process necessity for this application. The other part of this work addressed to a new approach of conception of permanent magnet synchronous machines, where a model based on load concepts, that demonstrated practical utility in recent works, was adapted to optimize the specific power of a machine. The final objective was to determine the maximum specific power achievable with the cooling technologies available nowadays. The optimization problem was conceived in various manners, each one with its version of the optimization program. Multiple approaches were tested with each software used, MATLAB[®] and AMPL[®], and, also, different methods, like the interior point method and sequential quadratic programming. The program versions were compared extensively to determine the better ones and to verify up to which point some execution parameters could be increased to justify the computational effort required with relation to the results obtained. The results were validated with a program that do calculations of the machine directly with design parameters. At the end of the development, it was possible to determine the theoretical limits of specific power for three speed ranges of the machine, with considerations being made about the results and about the limitations of the model used.

Keywords: Additive manufacturing. Magnetic testing. Optimization. Permanent Magnet Synchronous Machine. Specific Power.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Número de publicações conforme <i>Scopus</i>	27
Figura 2 – Relação entre custo e complexidade geométrica para AM e processos tradicionais.	27
Figura 3 – Ilustração de sistema de BJ.	29
Figura 4 – Processo de impressão 3D aglutinante de metal. (a) Impressão camada a camada, (b) Remoção do excesso de pó das partes, (c) Infiltração, (d) Resultado.	30
Figura 5 – Ilustração de sistema de PBF.	30
Figura 6 – Tecnologia DMLS. (a) Cama de pó e fusão, (b) Retirada do excesso de pó, (c) Remoção dos suportes, (d) Acabamento.	31
Figura 7 – Design inicial (esquerda) e design final otimizado (direita).	32
Figura 8 – Distribuição de fluxo em núcleo magnético de múltiplas permeabilidades (esquerda) e em indutor toroidal de permeabilidade única (direita).	33
Figura 9 – Distribuição de temperatura a 15000 rpm com tempo de simulação $t = 4200$ s (esquerda) e perdas no condutor dependentes da temperatura versus tempo de simulação, a 15000 rpm, e passo de tempo de 280 s (direita).	33
Figura 10 – Impressão de máquinas elétricas com manufatura aditiva. (a) Máquinas de fluxo radial (esquerda) e axial (direita), (b) Cada metade do estator e o rotor com rolamentos encaixados.	34
Figura 11 – Parâmetros de impressão de toroides de ferrossilício (FeSi) à esquerda e comparação entre as curvas de magnetização para as amostras ferromagnéticas impressas e para um protótipo de compósito magnético mole (SMC – <i>Soft Magnetic Composite</i>) à direita.	35
Figura 12 – Marcas verdes representam cuboides com densidade relativa maior do que 99,5%, marcas azuis representam densidades relativas menores do que 99,5% e marcas vermelhas são densas, porém irregulares, devido a energias altas. As linhas pretas sólidas representam linhas de energia constante (linhas de energia = potência do feixe/velocidade de varredura).	36
Figura 13 – Comportamento magnético de materiais ferromagnéticos. (a) Não há campo magnético externo, (b) O volume de domínios convenientemente orientados aumenta, (c) O movimento das paredes cessa quando não há mais domínios menos energéticos viáveis disponíveis, (d) Os domínios restantes sofrem rotação.	37
Figura 14 – Esquema de evolução da direção dos domínios de um material ferromagnético quando submetido a uma excitação alternada.	38

Figura 15 – Curvas e valores característicos mostrados em um ciclo de histerese.	39
Figura 16 – Esquema simplificado da bancada de testes.	41
Figura 17 – Distorção na corrente do primário devida a propriedades não lineares de materiais ferromagnéticos.....	41
Figura 18 – Simulação da distribuição de fluxo magnético em uma estrutura de Halbach.....	44
Figura 19 – Comparação da curva de indução magnética entre uma estrutura radial de ímãs e uma de Halbach.	44
Figura 20 – Plot da função que representa valores típicos de k_{form}	47
Figura 21 – Ilustração do algoritmo <i>GlobalSearch</i>	54
Figura 22 – Representação elétrica dos enrolamentos nas amostras.....	57
Figura 23 – Algumas das amostras caracterizadas.....	58
Figura 24 – Curvas B-H obtidas para C3 a (a) 3 Hz, (b) 25 Hz e (c) 50 Hz.	59
Figura 25 – Comparação das curvas anisteréticas para as quatro amostras impressas.	59
Figura 26 – Comparação das permeabilidades (a) relativa e (b) relativa diferencial.	60
Figura 27 – Comparação da perda total das amostras em (a) 3 Hz, (b) 25 Hz e (c) 50 Hz.	61
Figura 28 – Exemplo de como o <i>plot</i> das perdas totais pode ser distorcido. Vemos em (a) os valores das perdas incluindo pontos com fator de forma inadequado e em (b) o <i>plot</i> sem distorção.	62
Figura 29 – Comparação da permeabilidade relativa da amostra C4 e da amostra recozida equivalente a C4.....	66
Figura 30 – Perdas a 50 Hz para C4 e C4 recozida.	66
Figura 31 – Comparação das curvas anisterética da melhor amostra não recozida, da amostra recozida e de ferro puro.	67
Figura 32 – Representação da seção transversal de um motor.....	69
Figura 33 – Estator de enrolamentos distribuídos, indicando-se a cabeça de bobina em um de seus lados.....	69
Figura 34 – Fluxo magnético em um polo fluindo pela coroa do estator.....	71
Figura 35 – Densidade mássica do rotor como função do número de polos.....	74
Figura 36 – Tempo de execução para 1000 pontos de partida, com N (na legenda do gráfico corresponde a R) variando de 20 até 100.	84

Figura 37 – Tempo de execução para 20 execuções com o <i>loop for</i> , com N_{points} variando de 1000 até 10000.....	84
Figura 38 – Média dos tempos de execução de acordo com categorias de parâmetros que possuem maior influência no tempo de execução.	85
Figura 39 – Valores máximos da função objetivo de acordo com categoria.	86
Figura 40 – Valores médios da função objetivo obtidos para cada versão nas diferentes simulações.	86
Figura 41 – Função objetivo obtida para <i>Opt3</i> , <i>Opt4</i> e <i>Opt5</i> , comparando com <i>LikeOpt3</i> , <i>LikeOpt4</i> e <i>LikeOpt5</i> , quando as soluções dos primeiros três são usadas como pontos de partida para as últimas três.....	87
Figura 42 – Valores obtidos para a função objetivo com a abordagem <i>MultiSolve</i> e os métodos <i>Ipopt</i> e <i>Snopt</i>	88
Figura 43 – Valores obtidos para a função objetivo com a abordagem <i>MultiStart</i> e os métodos <i>Ipopt</i> e <i>Snopt</i>	89
Figura 44 – Tempos de execução com a abordagem <i>MultiStart</i> e os métodos <i>Ipopt</i> e <i>Snopt</i>	89
Figura 45 – Valores obtidos para a função objetivo com a abordagem <i>MultiSolve+MultiStart</i> e os métodos <i>Ipopt</i> e <i>Snopt</i> , separados conforme número de pontos de partida (esquerda) e número de execuções (direita).	90
Figura 46 – Tempos de execução com a abordagem <i>MultiSolve+MultiStart</i> e os métodos <i>Ipopt</i> e <i>Snopt</i> , separados conforme número de pontos de partida (esquerda) e número de execuções (direita).	90
Figura 47 – Valores obtidos para a função objetivo com <i>Snopt</i> em <i>LikeOpt3</i> , <i>LikeOpt4</i> e <i>LikeOpt5</i> , comparando as três abordagens.	91
Figura 48 – Valores obtidos para a função objetivo com <i>MultiSolve+MultiStart</i> e com os solucionadores <i>Ipopt</i> e <i>Baron</i> em <i>LikeOpt5</i> com p fixo.	93
Figura 49 – Imagem gerada pelo programa usado para determinar a espessura dos ímãs do rotor para o caso de baixa velocidade.....	102
Figura 50 – Desenho 2D em FEMM para a máquina de alta velocidade concebida.	103
Figura 51 – Desenho 2D em FEMM para a máquina de média velocidade concebida.	103
Figura 52 – Desenho 2D em FEMM para a máquina de baixa velocidade concebida.	104

Figura 53 – Ilustração de como os pontos são determinados para desenhar a máquina.

..... 143

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Significado dos <i>flags</i> de saída em <i>fmincon</i>	54
Quadro 2 – Parâmetros geométricos.	68
Quadro 3 – Parâmetros estruturais.	68
Quadro 4 – Parâmetros de enrolamento.	68
Quadro 5 – Parâmetros fixos para todas as otimizações.	77
Quadro 6 – Parâmetros calculados para todas as otimizações.	77
Quadro 7 – Parâmetros de todas as versões do programa de otimização. As abreviações correspondem a parâmetros fixos (F), calculados (C) e variáveis (V).	78
Quadro 8 – Restrições não lineares de igualdade.	79
Quadro 9 – Restrições não lineares de desigualdade.	79
Quadro 10 – Simulações realizadas para comparar a influência de parâmetros nos resultados das otimizações e diferentes estratégias de otimização.	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de pico típicos de densidade de fluxo magnético.....	43
Tabela 2 – Valores rms permitidos para densidades lineares de corrente no enrolamento de armadura e para densidades de corrente.	43
Tabela 3 – Valores típicos de estresse tangencial.	43
Tabela 4 – Intervalos calculados do produto A_j de acordo com o tipo de resfriamento.	46
Tabela 5 – Configurações de potência de laser e velocidade para cada amostra.	57
Tabela 6 – Propriedades e dimensões das amostras.	57
Tabela 7 – Limites dos parâmetros.....	82
Tabela 8 – Parâmetros determinados em seus limites de acordo com tipo de simulação e <i>software</i> , em porcentagem.	83
Tabela 9 – Limites dos parâmetros usados para comparar <i>Opt6</i> e o modelo direto...	95
Tabela 10 – Comparação entre <i>Opt6</i> e o modelo direto em três casos de velocidade.	96
Tabela 11 – Comparação entre <i>Opt7</i> e o modelo direto em três casos de velocidade.	97
Tabela 12 – Limites dos parâmetros usados para comparar <i>Opt8</i> e o modelo direto.	99
Tabela 13 – Resultados do modelo direto a partir das soluções de <i>Opt8</i> para os três casos de velocidade.	100
Tabela 14 – Entreferrros mínimos esperados comparados com os resultantes das otimizações.	101

LISTA DE CÓDIGOS

Código 1 – <i>Script principal, Main</i> , da versão <i>Opt6</i>	113
Código 2 – <i>Script Param</i> , da versão <i>Opt6</i>	114
Código 3 – <i>Script Fobj</i> , da versão <i>Opt6</i>	116
Código 4 – <i>Script Pm</i> , da versão <i>Opt6</i>	116
Código 5 – <i>Script Rho_m_rot</i> , da versão <i>Opt6</i>	117
Código 6 – <i>Script Contraintes</i> , da versão <i>Opt6</i>	117
Código 7 – <i>Script Pj</i> , da versão <i>Opt6</i>	119
Código 8 – <i>Script Pfer</i> , da versão <i>Opt6</i>	119
Código 9 – <i>Script ps</i> , da versão <i>Opt6</i>	120
Código 10 – <i>Script Affichage</i> , da versão <i>Opt6</i>	121
Código 11 – <i>Script LikeOpt6.run</i> , da versão <i>LikeOpt6</i>	123
Código 12 – <i>Script machine_design6.mod</i> , da versão <i>LikeOpt6</i>	124
Código 13 – <i>Script machine_design6.dat</i> , da versão <i>LikeOpt6</i>	125
Código 14 – <i>Script Modele_directe</i> , do modelo direto.....	127
Código 15 – <i>Script Moteur</i> , do modelo direto.....	129
Código 16 – <i>Script Coefficients</i> , do modelo direto.....	129
Código 17 – <i>Script Loads</i> , do modelo direto.....	129
Código 18 – <i>Script Prophys</i> , do modelo direto.....	130
Código 19 – <i>Script rho</i> , do modelo direto.....	130
Código 20 – <i>Script MoreSizes</i> , do modelo direto.....	130
Código 21 – <i>Script Volumes</i> , do modelo direto.....	131
Código 22 – <i>Script Masses</i> , do modelo direto.....	131
Código 23 – <i>Script ChampMag</i> , do modelo direto.....	131
Código 24 – <i>Script Main</i> , de <i>Opt8</i>	132
Código 25 – <i>Script Param</i> , de <i>Opt8</i>	133
Código 26 – <i>Script Fobj</i> , de <i>Opt8</i>	135
Código 27 – <i>Script Pm</i> , de <i>Opt8</i>	135
Código 28 – <i>Script Masse</i> , de <i>Opt8</i>	136
Código 29 – <i>Script MVrot</i> , de <i>Opt8</i>	138
Código 30 – <i>Script Contraintes</i> , de <i>Opt8</i>	138
Código 31 – <i>Script Affichage</i> , de <i>Opt8</i>	140
Código 32 – <i>Script main</i> , do programa que desenha a máquina no FEMM.....	144

Código 33 – <i>Script EntryData</i> , do programa que desenha a máquina no FEMM. ..	144
Código 34 – <i>Script PointsDefinition</i> , do programa que desenha a máquina no FEMM.	145
Código 35 – <i>Script circIntersect</i> , do programa que desenha a máquina no FEMM.	148
Código 36 – <i>Script DrawFEMM</i> , do programa que desenha a máquina no FEMM.	149

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
AM	Manufatura aditiva - <i>Additive Manufacturing</i>
AMPL	Uma Linguagem de Programação Matemática - <i>A Mathematical Programming Language</i>
BJ	Impressão 3D aglutinante - <i>Binder Jetting</i>
CAD	Design auxiliado por computador - <i>Computer Aided Design</i>
CC	Corrente contínua
CIRIMAT	Centro Interuniversitário de Pesquisa e de Engenharia de Materiais - <i>Centre Inter-universitaire de Recherche et d'Ingénierie des Matériaux</i>
CNRS	Centro Nacional da Pesquisa Científica - <i>Centre National de Recherche Scientifique</i>
Couenne	Envelope Convexo Acima e Abaixo de Envelopes para Estimativa Não Linear - <i>Convex Over and Under Envelopes for Nonlinear Estimation</i>
DFA	Projeto para montagem - <i>Design for Assembly</i>
DFM	Projeto para manufatura - <i>Design For Manufacture</i>
DFMA	Projeto para manufatura e montagem - <i>Design For Manufacture and Assembly</i>
DMLS	Sinterização direta de metal por laser - <i>Direct Metal Laser Sintering</i>
EBM	Fusão por feixe de elétrons - <i>Electrom Beam Melting</i>
ENSEEIH	Escola Nacional de Ensino Superior de Eletrotécnica, Eletrônica, Informática, Hidráulica e de Telecomunicações - <i>École nationale supérieure d'électrotechnique, d'électronique, d'informatique, d'hydraulique et des télécommunications</i>
EOS	<i>Electro Optical Systems</i>
FEM	Análise de Elementos Finitos - <i>Finite Element Analysis</i>

FEMM	<i>Finite Element Method Magnetics</i>
GEEPS	Grupo de Engenharia Elétrica e Eletrônica de Paris - <i>Laboratoire Génie électrique et électronique de Paris</i>
GREM3	Grupo de Pesquisa em Eletrodinâmica, Materiais, Máquinas e Mecanismos Eletroativos - <i>Groupe de Recherche en Electrodynamique, Matériaux, Machines et Mécanismes Électroactifs</i>
GRUCAD	Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos
INPT	Instituto Nacional Politécnico de Toulouse - <i>Institut National Polytechnique de Toulouse</i>
IPM	Método do ponto interior - <i>Interior Point Method</i>
Ipoint	Otimizador com Ponto Interior - <i>Interior Point Optimizer</i>
KKT	Karush-Kuhn-Tucker
Laplace	Laboratório de Plasma e Conversão de Energia - <i>Laboatoire Plasma et Convesion d'Énergie</i>
MJ	Impressão 3D aglutinante de metal - <i>Metal Binder Jetting</i>
MSIP	Máquina síncrona a ímãs permanentes
NCOP	Problema de otimização não linear com restrições - <i>Nonlinear Constrained Optimization Problem</i>
PBF	Fusão por cama de pó de metal - <i>Powder Bed Fusion</i>
PM	Potência mássica
PO	Problema de otimização
Rms	valor médio quadrático
SLM	Fusão seletiva por laser - <i>Selective Laser Melting</i>
SLS	Sinterização seletiva por laser - <i>Selective Laser Sintering</i>
SMC	Compósito magnético mole - <i>Soft Magnetic Composite</i>
Snopt	Otimizador Esparso Não Linear - <i>Sparse Nonlinear Optimizer</i>

SQP Programação Quadrática Sequencial - *Sequential Quadratic Programming*

TP Processo tradicional - *Traditional Process*

UPS Universidade Paul Sabatier - Université Toulouse III - Paul Sabatier

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{rms}	Valor rms da densidade linear de corrente [A].
\mathbf{B}	Indução magnética ou densidade de fluxo magnético [T].
B_m	Valor de pico da indução magnética no entreferro [T].
B_{rms}	Valor rms da indução magnética no entreferro [T].
B_t	Indução magnética nos dentes do estator [T].
B_y	Indução magnética na coroa do estator [T].
Dif	Diferença relativa.
$Direto$	Valor da variável no modelo direto.
\mathbf{e}_z	Vetor unitário na direção Oz .
F	Força de Lorentz [N].
f_e	Frequência elétrica [Hz].
f_t	Estresse magnético tangencial [N/m^2].
g	Tamanho do entreferro [m].
h_s	Altura das ranhuras do estator [m].
h_y	Altura da coroa do estator [m].
I	Corrente elétrica [A].
I_{rms}	Valor rms da corrente na máquina [A].
j	Densidade de corrente [A/m^2].
j_{rms}	Valor rms da densidade de corrente [A/m^2].
$K(\theta_t)$	Onda progressiva de densidade de corrente [A/m^2].
k_c	Coefficiente de perda por correntes induzidas.
k_e	Coefficiente de perdas de excesso.

k_{fill}	Fator de preenchimento de ranhura.
k_{form}	Coefficiente de forma do rotor.
k_h	Coefficiente de histerese.
k_{hw}	Coefficiente de cabeça de bobina.
K_{rms}	Valor rms da onda progressiva de densidade de corrente [A/m ²].
k_w	Fator de enrolamento.
L	Comprimento das partes ativas da máquina [m].
\mathbf{l}	Vetor com direção da corrente.
M_{Cu}	Massa de cobre [kg].
M_{rot}	Massa do rotor [kg].
M_s	Massa das ranhuras do estator [kg].
M_{stat}	Massa do estator [kg].
M_t	Massa dos dentes do estator [kg].
M_{total}	Massa total da máquina [kg].
M_y	Massa da coroa do estator [kg].
N	Número de execuções de <i>GlobalSearch</i> no programa de otimização ou velocidade de rotação da máquina [rpm].
N_c	Número total de condutores .
$N_{c/phase}$	Número de condutores por fase da máquina.
N_{eval}	Número de avaliações dentro de <i>fmincon</i> .
N_{points}	Número de pontos de partida.
N_s	Número de ranhuras.
N_t	Número de dentes.
Opt	Valor da variável no programa de otimização.

P_{out}	Potência mecânica de saída [W].
P_{em}	Potência eletromagnética [W].
P_f, P_{fer}	Perdas no ferro [W].
P_j	Perdas Joule [W].
P_m, SP	Potência mássica ou potência específica [W/kg].
p	Número de pares de polo .
R	Raio do rotor, aproximado com igual ao raio do furo do estator [m].
R_{out}	Raio externo do estator [m].
r_2	Raio do rotor [m].
r_3	Raio da circunferência interna do estator [m].
S	Seção por onde flui corrente [m ²].
S_s	Seção do fio [m ²].
T	Torque [N.m].
T_{win}	Temperatura dos enrolamentos da máquina [°C].
t	Tempo [s].
V_{Cu}	Volume de cobre [m ³].
V_{fer}	Volume de ferro [m ³].
V_{rot}	Volume do rotor [m ³].
V_t	Volume dos dentes do estator [m ³].
V_y	Volume da coroa do estator [m ³].
v_{lin}	Velocidade linear da máquina [m/s].
ST	Torque específico [N.m/kg].
w_t	Largura de um dente no raio do furo do estator [m].

w_s	Largura de uma ranhura no raio do furo do estator [m].
x_g	Tamanho relativo do entreferro.
x_{lp}	Comprimento de um polo [m].
α_{Cu}	Coefficiente de resistividade do cobre.
γ	Coefficiente relativo ao polo e sapato de polo.
η	Rendimento.
θ	Posição angular [rad].
λ	Parâmetro relacionado a k_{form} .
$\rho_{Cu,20}$	Resistividade do cobre a 20 °C [Ω .m].
$\rho_{m,Cu}$	Densidade mássica do cobre [kg/m^3].
$\rho_{m,vac}$	É a densidade mássica do <i>VACOFLUX 48</i> [kg/m^3].
$\rho_{m,Rot}$	Densidade mássica do rotor [kg/m^3].
τ, τ_e	Taxa de ranhuras na circunferência interna do estator.
τ_a	Taxa de ímãs em um arco polar.
τ_p	Passo de polo.
Φ_p	Fluxo magnético em um polo [Wb].
Φ_y	Fluxo magnético na coroa do estator [Wb].
Ω	Velocidade angular da máquina [rad/s].

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	24
1.2	OBJETIVOS	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1	MANUFATURA ADITIVA	26
2.1.1	Processos e tecnologias	28
2.1.1.1	<i>Impressão 3D Aglutinante de Metal (MJ - Metal Binder Jetting).....</i>	<i>29</i>
2.1.1.2	<i>Fusão por Cama de Pó de Metal (PBF - Metal Powder Bed Fusion)</i>	<i>30</i>
2.1.2	Aplicações	32
2.1.3	Influência dos parâmetros	34
2.2	CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS.....	36
2.3	DIMENSIONAMENTO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS.....	42
2.3.1	Carregamento mecânico	45
2.3.2	Carregamento elétrico.....	45
2.3.3	Carregamento magnético.....	46
2.3.4	Observação sobre o entreferro	47
2.4	OTIMIZAÇÃO	48
2.4.1	Solução de problemas de otimização não lineares com restrições	49
2.4.2	SQP.....	50
2.4.3	Ponto interior	51
2.4.4	Otimização com MATLAB®	53
2.4.5	Otimização com AMPL®	55
3	CONTRIBUIÇÃO PARA A CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS	56
3.1	AMOSTRAS E CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL.....	56
3.2	ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO	58
3.3	FERRAMENTA PARA AGRUPAMENTO E PROCESSAMENTO DE DADOS DE ENSAIO	61

3.4	CARACTERIZAÇÃO DE AMOSTRA RECOZIDA.....	66
4	MODELO PARA MÁQUINAS SÍNCRONAS A ÍMÃS PERMANENTES ..	68
5	CONTRIBUIÇÃO PARA A OTIMIZAÇÃO DE MSIPs.....	75
5.1	ABORDAGEM DO PROGRAMA DE OTIMIZAÇÃO COM MATLAB®	76
5.2	ABORDAGENS DO PROGRAMA DE OTIMIZAÇÃO COM AMPL®	76
5.3	AS VERSÕES DO PROGRAMA DE OTIMIZAÇÃO	76
5.4	ANÁLISE DOS PROGRAMAS	80
5.4.1	Escolhendo parâmetros de execução e versão em MATLAB®	83
5.4.2	Validando o uso de AMPL®	86
5.4.3	Testando MultiSolve.....	87
5.4.4	Testando MultiStart	88
5.4.5	Testando MultiSolve+MultiStart	90
5.4.6	Verificando o comportamento das soluções ótimas.....	91
5.4.7	Testando <i>Baron</i>	92
5.5	VALIDANDO SOLUÇÕES ÓTIMAS PARA DIFERENTES FAIXAS DE VELOCIDADE	93
5.6	UM PROGRAMA BASEADO NO MODELO DIRETO.....	97
5.7	DESENHO 2D DAS MÁQUINAS OTIMIZADAS	101
6	CONCLUSÃO.....	105
	REFERÊNCIAS.....	108
	APÊNDICE A – Programa de otimização <i>Opt6</i>.....	112
	APÊNDICE B – Programa de otimização <i>LikeOpt6</i>.....	123
	APÊNDICE C – Modelo direto	127
	APÊNDICE D – Programa de otimização <i>Opt8</i>.....	132
	APÊNDICE E – Programa para desenho 2D em FEMM.....	143

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos intensificou-se a busca por máquinas elétricas de alta tecnologia, visando-se alta potência mássica (PM) em uma gama variada de aplicações, especialmente no âmbito automotivo e aeroespacial, com o segundo demandando as melhores tecnologias e materiais disponíveis (EL-REFAIE e OSAMA, 2019). Além dessas aplicações em que é um interesse inerente fornecer uma mesma potência com um motor mais leve, no contexto industrial isso significa redução de custos, já que seria usado também um volume menor de material (VINAGRE, 1991), cujo impacto financeiro no produto é bastante expressivo. Outra forma de reduzir custos tem relação com o uso da matéria-prima, onde entra em cena o potencial das tecnologias emergentes de manufatura aditiva para, por exemplo, redução de desperdício.

O presente trabalho insere-se nesse contexto, atuando sobre novos métodos para a concepção e fabricação de máquinas elétricas, envolvendo-se em duas linhas de pesquisa do grupo de pesquisa GREM3 (*Groupe de Recherches en Electrodynamique, Matériaux, Machines et Mécanismes Electroactifs* – Grupo de Pesquisa em Eletrodinâmica, Materiais, Máquinas e Mecanismos Ativos): dimensionamento de máquinas elétricas de alta tecnologia e caracterização de materiais magnéticos manufaturados aditivamente.

O dimensionamento de máquinas elétricas começa, tipicamente, com a seleção de algumas medidas principais da máquina, como o diâmetro de seu entreferro e o seu comprimento ativo (PYRHONEN, JOKINEN e HRABOVCOVA, 2008). Isso é feito porque existe uma quantidade considerável de parâmetros livres, o que pode tornar a tarefa de otimização extremamente complicada, caso esse número não seja limitado de alguma forma (PYRHONEN, JOKINEN e HRABOVCOVA, 2008). Estratégias para simplificar o projeto envolvem considerar constantes alguns parâmetros que variam pouco e utilizar algumas faixas empiricamente definidas para densidades de corrente e fluxo magnético na máquina (PYRHONEN, JOKINEN e HRABOVCOVA, 2008).

Esforços contínuos vêm sendo aplicados para melhorar a qualidade de materiais produzidos pela metodologia de manufatura aditiva (AM – *Additive manufacturing*), especialmente nos últimos dez anos, quando se nota um aumento exponencial de vendas (WOHLERS ASSOCIATES, INC., 2018). Como será mostrado na Seção 2.1, já estão sendo produzidos materiais com boas propriedades mecânicas e elétricas com impressoras 3D (tridimensionais), contudo materiais com características magnéticas adequadas ainda estão para serem atingidos.

Esse trabalho foi possível graças ao projeto CAPES-COFECUB Ph 930/19 intitulado “Motor a fluxo axial: novos processos de fabricação”, com colaboração entre o Laplace (*Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie* – Laboratório de Plasma e Conversão de Energia), o GRUCAD (Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos) e o GEEPS (*Génie électrique et électronique de Paris* – Grupo de Engenharia Elétrica e Eletrônica de Paris). O GREM3, com o qual esse trabalho foi desenvolvido, faz parte do laboratório Laplace, que forneceu os recursos necessários para a sua realização, como *software* e licenças, bancada de ensaios e amostras de material magnético. O Laplace é uma unidade mista de pesquisa do Centro Nacional da Pesquisa Científica (CNRS – *Centre National de la Recherche Scientifique*), do Instituto Nacional Politécnico de Toulouse (INPT – *Institut National Polytechnique de Toulouse*) e da Universidade Paul Sabatier (UPS – *Université Toulouse III – Paul Sabatier*).

1.1 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está dividido em 6 partes principais: introdução, referencial teórico sobre os temas envolvidos, contribuições a respeito de novos métodos de fabricação, descrição do modelo usado para máquinas síncronas a ímãs permanentes (MSIPs), contribuições para novos métodos de concepção de máquinas elétricas rotativas e, por fim, a conclusão.

Esta primeira parte explica o contexto e a problemática na qual o trabalho se insere.

A evolução da manufatura aditiva é apresentada na segunda parte, bem como vantagens e desafios de processos desse tipo. Serão indicados os principais processos para confecção de partes ferromagnéticas para máquinas elétricas, além de diversas aplicações da metodologia e alguns aspectos que influenciam fabricações com AM. Em seguida, conceitos importantes para a caracterização magnética de materiais são explicados. Logo após, especificidades sobre o dimensionamento de máquinas são apresentadas e, finalmente, uma base sobre otimização é provida.

A terceira parte do trabalho traz detalhes sobre a fabricação das amostras de material magnético e sobre a bancada de caracterização, assim como as configurações experimentais e a metodologia de trabalho. Então, apresentam-se os resultados de alguns ensaios feitos, para comparar diferentes configurações de parâmetros de impressão, e uma ferramenta desenvolvida em *Microsoft Excel* para facilitar o agrupamento e processamento de dados dos diferentes ensaios. Por fim, mostra-se o resultado de um ensaio realizado com uma amostra que foi recozida, comparando-o com o resultado da impressão padrão.

A quarta seção do trabalho descreve o modelo baseado em conceitos de carregamento usado para uma MSIP sinusoidal ideal de fluxo radial e polos lisos e alguns desenvolvimentos sobre o modelo para que ele seja usado no contexto de otimização.

A penúltima seção explica os programas de otimização desenvolvidos e implementados em MATLAB® e AMPL® (A *Mathematical Programming Language* – Uma Linguagem de Programação Matemática). Apresentam-se também os diferentes testes realizados para determinar os parâmetros de execução a serem utilizados, a validação dos resultados para três faixas de velocidade com um modelo direto de cálculo e uma última abordagem sobre o problema de otimização. Adicionalmente, faz-se considerações sobre desenhos 2D (bidimensionais) das máquinas otimizadas realizados no *software* FEMM (*Finite Element Method Magnetics*).

Finalmente, a última parte condensa as conclusões do trabalho, com considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

1.2 OBJETIVOS

Como este TCC envolve dois temas, os objetivos são diferentes para cada um deles.

No escopo de dimensionamento de máquinas elétricas rotativas, visa-se determinar qual é a maior potência mássica alcançável atualmente com as tecnologias disponíveis para MSIPs. Partindo-se de um estudo conduzido previamente pelo GREM3 para consolidar o dimensionamento de motores de alta PM (MRAD, 2018), a potência mecânica de 1 MW foi usada como referência. Fornece-se em (EL-REFAIE e OSAMA, 2019) uma pesquisa sobre máquinas de alta PM, onde um motor com essa magnitude de potência de saída é apresentado: motor *Honeywell* híbrido elétrico de propulsão de aeronave, com massa de 126,5 kg, velocidade nominal de 19000 rpm e PM de 7,9 kW/kg, o que foi determinado como sendo o limiar de PM a ser superado com motores de alta velocidade neste trabalho.

Já com relação à caracterização de materiais magnéticos manufaturados aditivamente, procurou-se verificar a influência de alguns parâmetros de impressão nas propriedades magnéticas das amostras, assim como o impacto do processo de recozimento nessas propriedades.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Essa seção providencia uma revisão bibliográfica sobre manufatura aditiva, caracterização de materiais, projeto de máquinas elétricas rotativas e otimização. Considerações importantes são feitas sobre esses quatro tópicos principais e conceitos essenciais para o entendimento deste trabalho são descritos.

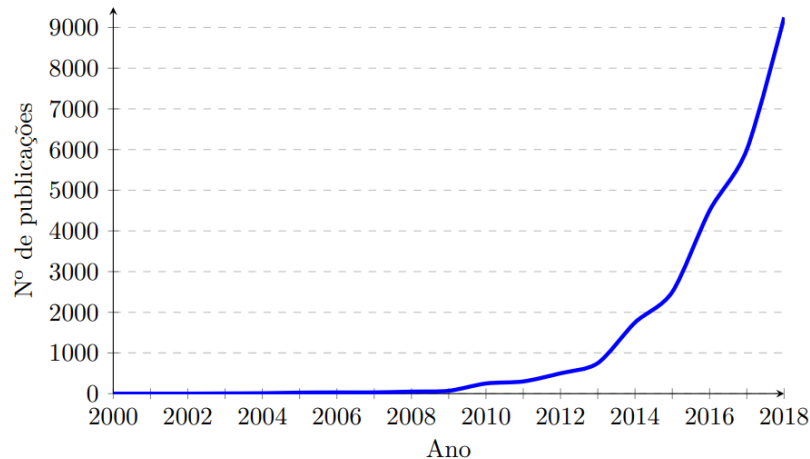
2.1 MANUFATURA ADITIVA

O projeto para manufatura e montagem (DFMA – *design for manufacturing and assembly*) tradicional consiste em projetar e otimizar um produto usando princípios de projeto para montagem (DFA – *Design for Assembly*) e projeto para manufatura (DFM – *Design for Manufacture*). O primeiro foca em reduzir tempo e custo da montagem, geralmente levando a uma redução do número de partes de um produto, enquanto o segundo se preocupa em tornar a sua manufatura mais fácil ao mesmo tempo que suas propriedades são mantidas, o que é obtido reduzindo-se a complexidade das operações de manufatura e o número de tolerâncias justas (DURAKOVIC, 2018). O mencionado também é verdade para AM, mas na prática existe uma diferença significativa em conhecimento, método, ferramentas e normas (DURAKOVIC, 2018).

Manufatura aditiva, ao contrário das tradicionais metodologias subtrativas, é definida como “um processo de junção de materiais para fazer objetos a partir de dados um modelo 3D” (FRAZIER, 2014). O primeiro processo de AM bem sucedido foi inventado na década de 1980, com fortes contribuições de Hideo Kodama e Charles Hull (WOHLERS, 2005), seguido na década de 1990 pela primeira máquina baseada na tecnologia de sinterização direta de metal por laser (DMLS – *Direct Metal Laser Sintering*), demonstrada pela *Electro Optical Systems* (EOS) com o protótipo *EOSINT M160* (METAL AM MAGAZINE). Os avanços nessa metodologia de manufatura possibilitaram, em 2015, a construção do *Rolls-Royce Trent XWB-97*, ainda hoje a maior estrutura de motor de aeronave construída com AM, a qual teve seu voo de teste bem-sucedido (ROLLS-ROYCE, 2015), o que contribuiu para consolidar a usabilidade de AM e incentivou estudos nesse ramo.

Esforços em pesquisa têm crescido exponencialmente na última década, como mostrado na Figura 1. Isso é explicado pelo vasto domínio de aplicação desse processo emergente e pela necessidade de preencher o vão de conhecimento sobre ele (DURAKOVIC, 2018) em áreas como: projeto, modelagem de processo e controle, materiais, processos e máquinas (FRAZIER, 2014).

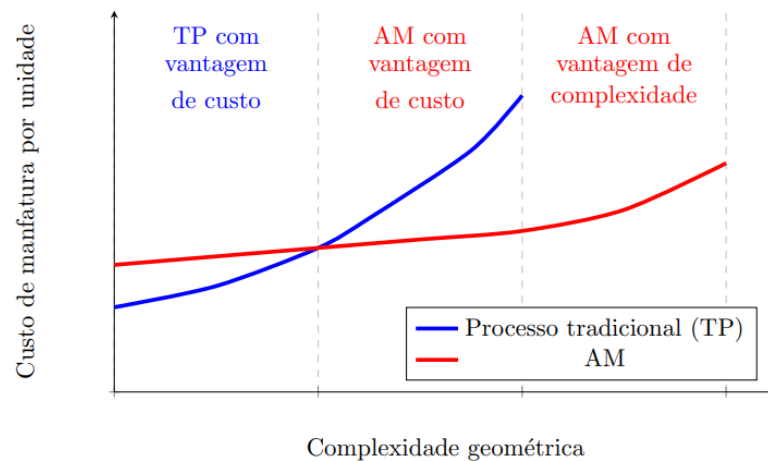
Figura 1 – Número de publicações conforme *Scopus*.



Fonte: Adaptado de (DURAKOVIC, 2018).

O aparecimento dessa tecnologia tornou possível produzir geometrias complexas sem aumento do custo de produção, tendo não apenas vantagem de custo para partes complexas, mas também uma vantagem no que diz respeito à limitação por nível de complexidade da peça (DURAKOVIC, 2018). Assim, a tecnologia possibilita a produção de partes mais complexas do que seria possível com métodos tradicionais de manufatura, como é ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Relação entre custo e complexidade geométrica para AM e processos tradicionais.



Fonte: Adaptado de (DURAKOVIC, 2018).

Podem ser citadas vantagens de AM em diversos aspectos (DURAKOVIC, 2018):

- Custo e complexidade geométrica: menor custo por partes mais complexas e possibilidade de manufaturar estruturas com canais internos, o que não seria factível com processos convencionais;
- Complexidade funcional: pode não haver necessidade de montagem;

- Complexidade do material: podem ser utilizados múltiplos materiais em uma operação;
- Complexidade hierárquica: projeto de manufatura de vários feitos de estruturas internas;
- Baixa habilidade em manufatura: não há a necessidade de profissionais altamente qualificados para realizar partes complexas;
- Redução do desperdício de material: apenas a quantidade necessária de material é usada;
- Variedade de peça e material: novas peças podem ser confeccionadas sem a necessidade de investimento em ferramentas extras;
- Método de projeto: ferramentas e regras para AM estão traçando um novo conceito de projeto;
- Controle de qualidade: pode incluir requerimentos de tamanho, configurações e análise de processos.

Como AM está evoluindo rapidamente, padronizar o processo torna-se difícil, sendo isso um ponto crítico para sua adoção (FRAZIER, 2014). Em (FRAZIER, POLAKOVICS e KOEGEL, 2001) apud (FRAZIER, 2014), alguns requerimentos são definidos:

- Os materiais devem ser produzidos segundo especificações fixas de processo;
- Dados estatísticos substanciais sobre propriedades mecânicas devem estar disponíveis;
- A tecnologia do material deve ser demonstrada em ambientes de operação relevantes.

Em (FRAZIER, 2014) também são apresentados fatores a favor de AM sobre manufatura convencional sob o ponto de vista de negócios, somando-se às vantagens apresentadas acima: investimento de capital, custos de logística, custos de transporte e prototipagem.

2.1.1 Processos e tecnologias

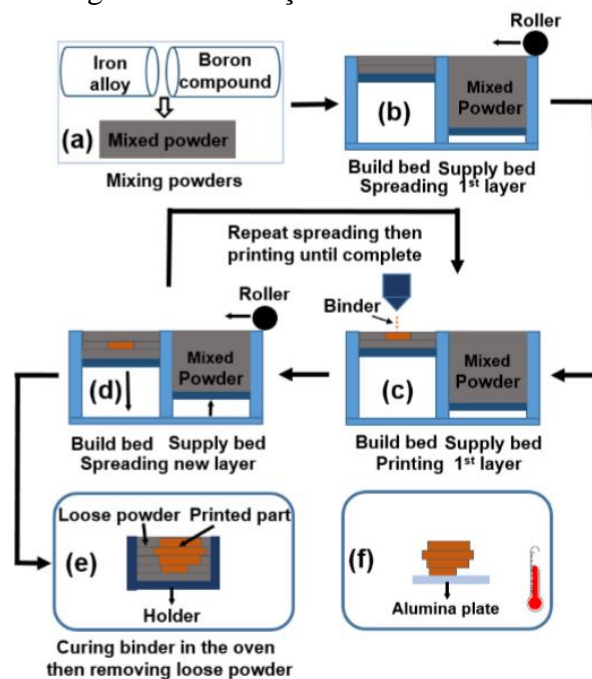
Existem diversos processos e tecnologias para AM que são cada dia mais numerosos, já que esse método de manufatura ainda está sob desenvolvimento. Essa seção apresenta os principais processos e tecnologias para aplicações no campo da engenharia elétrica, focando na impressão de metais, baseando-se principalmente em (ALL3DP, 2020).

2.1.1.1 Impressão 3D Aglutinante de Metal (MJ - Metal Binder Jetting)

Em impressão 3D aglutinante típica (BJ – *Binder Jetting*), gotas de um líquido aglutinante são seletivamente depositadas com uma cabeça de impressão sobre uma superfície de pó. Dessa maneira, o objeto é impresso camada a camada, com a mesa de impressão sendo rebaixada após a conclusão de cada camada e sendo espalhado o agente aglutinante sobre uma nova camada de pó. Após a impressão, é necessário que o objeto seja curado para ganhar força, sendo posteriormente removido da cama de pó. O sistema é ilustrado na Figura 3, onde observa-se:

- Mistura de compósitos;
- Espalhamento das partículas de pó com um rolo para formar primeira camada;
- Impressão da primeira camada com deposição de agente aglutinante;
- Espalhamento das partículas de nova camada, repetindo-se a etapa anterior até conclusão da peça;
- A peça é curada em um forno, sendo então retirado o pó solto;
- Pode ser realizado outro processo térmico, como será comentado a seguir.

Figura 3 – Ilustração de sistema de BJ.

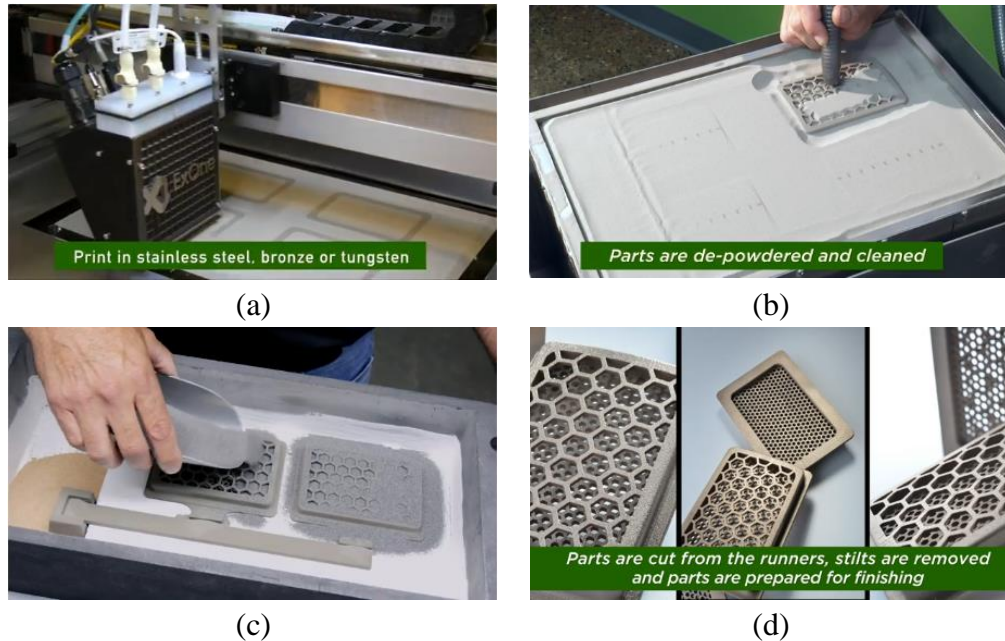


Fonte: (PHAM, DO, *et al.*, 2018).

Para produzir objetos metálicos com BJ, um processo secundário é necessário, o qual pode ser infiltração ou sinterização. No primeiro, depois da impressão e cura, a peça pode ir a uma fornaça para queimar o aglutinante e, então, infiltrar cobre por capilaridade, aumentando a densidade do material de 60% para aproximadamente 90%, além de sua resistência mecânica.

No segundo caso, o objeto impresso é curado em um forno e então sinterizado em uma fornaça, o que pode aumentar sua densidade para até 97%, porém pode ocorrer um encolhimento não uniforme. A Figura 4 mostra o processo passo-a-passo.

Figura 4 – Processo de impressão 3D aglutinante de metal. (a) Impressão camada a camada, (b) Remoção do excesso de pó das partes, (c) Infiltração, (d) Resultado.

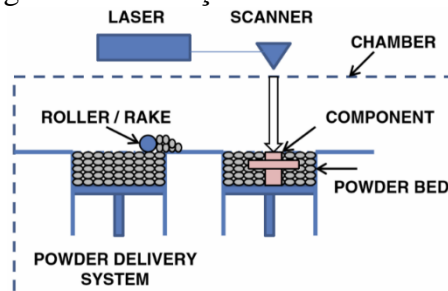


Fonte: (EXONE, 2014).

2.1.1.2 Fusão por Cama de Pó de Metal (PBF - Metal Powder Bed Fusion)

Fusão por Cama de Pó de Metal usa uma fonte térmica para induzir fusão entre partículas de pó de metal, camada a camada, com um sistema similar ao processo explicado na Seção 2.1.1.1, como ilustrado na Figura 5. Esse processo apresenta algumas desvantagens, como risco de empenamento por causa de estresse residual de altas temperaturas, necessidade de suporte estrutural para evitar distorções e necessidade de pós-tratamento. Entretanto, o método possui a vantagem de produzir objetos mais resistentes.

Figura 5 – Ilustração de sistema de PBF.

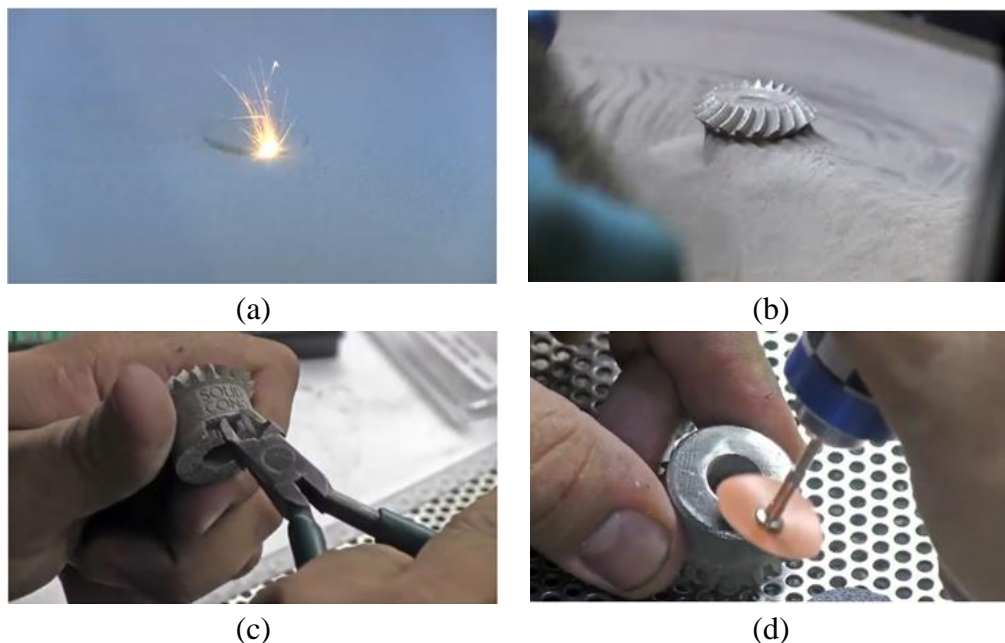


Fonte: (FRAZIER, 2014).

As principais tecnologias para esse processo são:

- Sinterização Seletiva por Laser (SLS – *Selective Laser Sintering*) ou Sinterização Direta de Metal por Laser (DMLS – *Direct Metal Laser Sintering*): os materiais, tipicamente ligas metálicas, atingem uma temperatura próxima à de fusão, de forma que são fundidos parcialmente, mas não derretidos (SILVA, 2017). Pode ser necessário aplicar um aglomerante, que é removido posteriormente com vaporização em um forno (SILVA, 2017). Esse processo é mostrado na Figura 6;
- Fusão Seletiva por Laser (SLM – *Selective Laser Melting*): um laser é usado para derreter por completo o pó, o que traz a vantagem de uma composição mais homogênea das partes quando comparada à DMLS, além de usar uma única temperatura de fusão, o que simplifica o processo. O processo é realizado em um ambiente com argônio ou nitrogênio para proteger contra oxidação e permitir uma condução de calor eficiente (SILVA, 2017);
- Fusão por Feixe de Elétrons (EBM – *Electron Beam Melting*): um feixe de alta energia induz fusão entre partículas condutoras no vácuo, normalmente sendo mais rápido que a DMLS e a SLM por causa de sua maior densidade de energia. Por outro lado, aspecto mínimo de tamanho, tamanho de partícula de pó, grossura de camada e acabamento de superfície são normalmente maiores.

Figura 6 – Tecnologia DMLS. (a) Cama de pó e fusão, (b) Retirada do excesso de pó, (c) Remoção dos suportes, (d) Acabamento.

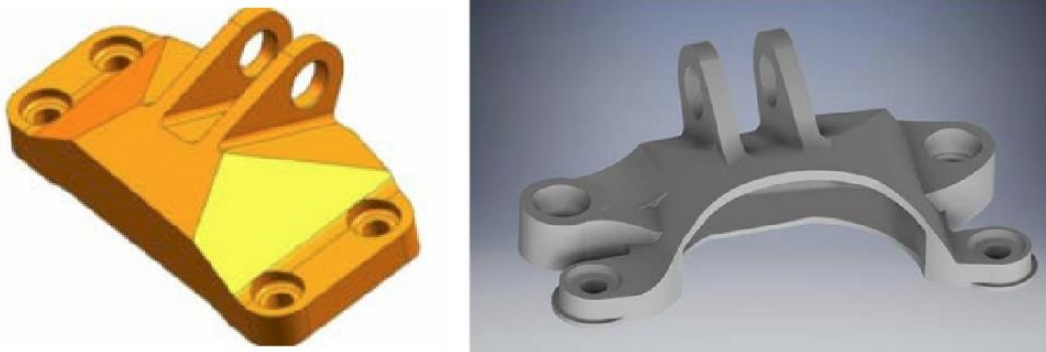


Fonte: (STRATASYS DIRECT MANUFACTURING, 2017).

2.1.2 Aplicações

No estudo de caso em otimização topológica de (GEBISA e LEMU, 2017), uma redução de massa de 65% foi atingida enquanto a mesma carga mecânica foi sustentada. A abordagem do estudo começou com um modelo CAD (Design Auxiliado por Computador - *Computer Aided Design*) original, o qual foi submetido a uma análise estrutural para verificar estresse e distribuição de deslocamento. Então, foi removido o material de áreas sem contribuição significativa para a força mecânica, o que foi determinado pelo modelo de otimização topológica. Depois da construção de um novo modelo CAD, verificou-se com FEA (Análise de Elementos Finitos - *Finite Element Analysis*) se os requerimentos de projeto foram atingidos. O resultado do trabalho é mostrado na Figura 7.

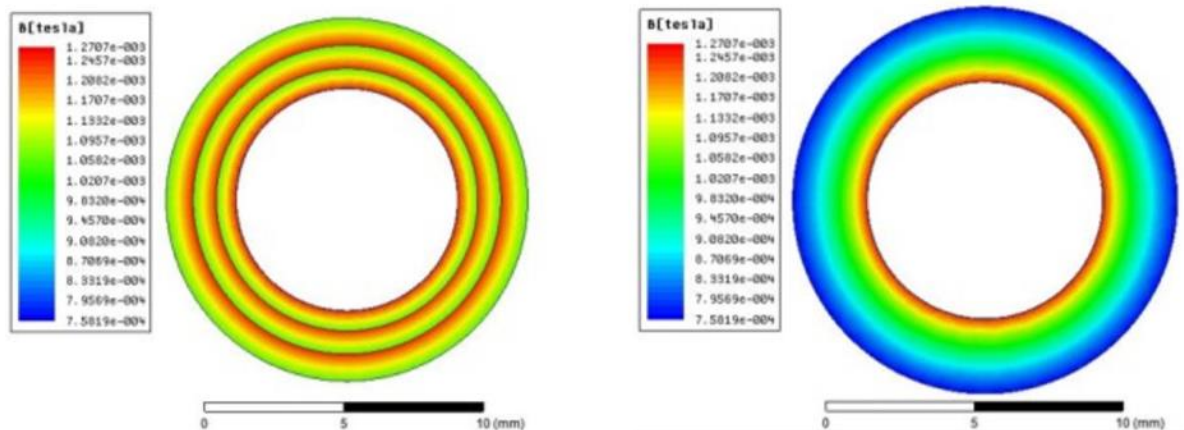
Figura 7 – Design inicial (esquerda) e design final otimizado (direita).



Fonte: (GEBISA e LEMU, 2017).

Para produzir núcleos magnéticos com densidade de potência melhorada, foram testados dois tipos de sistema de pasta magnética para fabricar núcleos de permeabilidade múltipla com impressão 3D na pesquisa de (LIU, DING, *et al.*, 2017). Para um núcleo de três permeabilidades, obteve-se em simulações 2D a mesma indutância que para um indutor toroidal de permeabilidade única que possuía tamanho em torno de 28% maior e distribuição de fluxo magnético significativamente menos uniforme, conforme Figura 8, o que limita a densidade de potência. Em medições de indutância por corrente contínua (CC), indutores de pó de ferro tiveram o mesmo comportamento que indutores de ferrite, ambos estando de acordo com as simulações.

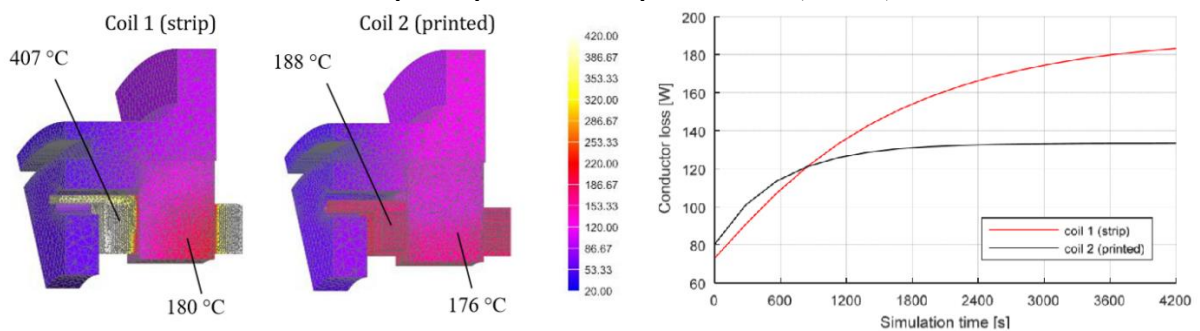
Figura 8 – Distribuição de fluxo em núcleo magnético de múltiplas permeabilidades (esquerda) e em indutor toroidal de permeabilidade única (direita).



Fonte: (LIU, DING, *et al.*, 2017).

Em (LORENZ, RUDOLPH e WERNER, 2018), foram avaliadas as capacidades térmicas de uma bobina manufaturada aditivamente em uma máquina de relutância chaveada. Obteve-se que a bobina impressa teve melhor acoplamento com o estator quando comparada com a bobina de fita, sendo melhor na dissipação de calor, o que limitou o aumento de sua resistência. Mostrou-se que a bobina impressa foi capaz de suportar correntes maiores sem superaquecimento, além de fornecer perdas menores no condutor para um tempo maior de sobrecarga da máquina, como mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Distribuição de temperatura a 15000 rpm com tempo de simulação $t = 4200$ s (esquerda) e perdas no condutor dependentes da temperatura versus tempo de simulação, a 15000 rpm, e passo de tempo de 280 s (direita).

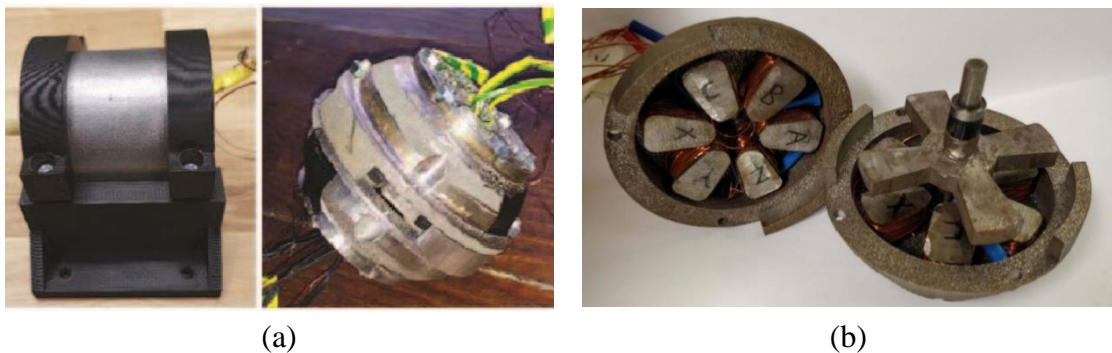


Fonte: adaptado de (LORENZ, RUDOLPH e WERNER, 2018).

A manufatura aditiva também está sendo explorada para imprimir máquinas elétricas, como foi feito em (KALLASTE, VAIMANN e RASSÖLKIN, 2018) e (TIISMUS, KALLASTE, *et al.*). No primeiro, dois projetos de máquinas de relutância foram impressos, um de fluxo radial e outro de fluxo axial, mas características de funcionamento não foram apresentadas no artigo. Já no segundo, componentes de rotor e estator de pó de aço com 3% de silício foram manufaturados para uma máquina de relutância chaveada de fluxo axial de

maneira bem-sucedida com tecnologia SLM. Mesmo assim, foi necessário um pós-processamento que incluiu a remoção de estruturas de suporte metálicas e um desbaste adicional para corrigir pequenas deformações dentro da máquina e melhorar o acabamento da superfície. Esse estudo também cita alguns desafios para a produção de máquinas dessa forma: velocidade de manufatura relativamente lenta e limitação quanto ao uso de múltiplos materiais. Ambos os trabalhos são mostrados na Figura 10.

Figura 10 – Impressão de máquinas elétricas com manufatura aditiva. (a) Máquinas de fluxo radial (esquerda) e axial (direita), (b) Cada metade do estator e o rotor com rolamentos encaixados.

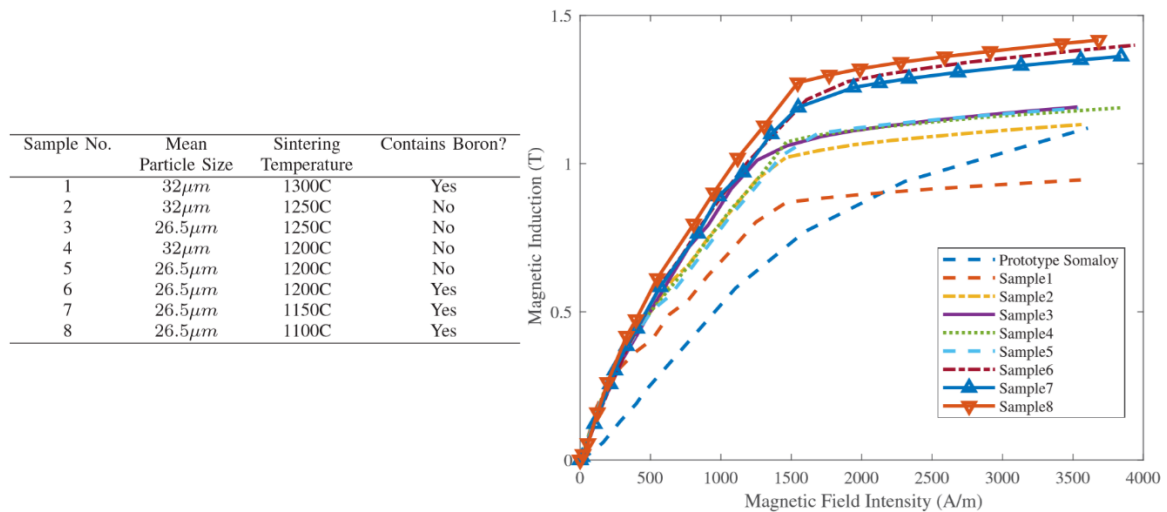


Fonte: (KALLASTE, VAIMANN e RASSÖLKIN, 2018) e (TIISMUS, KALLASTE, *et al.*).

2.1.3 Influência dos parâmetros

Oito amostras de material ferromagnético foram feitas em (PHAM, DO, *et al.*, 2018) com o processo de BJ de impressão 3D para comparar a performance magnética utilizando-se diferentes parâmetros de impressão, como a temperatura de sinterização, o tamanho das partículas e a mistura de pós. No estudo, obteve-se uma permeabilidade relativa máxima três vezes maior para as amostras impressas em comparação com *Somaloy*, além de determinar-se que uma temperatura mais baixa de sinterização e um tamanho maior de partículas melhoram a permeabilidade. A Figura 11 mostra os principais parâmetros de impressão e a curva de magnetização das amostras do estudo.

Figura 11 – Parâmetros de impressão de toroides de ferrossilício (FeSi) à esquerda e comparação entre as curvas de magnetização para as amostras ferromagnéticas impressas e para um protótipo de compósito magnético mole (SMC – *Soft Magnetic Composite*) à direita.



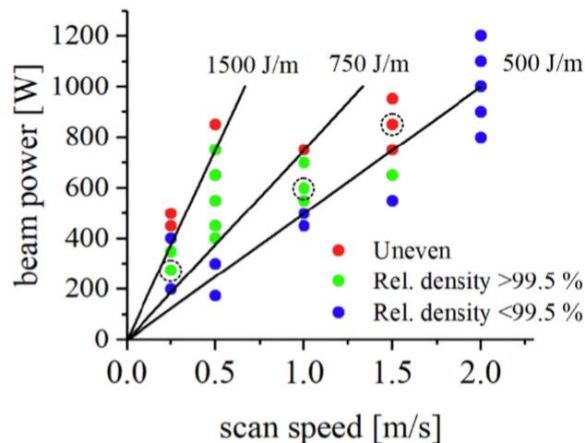
Fonte: adaptado de (PHAM, DO, *et al.*, 2018).

Outros parâmetros são mencionados em (TIISMUS, KALLASTE, *et al.*) para a melhoria de propriedades de materiais magnéticos moles impressos: a energia de entrada da impressão, pré-secagem do pó, pré-aquecimento da base da impressora e recozimento do material após a impressão.

Baixa densidade relativa e rachaduras por calor estão entre os problemas mais comuns quando a tecnologia SLM é utilizada (TIISMUS, KALLASTE, *et al.*). Para explorar esses problemas, quatro amostras toroidais foram impressas em (TIISMUS, KALLASTE, *et al.*): duas com 3% de Silício (Si) e outras duas com 6,5% de Si. No trabalho, é mencionado sobre resultados de 99,8% de densidade de aço de alto teor de Si com fissuras mínimas, mas no estudo as amostras foram impressas com parâmetros de processamento sub-ótimos a fim de reduzir o tempo de impressão e o consumo de energia, enquanto um balanço entre duração de impressão e qualidade do material ainda não está definido. Obtiveram-se resultados contraditórios, pois o maior e o menor valor de coercividade obtidos ocorreram para toroides com 3% de Si, o que foi explicado por fissuras excessivas e alta porosidade das amostras com 6,5% de Si. Por fim, indicou-se o processo de recozimento das amostras como imprescindível para a melhoria de suas propriedades magnéticas. Afirmou-se que esse processo adicional relaxa estresses internos no material, aumentando o tamanho dos grãos e reduzindo defeitos de treliça durante o processo de recristalização, o que tornou as amostras impressas comparáveis a materiais comerciais de alta qualidade (TIISMUS, KALLASTE, *et al.*).

Foi possível imprimir cobre 99,95% puro usando a tecnologia EBM em (GUSCHLBAUER, MOMENI, *et al.*, 2018) ao regular os parâmetros de velocidade de varredura e de potência do feixe. A Figura 12 representa os resultados para as amostras impressas sob diferentes condições de potência e velocidade. Notam-se amostras irregulares para velocidades altas com potência do feixe de elétrons superior a 750 W e para baixas velocidades com potências acima de 400 W, sendo a densidade de energia acima de 750 J/m no primeiro caso e acima de 1500 J/m no segundo. Também se observam amostras de baixa densidade quando níveis insuficientes de energia foram aplicados, indicando que amostras densas e regulares foram obtidas com configurações de velocidades de varredura entre 0,5 e 1 m/s e com potência de feixe entre 500 W e 700 W.

Figura 12 – Marcas verdes representam cuboides com densidade relativa maior do que 99,5%, marcas azuis representam densidades relativas menores do que 99,5% e marcas vermelhas são densas, porém irregulares, devido a energias altas. As linhas pretas sólidas representam linhas de energia constante (linhas de energia = potência do feixe/velocidade de varredura).



Fonte: (GUSCHLBAUER, MOMENI, *et al.*, 2018).

2.2 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS

Antes de falar explicitamente sobre a caracterização de materiais magnéticos, é importante definir alguns conceitos relacionados ao magnetismo.

A indução magnética **B**, ou densidade de fluxo magnético, é o conceito mais importante no estudo de magnetismo (NOURDINE, 2002), pois ela dá informação sobre quantas linhas de fluxo um material é capaz de absorver e permite a avaliação de forças magnéticas. A indução tem uma forte relação com campos elétricos, pois quando ela varia no tempo, sempre está acompanhada por campos elétricos (NOURDINE, 2002).

Por outro lado, o campo magnético \mathbf{H} , se relaciona diretamente com correntes elétricas e não pode ser medido diretamente, sendo deduzido de (1), no vácuo, onde μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo (NOURDINE, 2002).

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (1)$$

Em uma escala microscópica, um material é dito magnético se os momentos dos átomos de um corpo homogêneo se organizam quando submetidos a um campo magnético (NOURDINE, 2002). Se essa organização ocorre no sentido contrário ao campo aplicado, o material é dito diamagnético, mas se ocorre no mesmo sentido, o material é considerado ferromagnético (NOURDINE, 2002), o tipo no qual esse trabalho se interessa.

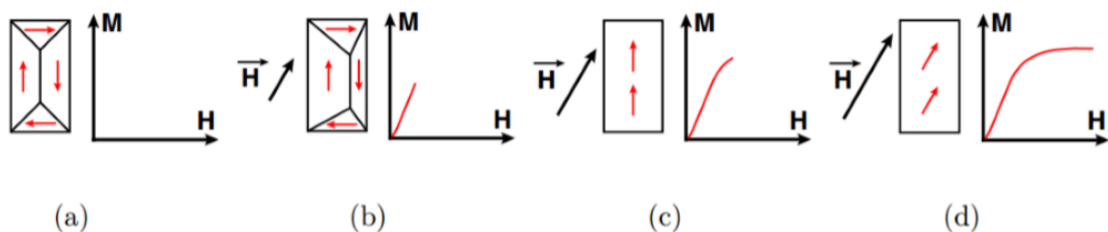
Para um material magnético, a indução é escrita conforme (2) ou, usando a convenção de Sommerfeld (MAILHÉ, 2018), como (3). Nas equações, \mathbf{M} é a magnetização do material, \mathbf{J} é a polarização, μ é a permeabilidade do material e μ_r é a permeabilidade relativa.

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{J} \quad (2)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (3)$$

Para explicar a magnetização, domínios e paredes devem ser definidos. Um domínio é uma porção do cristal onde momentos de mesmo sentido estão agrupados e uma parede é a separação entre dois domínios (NOURDINE, 2002). A Figura 13 resume a magnetização.

Figura 13 – Comportamento magnético de materiais ferromagnéticos. (a) Não há campo magnético externo, (b) O volume de domínios convenientemente orientados aumenta, (c) O movimento das paredes cessa quando não há mais domínios menos energéticos viáveis disponíveis, (d) Os domínios restantes sofrem rotação.



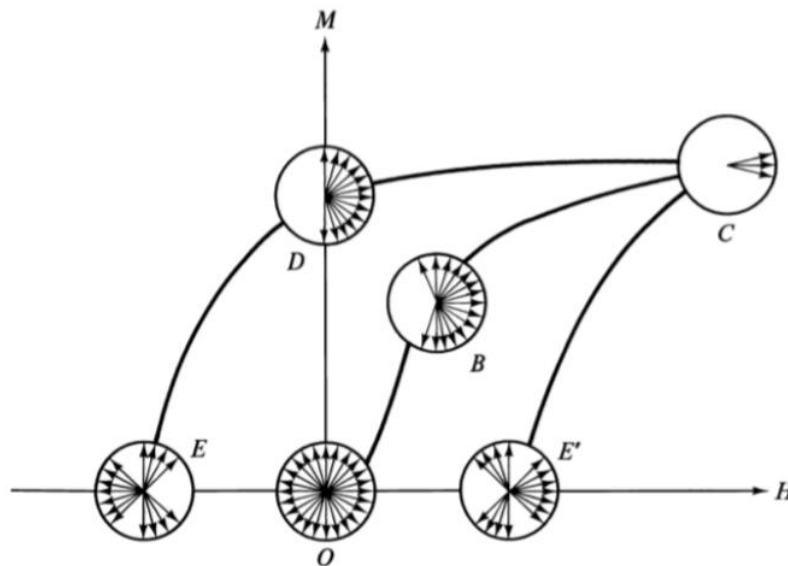
Fonte: (DANIEL, 2003 apud MAILHÉ, 2018).

Materiais magnéticos tem uma propriedade chamada histerese, definida pela capacidade deles de reter parte da magnetização após um campo magnético externo deixar de

existir, como ilustrado na Figura 14, que mostra a parte superior de um ciclo de histerese. Na Figura 14, o caminho a ser seguido é (MAILHÉ, 2018):

- (O) Estado desmagnetizado, com dispersão magnética ideal;
- (B) Um campo magnético positivo é aplicado, levando aos estágios (b) e (c) da Figura 13;
- (C) Material próximo ao nível de saturação, onde a polarização está próxima de seu nível máximo (NOURDINE, 2002);
- (D) O campo magnético é removido, deixando uma magnetização remanente;
- (E) Um campo negativo é aplicado de forma que a magnetização resultante no material seja nula, porém em uma configuração energética instável. Esse campo é dito campo coercitivo;
- (E') É o ponto simétrico a (E).

Figura 14 – Esquema de evolução da direção dos domínios de um material ferromagnético quando submetido a uma excitação alternada.



Fonte: (CHIKAZUMI e GRAHAM, 1997 apud MAILHÉ, 2018).

É possível distinguir materiais magnéticos moles e duros. Este trabalho está em materiais moles, os quais são mais fáceis de desmagnetizar, tendo campos coercitivos de até 100 A/m (NOURDINE, 2002) Adversamente, nos materiais duros, a polarização se mantém aproximadamente em seu valor de saturação e os campos coercitivos são tipicamente maiores do que 100 kA/m (NOURDINE, 2002).

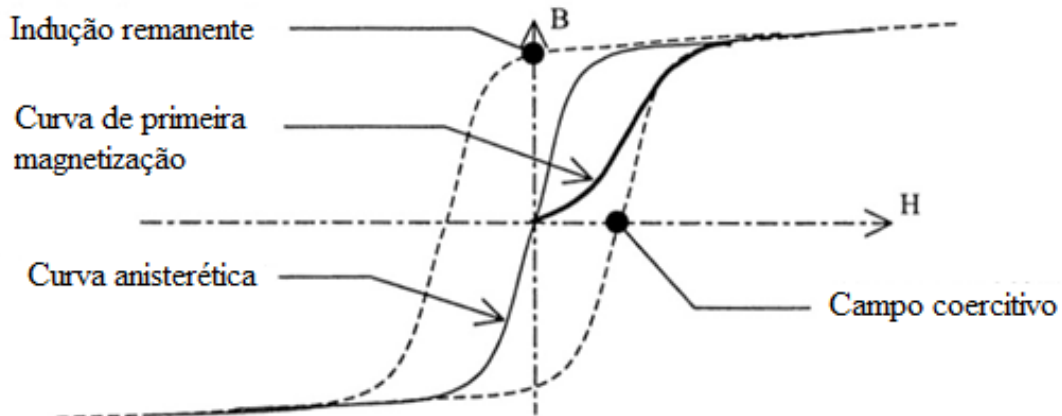
É notado, experimentalmente, que a indução remanente de um material deixa de existir acima de uma temperatura chamada de temperatura de Curie (NOURDINE, 2002). Uma opção

direta para desmagnetizar um material seria esquentá-lo acima de seu ponto de Curie e deixá-lo esfriar lentamente (MAILHÉ, 2018). Entretanto, uma maneira mais simples e fácil de desmagnetizar um espécime é aplicar campos alternados de amplitudes lentamente decrescentes (MAILHÉ, 2018).

A Figura 15 mostra as principais definições para a caracterização de materiais magnéticos indicadas em um ciclo B-H, que são: campo coercitivo, indução remanente, curva anisterética e curva de primeira magnetização (NOURDINE, 2002), dentre os quais os dois primeiros já foram explicados acima.

A curva anisterética representa como a indução em um material seria se as transformações ocorridas nele fossem reversíveis (NOURDINE, 2002). Essa curva é obtida experimentalmente tomando-se o valor de indução correspondente ao maior valor de campo magnético aplicado em cada ciclo de um campo sinusoidal decrescente, assumindo-se que a indução converge para a curva anisterética (NOURDINE, 2002).

Figura 15 – Curvas e valores característicos mostrados em um ciclo de histerese.



Fonte: Adaptado de (NOURDINE, 2002).

A curva de primeira magnetização corresponde ao caminho da indução de um material inicialmente desmagnetizado submetido a um campo externo que varia de zero até infinito, i.e., até que o material sature.

Existem três tipos de perdas definidas atualmente: histerética, por correntes de Foucault e excedentes. A primeira se relaciona a mecanismos irreversíveis que ocorrem devido à evolução dos momentos e energias internas de um cristal submetido a campos magnéticos (NOURDINE, 2002). As perdas por correntes de Foucault, também chamadas de perdas por correntes induzidas ou por correntes de redemoinho, estão relacionadas a fenômenos dinâmicos. Mais especificamente, essas perdas se referem às correntes induzidas em cada material condutor

que, por si só, gera um campo magnético oposto àquele que o excita, conseqüentemente reduzindo indução do material (NOURDINE, 2002). Finalmente, as perdas excedentes são dadas pela diferença entre perdas totais e as outras duas mencionadas (NOURDINE, 2002).

A densidade de energia gasta em um ciclo de histerese pode ser calculada com (4), onde m_v é a densidade do material e B_{max} é a indução máxima do ciclo (MAILHÉ, 2018). Isso revela a relação estrita entre perdas totais e a área da curva B-H, o que explica o porquê de materiais duros terem perdas maiores do que os moles.

$$W_{tot} = \frac{1}{m_v} \int_0^{B_{max}} H dB \quad (4)$$

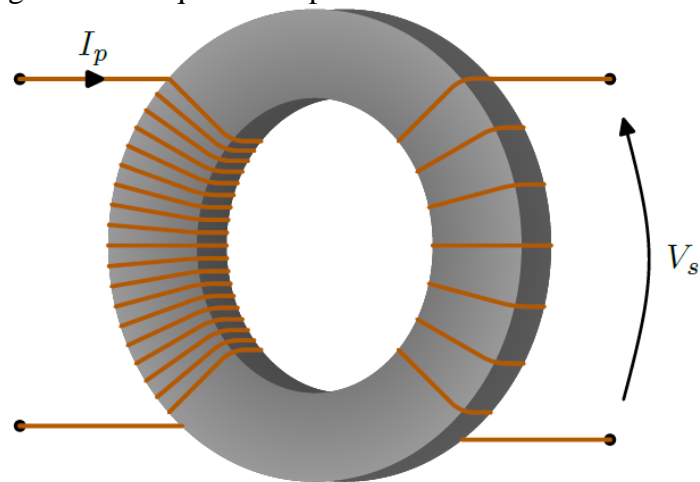
Como mencionado anteriormente, a indução se relaciona diretamente com campos elétricos e, conseqüentemente, com diferenças de potencial, ao passo que campos magnéticos se relacionam com correntes elétricas. Essas relações são definidas por duas das quatro equações de Maxwell, vide (5) e (6), também chamadas de lei de Faraday-Lenz e lei de Ampère, respectivamente. Essas relações estabelecem o princípio de uma bancada para caracterização de materiais magnéticos, mostrando que podemos definir uma indução em uma determinada área ao integrar a tensão e que um campo magnético é proporcional a uma corrente (KANE, 2015)

$$v = \oint_{\partial S} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \iint_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \quad (5)$$

$$\oint_{\partial S} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \iint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} \quad (6)$$

Um esquema simplificado para amostras toroidais é representado na Figura 16, onde a amostra age como um transformador, ilustrando que um material pode ser caracterizado aplicando-se uma corrente em seu enrolamento primário e medindo a tensão em seu enrolamento secundário (KANE, 2015). Na prática, um amplificador de potência alimenta a corrente do primário, que é medida com um resistor *shunt*, e a tensão no secundário é verificada e controlada para ser mantida sinusoidal (BROCKHAUSS MEASUREMENTS).

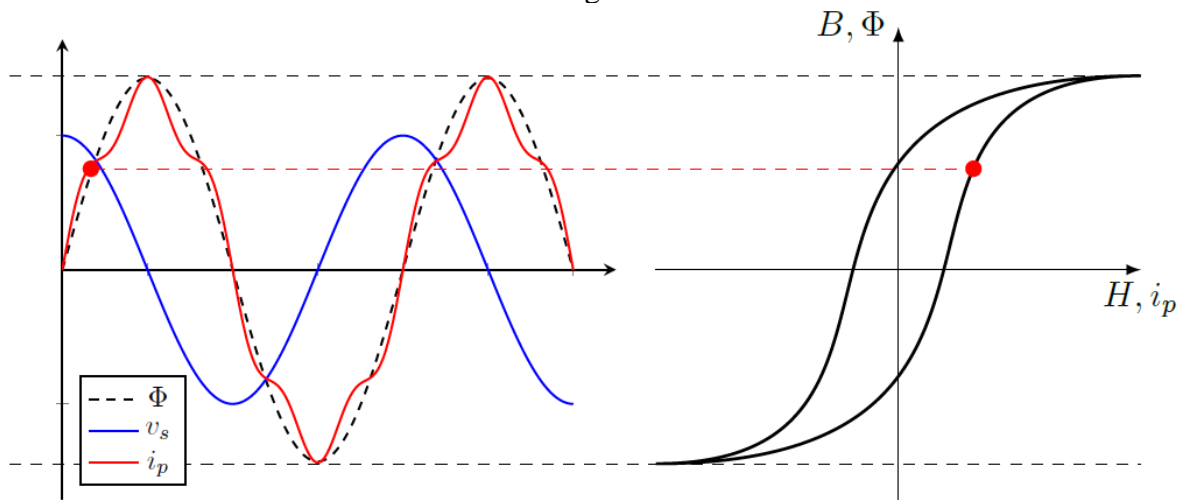
Figura 16 – Esquema simplificado da bancada de testes.



Fonte: próprio autor.

Devido à não linearidade da permeabilidade de núcleos ferromagnéticos, a corrente de excitação em transformadores é distorcida mesmo com uma fonte sinusoidal (GOTTLIEB, 1998). Apesar da corrente distorcida, uma tensão sinusoidal é induzida no secundário já que o fluxo mútuo, que é o agente de transferência de energia entre os enrolamentos, é mantido praticamente constante (GOTTLIEB, 1998). A Figura 17 ilustra como a corrente do primário é distorcida pelas propriedades não lineares de materiais ferromagnéticos, observando-se que ela é estereotipada na figura, pois, na realidade, não há simetria em meio período.

Figura 17 – Distorção na corrente do primário devida a propriedades não lineares de materiais ferromagnéticos.



Fonte: próprio autor.

2.3 DIMENSIONAMENTO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS

Para projetar uma máquina elétrica rotativa, algumas características básicas podem ser consideradas (PYRHONEN, JOKINEN e HRABOVCOVA, 2008):

- Tipo da máquina: síncrona;
- Tipo de construção: polo interno, fluxo radial;
- Potência mecânica de saída nominal: 1 MW. O fator de potência também seria necessário em um dimensionamento típico da máquina;
- Velocidade rotacional nominal;
- Número de pares de polos p ;
- Frequência nominal f_e ;
- Número de fases;
- Classe do invólucro e estrutura;
- Eficiência;
- Torque necessário com rotor travado;
- Torque de partida;
- Torque máximo;
- Corrente de rotor travado;
- Acionamento controlado por velocidade;
- Padrões de projeto;
- Limitações econômicas;
- Manufaturabilidade.

Ainda, existem vários parâmetros livres, dentre os quais pode-se citar: diâmetro externo e comprimento do núcleo do estator, largura e altura das ranhuras do estator, valor de pico da densidade de fluxo magnético no entreferro, número de pares de polo e frequência e, ainda, diâmetro e comprimento do entreferro (PYRHONEN, JOKINEN e HRABOVCOVA, 2008), o que será indicado adiante, mas desconsiderado na Seção 4.

O desempenho de máquinas elétricas é limitado principalmente por restrições térmicas em materiais de isolamento de enrolamentos (LEFÈVRE, EL-AABID, *et al.*, 2019). Baseando-se em máquinas padrão bem projetadas, algumas definições empíricas de carregamento podem ser aplicadas em uma fase preliminar de projeto (PYRHONEN, JOKINEN e HRABOVCOVA, 2008) e limitações tecnológicas podem ser reconhecidas.

Extratos de (PYRHONEN, JOKINEN e HRABOVCOVA, 2008) são condensados na Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3, respectivamente, com valores de pico típicos de densidade de fluxo magnético, com valores rms (valor médio quadrático - *root mean square*) permitidos para densidades de corrente e para densidades lineares de corrente e, a partir dessas duas tabelas, a última apresenta valores típicos de estresse tangencial, também chamado de densidade de força tangencial.

Tabela 1 – Valores de pico típicos de densidade de fluxo magnético.

Valor de pico de densidade de fluxo B_m (T)	
Máquinas síncronas de polos lisos	
Entreferro	0,8 – 1,05
Coroa do estator	1,1 – 1,5
Dentes do estator	1,5 – 2,0

Fonte: adaptado de (PYRHONEN, JOKINEN e HRABOVCOVA, 2008).

Tabela 2 – Valores rms permitidos para densidades lineares de corrente no enrolamento de armadura e para densidades de corrente.

Máquinas síncronas de polos lisos			
	Resfriamento indireto		Resfriamento direto por água
	Ar	Hidrogênio	
A_{rms} (kA/m)	30 – 80	90 – 110	150 – 200
j_{rms} (A/mm ²)	3 – 5	4 – 6	7 – 10

Fonte: adaptado de (PYRHONEN, JOKINEN e HRABOVCOVA, 2008).

Tabela 3 – Valores típicos de estresse tangencial.

Máquinas síncronas de polos lisos			
	Resfriamento indireto		Resfriamento direto por água
	Ar	Hidrogênio	
f_t (N/m ²)			
Mínimo	17000	51000	85000
Médio	36000	65500	114500
Máximo	59500	81500	148500

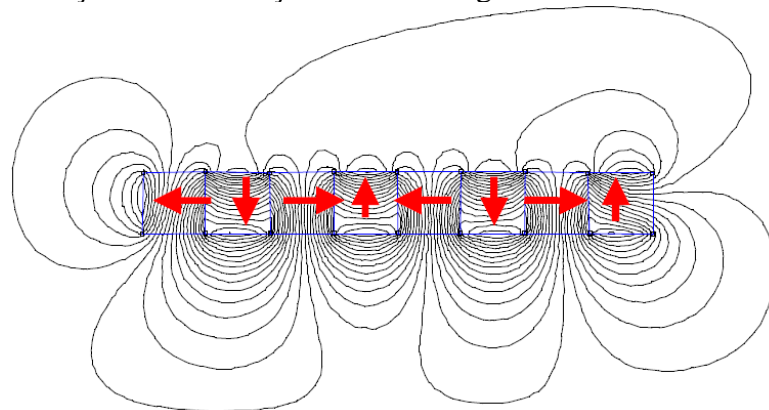
Fonte: adaptado de (PYRHONEN, JOKINEN e HRABOVCOVA, 2008).

Segundo Ibissam, Mourad, *et al* (2014), “a demanda por maquinários elétricos mais compactos e mais eficientes direcionou a atenção dos industriais e pesquisadores para máquinas a ímãs permanentes”, o tipo de máquina foco deste trabalho. Por causa da remanência e

coercitividade limitadas dos ímãs disponíveis atualmente, é sugerido em (PYRHONEN, JOKINEN e HRABOVCOVA, 2008) que sejam selecionados valores dentro da metade inferior dos intervalos de densidade de fluxo da Tabela 1, o que deve ser considerado ao se trabalhar com soluções ótimas para garantir que essas induções não sejam excessivamente altas para condições realistas.

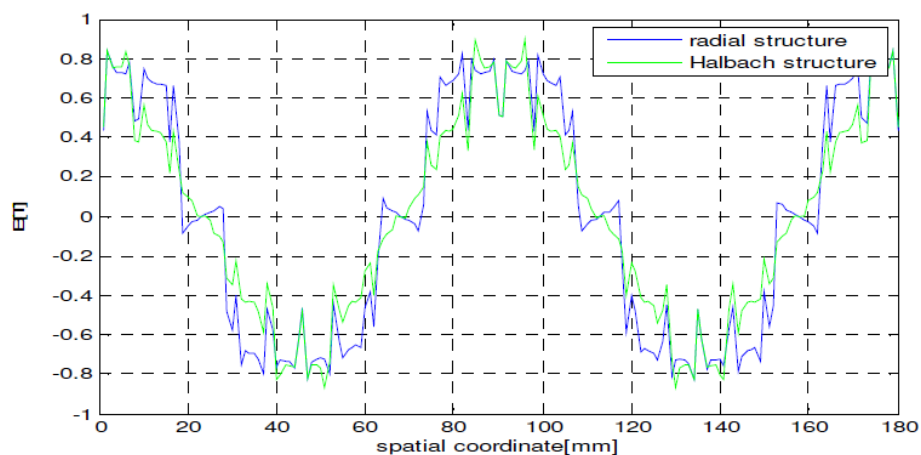
É importante mencionar que o campo magnético no entreferro se aproxima mais de um sinal trapezoidal do que sinusoidal, logo harmônicas de ordens elevadas com efeitos negativos estão presentes no seu espectro (IBTISSAM, MOURAD, *et al.*, 2014). Como o modelo a ser apresentado na Seção 4 considera uma máquina idealmente sinusoidal, assume-se o uso de um arranjo de Halbach para os ímãs no rotor, o que aumenta o campo magnético em um lado do arranjo enquanto o leva praticamente a zero no outro lado, sendo capaz de garantir inerentemente uma onda sinusoidal no entreferro (IBTISSAM, MOURAD, *et al.*, 2014). Esses fatos são mostrados na Figura 18 e Figura 19.

Figura 18 – Simulação da distribuição de fluxo magnético em uma estrutura de Halbach.



Fonte: (IBTISSAM, MOURAD, *et al.*, 2014).

Figura 19 – Comparação da curva de indução magnética entre uma estrutura radial de ímãs e uma de Halbach.



Fonte: (IBTISSAM, MOURAD, *et al.*, 2014).

Também é comentado em (PYRHONEN, JOKINEN e HRABOVCOVA, 2008) que valores baixos de j_{rms} na Tabela 2 normalmente são selecionados no caso de ranhuras maiores. Isso implica que máquinas maiores possuem valores menores de j_{rms} , em contraste com o A_{rms} , que é maior para máquinas de grande porte (PYRHONEN, JOKINEN e HRABOVCOVA, 2008), o que será explicado Seção 2.3.2.

A seguir, relações físicas importantes e considerações sobre o carregamento de máquinas são comentadas, mas desenvolvimentos específicos sobre balanços elétricos e magnéticos que dizem respeito ao presente trabalho são apresentados apenas na Seção 4.

2.3.1 Carregamento mecânico

Forças centrífugas causam um estresse mecânico σ_{mec} no rotor que restringem a potência de saída e a velocidade máxima da máquina (PYRHONEN, JOKINEN e HRABOVCOVA, 2008). O estresse mecânico é proporcional ao quadrado da velocidade periférica (PYRHONEN, JOKINEN e HRABOVCOVA, 2008), então essa é sua restrição principal do ponto de vista mecânico e deveria ser inferior à sua primeira velocidade crítica.

2.3.2 Carregamento elétrico

Perdas Joule são proporcionais ao quadrado da densidade de corrente j_{rms} e à massa dos condutores (PYRHONEN, JOKINEN e HRABOVCOVA, 2008) e pode ser negligenciada no rotor de MSIPs (MRAD, 2018).

Em suma, a densidade linear de corrente A_{rms} e a densidade de corrente j_{rms} são medidas do carregamento elétrico e se comportam em sentidos contrários: enquanto máquinas pequenas toleram valores mais altos de j_{rms} do que máquinas grandes, valores de A_{rms} são maiores em máquinas de porte maior (PYRHONEN, JOKINEN e HRABOVCOVA, 2008). Não obstante, o produto Aj é independente do tamanho da máquina, sendo útil para determinar o mecanismo de resfriamento (PYRHONEN, JOKINEN e HRABOVCOVA, 2008). Outro extrato de (PYRHONEN, JOKINEN e HRABOVCOVA, 2008) é apresentado na Tabela 4, que contém o máximo valor permitido para o produto Aj de acordo com o tipo de resfriamento, calculado a partir da Tabela 2.

Tabela 4 – Intervalos calculados do produto Aj de acordo com o tipo de resfriamento.

Máquinas síncronas de polos lisos			
	Resfriamento indireto		Resfriamento
	Ar	Hidrogênio	direto por água
$Aj (\times 10^{10} A^2/m^3)$	10,5 – 40	36 – 66	105 – 200

Fonte: adaptado de (PYRHONEN, JOKINEN e HRABOVCOVA, 2008).

2.3.3 Carregamento magnético

O carregamento magnético de uma máquina é determinado pela densidade de fluxo no entreferro e pela sua frequência de alimentação (PYRHONEN, JOKINEN e HRABOVCOVA, 2008). Dois aspectos principais a serem considerados são as perdas no ferro e a ressonância mecânica nas velocidades críticas.

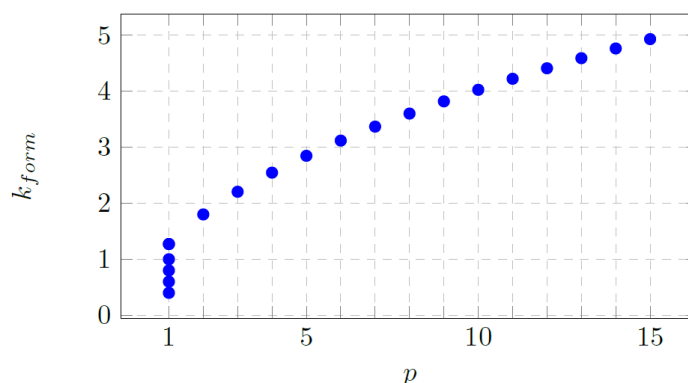
Perdas no ferro são proporcionais ao quadrado da indução magnética no entreferro, ao volume de ferro e, em altas frequências, ao quadrado da frequência elétrica (PYRHONEN, JOKINEN e HRABOVCOVA, 2008).

A ressonância mecânica restringe o comprimento do rotor, já que diferentes modos de curvatura ocorrem para diferentes velocidades críticas (PYRHONEN, JOKINEN e HRABOVCOVA, 2008). Isso não é considerado diretamente neste trabalho, em vez disso utilizam-se valores seguros para o coeficiente de forma k_{form} , definido como a relação entre o diâmetro do rotor e seu comprimento, os quais foram determinados como sendo maiores do que 0,4 para motores de alta rotação, segundo (MULTON e BONAL, 1999) e (BERNARD e OLIVIER, 2014).

Quando os programas de otimização, que serão discutidos na Seção 5, começaram a ser desenvolvidos, observou-se uma tendência para k_{form} ser determinado em seu limite superior. Entretanto, normalmente máquinas de alta velocidade possuem o coeficiente menor do que 1. Para explorar essa divergência, uma fórmula sugerida em (PYRHONEN, JOKINEN e HRABOVCOVA, 2008) para valores típicos de k_{form} em máquinas síncronas, vide (7), foi usada para gerar o gráfico da Figura 20.

$$k_{form}(p) = \begin{cases} 0,333 \text{ até } 1, \text{ se } p = 1 \\ \frac{4 \cdot p}{\pi \sqrt{p}}, \text{ se } p > 1 \end{cases} \quad (7)$$

Figura 20 – Plot da função que representa valores típicos de k_{form} .



Fonte: próprio autor.

O gráfico da Figura 20 mostra que a relação entre diâmetro e comprimento do rotor é tipicamente maior do 1 para um número de pares de polo maior do que 2, o que corresponde a rotores mais curtos para máquinas mais lentas. Isso explica por que o programa de otimização tende a utilizar o valor do limite superior do fator de forma, visto que com o aumento de p tem-se:

- Redução da coroa do estator e, conseqüentemente, das perdas no ferro;
- Redução da densidade do rotor (vide Seção 4), o que reduz a massa do rotor, logo melhora a potência mássica;
- Aumento de k_{form} , o que reduz o comprimento da máquina, então também as perdas Joule.

2.3.4 Observação sobre o entreferro

Apesar de o entreferro não ser considerado inicialmente no modelo da Seção 4, ele tem uma influência significativa nas características de uma máquina elétrica, entretanto nenhum ótimo teórico foi resolvido para seu comprimento (PYRHONEN, JOKINEN e HRABOVCOVA, 2008). Existe um limite mínimo técnico de 0,2 mm para o comprimento do entreferro (PYRHONEN, JOKINEN e HRABOVCOVA, 2008) e outro mínimo comentado a seguir. Um entreferro pequeno é normalmente desejado, mas reduzi-lo apresenta circunstâncias (PYRHONEN, JOKINEN e HRABOVCOVA, 2008):

- Baixa corrente de magnetização;
- Ranhuras abertas ou semi-abertas criam harmônicas de permeância nas superfícies do rotor e estator, aumentando as correntes induzidas;
- Harmônicas de vazamento de corrente do estator induzem correntes de Foucault no rotor.

Basicamente, a reação de armadura não pode reduzir a densidade de fluxo magnético excessivamente em um lado de um polo magnético. Essa redução excessiva é evitada quando a corrente de ligação do enrolamento de campo é maior do que a corrente de ligação da armadura (PYRHONEN, JOKINEN e HRABOVCOVA, 2008). Isso leva a (8), onde g é o comprimento do entreferro, τ_p é o passo do polo e γ é um coeficiente que considera a largura relativa entre o polo e o sapato de polo, a permeabilidade do vácuo μ_0 e uma constante 1/2 (PYRHONEN, JOKINEN e HRABOVCOVA, 2008). Para máquinas síncronas de polos lisos, $\gamma = 3 \cdot 10^{-7}$.

$$g \geq \gamma \cdot \tau_p \cdot \frac{A_{rms}}{B_m} \quad (8)$$

Essa condição será útil na Seção 5 para verificar a adequação do comprimento do entreferro.

2.4 OTIMIZAÇÃO

Para entender como o projeto de máquinas pode ser direcionado em um ambiente de otimização, aspectos envolvendo esse contexto precisam ser definidos.

Uma otimização visa resolver um problema de otimização (PO), no caso deste trabalho um problema de otimização não linear com restrições (NCOP – *Nonlinear Constrained Optimization Problem*), definido matematicamente como (9).

$$(\mathcal{P}) \begin{cases} \min_{x \in \mathcal{R}^n} & f(x) \\ \text{sujeito a} & \\ & h_i(x) = 0, \forall i \in \{1, \dots, q\} \\ & g_j(x) \leq 0, \forall j \in \{1, \dots, p\} \end{cases} \quad (9)$$

Em palavras, um NCOP consiste dos seguintes elementos:

- Função objetivo $f(x)$, que é a função a ser minimizada ou maximizada;
- Variável x de n dimensões, configurada entre limites;
- Restrições de igualdade e desigualdade $h_i(x)$ e $g_j(x)$, respectivamente, as quais devem ser respeitadas.

Um método comum em MATLAB[®] para encontrar soluções factíveis é *fmincon*, que permite a seleção de diferentes algoritmos, dentre os quais IPM (Método do Ponto Interior – *Interior Point Method*) e SQP (Programação Quadrática Sequencial – *Sequential Quadratic Programming*) foram testados. Outro *software* utilizado foi AMPL[®], com o qual dois métodos

foram utilizados mais intensamente: *Ipopt* (Otimizador com Ponto Interior – *Interior Point Optimizer*) e *Snopt* (Otimizador Esparso Não Linear – *Sparse Nonlinear Optimizer*), que é um algoritmo de SQP para NCOPs de larga escala (GILL, MURRAY e SAUNDERS, 2002). Dois solucionadores globais também foram testados, mas sem sucesso: *Couenne* (Envelope Convexo Acima e Abaixo de Envelopes Para Estimativa Não Linear – *Convex Over and Under Envelopes for Nonlinear Estimation*) e *Baron*.

Tanto SQP quanto IPM são algoritmos numéricos que usam passos de gradiente (MESSINE, 2020) para resolver NCOPs como o definido em (9). Basicamente, isso significa que esses algoritmos usam o gradiente da função objetivo para calcular passos descendentes para, no caso de minimização, reduzir o valor da função objetivo a cada iteração (MESSINE, 2020).

As próximas subseções dão mais detalhes sobre como POs são solucionados pelos dois principais algoritmos utilizados.

2.4.1 Solução de problemas de otimização não lineares com restrições

A primeira coisa a se ter em mente para resolver NCOPs é o Lagrangeano, definido (para minimização) em (10), onde λ_i e μ_i são os multiplicadores de Lagrange.

$$\mathcal{L}(x, \lambda, \mu) = f(x) + \sum_{i=1}^q \lambda_i h_i(x) + \sum_{j=1}^p \mu_j g_j(x) \quad (10)$$

Um ponto de mínimo/máximo x^* de $f(x)$ sob restrições $h_i(x)$ e $g_j(x)$ é um ponto de sela da função Lagrangeana (MESSINE, 2020), então o problema (9) pode ser reescrito como o problema de *Min-Max* (11).

$$\min_x \max_{\mu \geq 0, \lambda} \mathcal{L}(x, \lambda, \mu) \quad (11)$$

O problema equivalente (11) é resolvido usando condições KKT (Karush-Kuhn-Tucker) (MESSINE, 2020), que são necessárias para que um ponto seja ótimo (BOLTYANSKI, MARTINI e SOLTAN, 1998). São quatro as condições KKT:

- Estacionariedade:

$$\nabla_x \mathcal{L}(x, \lambda, \mu) = 0 \quad (12)$$

- Factibilidade primal:

$$\begin{aligned} h_i(x) &= 0, \forall i \in \{1, \dots, q\} \\ g_j(x) &\leq 0, \forall j \in \{1, \dots, p\} \end{aligned} \quad (13)$$

- Folga complementar:

$$\mu_j g_j(x) = 0, \forall j \in \{1, \dots, p\} \quad (14)$$

- Factibilidade dual:

$$\mu_j \geq 0, \forall j \in \{1, \dots, p\} \quad (15)$$

Diversas afirmações podem ser feitas sobre POs a partir de suas características. Entretanto, nenhuma será apontada aqui, pois, além de não ser o foco deste trabalho, análises analíticas sobre $f(x)$, $h_i(x)$ ou $g_j(x)$ no caso do problema que será descrito na Seção 5 são obstadas pela sua complexidade.

2.4.2 SQP

A essência do SQP é computar um passo descendente $d^{[k]}$ com expansões de Taylor de segunda ordem para $f(x)$ e de primeira ordem para as restrições (MESSINE, 2020), como (16), (17) e (18).

$$\begin{aligned} f(x^{[k]} + d^{[k]}) &\approx f(x^{[k]}) + \langle \nabla_x f(x^{[k]}), d^{[k]} \rangle + \\ &\quad + \frac{1}{2} \cdot (d^{[k]})^T \cdot H_{\mathcal{L}_x}(x^{[k]}, \lambda^{[k]}, \mu^{[k]}) \cdot d^{[k]} \end{aligned} \quad (16)$$

$$h_i(x^{[k]} + d^{[k]}) \approx h_i(x^{[k]}) + \langle \nabla_x h_i(x^{[k]}), d^{[k]} \rangle, \forall i \quad (17)$$

$$g_j(x^{[k]} + d^{[k]}) \approx g_j(x^{[k]}) + \langle \nabla_x g_j(x^{[k]}), d^{[k]} \rangle, \forall j \quad (18)$$

Uma sutilidade do termo quadrático em (16) é o cálculo da derivada (hessiano) da função Lagrangeana, que não é diretamente calculada como normalmente acontece em outros

algoritmos de otimização, mas sim aproximada por um método de quase-Newton (MESSINE, 2020).

Então, o passo $d^{[k]}$ é obtido ao resolver (19), que é um problema de *arg-min* de (16) sujeita às restrições (17) e (18), onde o argumento é d .

$$(\mathcal{P}_{SQP}) \begin{cases} \min_{x \in \mathcal{R}^n} & f(x^{[k]}) + \langle \nabla_x f(x^{[k]}), d^{[k]} \rangle + \\ & + \frac{1}{2} \cdot (d^{[k]})^T \cdot H_{\mathcal{L}_x}(x^{[k]}, \lambda^{[k]}, \mu^{[k]}) \cdot d^{[k]} \\ \text{sujeito a} & h_i(x^{[k]}) + \langle \nabla_x h_i(x^{[k]}), d^{[k]} \rangle, \forall i \\ & g_j(x^{[k]}) + \langle \nabla_x g_j(x^{[k]}), d^{[k]} \rangle, \forall j \end{cases} \quad (19)$$

Assim como na Seção 2.4.1, o problema pode ser resolvido com condições KKT, adaptadas conforme (21), onde o gradiente do Lagrangeano na condição de estacionariedade é calculado como (21) (MESSINE, 2020).

$$\begin{cases} \nabla_d \mathcal{L}_{SQP}(d, \lambda^{[k+1]}, \mu^{[k+1]}) = 0 \\ h_i(x^{[k]}) + \langle \nabla_x h_i(x^{[k]}), d \rangle = 0, \forall i \\ g_j(x^{[k]}) + \langle \nabla_x g_j(x^{[k]}), d \rangle \leq 0, \forall j \\ \mu_j^{[k+1]} \cdot (g_j(x^{[k]}) + \langle \nabla_x g_j(x^{[k]}), d \rangle) = 0, \forall j \\ \mu_j^{[k+1]} \geq 0, \forall j \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \nabla_d \mathcal{L}_{SQP}(d, \lambda^{[k+1]}, \mu^{[k+1]}) &= \nabla_x f(x^{[k]}) + H_{\mathcal{L}_x}(x^{[k]}, \lambda^{[k]}, \mu^{[k]}) \cdot d \\ &+ \sum_{i=1}^q \lambda_i^{[k+1]} \cdot \nabla_x h_i(x^{[k]}) \\ &+ \sum_{j=1}^p \mu_j^{[k+1]} \cdot \nabla_x g_j(x^{[k]}) \end{aligned} \quad (21)$$

Uma vantagem notável do algoritmo SQP é que ao resolver (19) para encontrar o passo descendente $d^{[k]}$, os próximos multiplicadores de Lagrange são automaticamente calculados.

2.4.3 Ponto interior

O IPM substitui restrições de desigualdade por uma função de barreira, com a qual é mais fácil lidar e na qual se penaliza um termo (MESSINE, 2020). Para explicar o método

brevemente, pode-se considerar o problema que possui apenas restrição de desigualdade (22) e a função de barreira (23).

$$(\mathcal{P}) \begin{cases} \min_{x \in \mathbb{R}^n} & f(x) \\ \text{sujeito a} & g_j(x) \leq 0, \forall j \in \{1, \dots, p\} \end{cases} \quad (22)$$

$$B(x, \beta) := f(x) - \beta \sum_{j=1}^p \ln(-g_j(x)), \beta \geq 0 \quad (23)$$

Como pode ser verificado em (23), o valor da função tende a infinito em pontos que se aproximam da fronteira da região factível. Então, esses pontos são fortemente penalizados no problema equivalente sem restrições (24).

$$\min_{x \in \mathbb{R}^n} B(x, \beta) \quad (24)$$

Um objetivo do método do ponto interior é fazer com que β tenda a zero, pois, quando isso ocorre, a própria função objetivo $f(x)$ é minimizada (MESSINE, 2020), então a solução encontrada para (24) é também solução de (22).

Quando o gradiente da função de barreira é calculado, obtém-se (25). Substituindo (26) em (25), tem-se, basicamente, o gradiente da função Lagrangeana, então conclui-se que o problema pode ser resolvido usando-se as condições KKT.

$$\nabla_x B(x, \beta) = \nabla_x f(x) - \beta \sum_{j=1}^p \frac{1}{g_j(x)} \nabla g_j(x) \quad (25)$$

$$\mu_j = \frac{\beta}{g_j(x)}, \forall j \in \{1, \dots, p\} \quad (26)$$

Nesse método, o passo $d^{[k]}$ é calculado usando um método quase-Newton com $x^{[k]}$ e $\beta^{[k]}$ (MESSINE, 2020). O valor de $\beta^{[k+1]}$ é determinado escolhendo-se uma constante de redução para $\beta^{[k]}$, definindo, então, $\mu^{[k+1]}$ diretamente de (26) (MESSINE, 2020), o que também é uma vantagem do IPM, pois o multiplicador de Lagrange da próxima iteração é automaticamente calculado. Ademais, a condição KKT de folga complementar (vide (14)), é escrita de (26).

2.4.4 Otimização com MATLAB®

O primeiro *software* utilizado para resolver o PO da Seção 5 foi o MATLAB®, que encontra o mínimo de um NCOP com a função *fmincon*, que pode ser usada da seguinte forma:

```
fmincon(@fobj,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,@constraints,options)
```

Os argumentos *A*, *b*, *Aeq* e *beq* são usados para resolver problemas com restrições lineares, o que não é o caso deste trabalho, como será visto adiante. Então, essas entradas devem ser atribuídas como *arrays* vazios. A definição do PO com *fmincon* é razoavelmente simples:

- A função objetivo e as restrições não lineares podem ser definidas em *subscripts*, por exemplo *fobj* e *constraints*, para depois serem chamadas no *script* principal, que contém *fmincon* como acima. No *script constraints*, as equações de igualdade são igualadas a zero e as equações de desigualdade são menores ou iguais a zero;
- Um ponto inicial *x0* deve ser fornecido;
- Limites inferiores e superiores, *lb* e *ub* acima, devem ser definidos para as variáveis do problema;
- Opções adicionais podem ser definidas, como impressão de informações de cada iteração, troca do número de avaliações dentro de *fmincon*, escolha do algoritmo a ser utilizado, dentre várias outras.

Ainda, parâmetros de saída além do ponto ótimo e do valor de *fobj* nesse ponto são fornecidos por *fmincon*, como um *flag* de saída e o número de iterações realizadas:

```
[x,fval,exitflag,output] = fmincon(_)
```

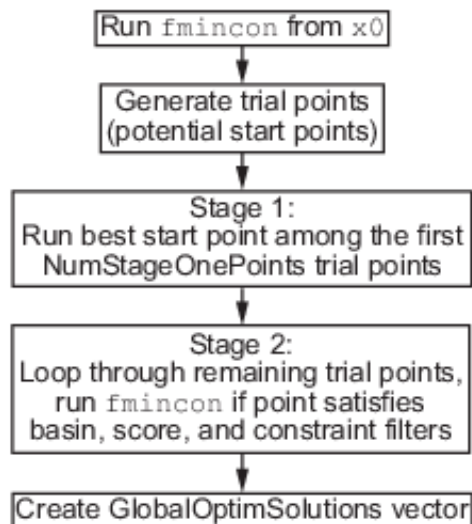
Informação sobre os multiplicadores de Lagrange, gradiente e hessiano de $f(x^*)$ também poderia ser levada em consideração, mas os programas da Seção 5 consideraram apenas *flags* de saída, sobre os quais será dada ênfase aqui. Basicamente, qualquer razão que dê um *flag* de saída maior ou igual a 1 é aceitável e razões que dão *flags* negativos são indesejáveis, como resumido no Quadro 1. No caso do *flag* 0, o problema é facilmente contornado aumentando o número máximo de iterações.

Quadro 1 – Significado dos *flags* de saída em *fmincon*.

<i>Flag</i> de saída	Motivo de parada
-3	As restrições são violadas ou <i>fobj</i> é ilimitada
-2	Nenhum ponto factível encontrado
0	Número máximo de iterações excedido
1	As restrições são respeitadas e x é próximo o suficiente de ser ótimo
2	Variação pequena em x
3	Variação pequena em <i>fobj</i>
4 e 5	Passo de gradiente pequeno

Fonte: adaptado de (MATHEWORKS).

O uso de *fmincon* sozinho não foi o suficiente para fornecer resultados razoáveis para o PO da Seção 5. Então, uma abordagem com *GlobalSearch* foi utilizada para resolver o problema. Esse algoritmo roda *fmincon* a partir de um vetor inicial de dados x_0 , gerando então pontos de tentativa com um mecanismo de busca dispersa, rejeitando pontos que são improváveis de melhorar o mínimo local encontrado até o momento. Com os pontos restantes, o algoritmo roda *fmincon* repetidamente até que um ponto satisfaça uma bacia¹, pontuação² e filtros de restrição, quando então um vetor solução é criado (MATHEWORKS). O algoritmo é ilustrado na Figura 21.

Figura 21 – Ilustração do algoritmo *GlobalSearch*.

Fonte: (MATHEWORKS).

¹ *GlobalSearch* grava o ponto inicial e final para uma primeira estimativa de uma bacia de atração.

² *GlobalSearch* grava o valor final da função objetivo para usá-lo em uma função de pontuação.

2.4.5 Otimização com AMPL[®]

AMPL[®] é uma linguagem de modelagem algébrica desenvolvida para resolver POs de alta complexidade. O *software* oferece diversos solucionadores, dentre os quais este trabalho utilizou os já citados *Ipopt*, *Snopt*, *Couenne* e *Baron*. Um programa em AMPL[®] é composto das seguintes partes:

- Um *script* de dados *.dat*, que contém os valores dos parâmetros fixos usados no modelo;
- Um *script* de modelo *.mod*, que contém a descrição do problema, com:
 - Declaração dos parâmetros fixos do modelo, mas sem seus valores numéricos;
 - Declaração das variáveis e definição de seus limites;
 - Definição da função objetivo e escolha entre problema de minimização ou de maximização;
 - Definição das restrições;
- Um *script* executável *.run*, onde é possível:
 - Chamar o modelo e *script* de dados;
 - Determinar o ponto de partida;
 - Escolher o solucionador;
 - Lançar o solucionador;
 - Imprimir os resultados.

O *software* também suporta alguns operadores de programação, como:

- *If*: útil para definir parâmetros que trocam de acordo com outros parâmetros a cada iteração;
- *For*: usado para resolver o problema de formas diferentes por exemplo, usando múltiplo pontos de partida.

3 CONTRIBUIÇÃO PARA A CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS

Essa seção apresenta o trabalho realizado no escopo de caracterização de materiais magnéticos.

As amostras caracterizadas foram manufaturadas com tecnologia SLM no CIRIMAT (Centro Interuniversitário de Pesquisa e de Engenharia de Materiais – *Centre Inter-universitaire de Recherche et d'Ingénierie des Matériaux*), que também é uma unidade mista do CNRS, INPT e UPS. Essa parceria entre os laboratórios permitiu o conhecimento dos parâmetros de impressão de cada amostra, o que não foi possível quando amostras industriais foram adquiridas.

Uma unidade de medição *Brockhaus MPG 100 D*, para materiais magnéticos moles, que segue o padrão internacional IEC 60404, foi usada para a caracterização neste trabalho. As comparações envolveram permeabilidades das amostras, deduzidas de suas curvas anisterética, e perdas totais.

As próximas seções apresentam informações sobre as amostras e as configurações de ensaio, comparações entre amostras que usaram parâmetros de impressão diferentes, considerações sobre uma ferramenta desenvolvida para juntar e processar os dados dos ensaios e, por fim, a comparação entre uma amostra recozida e sua equivalente, em termos de parâmetros de impressão, não recozida.

3.1 AMOSTRAS E CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

Quatro amostras foram impressas sob diferentes condições de potência de *laser* e velocidades, mantendo constante:

- Espaçamento entre duas linhas de laser: 50 μm ;
- Espessura da camada de pó: 50 μm ;
- Ponto de laser: 70 μm .

A Tabela 5 mostra as diferentes potências de *laser* e velocidades de *jog*³ usadas para cada amostra, assim como as densidades lineares de energia correspondentes.

³ Velocidade em que o *laser* se move ao longo dos eixos na mesa de impressão.

Tabela 5 – Configurações de potência de laser e velocidade para cada amostra.

Amostra	Potência (W)	Velocidade (mm/s)	Densidade linear de energia (J/m)
C1	120	1250	96
C2	150	1500	100
C3	180	2000	90
C4	150	1750	85,7

Fonte: próprio autor.

A unidade de medição também requer informações sobre as amostras, conforme Tabela 6, e sobre o número de espiras nos enrolamentos primário e secundário, $N_p = 200$ e $N_s = 100$, respectivamente.

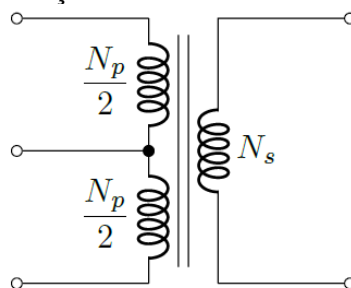
Tabela 6 – Propriedades e dimensões das amostras.

Amostra	Massa (g)	Densidade (g/cm ³)	Diâmetro externo (mm)	Diâmetro interno (mm)	Espessura (mm)
C1	33,00	5,32	65	54,5	6,3
C2	33,77	5,44	65	54,5	6,3
C3	33,14	5,34	65	54,5	6,3
C4	32,09	5,17	65	54,5	6,3

Fonte: próprio autor.

Cada amostra foi coberta com fita isolante antes da bobinagem, para evitar que cantos vivos retirassem o esmalte dos fios e causassem curto-circuitos entre espiras ou entre a amostra e as espiras. O enrolamento primário foi feito primeiro, ficando interno ao secundário e cada cem espiras corresponderam a uma camada de fio ao redor da amostra, então o enrolamento primário possuía duas camadas de fio e o secundário apenas uma. A Figura 22 representa eletricamente os enrolamentos na amostra e a Figura 23 mostra algumas das amostras.

Figura 22 – Representação elétrica dos enrolamentos nas amostras.



Fonte: próprio autor.

Figura 23 – Algumas das amostras caracterizadas.



Fonte: próprio autor.

Os ensaios magnéticos foram realizados em três frequências:

- 3 Hz: a menor frequência atingível na unidade de medição, usada para obter a curva anisterética e duas permeabilidades relativas a partir das curvas B-H;
- 25 Hz e 50 Hz: usadas apenas para avaliar as perdas totais.

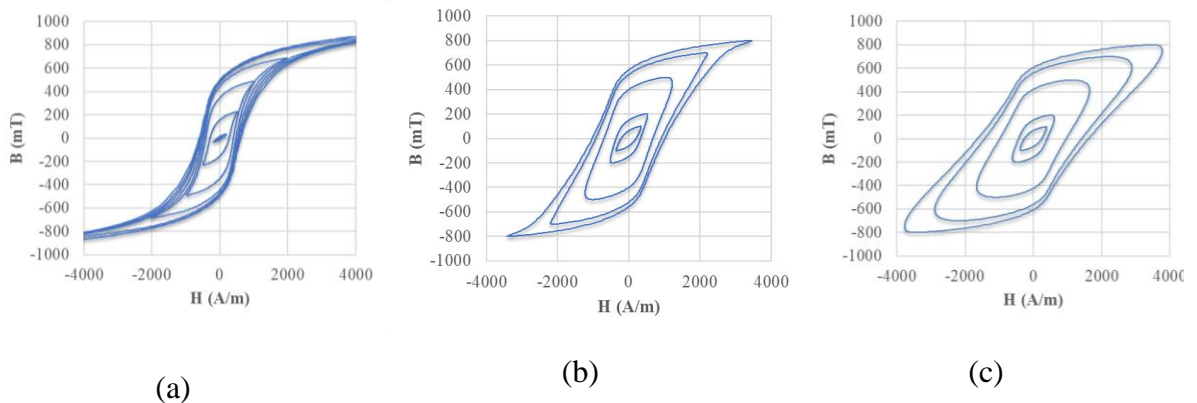
Em 3 Hz, o campo magnético aplicado era determinado pelo usuário, sendo aumentado gradualmente até 20 kA/m. Em frequências mais altas, colocou-se, no *software* da bancada, a indução magnética desejada, sendo também aumentada gradualmente, dessa vez até que a unidade de medição não fosse mais capaz de manter a tensão no secundário sinusoidal, a qual era monitorada com um osciloscópio.

3.2 ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO

As especificidades da caracterização serão explicadas na Seção 3.3 juntamente com a ferramenta desenvolvida. Essa seção focará na comparação entre as amostras levando em conta os parâmetros de impressão de cada uma.

Basicamente, toda a informação sobre as amostras é tomada de suas curvas B-H. Todos os testes foram realizados a uma temperatura controlada de 20 °C e as amostras eram desmagnetizadas a cada ciclo. Como um exemplo, as curvas B-H da amostra C3, para as três frequências de ensaio, são mostradas na Figura 24, onde se pode ver os ciclos de cada nível de indução e o aumento da área das curvas para frequências mais altas.

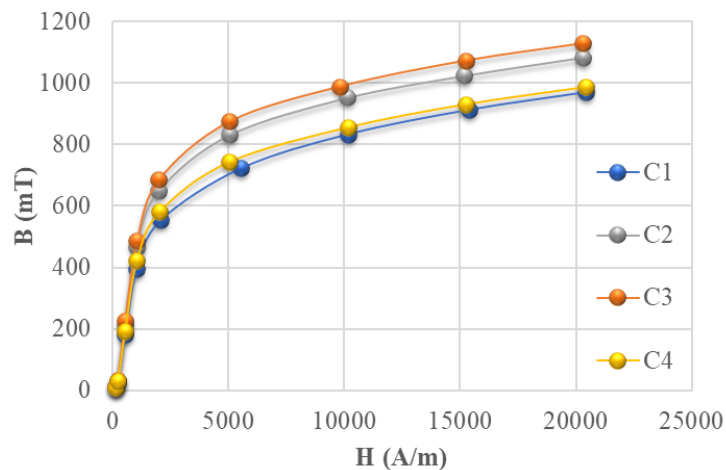
Figura 24 – Curvas B-H obtidas para C3 a (a) 3 Hz, (b) 25 Hz e (c) 50 Hz.



Fonte: próprio autor.

Do ensaio a 3 Hz, o valor de indução magnética no campo máximo aplicado a cada ciclo é tomado para gerar a curva anisterética da Figura 25. Nota-se que C3 satura em um maior nível de indução e C1 em um menor, enquanto C2 e C4 saturam em níveis intermediários, indicando uma vantagem do acréscimo da potência do *laser*. Entretanto, como indicado na Seção 2.1.3 para EBM, uma alta potência combinada com uma baixa velocidade pode causar amostras irregulares, o que pode ser também o caso para SLM. Comparando C2 com C4, ambos impressos com a mesma potência, vê-se que um decréscimo na velocidade de impressão melhorou a capacidade magnética da amostra C2.

Figura 25 – Comparação das curvas anisteréticas para as quatro amostras impressas.



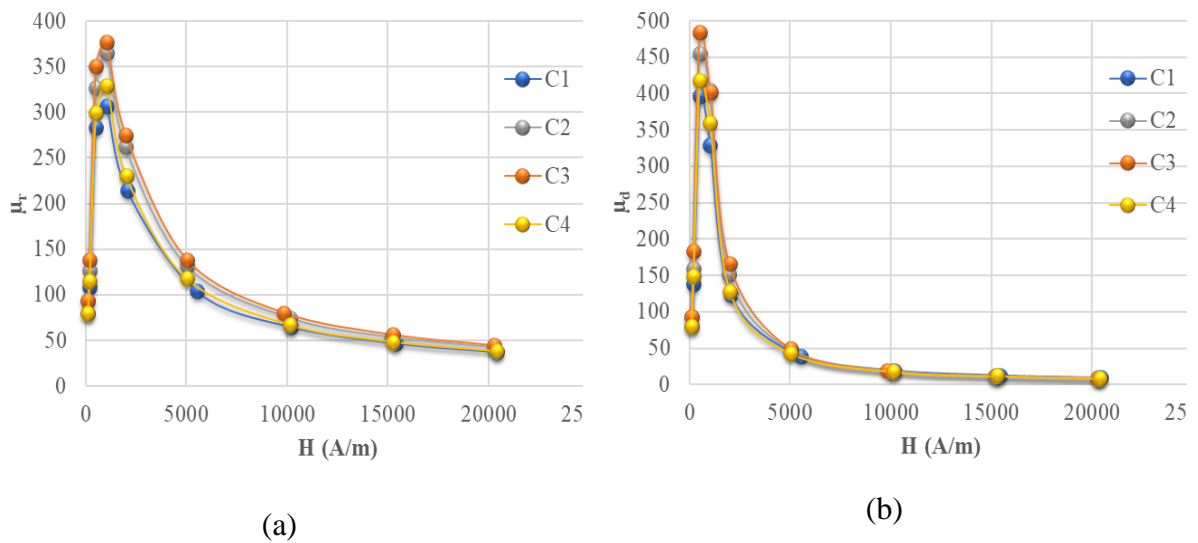
Fonte: próprio autor.

Em seguida, os valores da curva anisterética são usados para calcular a permeabilidade relativa da amostra com (3). Adicionalmente, a permeabilidade relativa diferencial é calculada com (27) para dar uma ideia sobre a variação da permeabilidade. Ambas as permeabilidades são mostradas na Figura 26. Observa-se novamente a vantagem de C3 sobre as outras amostras, com C1 sendo o pior resultado. Entretanto, a permeabilidade diferencial indica que a

permeabilidade de C4 decai mais rapidamente do que a de C1, então aumentar a potência e velocidade não garante resultados melhores, se os parâmetros não estiverem combinados adequadamente.

$$\mu_{d_i} = \frac{B_i - B_{i-1}}{\mu_0(H_i - H_{i-1})} \quad (27)$$

Figura 26 – Comparação das permeabilidades (a) relativa e (b) relativa diferencial.

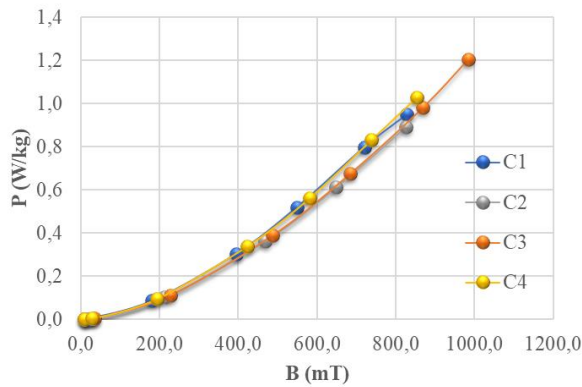


Fonte: próprio autor.

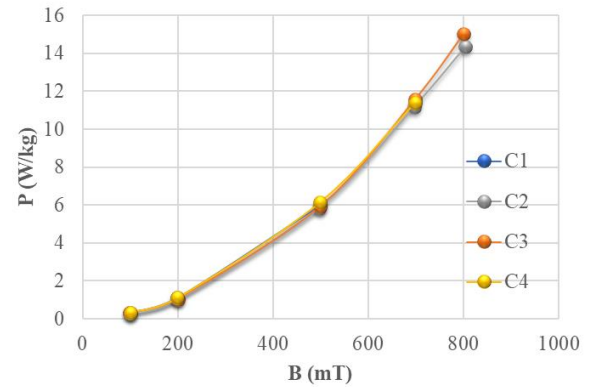
Finalmente, as perdas totais das quatro amostras nas três frequências são mostradas na Figura 27. A maior dispersão entre curvas é observada em 3 Hz, onde há uma clara vantagem dos pares C2 e C3 contra C1 e C4. Em 25 Hz, C2 teve as menores perdas e, em 50 Hz, C2 e C3 apresentaram perdas levemente maiores do que as outras duas. Entretanto, C3 foi a única amostra capaz de chegar ao nível de magnetização de 800 mT nessa frequência. Isso indica que a velocidade do *laser* e sua potência são dois parâmetros estritamente relacionados, já que:

- Para uma mesma potência, um decréscimo de velocidade reduziu as perdas;
- Reduzir a velocidade juntamente com a potência fez as perdas aumentarem;
- Aumentar a velocidade juntamente com a potência fez as perdas decrescerem.

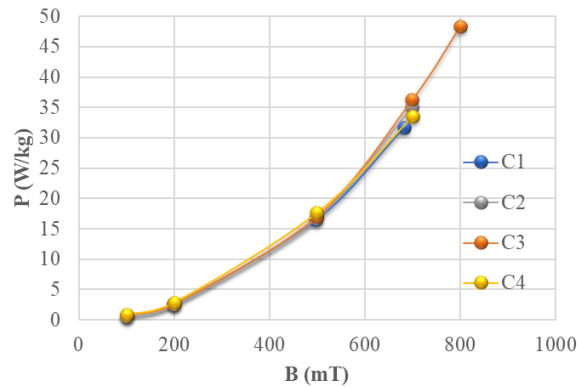
Figura 27 – Comparação da perda total das amostras em (a) 3 Hz, (b) 25 Hz e (c) 50 Hz.



(a)



(b)



(c)

Fonte: próprio autor.

Não foram realizadas medições microscópicas para avaliar a estrutura interna do material e possíveis defeitos nas amostras, mas a maior permeabilidade de C3, as menores perdas em baixas frequências e as maiores em frequências mais altas seriam explicadas por um maior tamanho de partícula. Com partículas maiores, o material suporta densidades de fluxo maiores (LI, KARTIKOWATI, *et al.*, 2017), mas ao mesmo tempo, há mais espaço para a circulação de correntes induzidas, o que aumenta significativamente as perdas totais do material em altas frequências.

3.3 FERRAMENTA PARA AGRUPAMENTO E PROCESSAMENTO DE DADOS DE ENSAIO

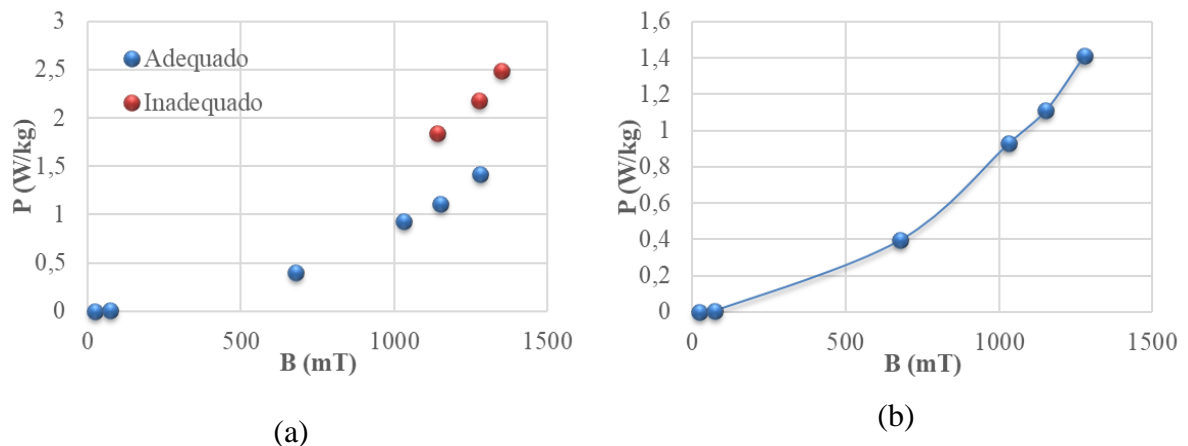
Unir e processar os dados de todos os ensaios magnéticos pode ser um trabalho exaustivo e repetitivo, o que motivou o desenvolvimento de uma planilha *MS Excel* para juntar os dados mais facilmente e processá-los de forma automática.

Quando os dados dos ensaios são exportados com o *software* da bancada, uma planilha de três páginas é gerada automaticamente:

- *Common*: contém os dados de entrada sobre a amostra e os enrolamentos;
- *Meas. results*: possui informações sobre o teste, como frequência, indução máxima, campo máximo, perdas totais, permeabilidade relativa, fator de forma e outros;
- *Hyst. data*: contém os 421 pontos (H,B) medidos a cada ciclo.

Para níveis maiores de indução, o controle da forma de onda da tensão no secundário não é sempre satisfatório, o que é determinado pelo fator de forma, que consegue indicar o quão próximo de sinusoidal um sinal é. O fator de forma é a divisão do valor rms do sinal pelo valor médio do sinal retificado, o que gira em torno de 1,11 para um seno. Com uma tolerância de 26%, medições com fator de forma acima de 1,4 eram descartadas, o que é importante para analisar as perdas do material, que seriam distorcidas por esses pontos inadequados, como mostrado na Figura 28.

Figura 28 – Exemplo de como o *plot* das perdas totais pode ser distorcido. Vemos em (a) os valores das perdas incluindo pontos com fator de forma inadequado e em (b) o *plot* sem distorção.



Fonte: próprio autor.

Outra observação importante diz respeito aos valores de permeabilidade relativa fornecidos diretamente pelo *software* da bancada. Quando comparados com os valores calculados de permeabilidades a partir dos dados não tratados das curvas B-H, observam-se diferenças de até 20%. Então, optou-se por comparar a permeabilidade das amostras calculando-as a partir dos dados das curvas B-H, em vez de utilizar os valores fornecidos pelo *software* diretamente.

Para o caso de conhecimento prévio do comportamento dos materiais, múltiplos níveis de indução poderiam ser definidos simultaneamente, o que geraria apenas uma planilha com todos os dados. Entretanto, após testes preliminares, viu-se o risco de superaquecimento das amostras devido a correntes altas quando a bancada não conseguia aplicar níveis mais elevados de indução. Por isso, cada nível de indução era configurado separadamente, gerando uma planilha para cada. Isso torna os ensaios mais demorados, mas garante que as amostras não sejam danificadas, já que cada caso é observado individualmente, sendo mais fácil interromper o processo em caso de inadequação. Além disso, a realização dos ensaios individuais para cada indução facilitou a questão da padronização e tornou possível a planilha que será descrita a seguir.

Os dados de cada ensaio foram exportados para o *Excel* seguindo o padrão de nomeação: *N-TX-FY*, onde *N* deve ser substituído pelo nome da amostra, *T* pode ser substituído por *H* ou *J*, dependendo se o usuário estiver selecionando o campo magnético desejado (para 3 Hz) ou a indução desejada (para 25 Hz e 50 Hz), *X* corresponde ao valor de campo ou indução magnética e *Y* é a frequência do ensaio. A planilha foi planejada para um máximo de 9 medições, o maior número de medições realizado para uma única frequência durante o trabalho, mas ela pode ser facilmente adaptada. O exemplo da amostra C4 recozida será usado para explicar a planilha.

A planilha desenvolvida segue a estrutura gerada automaticamente pelo *software* da bancada, possuindo também uma página chamada *Meas. results*, outra chamada *Hyst. data* e uma página adicional chamada *Courbe Anhystérique*, onde a curva anisterética da amostra é *plotada* e as permeabilidades são calculadas.

Os arquivos dos ensaios encontram-se na pasta relativa à amostra em questão, *ToreC4rec* no caso do exemplo, havendo também uma pasta dedicada para cada frequência de ensaio, as quais seguem o padrão de nomenclatura *FYHz*, onde *Y* é a frequência do ensaio.

Na página *Meas. results*, cada linha corresponde a um ciclo diferente, com a numeração relativa a cada ciclo na coluna *A*. Faz-se, então, a primeira coluna (deve ser *B*), a da frequência, com:

```
= 'C:\Users\...\ToreC4rec\F3Hz\[C4-H100-F3.xls]Meas. results'!B$2
```

Para manter algumas automatizações da planilha adequadas, deve-se copiar a célula e colá-la nas linhas subsequentes com *Colar Especial > Fórmulas*, trocando-se apenas o valor do

campo magnético (ou indução). Para outras frequências de ensaio, deve-se atentar ao “caminho” até o arquivo, adequando também a nomenclatura do arquivo conforme explicado acima, realizando o mesmo procedimento com *Colar Especial*. Para preencher as outras colunas da planilha, deve-se copiar a primeira coluna de cada linha novamente, selecionar as colunas seguintes e, novamente, fazer *Colar Especial > Fórmulas*, o que faz com que os fatores de forma inadequados sejam destacados automaticamente. Abaixo da planilha gerada, é criada automaticamente uma planilha cópia que não considera as linhas que possuem fatores de forma ruins. Os valores de perdas totais para cada nível de indução são plotados automaticamente também, mas deve-se selecionar os dados desejados manualmente, excluindo aqueles onde o controle da tensão no secundário não foi satisfatório.

Na próxima página da planilha, *Hyst. data*, assume-se que as células A2 até A422 são iguais a 1, correspondendo ao primeiro ciclo de histerese, medição número 1. Os números das próximas medições são automaticamente preenchidos escrevendo, na célula A424:

```
=SE (E (A2>0; B424>0) ;A2+1; "-")
```

Existe uma linha nula (numericamente) entre cada sequência de medições, o que foi feito para manter o padrão de quando se opta por realizar mais níveis de indução ao mesmo tempo no *software* da unidade de medição. Mas, para que o número das outras medições seja completado, basta copiar a célula A424 para todas as outras linhas, de forma que essa linha nula é automaticamente preenchida por “-”.

Para inserir os dados dos ensaios, um procedimento similar ao de *Meas. results* é realizado. Completa-se a célula B2 com:

```
= 'C:\Users\...\ToreC4rec\F3Hz\[C4-H100-F3.xls]Hyst. data'!B2
```

Então, copia-se a célula e faz-se *Colar Especial > Fórmulas* novamente, para as próximas duas colunas. Em seguida, deve-se copiar essas três células, selecionar todas as 421 linhas correspondentes aos pontos B-H e fazer *Colar Especial > Fórmulas*. Para os dados das próximas medições, pula-se uma linha ao final da medição já inserida, e realiza-se o mesmo procedimento. Isso garante que a formatação da planilha seja mantida, apenas sendo necessário verificar se todos os dados dos ensaios estão sendo incluídos no gráfico que plota os ciclos de histerese, já presente na planilha. Outro detalhe da formatação é um auxílio visual, que destaca em amarelo, de maneira automática, o valor máximo de campo magnético em cada medição e os valores de indução correspondentes a esse campo. Isso é feito comparando o valor de cada

célula com o valor máximo, determinado na página da planilha *Courbe Anhystérique*, por isso mais de um valor de indução pode ser destacado, mas o procedimento é válido para encontrar visualmente onde se encontra esse ponto de campo magnético máximo, o que antes era feito manualmente, além de já incluir o valor para os cálculos da página descrita a seguir.

Finalmente, na última página da planilha, o valor do campo magnético máximo (coluna C de *Hyst. data*) é determinado com:

```
=MAX('Hyst. data'!C2:C422)
```

O intervalo de células para a função deve ser completado manualmente no caso de extrapolação de 9 medições, mas basta tomar o último valor de linha da célula, no caso acima 422, somar 2, o que dá 424 para a linha de início da próxima medição, e então somar 420, o que dá 844 para a linha final da próxima medição. Então, a indução magnética correspondente a esse campo é dada por:

```
=@ÍNDICE('Hyst. data'!D$2:D$422;CORRESP($D$6;'Hyst. data'!$C$2:$C$422;0);)
```

O intervalo de células também deve ser adequado conforme para o valor máximo de campo magnético no caso de ultrapassagem de 9 medições. O que é feito, no caso do intervalo acima, por exemplo, é tomar a linha do array *'Hyst. data'!\$C\$2:\$C\$422* onde está o valor máximo de campo $\$D\$6=MAX('Hyst. data'!C2:C422)$ e ter como saída o valor do intervalo *'Hyst. data'!D\$2:D\$422* (indução magnética) correspondente àquela linha. Para confirmar que o procedimento foi feito corretamente, o número da medição e o número do ponto B-H são mostrados com o mesmo procedimento da indução máxima, como uma redundância. A curva anisterética é plotada automaticamente e as permeabilidades são calculadas também.

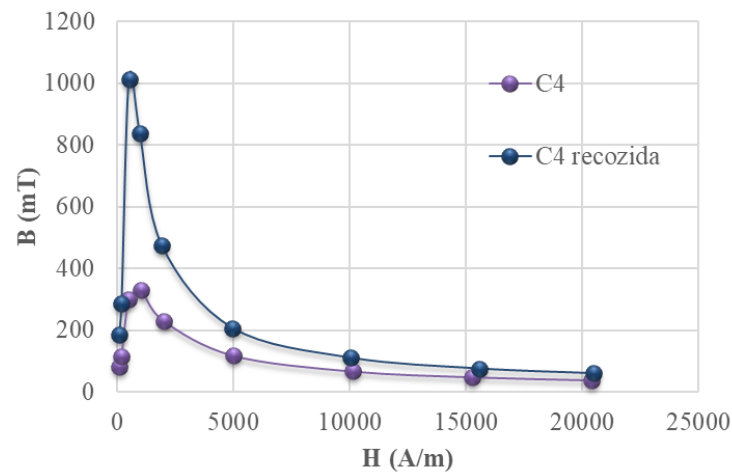
Vê-se que com essa planilha base, além de auxílios visuais para descartar níveis de indução inadequados e para encontrar mais facilmente os pontos de interesse nas medidas, adicionaram-se ao processo de junção dos dados dos ensaios diversas redundâncias que evitam erros e, ainda, cálculos e *plots* automáticos. Outra vantagem dessa ferramenta diz respeito à facilidade da junção dos dados em si, que descarta a necessidade de abrir diversas abas de ensaios diferentes para agrupá-los e a necessidade de múltiplas verificações ao longo do processo, o que acelera imensamente o trabalho.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DE AMOSTRA RECOZIDA

A amostra recozida foi impressa com os mesmos parâmetros de impressão de C4. As análises realizadas foram as mesmas da Seção 3.2, então as explicações serão mais diretas aqui.

Pode-se ver na Figura 29 uma melhora expressiva da permeabilidade relativa devida ao processo de recozimento, de até 3,39 vezes.

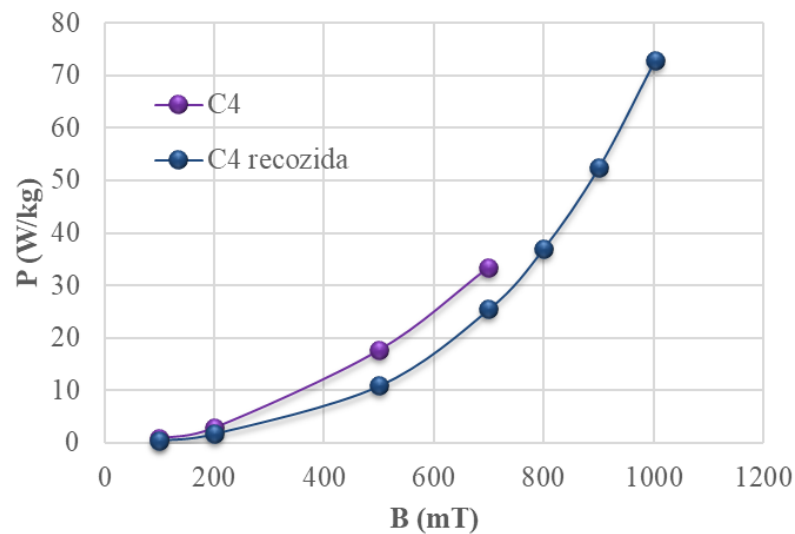
Figura 29 – Comparação da permeabilidade relativa da amostra C4 e da amostra recozida equivalente a C4.



Fonte: próprio autor.

Uma redução significativa das perdas também foi observada para todas as três frequências de ensaio testadas, mostrando-se, na Figura 30, as perdas a 50 Hz, condição em que as perdas foram reduzidas em até 40%.

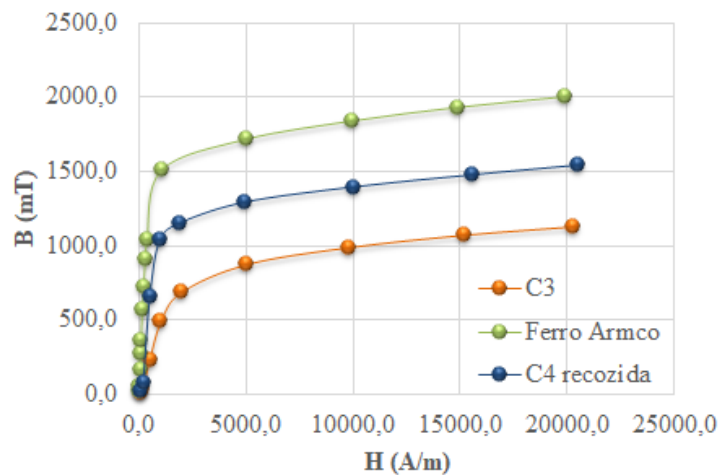
Figura 30 – Perdas a 50 Hz para C4 e C4 recozida.



Fonte: próprio autor.

Adicionalmente, a curva anisterética da melhor amostra não recozida, C3, foi *plotada* na Figura 31 com a de C4 recozida e com a de ferro puro. É interessante notar que a segunda pior amostra se tornou consideravelmente melhor, após o processo de recozimento, do que a amostra com melhor desempenho até então, apresentando indução magnética até 2,9 vezes maior para um mesmo campo magnético. Entretanto, quando comparada com ferro puro, a amostra recozida teve indução magnética máxima em torno de 25% menor.

Figura 31 – Comparação das curvas anisterética da melhor amostra não recozida, da amostra recozida e de ferro puro.



Fonte: próprio autor.

4 MODELO PARA MÁQUINAS SÍNCRONAS A ÍMÃS PERMANENTES

Essa seção descreve o modelo que permite estimar as dimensões principais, o peso das partes ativas e algumas perdas de MSIPs com balanços de fluxo magnético e correntes elétricas na máquina. Outro fator chave do modelo é o uso de valores típicos para densidades de fluxo, de corrente, de força tangencial e do produto Aj , apresentados na Seção 2.3. Alguns parâmetros úteis são definidos abaixo, em Quadro 2, Quadro 3 e Quadro 4, observando-se que alguns subscritos remetem a termos em inglês, como s , normalmente para ranhura (*slot*), y para coroa (*yoke*), t para dente (*tooth*), $fill$ para preenchimento e hw para cabeça de bobina (*head winding*).

Quadro 2 – Parâmetros geométricos.

Raio externo do estator	R_{out}
Raio do rotor, aproximado com igual ao raio do furo do estator	R
Comprimento das partes ativas	L
Altura das ranhuras do estator	h_s
Altura da coroa do estator	h_y
Largura de uma ranhura no raio do furo do estator	w_s
Largura de um dente no raio do furo do estator	w_t

Fonte: próprio autor.

Quadro 3 – Parâmetros estruturais.

Número de pares de polo	p
Número de dentes	N_t
Número de ranhuras	N_s
Número total de condutores	N_c

Fonte: próprio autor.

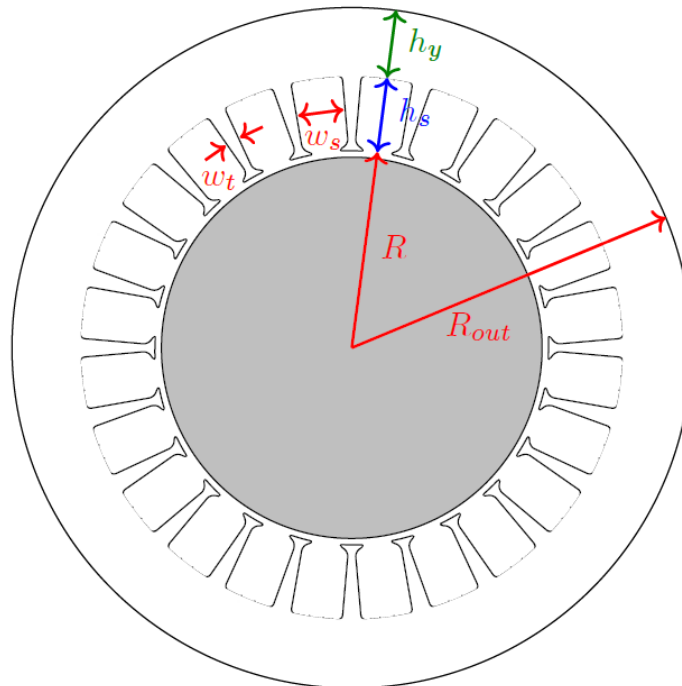
Quadro 4 – Parâmetros de enrolamento.

Seção do fio	S_s
Fator de preenchimento de ranhura	k_{fill}
Coefficiente de cabeça de bobina	k_{hw}

Fonte: próprio autor.

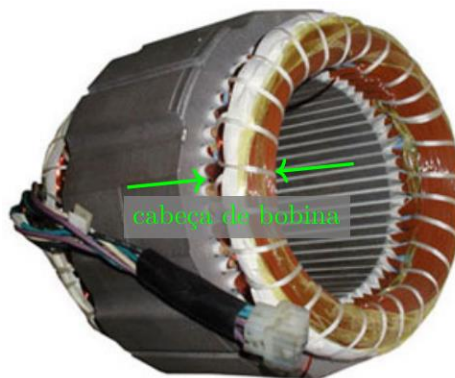
Vê-se na Figura 32 e Figura 33, respectivamente, um desenho da seção transversal de um motor de 24 ranhuras para visualizar os parâmetros definidos no Quadro 2 e um estator de enrolamentos distribuídos típico para visualizar o que o coeficiente k_{hw} representa.

Figura 32 – Representação da seção transversal de um motor.



Fonte: próprio autor.

Figura 33 – Estator de enrolamentos distribuídos, indicando-se a cabeça de bobina em um de seus lados.



Fonte: adaptado de (LEVKIN, 2019).

São feitas as seguintes hipóteses para o modelo:

- A densidade de fluxo no entreferro é distribuída de forma sinusoidal com relação à posição angular;
- Os condutores estão distribuídos de maneira sinusoidal ao longo da circunferência do estator;
- A máquina é alimentada com correntes trifásicas sinusoidais;
- O formato das ranhuras é retangular.

Da expressão da força de Lorentz, pode-se escrever (28) para calcular a força tangencial no rotor, onde j é a densidade de corrente, em A/m^2 , \mathbf{B} é a indução magnética, em T,

S é a área na qual j flui e \mathbf{l} é um vetor com a mesma direção e sentido da corrente de módulo $I = j \cdot S$.

$$\mathbf{F} = j \cdot S \cdot \mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad (28)$$

Se, em vez de j , for considerada uma onda progressiva de densidade de corrente $K(\theta_t)$ na superfície interna do estator (LEFÈVRE, EL-AABID, *et al.*, 2019), definida em (29), pode-se escrever (30), onde K_{rms} é o valor rms da onda progressiva de densidade de corrente, em A/m^2 , e B_{rms} é o valor rms da indução magnética no entreferro. Como o fluxo no entreferro é suposto sinusoidal, o valor de pico B_m da indução magnética no entreferro se relaciona com o valor rms por $B_{rms} = B_m/\sqrt{2}$.

$$K(\theta, t) = K_m \cos(p\theta - \omega t) \mathbf{e}_z \quad (29)$$

$$F = K_{rms} \cdot 2\pi RL \cdot B_{rms} \quad (30)$$

Então, o torque, em N.m, pode ser calculado conforme (31), onde $V_{rot} = \pi R^2 L$ é o volume do rotor e $f_t = K_{rms} \cdot B_{rms}$ é definido como o estresse magnético tangencial.

$$\begin{aligned} T &= r \cdot F \cdot \sin(\pi/2) \\ &= R \cdot K_{rms} \cdot 2\pi RL \cdot B_{rms} \\ &= 2\pi R^2 L \cdot K_{rms} \cdot B_{rms} \\ &= 2V_{rot} f_t \end{aligned} \quad (31)$$

A partir de (31), pode-se calcular um valor aproximado para o volume do rotor com (32) e, ao definir o coeficiente de forma do rotor como $k_{form} = 2R/L$, é possível determinar o comprimento ativo do motor com (33).

$$V_{rot} = \frac{T}{2f_t} \quad (32)$$

$$L = \frac{2 \cdot R}{k_{form}} \quad (33)$$

Com um torque T e uma potência mecânica de saída P_{out} definidos, pode-se calcular a velocidade angular Ω da máquina, em rad/s, com (34).

$$\Omega = \frac{P_{out}}{T} \quad (34)$$

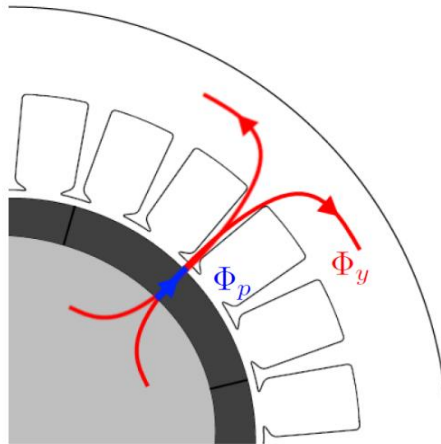
Calcula-se o fluxo magnético, em Wb, em um polo da máquina conforme (35).

$$\Phi_p = \iint B \cdot dS = \int_0^{\pi/p} \sqrt{2} \cdot B_{rms} \sin(p\theta) \cdot L \cdot R d\theta = \frac{2\sqrt{2}LRB_{rms}}{p} \quad (35)$$

Pela Figura 34, sabe-se que o fluxo na coroa do estator é $\Phi_y = \Phi_p/2 = B_y \cdot h_y \cdot L$, onde B_y é a indução magnética na coroa do estator e $h_y \cdot L$ é a área pela qual o fluxo passa. Então, a altura da coroa do estator é dada por (36).

$$h_y = \frac{\sqrt{2} \cdot B_{rms} \cdot R}{p \cdot B_y} \quad (36)$$

Figura 34 – Fluxo magnético em um polo fluindo pela coroa do estator.



Fonte: próprio autor.

Tem-se que o fluxo magnético em todos os dentes vale $\Phi_t = N_s w_t L B_t = 2 \cdot p \cdot \Phi_p$, então pode-se escrever o comprimento periférico total de dentes como (37).

$$\begin{aligned}
N_s \cdot w_t &= \frac{\Phi_t}{L \cdot B_t} = \frac{2 \cdot p \cdot \Phi_p}{L \cdot B_t} = \frac{2 \cdot p \cdot \frac{2 \sqrt{2} L R B_{rms}}{p}}{L \cdot B_t} \\
&= \frac{4 \cdot \sqrt{2} \cdot R \cdot B_{rms}}{B_t}
\end{aligned} \tag{37}$$

Então, é possível obter o comprimento total periférico das ranhuras com (38).

$$N_s \cdot w_s = 2\pi R - N_s \cdot w_t \tag{38}$$

O valor rms da onda progressiva de densidade de corrente é $K_{rms} = k_w \cdot A_{rms}$, onde k_w é o fator de enrolamento, que usualmente varia entre 0,85 e 0,95 (MILLER, 2002), e A_{rms} é o valor rms da densidade linear de corrente, em A/m, que pode ser definida como (39).

$$A_{rms} = \frac{N_c \cdot I_{rms}}{2\pi R} = \frac{N_s \cdot j_{rms} \cdot k_{fill} \cdot h_s \cdot w_s}{2\pi R} \tag{39}$$

Então, calcula-se a altura das ranhuras com (40).

$$h_s = \frac{2\pi R A_{rms}}{j_{rms} \cdot k_{fill} \cdot N_s \cdot w_s} \tag{40}$$

As perdas Joule em um sistema trifásico são calculadas abaixo e desenvolvidas para esse modelo conforme (41), onde ρ_{Cu} é calculado com (42), em que $\rho_{Cu20} = 1,728 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ é a resistividade do cobre a 20 °C, $\alpha_{Cu} = 0,00381$ é o coeficiente de resistividade do cobre e T_{win} é a temperatura do fio. Neste trabalho, T_{win} foi considerado 180 °C, que corresponde a aproximadamente 20% abaixo da classe térmica 220 de isolamento elétrica, para garantir uma margem de segurança.

$$\begin{aligned}
P_j &= 3 \cdot R \cdot I_{rms}^2 \\
&= 3 \cdot \rho_{Cu} \cdot \frac{N_{c/phase} \cdot k_{hw} \cdot L}{S_s} \cdot I_{rms}^2 \\
&= 3 \cdot N_{c/phase} \cdot I_{rms} \cdot \rho_{Cu} \cdot k_{hw} \cdot L \cdot j_{rms} \\
&= 2\pi R A_{rms} \cdot \rho_{Cu} \cdot k_{hw} \cdot L \cdot j_{rms}
\end{aligned} \tag{41}$$

$$\rho_{Cu} = \rho_{Cu20} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (T_{win} - 20)) \quad (42)$$

Para perdas no ferro da coroa e dos dentes do estator, usa-se o modelo de Bertotti (MRAD, 2018), definido em (43), onde k_h , k_c e k_e são, respectivamente, os coeficientes de histerese, de correntes induzidas e de excesso, os quais dependem do material.

$$p(B, f) = k_h B^2 f + k_c (B \cdot f)^2 + k_e (B \cdot f)^{1,5} \quad (43)$$

Logo, as perdas no ferro da máquina são dadas por (44), onde a frequência elétrica f_e é dada por (45) e as massas da coroa M_y e dos dentes M_t por, respectivamente, (46) e (47), onde $\rho_{m,vac} = 8120 \text{ kg/m}^3$ é a densidade mássica do VACOFLUX 48 (VAC© VACUUMSCHMELZE), o que foi considerado como o material do estator neste trabalho.

$$P_f = M_y p(B_y, f) + M_t p(B_t, f) \quad (44)$$

$$f_e = \frac{p \cdot \Omega}{2\pi} \quad (45)$$

$$M_y = \rho_{m,vac} \pi L \cdot [R_{out}^2 - (R + h_s)^2] \quad (46)$$

$$M_t = \rho_{m,vac} h_s L N_s w_t \quad (47)$$

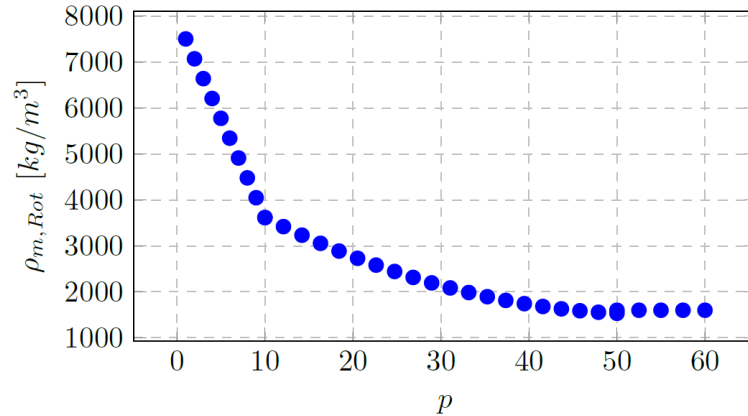
Ainda, para se ter mais informações sobre o peso da máquina, é possível estimar o peso de cobre no estator com (48), onde $\rho_{m,Cu} = 8920 \text{ kg/m}^3$ é a densidade mássica do cobre.

$$M_{Cu} = \rho_{m,Cu} k_{fill} k_{hw} h_s L N_s w_s \quad (48)$$

Em trabalhos passados do GREM3 (©LAPLACE - GREM3), fez-se um estudo estatístico em 50 motores industriais *ETEL* bem documentados, da classe de motores de torque, para estimar a densidade mássica do rotor de acordo com o número de polos das máquinas, obtendo-se (49). Um *plot* de (49) é mostrado na Figura 35 para ilustrar visualmente o decréscimo da densidade mássica do rotor conforme o aumento do número de polos da máquina.

$$\rho_{m, \text{Rot}}(p) = \begin{cases} -431,67p + 7932, & \text{se } 1 \leq p \leq 10 \\ 1,09p^2 - 117,45p + 4681, & \text{se } 10 < p \leq 50 \\ 1600, & \text{se } p > 50 \end{cases} \quad (49)$$

Figura 35 – Densidade mássica do rotor como função do número de polos.



Fonte: próprio autor.

Com esses dados, é possível estimar a massa do rotor conforme (50).

$$M_{\text{rot}} = \rho_{m, \text{Rot}}(p) \cdot V_{\text{rot}} \quad (50)$$

Por fim, de (41), é possível usar o produto equivalente A_j para checar a factibilidade da máquina com (51), onde P_{em} é a potência eletromagnética. No trabalho, as perdas mecânicas são desconsideradas, então $P_{em} = P_{out}$.

$$A_{j\text{eq}} = \frac{P_j + P_f + P_{em} - P_{out}}{\rho_{Cu} 2\pi R k_{hw} L} \quad (51)$$

5 CONTRIBUIÇÃO PARA A OTIMIZAÇÃO DE MSIPS

Como já mencionado, o objetivo principal deste trabalho, no escopo de dimensionamento de máquinas elétricas rotativas, é utilizar o modelo descrito na Seção 4 em um contexto de otimização para determinar a maior potência mássica atingível atualmente com as tecnologias disponíveis, principalmente para resfriamento, e sob quais condições de carregamento. Naturalmente, a função objetivo do problema de otimização em questão pode ser a própria PM, definida em (52).

$$P_m = \frac{T\Omega}{M_{rot} + M_y + M_t + M_{Cu}} \quad (52)$$

A metodologia desta parte do trabalho consistiu em testar diferentes abordagens com MATLAB® e, quando resultados interessantes foram obtidos, utilizou-se também o AMPL®. Para ambos os *softwares*, várias simulações foram feitas para determinar a melhor configuração para executar os programas e garantir o melhor resultado com o menor tempo de processamento possível. Foram feitas simulações para avaliar se haveria vantagem entre um *software* ou outro, para comparar diferentes versões dos programas, abordagens de solução e métodos para resolver o PO e, ainda, para avaliar o comportamento das soluções obtidas quando diferentes limites eram usados para as variáveis ou para alguns parâmetros, além de se ter analisado as soluções de acordo com o número de polos, em uma tentativa de se usar o solucionador global *Baron*.

Após o desenvolvimento principal dos programas, foram feitas melhorias, gerando *Opt6* e *LikeOpt6*, respectivamente para MATLAB® e AMPL®. Para esses programas, os parâmetros foram ajustados para valores mais realistas e fizeram-se comparações com um modelo direto. Como o modelo direto levava em conta o entreferro, houve diferenças de até 2%, o que motivou a adaptação dos programas para uma melhor correspondência, gerando-se *Opt7* e *LikeOpt7*. Essa adaptação foi importante, pois adiante, quando foram determinadas soluções ótimas para motores de alta, média e baixa velocidade, um entreferro maior foi usado para velocidades altas, o que pode tornar a aproximação do raio do rotor pelo raio interno do estator inadequada. Esse aumento do entreferro é necessário, pois, na prática, são usados sistemas de encaixe no formato “cauda de andorinha” para contrabalançar a força centrífuga

nos ímãs do rotor. Finalmente, outra versão do programa testada previamente em NOMAD⁴, foi implementada e testada em MATLAB[®].

5.1 ABORDAGEM DO PROGRAMA DE OTIMIZAÇÃO COM MATLAB[®]

Como comentado na Seção 2.4.4, houve apenas uma abordagem bem-sucedida com MATLAB[®], a qual usa o algoritmo *GlobalSearch* para rodar *fmincon*. A partir da segunda versão do programa de otimização, usou-se também um *loop for*, o qual se mostrou necessário para a obtenção de soluções melhores, executando-se *GlobalSearch* múltiplas vezes.

Três parâmetros de execução foram definidos nessa abordagem:

- N : número de vezes que *GlobalSearch* é executado;
- N_{points} : número de pontos de partida gerados em *GlobalSearch*;
- N_{eval} : número de avaliações em *fmincon*.

5.2 ABORDAGENS DO PROGRAMA DE OTIMIZAÇÃO COM AMPL[®]

Três abordagens forneceram bons resultados com AMPL[®]:

- *MultiSolve*: o comando *solve* é colocado dentro de um *loop for*, então o problema é resolvido múltiplas vezes a partir de um único ponto de partida, passando o resultado anterior para a próxima iteração, conseqüentemente melhorando o ponto inicial a cada execução;
- *MultiStart*: o problema é resolvido com múltiplos pontos iniciais, sendo o comando *solve* executado apenas uma vez para cada ponto inicial;
- *MultiSolve+MultiStart*: ambas as abordagens anteriores são combinadas, usando-se múltiplos pontos de partida e resolvendo-se o problema múltiplas vezes para cada um.

5.3 AS VERSÕES DO PROGRAMA DE OTIMIZAÇÃO

Alguns parâmetros são fixos e outros são calculados para todas as versões do programa desenvolvido, mostrados no Quadro 5 e Quadro 6, respectivamente. Tanto T_{win} quanto P_{out} seriam entradas para o programa, mas foram mantidos constantes para todas as versões, por isso foram citados no Quadro 5.

⁴ NOMAD é uma implementação em C++ de um algoritmo de MADS (*Mesh Adaptive Direct Search – Busca Direta por Rede Adaptativa*).

Quadro 5 – Parâmetros fixos para todas as otimizações.

Parâmetro	Significado	Classe	Valor	Unidade
k_w	Fator de enrolamento	Enrolamento	0,9	–
k_{hw}	Coefficiente de cabeça de bobina	Enrolamento	1,4	–
k_{fill}	Fator de preenchimento de ranhura	Enrolamento	0,6	–
k_h	Coefficiente de histerese	Perdas	$4,905 \cdot 10^{-2}$	–
k_c	Coefficiente de perdas por correntes induzidas	Perdas	$4,449 \cdot 10^{-5}$	–
k_e	Coefficiente de perdas de excesso	Perdas	0	–
$\rho_{Cu,20}$	Resistividade do cobre a 20 °C	Físico	$1,72 \cdot 10^{-8}$	Ω/m
α_{Cu}	Coefficiente de resistividade cobre	Físico	0,00381	–
$\rho_{m,vac}$	Densidade mássica do VACOFLUX 48	Físico	8120	kg/m^3
$\rho_{m,Cu}$	Densidade mássica do cobre	Físico	8920	kg/m^3
T_{win}	Temperatura dos enrolamentos	Especificação	180	°C
P_{out}	Potência mecânica de saída	Especificação	$1 \cdot 10^6$	W

Número total de parâmetros fixos: 12

Fonte: próprio autor.

Quadro 6 – Parâmetros calculados para todas as otimizações.

Parâmetro	Equação usada
f_t	$k_w \cdot A_{rms} \cdot B_{rms}$
L	$\frac{2R}{k_{form}}$
V_{rot}	$\frac{T}{2f_t}$
$N_s \cdot w_t$	$\frac{4\sqrt{2}RB_{rms}}{B_t}$
$N_s \cdot w_s$	$2\pi R - N_s \cdot w_t$
M_{rot}	$\rho_{m,rot} V_{rot}$
M_y	$\rho_{m,vac} \pi L [R_{out}^2 - (R + h_s)^2]$
M_t	$\rho_{m,vac} N_s w_t h_s L$
M_s	$\rho_{m,Cu} N_s w_s h_s L k_{fill} k_{hw}$

Fonte: próprio autor.

Um total de 6 versões do programa de otimização foram desenvolvidas, entre as quais variou-se quais parâmetros eram fixos, calculados ou variáveis. O Quadro 7 condensa as condições para todos os programas. Alguns parâmetros calculados não mostrados no Quadro 6 são determinados direta ou indiretamente conforme:

- Ω : (34);
- B_y, h_y : (36);
- h_s : (40);
- T : (31).

Quadro 7 – Parâmetros de todas as versões do programa de otimização. As abreviações correspondem a parâmetros fixos (F), calculados (C) e variáveis (V).

Parâmetro	Versão					
	1	2	3	4	5	6
A_{rms}	V	V	V	V	V	V
J_{rms}	V	V	V	V	V	V
B_{rms}	V	V	V	V	V	V
T	V	V	V	V	V	C
R	V	V	V	V	V	V
h_s	V	V	V	V	C	C
h_y	V	V	V	V	C	C
B_t	V	V	V	V	V	V
B_y	V	V	V	C	V	V
Ω	V	V	C	C	C	C
k_{form}	F	V	V	V	V	V
p	F	V	V	V	V	V
Número de variáveis	10	12	11	10	9	8
Número de restrições	12	13	12	12	10	8

Fonte: próprio autor.

A primeira versão (*Opt1*) é a única com menos graus de liberdade, já que k_{form} e p são fixos, o que foi feito inicialmente para se trabalhar com um problema com menos variáveis e, conseqüentemente, menos complexo.

Como o número de restrições é próximo ao número de variáveis e o problema é altamente não-linear, espera-se que o método SQP seja mais bem-sucedido do que o IPM

(NUMERICAL ALGORITHMS GROUP (NAG)). De fato, antes da versão *Opt5*, nenhum programa foi capaz de encontrar soluções razoáveis com o IPM e, mesmo quando soluções boas foram encontradas com o IPM, as soluções encontradas com SQP as superavam.

Mostra-se no Quadro 8 e Quadro 9, respectivamente, restrições de igualdade e desigualdade de acordo com as versões do programa de otimização.

Quadro 8 – Restrições não-lineares de igualdade.

Relativo a	Igualdade	Presente nas versões
Torque	$T - 2\pi R^2 L f_t = 0$	1 a 5
Raio do rotor	$R - \sqrt[3]{\frac{k_{form}}{2\pi} V_{rot}} = 0$	1 a 5
Altura da coroa do estator	$h_y - \frac{R \cdot \sqrt{2} \cdot B_{rms}}{p \cdot B_y} = 0$	1 a 3
Correntes elétricas	$2\pi R \cdot A_{rms} - N_s \cdot w_s \cdot h_s \cdot k_{fill} \cdot j_{rms} = 0$	1 a 4
Número de pares de polo	$sen(p \cdot \pi) = 0$	2 a 6

Fonte: próprio autor.

Quadro 9 – Restrições não-lineares de desigualdade.

Relativo a	Desigualdade	Presente nas versões
Correntes elétricas	$A_{rms} \cdot j_{rms} - [Aj]_{max} \leq 0$	1 a 6
Equivalente de correntes elétricas	$A_{jeq} - [A_{jeq}]_{max} \leq 0$	1 a 6
Estresse tangencial magnético	$[f_t]_{min} - f_t \leq 0$	1 a 6
Estresse tangencial magnético	$f_t - [f_t]_{max} \leq 0$	1 a 6
Velocidade linear	$\Omega \cdot R - [v_{lin}]_{max} \leq 0$	1 a 6
Comprimento total de dentes	$[\tau]_{min} - \frac{N_s \cdot w_t}{2\pi R} \leq 0$	1 a 6
Comprimento total de dentes	$\frac{N_s \cdot w_t}{2\pi R} - [\tau]_{max} \leq 0$	1 a 6
Indução magnética na coroa do estator	$[B_y]_{min} - B_y \leq 0$	4
Indução magnética na coroa do estator	$B_y - [B_y]_{max} \leq 0$	4

Fonte: próprio autor.

A partir da terceira versão, soluções satisfatórias foram obtidas, então versões correspondentes foram escritas em AMPL[®]. As versões no segundo *software* foram nomeadas

conforme no primeiro, utilizando-se o prefixo *Like*, do comparativo “como” no inglês. Por exemplo, a versão *Opt3* em MATLAB[®] tem um correspondente *LikeOpt3* em AMPL[®].

5.4 ANÁLISE DOS PROGRAMAS

Para facilitar a explicação das simulações executadas, definem-se alguns termos:

- Versão: é uma forma particular de algo, diferindo em alguns aspectos das outras formas. Nesta seção, tem-se *Opt3*, *Opt4* e *Opt5* para MATLAB[®] e *LikeOpt3*, *LikeOpt4* e *LikeOpt5* para AMPL[®];
- Método: é um procedimento particular para atingir um objetivo. Nesta seção serão tratados IPM e SQP para MATLAB[®] e *Ipopt*, *Snopt*, *Couenne* e *Baron* para AMPL[®];
- Abordagem: é uma forma particular de lidar com algo. No caso deste trabalho, se refere à organização dos programas, usando-se a combinação de *GlobalSearch* com *fmincon* dentro de um *loop for* para MATLAB[®] e usando-se as já citadas abordagens *MultiSolve*, *MultiStart* e *MultiSolve+MultiStart* para AMPL[®].

Uma série de simulações foram realizadas para determinar quais parâmetros de execução teriam maior impacto nos resultados, qual versão, abordagem e método é superior e como os resultados da otimização se comportam quando alguns limites de variáveis são alterados. As versões *Opt3* até *Opt5* foram comparadas com as versões *LikeOpt3* até *LikeOpt5*, resumindo-se as simulações realizadas no Quadro 10.

Quadro 10 – Simulações realizadas para comparar a influência de parâmetros nos resultados das otimizações e diferentes estratégias de otimização.

Tipo	O que é feito	O que é analisado	Software	Considerações
1	N é variado, mantendo-se constantes N_{points} e N_{eval}	Tempo, versão	MATLAB®	$[A_{jeq}]_{max} = 3e12;$ $[p]_{min} = 1;$ $[v_{lin}]_{max} = 100$
2	N_{points} é variado, mantendo-se constantes N e N_{eval}	Tempo, Versão	MATLAB®	$[A_{jeq}]_{max} = 3e12;$ $[p]_{min} = 1;$ $[v_{lin}]_{max} = 100$
3	N_{eval} é variado, mantendo-se constantes N e N_{points}	Tempo, versão	MATLAB®	$[A_{jeq}]_{max} = 3e12;$ $[p]_{min} = 1;$ $[v_{lin}]_{max} = 100$
4	Com as soluções de 1, 2 e 3 onde $p \geq 10$: pontos iniciais para AMPL®	Software, método	MATLAB® e AMPL®	$[A_{jeq}]_{max} = 3e12;$ $[p]_{min} = 10;$ $[v_{lin}]_{max} = 100$
5	<i>MultiSolve</i>	Abordagem, método, versão	AMPL®	$[A_{jeq}]_{max} = 3e12;$ $[p]_{min} = 10;$ $[v_{lin}]_{max} = 100$
6	<i>MultiStart</i>	Tempo, abordagem, método, versão	AMPL®	$[A_{jeq}]_{max} = 3e12;$ $[p]_{min} = 10;$ $[v_{lin}]_{max} = 100$
7	<i>MultiSolve+MultiStart</i>	Tempo, abordagem, método, versão	AMPL®	$[A_{jeq}]_{max} = 3e12;$ $[p]_{min} = 10;$ $[v_{lin}]_{max} = 100$
8	<i>MultiSolve+MultiStart</i> (melhor do Tipo 7)	Comportamento	AMPL®	$[A_{jeq}]_{max} = 2,2e12,$ $2,5e12 e 3e12;$ $[p]_{min} = 10;$ $[v_{lin}]_{max} = 80, 100 e 150$
9	p é fixado para analisar <i>Baron</i>	Comportamento, método	AMPL®	$[A_{jeq}]_{max} = 3e12;$ $[p]_{min} = 10;$ $[v_{lin}]_{max} = 100$

Fonte: próprio autor.

Exceto quando especificado no Quadro 10, alguns parâmetros, tanto variáveis quanto restrições, foram configurados nas simulações conforme a Tabela 7, quando aplicável conforme Quadro 8 e Quadro 9.

Tabela 7 – Limites dos parâmetros.

Parâmetro	Limite inferior	Limite superior	Unidade
A_{rms}	1,5e5	2e5	A/m
j_{rms}	7e6	10e6	A/m ²
f_t	85e3	148,5e3	N/m ²
A_j	–	2,2e12	A ² /m ³
A_{jeq}	–	3e12	A ² /m ³
B_{rms}	0,567	0,742	T
B_y	1,1	1,5	T
B_t	1,2	2	T
h_y	0,005	0,5	m
h_s	0,005	0,5	m
R	0,1	1	m
T	1	1e5	N.m
v_{lin}	–	100	m/s
k_{form}	1	5	–
p	1	30	–

Fonte: próprio autor.

Observou-se durante as simulações que alguns parâmetros acabavam por ser determinados em seus limites definidos na Tabela 7. Para fornecer uma visualização de como isso acontecia ao longo das simulações, a Tabela 8 mostra o total de cada tipo de simulação realizada e a porcentagem delas que eram atribuídas no limite inferior ou superior para cada variável. Nota-se que os parâmetros com maior tendência a serem firmados em seus limites foram: A_{rms} , A_{jeq} , B_t e v_{lin} . Um fato interessante é que A_{rms} normalmente esteve próximo de seu limite inferior, o que era esperado, conforme mencionado na Seção 2.3.2, pois as máquinas otimizadas nesse trabalho são relativamente pequenas.

Tabela 8 – Parâmetros determinados em seus limites de acordo com tipo de simulação e *software*, em porcentagem.

Parâmetro	Tipo 1 a 3	Tipo 4	Tipo não utilizado	Tipo 5	Tipo 6	Tipo 7	Tipo 8	Total AMPL [®]	Total
N ^o simulações	59	63	17	12	12	9	34	147	206
A_{rms}	54%	65%	53%	67%	83%	100%	68%	68%	53%
j_{rms}	39%	70%	53%	50%	83%	44%	68%	65%	47%
f_t	39%	8%	0%	17%	8%	44%	18%	12%	17%
A_j	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
A_{jeq}	83%	48%	53%	67%	92%	89%	62%	59%	56%
B_{rms}	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
B_y	53%	33%	35%	17%	8%	33%	62%	37%	31%
B_t	78%	65%	88%	67%	83%	33%	59%	66%	60%
h_y	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
h_s	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
R	20%	0%	0%	0%	0%	0%	15%	3%	6%
T	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
v_{lin}	86%	68%	53%	58%	75%	67%	59%	64%	61%
k_{form}	8%	17%	6%	0%	8%	22%	32%	18%	10%
p	0%	37%	76%	83%	92%	89%	12%	47%	32%

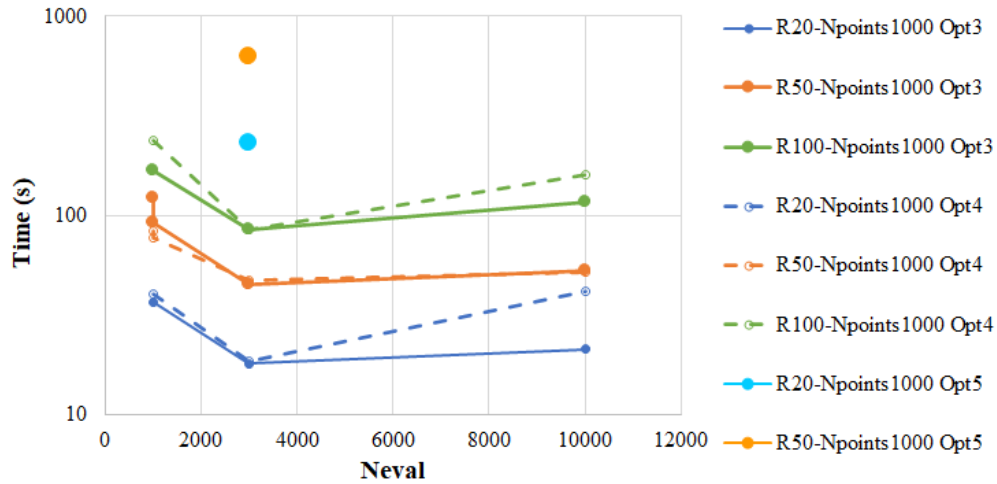
Fonte: próprio autor.

5.4.1 Escolhendo parâmetros de execução e versão em MATLAB[®]

A versão *Opt5* foi feita após as simulações dessa seção, mas alguns resultados serão mostrados para permitir comparações, quando aplicado.

Mantendo-se constante o número de pontos de partida $N_{points}=1000$, observa-se, na Figura 36, um aumento significativo no tempo de simulação com o aumento de N , assim como uma aparente independência de N_{eval} . Isso também é observado para os outros dois valores de N_{points} testados: 3000 e 10000, cujos gráficos são omitidos para não estender desnecessariamente o trabalho.

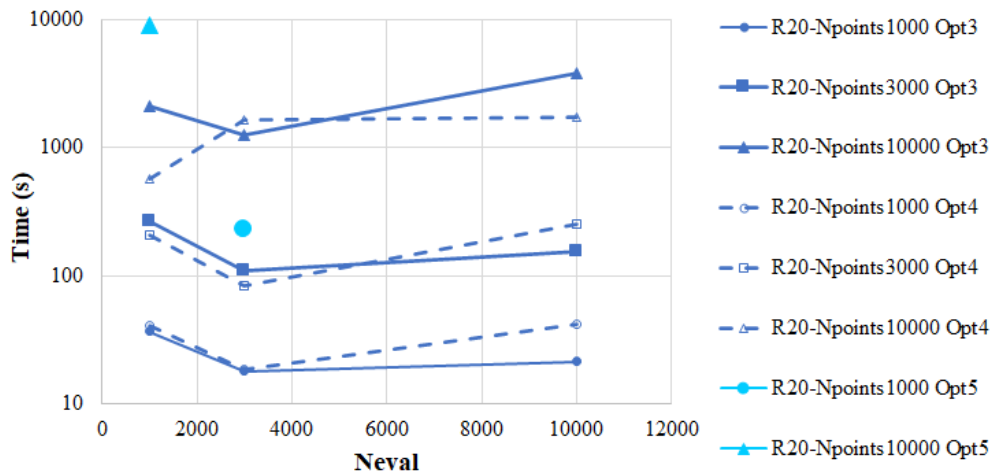
Figura 36 – Tempo de execução para 1000 pontos de partida, com N (na legenda do gráfico corresponde a R) variando de 20 até 100.



Fonte: próprio autor.

Agora, com o número de execuções N constante e igual a 20, vê-se, na Figura 37, um aumento ainda mais expressivo no tempo de execução conforme N_{points} aumenta, novamente sem influência de N_{eval} . Para $N=50$ e $N=100$, observa-se o mesmo, embora novamente os gráficos sejam omitidos aqui.

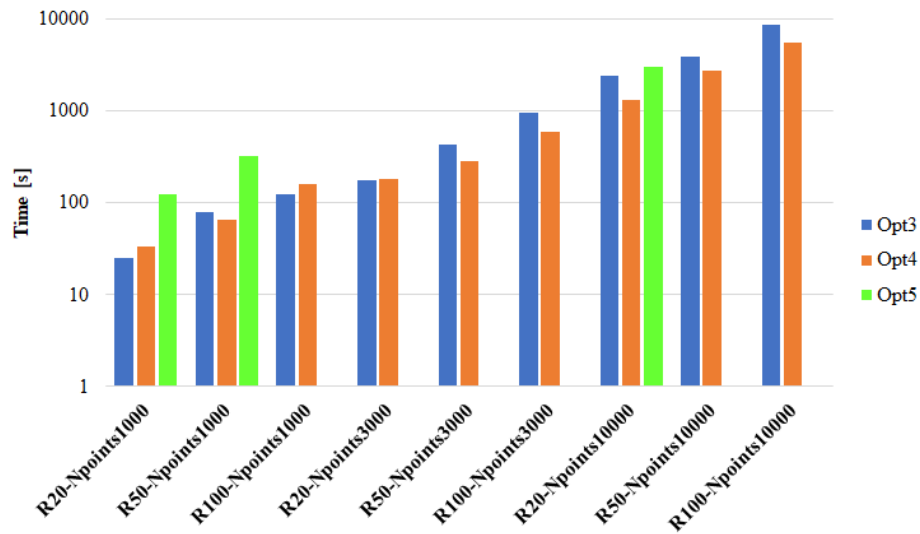
Figura 37 – Tempo de execução para 20 execuções com o *loop for*, com N_{points} variando de 1000 até 10000.



Fonte: próprio autor.

Os dados das simulações foram separados em categorias com combinações entre os valores de N e N_{points} e calculou-se a média de tempo para os valores de N_{eval} de cada categoria. A Figura 38 mostra o resultado obtido, onde se vê que *Opt3* é mais lento do que *Opt4* na maioria dos casos. Considerando-se também *Opt5*, para todas as três categorias onde a versão aparece, ela foi a mais lenta.

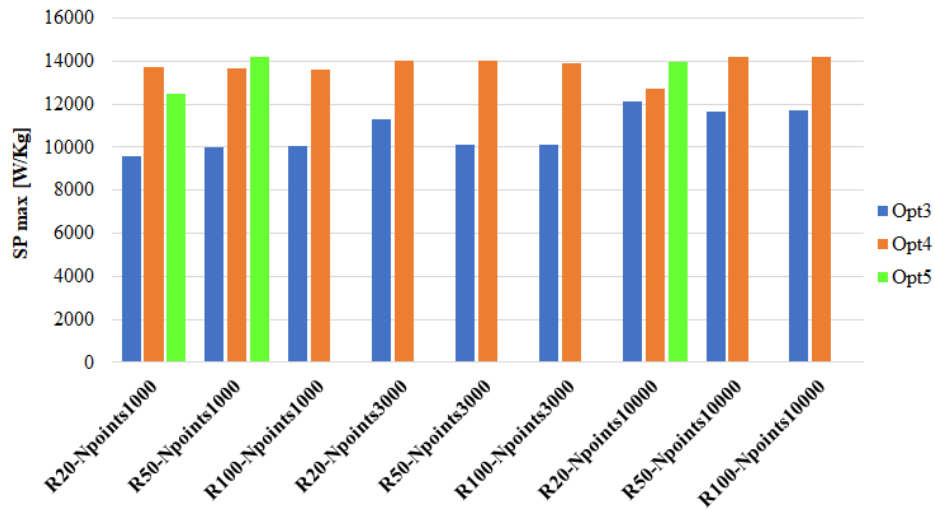
Figura 38 – Média dos tempos de execução de acordo com categorias de parâmetros que possuem maior influência no tempo de execução.



Fonte: próprio autor.

Ao comparar os melhores valores de função objetivo obtidos para cada categoria, na Figura 39, nota-se melhora no resultado com o aumento de N e N_{points} . Entretanto, quando o aumento exponencial de tempo de execução devido a esses parâmetros é considerado, entende-se que escolher N maior do que 50 ou N_{points} maior de que 3000 (valor padrão em *fmincon*) não se justifica. Ao comparar os valores da função objetivo com relação a N_{eval} , nenhuma correlação é observada, recomendando-se manter seu valor padrão de 3000. Ao comparar as versões, existe uma clara superioridade de *Opt4* sobre *Opt3* e de *Opt5* sobre *Opt4*. Para a categoria $N=20$ - $N_{points}=1000$, obteve-se um resultado melhor com *Opt4*, mas outros valores de N_{eval} acabaram por fornecer também os piores resultados, sendo a versão pior na média. Pode-se dizer que essa variabilidade alta dos resultados nessa categoria é devida aos valores reduzidos dos parâmetros de execução, não se podendo garantir as melhores soluções, embora elas possam ocorrer. É importante notar que, dentre todas as simulações, *Opt5* foi a que obteve o melhor resultado geral, de potência mássica de 14161 W/kg, a qual acredita-se ser a solução global para o problema de otimização sob essas condições, o que será reforçado adiante com AMPL[®].

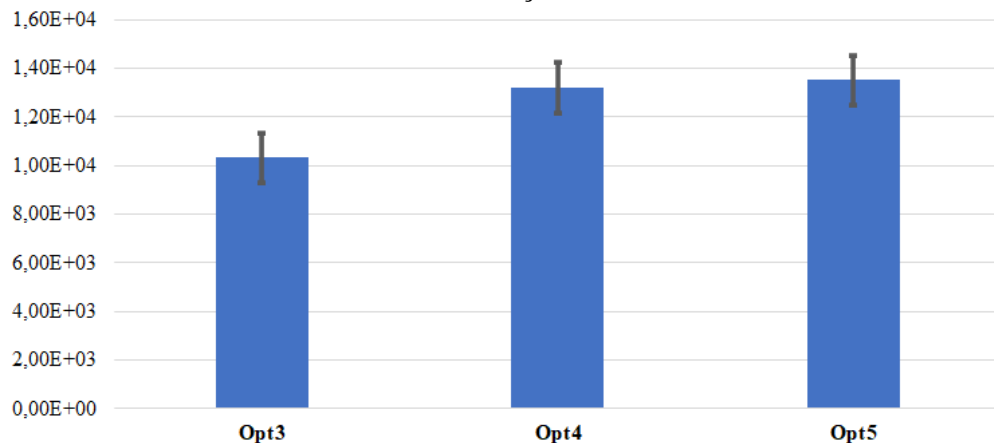
Figura 39 – Valores máximos da função objetivo de acordo com categoria.



Fonte: próprio autor.

Para comparar mais diretamente as versões, a Figura 40 mostra os valores médios da função objetivo obtidos para cada versão. Mostra-se também uma barra de erro, da qual se interpreta sobre como os valores podem variar a partir da média mostrada. Fica claro, pela figura, que *Opt5* não só apresenta a já mencionada melhor solução, mas também tem uma média mais alta, indicando que ela pode fornecer resultados mais consistentes e melhores do que as outras, com *Opt3* aparentando ser a pior.

Figura 40 – Valores médios da função objetivo obtidos para cada versão nas diferentes simulações.



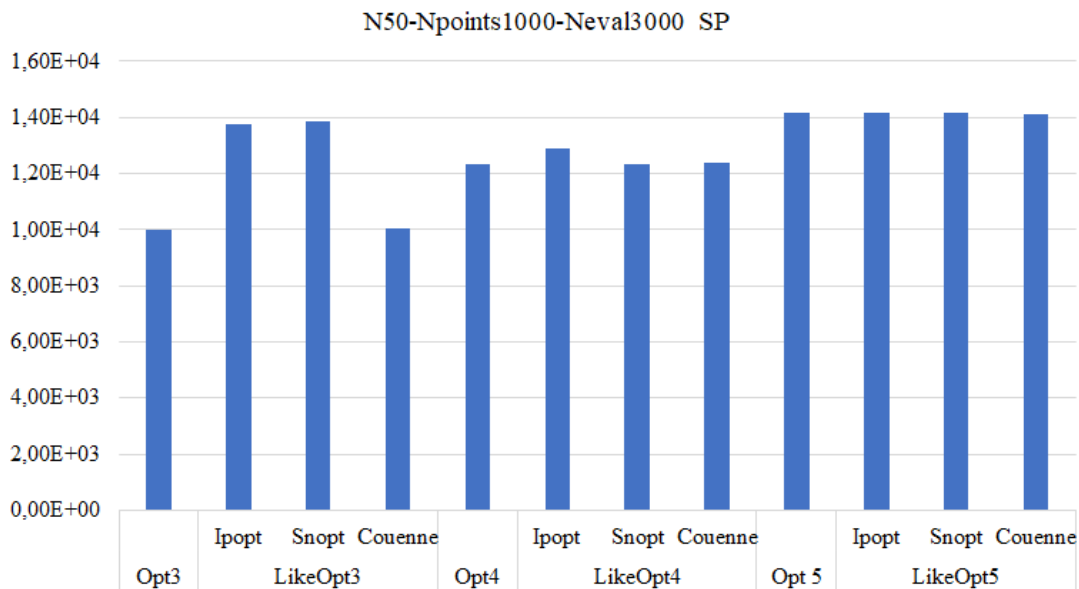
Fonte: próprio autor.

5.4.2 Validando o uso de AMPL[®]

Como já mencionado, *Opt5* não foi simulada em todas as mesmas condições que *Opt3* e *Opt4* e as versões em AMPL[®] só foram testadas para $p \geq 10$ nesse primeiro momento. Vale justificar essa escolha de limite para p : máquinas com mais polos possuem menor rotação, o que indica que a solução ótima para elas teria k_{form} maior do que 1 (conforme intervalos da

Tabela 7, onde p não é limitado diretamente), sendo essa escolha uma tentativa de forçar que k_{form} não fosse atribuído pelo programa em seu limite inferior, e sim determinado de acordo com o que se espera da teoria. Então, considerando-se as condições em que as três versões foram testadas e aquelas onde $p \geq 10$, duas simulações foram tomadas. Aqui, apenas uma é mostrada na Figura 41, mas o mesmo que será comentado é observado na comparação aqui omitida que consta as três versões e nas outras 18 simulações que consideram apenas *Opt3* e *Opt4*.

Figura 41 – Função objetivo obtida para *Opt3*, *Opt4* e *Opt5*, comparando com *LikeOpt3*, *LikeOpt4* e *LikeOpt5*, quando as soluções dos primeiros três são usadas como pontos de partida para as últimas três.



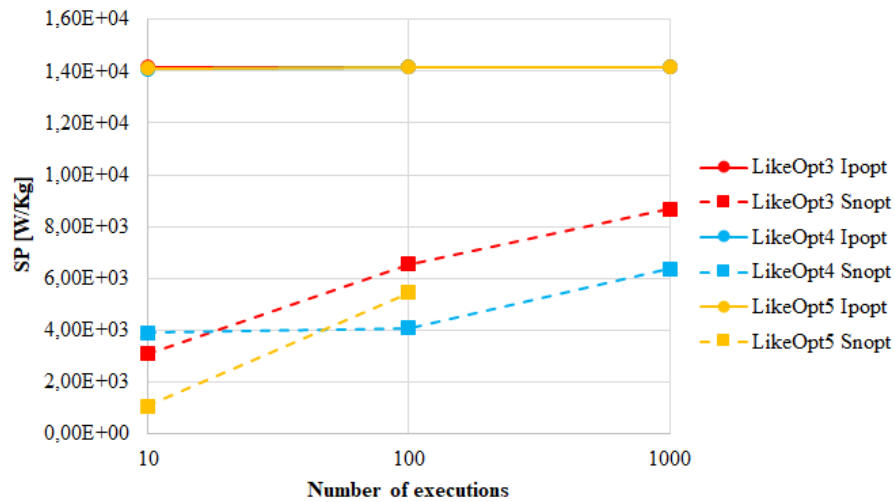
Fonte: próprio autor.

Vê-se, na Figura 41, que as soluções do MATLAB[®] foram melhoradas com AMPL[®], a não ser quando utilizado *Couenne*.

5.4.3 Testando MultiSolve

Com a abordagem *MultiSolve*, vê-se, na Figura 42, que *Ipopt* apresentou um desempenho muito superior ao *Snopt*. Com o primeiro, o aumento do número de execuções do comando *solve* acima de 10 não fez uma diferença significativa, mas o segundo indica que se pode obter melhoras nas soluções com o aumento do número de execuções.

Figura 42 – Valores obtidos para a função objetivo com a abordagem *MultiSolve* e os métodos *Ipopt* e *Snopt*.

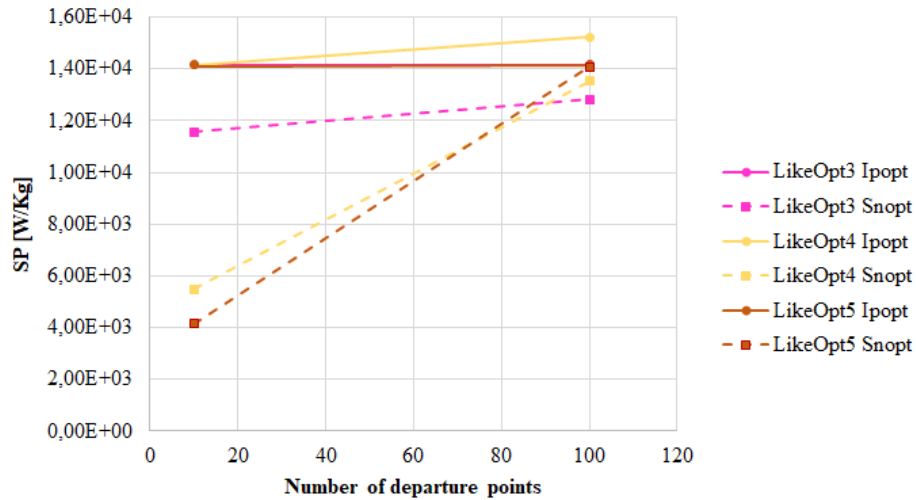


Fonte: próprio autor.

5.4.4 Testando MultiStart

Usando-se múltiplos pontos de partida, observa-se, na Figura 43, que os resultados com *Snopt* são fortemente melhorados. Mesmo que os resultados com *Ipopt* se mantiveram em um patamar similar, *LikeOpt4* teve a melhor solução encontrada até o momento, de potência mássica 15227 W/kg, quando usados 100 pontos iniciais. A melhora das soluções tanto com *Ipopt* quanto com *Snopt* indica que o número de pontos iniciais tem mais impacto nas soluções. Entretanto, mesmo com esse resultado obtido com *LikeOpt4*, como a PM de 14161 W/kg foi encontrada consistentemente em diversas simulações, atentou-se para a possibilidade de ela ser a solução global do problema, o que tardiamente foi reforçado quando foram realizadas verificações com um modelo direto, que será explicado na Seção 5.5. Ao realizar as verificações com o modelo direto para esse caso, notou-se que para os casos de PM 14161 W/kg, apenas pequenas variações ocorreram, o que é esperado pelo programa de otimização não considerar o entreferro e o modelo direto sim, mas no caso de PM 15227 W/kg, com os parâmetros determinados pela otimização, o modelo direto determinou que a PM resultante estaria em torno de 10% abaixo, concluindo-se que a solução é inferior. Isso alerta para o fato de que, embora incomum, resultados levemente imprecisos podem ocorrer por causa da tolerância usada para as restrições nos programas, devendo-se sempre adequar as soluções com o modelo direto.

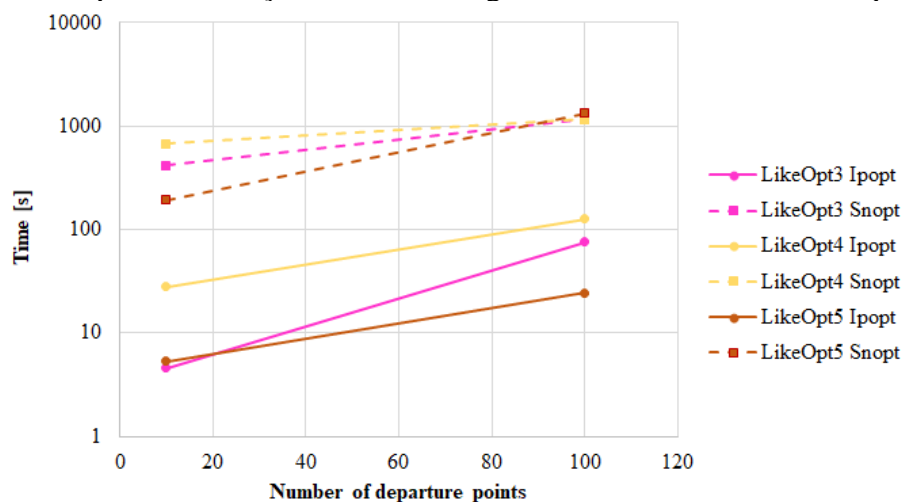
Figura 43 – Valores obtidos para a função objetivo com a abordagem *MultiStart* e os métodos *Ipopt* e *Snopt*.



Fonte: próprio autor.

O tempo de execução dos programas é mostrado na Figura 44, onde se vê que *LikeOpt4* foi a versão mais lenta quando *Ipopt* era utilizado e que, para um número grande de pontos de partida, *LikeOpt5* foi consideravelmente mais rápido. Observa-se, também, que *Snopt* leva ao menos 10 vezes mais tempo para ser executado, o que combinado com os resultados inferiores de PM obtidos, descarta a escolha desse método para resolver o PO deste trabalho. Isso contradiz a ideia apresentada anteriormente de que programação quadrática sequencial seria melhor do que ponto interior para resolver o problema, porém isso pode ser devido ao *Snopt*, apesar de ser baseado em SQP, ser focado na resolução de problemas de larga escala, o que pode influenciar sua performance para problemas menores.

Figura 44 – Tempos de execução com a abordagem *MultiStart* e os métodos *Ipopt* e *Snopt*.

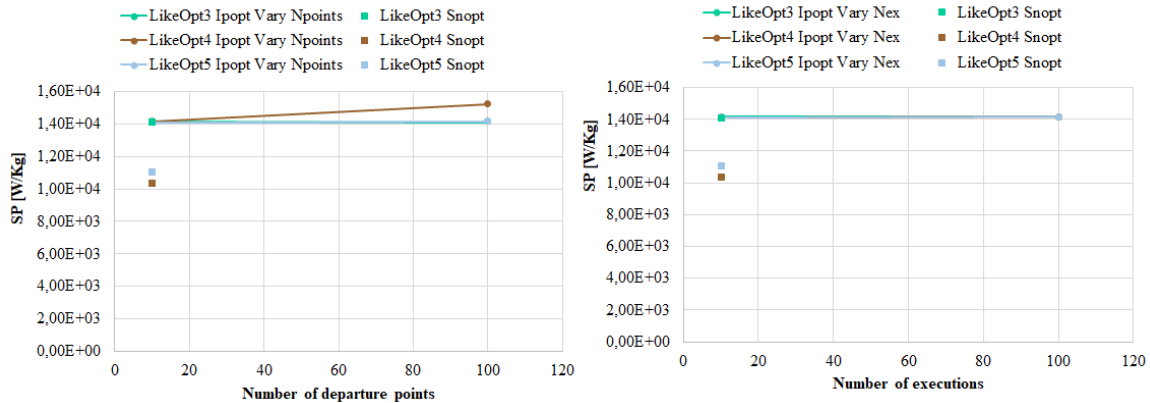


Fonte: próprio autor.

5.4.5 Testando MultiSolve+MultiStart

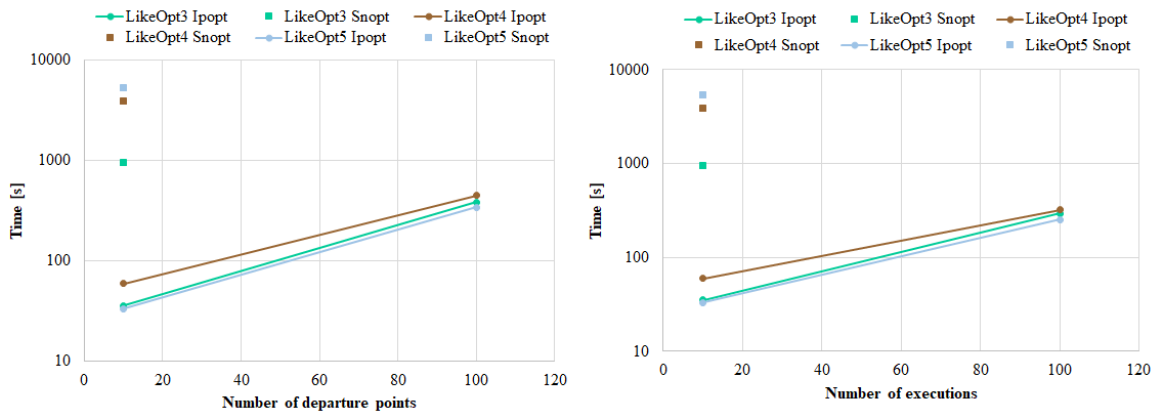
Quando as duas abordagens supracitadas foram combinadas, resultados semelhantes foram obtidos, conforme a Figura 45 e Figura 46 mostram, reafirmando o mencionado nas seções 5.4.3 e 5.4.4.

Figura 45 – Valores obtidos para a função objetivo com a abordagem *MultiSolve+MultiStart* e os métodos *Ipopt* e *Snopt*, separados conforme número de pontos de partida (esquerda) e número de execuções (direita).



Fonte: próprio autor.

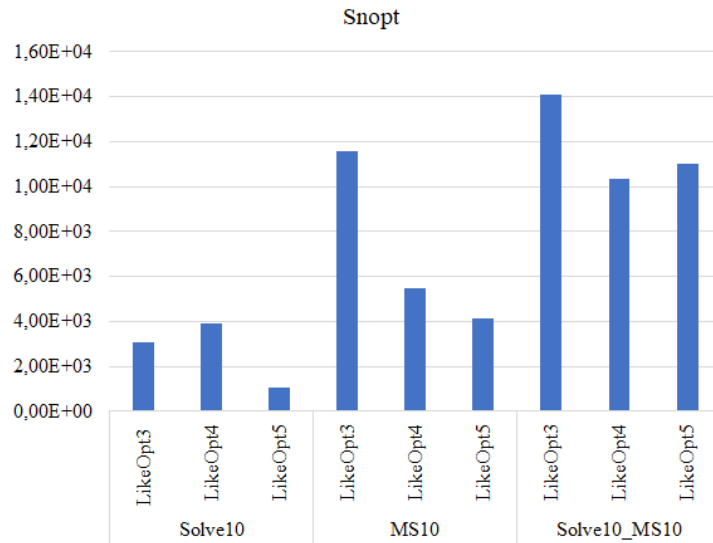
Figura 46 – Tempos de execução com a abordagem *MultiSolve+MultiStart* e os métodos *Ipopt* e *Snopt*, separados conforme número de pontos de partida (esquerda) e número de execuções (direita).



Fonte: próprio autor.

Entretanto, como *Ipopt* forneceu consistentemente a mesma solução, exceto quando o número de pontos de partida de *LikeOpt4* era determinado em 100, não há muita comparação a ser feita entre as três abordagens. Então, os resultados obtidos com *Snopt* foram usados para avaliar se haveria vantagem entre as abordagens ou não, conforme Figura 47, mesmo que o método seja inferior a *Ipopt*. A figura mostra que, para as três versões comparadas, há uma melhora significativa das soluções quando a abordagem *MultiSolve+MultiStart* é usada, então essa foi a abordagem escolhida para as simulações do Tipo 8.

Figura 47 – Valores obtidos para a função objetivo com *Snopt* em *LikeOpt3*, *LikeOpt4* e *LikeOpt5*, comparando as três abordagens.



Fonte: próprio autor.

5.4.6 Verificando o comportamento das soluções ótimas

O Tipo 8 de simulação, referente a esta seção, foi executado com a versão *LikeOpt5*, usando *Ipopt* com a abordagem *MultiSolve+MultiStart*.

Como essa simulação gerou diversos gráficos, eles serão omitidos, apenas se apresentando as observações a respeito deles.

Quando $[v_{lin}]_{max}$ decresce, diminuam:

- A velocidade rotacional;
- A altura da coroa h_y ;
- A eficiência;
- O fator de forma k_{form} ; e
- A frequência elétrica.

E aumentam:

- O carregamento elétrico j_{rms} ;
- O estresse magnético tangencial f_t ;
- Os carregamentos magnéticos B_{rms} , B_y e B_t ;
- A massa de cobre na máquina;
- A massa total da máquina; e
- As perdas no ferro e Joule.

Já quando $[A_{jeq}]_{max}$ diminui, diminuem:

- A velocidade rotacional;
- As perdas no ferro; e
- A frequência elétrica.

E aumentam:

- A altura da coroa do estator h_y ;
- As massas de cobre, de ferro e do rotor e, conseqüentemente, a massa total; e
- O fator de forma k_{form} .

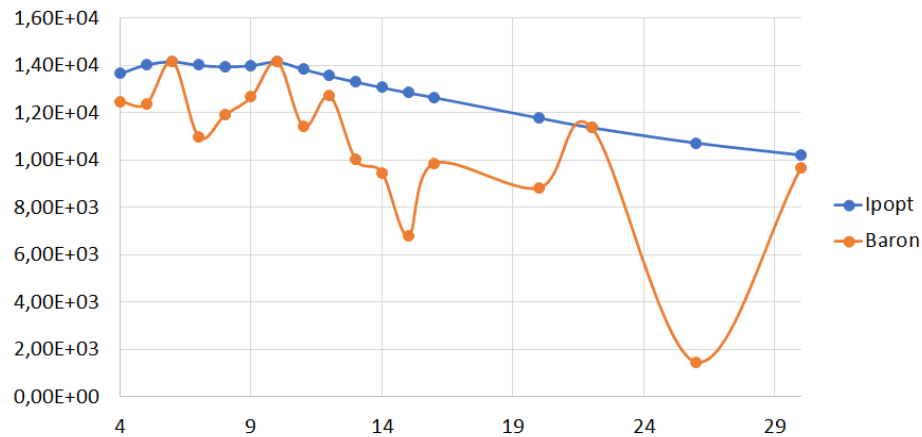
Pode-se fazer também algumas outras observações:

- A_{rms} foi sempre firmado em seu limite inferior;
- j_{rms} foi determinado em seu limite superior, quando $[A_{jeq}]_{max} = 3e12$;
- f_t foi atribuído em seu limite inferior quando $[v_{lin}]_{max} = 150$ ou $[A_{jeq}]_{max} = 2.2e12$;
- A_{jeq} foi sempre definido em seu limite superior;
- B_{rms} se manteve constante para $[A_{jeq}]_{max} = 2.2e12$;
- v_{lin} foi atribuído em seu limite superior quando $[v_{lin}]_{max}$ valia 80 e 100 m/s;
- Em poucos casos, a tolerância não foi suficiente para garantir um p inteiro, mas como a divergência ocorria na quarta casa decimal, assumiu-se que o número poderia ser arredondado;

5.4.7 Testando *Baron*

Como o método *Couenne* não foi bem-sucedido anteriormente, o nono tipo de simulação tentou outro solucionador global: *Baron*. Para tornar o PO mais simples, o número de pares de polo foi fixado e o programa foi executado para diferentes valores de p . Como a Figura 48 mostra, o método não foi capaz de encontrar melhores soluções do que o *Ipopt*, por vezes encontrando a mesma solução.

Figura 48 – Valores obtidos para a função objetivo com *MultiSolve+MultiStart* e com os solucionadores *Ipopt* e *Baron* em *LikeOpt5* com p fixo.



Fonte: próprio autor.

5.5 VALIDANDO SOLUÇÕES ÓTIMAS PARA DIFERENTES FAIXAS DE VELOCIDADE

Os resultados apresentados na Seção 5.4 dão subsídio para escolher tanto *Opt5*, com $N=50$, $N_{points}=3000$ e $N_{eval}=3000$, quanto *LikeOpt5*, com *MultiSolve+MultiStart*, cada um executado 10 vezes. Conforme mencionado na descrição metodológica do início da seção, o programa foi melhorado após a obtenção desses resultados, de forma que o torque passou a ser um parâmetro calculado. Nessa nova versão, de número “6”, os resultados foram semelhantes aos obtidos com *Opt5* e *LikeOpt5*, o que colaborou com a consistência das otimizações. Como os resultados foram similares para os dois *softwares*, apenas as soluções de *Opt6* serão apresentadas, estando separadas nas categorias: dimensões, carregamentos, volumes, massas, performances, perdas e outros. O código de *Opt6* é mostrado no APÊNDICE A – Programa de otimização *Opt6* e seu equivalente *LikeOpt6* é mostrado no APÊNDICE B – Programa de otimização *LikeOpt6*.

Um modelo direto desenvolvido pelo pesquisador Yvan Lefèvre, do Laplace, foi utilizado para validar os resultados das otimizações. A única diferença entre esse modelo e os programas já mencionados é que ele considera o entreferro. Para isso, um coeficiente x_g é definido como (53), onde g é o comprimento do entreferro e r_3 é o raio interno do estator, o que permite o cálculo do raio r_2 do rotor como (54).

$$x_g = \frac{g}{r_3} \quad (53)$$

$$r_2 = r_3 - g \quad (54)$$

Essa diferenciação entre os dois raios muda algumas equações da Seção 4 e do Quadro 6 e Quadro 9. Para facilitar a explicação, vale considerar que todas as equações são escritas com r_3 no lugar de R , então as únicas que mudam são relacionadas ao comprimento ativo da máquina L , ao volume do rotor V_{rot} e à velocidade linear v_{lin} , respectivamente calculadas agora como (55), (56) e (57).

$$L = \frac{2r_2}{k_{form}} \quad (55)$$

$$V_{rot} = \pi r_2^2 L \quad (56)$$

$$v_{lin} = \Omega \cdot r_2 \quad (57)$$

Esse modelo usa nove entradas para calcular as performances da máquina: p , τ_e^5 , r_3 , L , h_y , h_s , B_m , f_t e v_{lin} . Dessa forma, se a otimização funcionar adequadamente, seus resultados devem coincidir com os resultados do modelo direto. Além das entradas mencionadas, também são entradas do modelo direto os coeficientes do Quadro 5, à exceção de P_{out} , que no modelo direto é calculado. O *script* do programa pode ser visto no APÊNDICE C – Modelo direto.

As diferenças relativas entre os resultados de *Opt6* e do modelo direto são calculadas com (58). A Tabela 9 mostra os limites das variáveis utilizados para obter os resultados da Tabela 10. Os parâmetros fixos utilizados foram os mesmos do Quadro 5, com o parâmetro adicional $x_g = 0,01$. A Tabela 10 mostra dois parâmetros não mencionados anteriormente de maneira específica: a velocidade rotacional, em *rpm*, calculada conforme (59), e o torque específico, dado por (60).

$$Dif = \frac{\text{Direto} - \text{Opt}}{\text{Direto}} \quad (58)$$

$$N = \frac{60}{2\pi} \quad (59)$$

$$ST = \frac{T}{M_{rot} + M_y + M_t + M_{Cu}} \quad (60)$$

⁵ Taxa de ranhuras na circunferência interna do estator.

Tabela 9 – Limites dos parâmetros usados para comparar *Opt6* e o modelo direto.

Par.	Todos casos		Alta vel.		Média vel.		Baixa vel.		Un.
	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	
A_{rms}	1,5e5	2e5	–	–	–	–	–	–	A/m
j_{rms}	7e6	10e6	–	–	–	–	–	–	A/m ²
f_t	–	–	80e3	90e3	8,5e3	120e3	8,5e3	148,5e3	N/m ²
A_j	–	1,5e12	–	–	–	–	–	–	A ² /m ³
A_{jeq}	–	2,2e12	–	–	–	–	–	–	A ² /m ³
B_{rms}	0,354	0,742	–	–	–	–	–	–	T
B_y	0,6	1,5	–	–	–	–	–	–	T
B_t	0,6	1,5	–	–	–	–	–	–	T
R	0,040	0,200	–	–	–	–	–	–	m
v_{lin}	–	–	–	160	–	100	–	70	m/s
k_{form}	–	–	0,5	0,7	0,999	1,001	1	5	–
p	–	–	2	4	3	9	8	30	–

Fonte: próprio autor.

Tabela 10 – Comparação entre *Opt6* e o modelo direto em três casos de velocidade.

Categ.	Par.	Alta velocidade			Média velocidade			Baixa velocidade			Un.
		<i>Opt6</i>	Direto	Dif	<i>Opt6</i>	Direto	Dif	<i>Opt6</i>	Direto	Dif	
Dimens.	h_y	24.3	24.3	0.0%	19.3	19.3	0.0%	8.9	8.9	0.0%	mm
	h_s	47.8	47.8	0.0%	42.4	42.4	0.0%	45.7	45.7	0.0%	mm
	L	206.1	206.1	0.0%	191.6	191.6	0.0%	195.5	195.5	0.0%	mm
	R, r_3	72.1	72.1	0.0%	95.7	95.7	0.0%	136.8	136.8	0.0%	mm
Carregamentos	A_{rms}	1.5e5	1.5e5	0.0%	1.5e5	1.5e5	0.0%	1.5e5	1.5e5	0.0%	A/m
	j_{rms}	8.12e6	8.12e6	0.0%	9.59e6	9.59e6	0.0%	8.8e6	8.8e6	0.0%	A/m ²
	f_t	8e4	8e4	0.0%	8.68e4	8.68e4	0.0%	8.5e4	8.5e4	0.0%	N/m ²
	A_j	1.22e12	1.22e12	0.0%	1.44e12	1.44e12	0.0%	1.32e12	1.32e12	0.0%	A ² /m ³
	A_{jeq}	2.20e12	2.22e12	0.9%	2.20e12	2.21e12	0.7%	2.20e12	2.22e12	0.8%	A ² /m ³
	B_{rms}	0.59	0.59	0.0%	0.64	0.64	0.0%	0.63	0.63	0.0%	T
	B_y	1.24	1.24	0.0%	1.50	1.50	0.0%	1.37	1.37	0.0%	T
B_t	1.50	1.50	0.0%	1.50	1.50	0.0%	1.50	1.50	0.0%	T	
Volumes	V_{Cu}	2.41	2.42	0.0%	2.52	2.52	0.0%	4.01	4.01	0.0%	cm ³
	V_y	4.15	4.15	0.0%	3.44	3.44	0.0%	2.05	2.05	0.0%	cm ³
	V_t	1.59	1.59	0.0%	1.89	1.89	0.0%	2.90	2.90	0.0%	cm ³
	V_{fer}	5.74	5.74	0.0%	5.33	5.33	0.0%	4.95	4.95	0.0%	cm ³
	V_{rot}	3.37	3.30	-2.0%	5.52	5.41	-2.0%	11.50	11.27	-2.1%	cm ³
Massas	M_{Cu}	21.5	21.5	0.0%	22.5	22.5	0.0%	35.8	35.8	0.0%	kg
	M_y	33.7	33.7	0.0%	27.9	27.9	0.0%	16.6	16.6	0.0%	kg
	M_t	12.9	12.9	0.0%	15.3	15.3	0.0%	23.6	23.6	0.0%	kg
	M_{fer}	46.6	46.6	0.0%	43.3	43.3	0.0%	40.2	40.2	0.0%	kg
	M_{stat}	68.1	68.1	0.0%	65.8	65.8	0.0%	76.0	76.0	0.0%	kg
	M_{rot}	23.8	23.3	-2.0%	36.6	35.9	-2.0%	41.6	40.7	-2.1%	kg
	M_{total}	91.9	91.5	-0.5%	102.4	101.6	-0.7%	117.5	116.7	-0.7%	kg
Perd.Perf.	ST	5.86	5.89	0.5%	9.35	9.42	0.7%	16.63	16.75	0.7%	N.m/kg
	SP	10880	11048	1.5%	9769	9937	1.7%	8507	8655	1.7%	W/kg
Perd.	P_{fer}	3615.6	3667.3	1.4%	3459.3	3505.1	1.3%	5833.4	5918.5	1.4%	W
	P_j	4484.5	4461.7	-0.5%	6538.5	6503.1	-0.5%	8747.7	8699.8	-0.6%	W
Outros	η	99.2%	99.2%	0.0%	99.0%	99.0%	0.0%	98.6%	98.6%	0.0%	–
	N	17728	17909	1.0%	9977	10077	1.0%	4885	4936	1.0%	rpm
	v_{lin}	133.9	133.9	0.0%	100.0	100.0	0.0%	70.0	70.0	0.0%	m/s
	k_{form}	0.7	0.7	0.0%	1.0	1.0	0.0%	1.4	1.4	0.0%	–
	τ_e	0.644	0.644	0.0%	0.614	0.614	0.0%	0.622	0.622	0.0%	–
	p	2	2	0.0%	3	3	0.0%	10	10	0.0%	–
	f_e	590.94	596.95	1.0%	498.84	503.85	1.0%	814.15	822.62	1.0%	Hz
	T	538.7	538.8	0.0%	951.1	957.2	0.0%	1954.9	1954.0	0.0%	N.m

Fonte: próprio autor.

Observa-se que com um entreferro de 1% do raio interno do estator, o desvio máximo entre os resultados das otimizações e o modelo direto foi de -2,1% para o volume do rotor no caso de baixa velocidade e -2% nos outros. A diferença da PM (SP na tabela) foi de aproximadamente 1,7%, sendo o valor dado pelo modelo direto maior, o que não é necessariamente bom, pois o valor de A_{jeq} também aumentou, causando uma violação da restrição de 2,2 A²/m³ por aproximadamente 1%, sendo isso altamente indesejável, já que o produto A_j é definido considerando a melhor tecnologia de resfriamento disponível. Então, adaptou-se *Opt6* para que o programa de otimização também considerasse (53) a (57), gerando-se a versão *Opt7*. Os valores obtidos foram novamente comparados com o modelo direto, conforme Tabela 11, onde se utilizaram os mesmos limites da Tabela 9, exceto para o caso de alta velocidade, onde se usou um $[f_t]_{min}$ de $85 \cdot 10^3$ N/m².

Tabela 11 – Comparação entre *Opt7* e o modelo direto em três casos de velocidade.

Categ.	Par.	Alta velocidade			Média velocidade			Baixa velocidade			Un.
		<i>Opt7</i>	Direto	Dif	<i>Opt7</i>	Direto	Dif	<i>Opt7</i>	Direto	Dif	
Dimens.	h_y	25.3	25.3	0.0%	14.3	14.3	0.0%	9.9	9.9	0.0%	mm
	h_s	48.1	48.1	0.0%	51.9	51.9	0.0%	42.7	42.7	0.0%	mm
	L	208.4	208.4	0.0%	192.6	192.6	0.0%	184.4	184.4	0.0%	mm
	r_3	72.9	72.9	0.0%	96.2	96.2	0.0%	143.6	143.6	0.0%	mm
Carregamentos	A_{rms}	1.5e5	1.5e5	0.0%	1.5e5	1.5e5	0.0%	1.5e5	1.5e5	0.0%	A/m
	j_{rms}	8.35e6	8.35e6	0.0%	7.74e6	7.74e6	0.0%	9.41e6	9.41e6	0.0%	A/m ²
	J_t	8.5e4	8.5e4	0.0%	8.5e4	8.5e4	0.0%	8.5e4	8.5e4	0.0%	N/m ²
	A_j	1.25e12	1.25e12	0.0%	1.16e12	1.16e12	0.0%	1.41e12	1.41e12	0.0%	A ² /m ³
	A_{jeq}	2.20e12	2.21e12	0.3%	2.20e12	2.21e12	0.3%	2.20e12	2.205e12	0.2%	A ² /m ³
	B_{rms}	0.63	0.63	0.0%	0.63	0.63	0.0%	0.63	0.63	0.0%	T
	B_y	1.28	1.28	0.0%	1.49	1.49	0.0%	1.29	1.29	0.0%	T
	B_t	1.50	1.50	0.0%	1.50	1.50	0.0%	1.50	1.50	0.0%	T
Volumes	V_{Cu}	2.40	2.40	0.0%	3.16	3.16	0.0%	3.71	3.71	0.0%	cm ³
	V_y	4.43	4.43	0.0%	2.69	2.69	0.0%	2.20	2.20	0.0%	cm ³
	V_t	1.74	1.74	0.0%	2.28	2.28	0.0%	2.68	2.68	0.0%	cm ³
	V_{fer}	6.17	6.17	0.0%	4.98	4.98	0.0%	4.89	4.89	0.0%	cm ³
	V_{rot}	3.41	3.41	0.0%	5.49	5.49	0.0%	11.71	11.71	0.0%	cm ³
Massas	M_{Cu}	21.4	21.4	0.0%	28.2	28.2	0.0%	33.1	33.1	0.0%	kg
	M_y	36.0	36.0	0.0%	21.9	21.9	0.0%	17.9	17.9	0.0%	kg
	M_t	14.1	14.1	0.0%	18.5	18.5	0.0%	21.8	21.8	0.0%	kg
	M_{fer}	50.1	50.1	0.0%	40.4	40.4	0.0%	39.7	39.7	0.0%	kg
	M_{stat}	71.5	71.5	0.0%	68.6	68.6	0.0%	72.8	72.8	0.0%	kg
	M_{rot}	24.1	24.1	0.0%	34.1	34.1	0.0%	42.3	42.3	0.0%	kg
	M_{total}	95.6	95.7	0.0%	102.7	102.7	0.0%	115.1	115.1	0.0%	kg
Perd.Perf.	ST	6.19	6.19	0.0%	9.28	9.28	0.0%	17.64	17.64	0.0%	N.m/kg
	SP	10455	10458	0.0%	9739,0	9739,2	0.0%	8685.3	8685.8	0.0%	W/kg
	P_{fer}	3566.3	3568.5	0.1%	4766.3	4766.8	0.0%	5170.1	5170.2	0.0%	W
Outros	P_j	4719.4	4693.9	-0.5%	5338.4	5308.3	-0.6%	9265.2	9215.0	-0.5%	W
	η	99.2%	99.2%	0.0%	99.0%	99.0%	0.0%	98.6%	98.6%	0.0%	-
	N	16128	16134	0.0%	10024	10024	0.0%	4701	4702	0.0%	rpm
	v_{tin}	122	122	0.0%	100	100	0.0%	70	70	0.0%	m/s
	k_{form}	0.7	0.7	0.0%	1.0	1.0	0.0%	1.6	1.6	0.0%	-
	τ_e	0.622	0.622	0.0%	0.622	0.622	0.0%	0.622	0.622	0.0%	-
	p	2	2	0.0%	4	4	0.0%	10	10	0.0%	-
	f_e	537.59	537.79	0.0%	668.28	668.28	0.0%	783.51	783.66	0.0%	Hz
	T	592.1	592.1	0.0%	952.6	952.6	0.0%	2031.4	2030.8	0.0%	N.m

Fonte: próprio autor.

É visível que com *Opt7* as diferenças relativas foram significativamente reduzidas, apenas restando uma pequena diferença para a potência mássica, de 0,2%, e para A_{jeq} , de 0,3%, com a maior diferença sendo relativa às perdas Joule, que chegou a -0,5%.

Embora *Opt7* tenha concordado melhor com o modelo direto, *LikeOpt7* não foi tão bem-sucedido em termos de resultados absolutos. Mesmo com mais pontos de partida do que os determinados na Seção 5.4.5, a melhor solução encontrada para o caso de baixa velocidade foi 7 kW/kg, contra 8,6 kW/kg determinado por *Opt7*. Isso se deve, provavelmente, ao aumento de complexidade do programa com as equações adicionais para considerar o entreferro, que podem tornar as linearizações mais difíceis em AMPL[©].

5.6 UM PROGRAMA BASEADO NO MODELO DIRETO

Após os resultados bem-sucedidos mencionados, o pesquisador Yvan Lefèvre, do Laplace, trabalhou em outro *software*, para resolver o problema estocasticamente: NOMAD. Nesse desenvolvimento, resultados inspiradores foram obtidos, então escreveu-se a mesma versão do programa em MATLAB[®], a qual chamou-se *Opt8*. Para essa versão, observou-se que

era possível reformular o problema de otimização com apenas 8 variáveis, não havendo dimensões entre elas: p , λ , B_m , v_{lin} , j_{rms} , A_j , B_y e B_t , onde λ é relacionado a k_{form} por (61).

$$\lambda = \frac{L}{r_2} = \frac{2}{k_{form}} \quad (61)$$

Com essa construção do problema, a partir de (34), chega-se em (62).

$$r_3 = \sqrt{\frac{P_{out}}{2\pi\lambda v_{lin} f_t}} \quad (62)$$

Nessa versão, também se adicionou uma restrição relativa ao comprimento de um polo, vide (63), devendo ser inferior a 3 cm. Entretanto, as restrições para A_j , f_t e v_{lin} deixaram de ser necessárias, então apenas 5 restrições foram utilizadas: integralidade do número de pares de polo p , produto A_{jeq} , comprimento de um polo x_{lp} e duas para a taxa de ranhuras τ_e .

$$x_{lp} = \frac{\pi r_3}{p} \quad (63)$$

Uma versão equivalente também foi escrita em AMPL[®], mas novamente os resultados não foram tão satisfatórios com esse *software*, que forneceu soluções ótimas até 20% menores, no caso de baixa velocidade, e teve diferenças relativas com o modelo direto mais elevadas no caso de alta velocidade. Dado o pior desempenho de *LikeOpt8*, apenas o programa *Opt8* é mostrado neste trabalho, no APÊNDICE D – Programa de otimização *Opt8*.

Usando os limites da Tabela 12, os parâmetros fixos do Quadro 5 e $x_g = 0,03$, as soluções ótimas foram aplicadas ao modelo direto, fornecendo os resultados da Tabela 13. Para cada caso de velocidade, apenas o limite superior da velocidade linear v_{lin} foi trocado:

- Baixa: 70 m/s;
- Média: 100 m/s;
- Alta: 150 m/s.

Tabela 12 – Limites dos parâmetros usados para comparar *Opt8* e o modelo direto.

Par.	Inf.	Sup.	Un.
j_{rms}	7e6	10e6	A/m ²
A_j	0,5e12	2,2e12	A ² /m ³
A_{jeq}	–	2,2e12	A ² /m ³
B_{rms}	0,354	0,742	T
B_y	0,6	1,5	T
B_t	0,6	1,5	T
v_{lin}	20	Varia	m/s
k_{form}	0,5	20	–
λ	0,1	4	–
x_{tp}	–	0,03	m
τ_e	0,05	0,095	–

Fonte: próprio autor.

Tabela 13 – Resultados do modelo direto a partir das soluções de *Opt8* para os três casos de velocidade.

	Par.	Alta vel.	Media vel.	Baixa vel.	Un.
Dimens.	h_y	13.0	6.4	5.8	mm
	h_s	25.9	21.7	31.5	mm
	L	278.5	358.9	360.5	mm
	r_3	71.8	95.5	95.5	mm
Carregamentos	A_{rms}	1.04e5	8.28e4	1.10e5	A/m
	j_{rms}	1.00e7	1.00e7	9.54e6	A/m ²
	f_t	5.15e4	4.51e4	6.41e4	N/m ²
	A_j	1.04e12	8.28e11	1.05e12	A ² /m ³
	$A_{j_{eq}}$	2.21e12	2.21e12	2.21e12	A ² /m ³
	B_{rms}	0.55	0.60	0.65	T
	B_m	0.78	0.85	0.92	T
	B_y	1.43	1.29	1.50	T
	B_t	1.50	1.50	1.50	T
Volumes	V_{Cu}	1.84	2.50	3.50	cm ³
	V_y	2.37	1.72	1.71	cm ³
	V_t	1.07	1.69	2.64	cm ³
	V_{fer}	3.44	3.42	4.34	cm ³
	V_{rot}	4.24	9.67	9.72	cm ³
Massas	M_{Cu}	16.4	22.3	31.2	kg
	M_y	19.2	14.0	13.9	kg
	M_t	8.7	13.7	21.4	kg
	M_{fer}	27.9	27.7	35.3	kg
	M_{stat}	44.3	50.0	66.5	kg
	M_{rot}	28.2	35.0	35.1	kg
	M_{total}	72.5	85.0	101.6	kg
Perf.	ST	6.40	10.90	13.02	N.m/kg
	SP	13796	11769	9837	W/kg
Perd.	P_{fer}	5727	11650	9795	W
	P_j	5144	6996	8922	W
Outros	η	98.9%	98.2%	98.2%	–
	N	20570	10310	7217	rpm
	v_{lin}	150	100	70	m/s
	λ	3.879	3.758	3.775	–
	k_{form}	0.516	0.532	0.530	–
	τ_e	0.671	0.637	0.613	–
	p	3	10	10	–
	f_e	1028.5	1718.3	1202.8	Hz
T	464.2	926.3	1323.1	N.m	

Fonte: próprio autor.

Pode-se ver que resultados melhores foram obtidos para a função objetivo: 13,8 kW/kg, 11,8 kW/kg e 9,8 kW/kg para máquinas de alta, média e baixa velocidade, respectivamente, fazendo dessa versão a melhor dentre as vistas. Entretanto, como o parâmetro λ não foi limitado de acordo com o esperado para diferentes velocidades, como foi feito para o parâmetro k_{form} na Seção 5.5, os valores de k_{form} determinados pelo programa não estiveram nas faixas esperadas na prática. Na Seção 2.3.3, menciona-se que k_{form} teria a tendência de ser determinado em seu limite superior para os programas de otimização, mas nessa nova versão o contrário ocorre. De qualquer forma, a relação entre diâmetro e comprimento do rotor ser

inferior a 1 para máquinas de baixa velocidade não é um problema, ao contrário de relações maiores do que 1 para as de alta velocidade.

Como mencionado na Seção 2.3.4, a adequação do entreferro às limitações industriais e teóricas não foi considerada diretamente no programa de otimização como restrições adicionais. Entretanto, a Tabela 14 compara o entreferro obtido com o mínimo esperado, calculados com (53) e (8), respectivamente, onde se observa que o entreferro foi inadequado apenas para o caso de alta velocidade, havendo ainda uma boa margem para redução nos outros dois casos.

Tabela 14 – Entreferros mínimos esperados comparados com os resultantes das otimizações.

Caso de velocidade	Entreferro mínimo	Entreferro obtido	Unidade
Alta	3,04	2,15	mm
Média	0,87	2,86	mm
Baixa	1,09	2,86	mm

Fonte: próprio autor.

5.7 DESENHO 2D DAS MÁQUINAS OTIMIZADAS

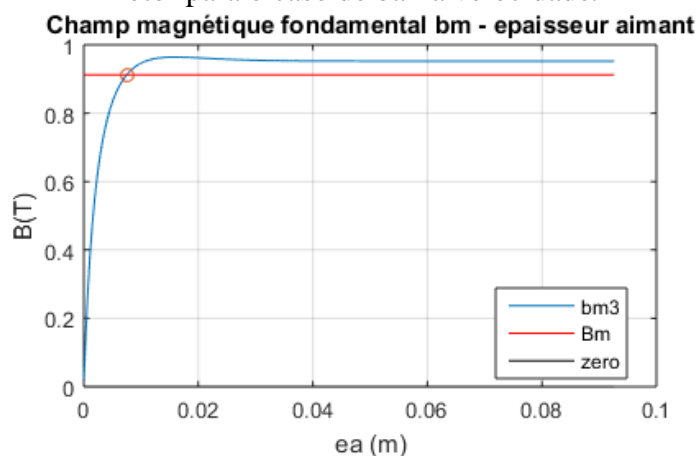
Um programa adicional foi feito em MATLAB[®] para desenhar em 2D, no *software* FEMM, as máquinas otimizadas, o que poderia ser usado posteriormente para realizar uma análise por elementos finitos. O programa desenvolvido pode ser visto no APÊNDICE E – Programa para desenho 2D em FEMM, mas aqui são feitos alguns comentários:

- As entradas do programa dadas pelas otimizações são: R (raio interno do estator), h_y , h_s , p , B_{rms} , B_t e x_g ;
- As entradas que não dependem da otimização são: q (número de ranhuras por polo por fase) e n (número de fases);
- Entradas dependentes das características do rotor: $h_{y,rot}$ (coroa do rotor) e h_{magnet} (altura dos ímãs do rotor).

É importante lembrar que o modelo da Seção 4 não considera nenhuma característica do rotor, ele apenas usa um polinômio determinado estatisticamente para estimar a densidade mássica do rotor. Então, para desenhar o rotor, considerou-se que a coroa do rotor é igual à coroa do estator, apenas para efeito visual, e usou-se outro programa disponível no Laplace, que calcula a amplitude da frequência fundamental do campo magnético na superfície interna

do estator e permite determinar a espessura necessária para os ímãs. O programa gera um gráfico como o da Figura 49 e existem 5 parâmetros a serem alterados dependendo dos resultados das otimizações: p , r_3 , x_g , B_m e τ_a (taxa de ímãs em um arco polar).

Figura 49 – Imagem gerada pelo programa usado para determinar a espessura dos ímãs do rotor para o caso de baixa velocidade.

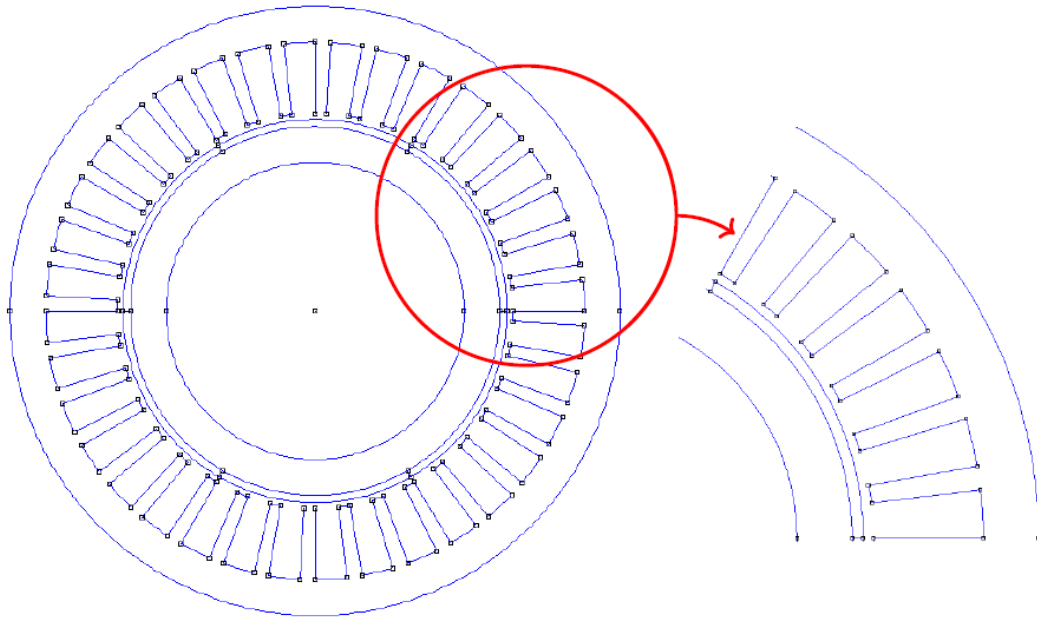


Fonte: próprio autor.

Outra observação diz respeito a uma hipótese do modelo: as ranhuras são consideradas retangulares, mas o desenho não levou isso em consideração, as linhas das ranhuras e dos dentes foram desenhadas radialmente ao centro da máquina.

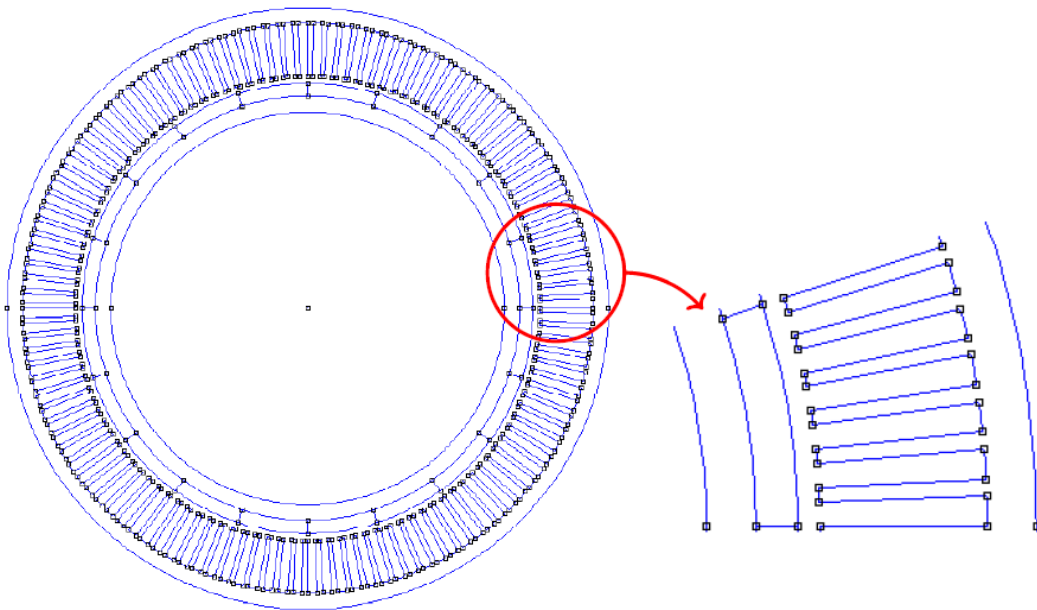
No presente trabalho, a utilidade dos desenhos se deu apenas para identificar resultados de otimização irrealizáveis fisicamente, sendo uma forma qualitativa de analisá-los que permitiu desqualificar resultados onde, por exemplo, a coroa era muito fina. Os desenhos 2D em FEMM das máquinas concebidas para os três casos de velocidade são mostrados na Figura 50 até a Figura 52.

Figura 50 – Desenho 2D em FEMM para a máquina de alta velocidade concebida.



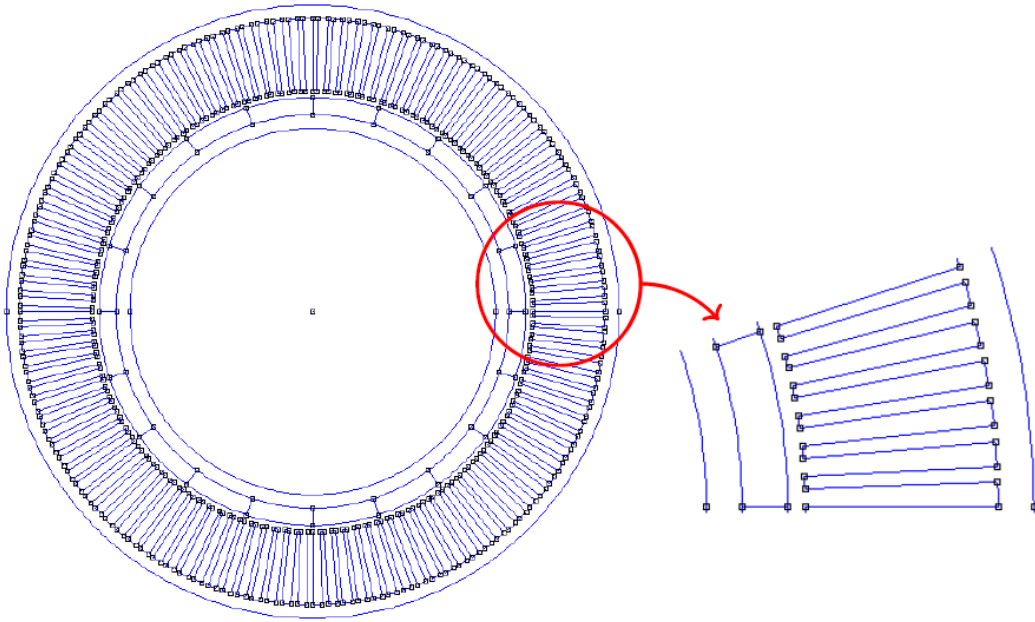
Fonte: próprio autor.

Figura 51 – Desenho 2D em FEMM para a máquina de média velocidade concebida.



Fonte: próprio autor.

Figura 52 – Desenho 2D em FEMM para a máquina de baixa velocidade concebida.



Fonte: próprio autor.

6 CONCLUSÃO

Este TCC envolveu duas linhas de pesquisa do Laplace, uma sobre novos métodos de fabricação de máquinas elétricas, onde se realizou a caracterização de materiais magnéticos moles manufaturados aditivamente, e outra sobre novas formas de concepção de máquinas elétricas, na qual se utilizou um modelo analítico simplificado para otimizar máquinas rotativas, de forma a determinar a maior potência mássica possível de ser atingida atualmente com as tecnologias de resfriamento disponíveis.

No escopo de materiais magnéticos, as amostras foram produzidas com a tecnologia SLM, comparando-se a influência dos parâmetros de impressão e o impacto do processo de recozimento das amostras. Uma planilha *Excel* automatizada foi desenvolvida para juntar e processar os dados dos ensaios realizados, dispensando a necessidade de copiar os dados de todos os arquivos gerados manualmente e refazer os processamentos cada vez. No que diz respeito aos parâmetros de impressão, os resultados obtidos indicaram a vantagem da utilização de maior potência do *laser* para melhorar a performance magnética do material, mas atenta-se que aumentar a potência em desarmonia com o ajuste da velocidade de *jog* pode causar rachaduras no material, devendo os dois parâmetros serem selecionados de maneira dependente, assim como foi apresentado para a tecnologia EBM no referencial teórico, Seção 2.1.3. Análises futuras contemplando o impacto dos parâmetros na estrutura das amostras podem ajudar a explicar em mais detalhes seus desempenhos magnéticos e contribuir para a definição de um balanço adequado entre as propriedades físicas e magnéticas. Quanto ao processo de recozimento das amostras, notou-se que as propriedades magnéticas foram melhoradas expressivamente, mais do que triplicando a permeabilidade relativa e reduzindo as perdas totais em até 40%, reafirmando a importância desse processo para materiais magnéticos, conforme já havia sido indicado por (TIISMUS, KALLASTE, *et al.*). Apesar de a amostra recozida não ter sido impressa com os melhores parâmetros de impressão, ela superou as propriedades da melhor amostra não recozida, com uma permeabilidade quase três vezes maior. Entretanto, quando comparada com um material magnético mole tradicional, ferro puro, a indução magnética máxima obtida foi em torno de 25% inferior. Trabalhos futuros podem ser feitos variando-se a temperatura de recozimento para avaliar se isso também influencia as performances.

No contexto de concepção de máquina elétricas, um modelo de MSIPs baseado em conceitos de carregamentos elétrico e magnético foi apresentado e adaptado de diferentes formas no âmbito da otimização. A principal contribuição do trabalho foi o desenvolvimento de uma abordagem de otimização em MATLAB[®] que combinou o algoritmo *GlobalSearch*

com a função de minimização *fmincon*. Durante o desenvolvimento dos programas de otimização, também se utilizou o *software* AMPL[®], que apresentou resultados positivos e, até certo ponto, superiores aos obtidos com MATLAB[®]. Diversas simulações foram realizadas para avaliar os programas e estratégias de otimização e para determinar a melhor configuração dos parâmetros de execução, onde se determinou que não é justificável, em termos de resultados e tempo de execução, aumentar os parâmetros para além de $N=50$, $N_{eval}=3000$ e $N_{points}=1000$. As simulações com AMPL[®] indicaram vantagem em se resolver o problema com múltiplos pontos de partida, sendo ele resolvido múltiplas vezes com cada ponto, aproveitando a melhor solução já obtida (abordagem *MultiSolve+MultiStart*). Após os desenvolvimentos principais, os programas de otimização foram adaptados para considerar o entreferro com ajuda de um coeficiente que o relaciona com o raio interno do estator, o que garantiu resultados mais realistas e precisos, mas restrições relativas ao entreferro não foram consideradas diretamente. Os resultados foram comparados com um modelo direto que tomava as características da máquina definidas pelo programa e, a partir disso, calculava suas performances, para três categorias de velocidade, o que confirmou a vantagem de usar um programa que considera o entreferro.

Finalmente, uma configuração diferente do programa de otimização possibilitou resolver o PO sem que houvesse dimensões da máquina entre as variáveis. Boas soluções foram encontradas com essa versão utilizando-se NOMAD e MATLAB[®]. Entretanto, AMPL[®] apresentou um desempenho inferior, o que pode ser devido ao aumento da complexidade das equações, que nesse *software* devem ser escritas apenas com as variáveis principais do problema explícitas, i.e. sem termos intermediários, de forma que pode ser mais difícil fazer as linearizações para resolver o PO. Essa versão, *Opt8*, foi considerada a melhor, pois apresentou os maiores valores de potência mássica. Os resultados foram mostrados para três classes de velocidade, assim como seus respectivos desenhos 2D realizados em FEMM através de um programa desenvolvido também em MATLAB[®], apenas para fins de visualização. Como o modelo deste trabalho não leva em conta características do rotor, algumas dimensões, como coroa do rotor e espessura dos ímãs, foram estimadas e a hipótese de ranhuras retangulares não foi seguida à risca, logo simulações em FEMM com o desenho em sua forma atual podem não ser adequadas. De qualquer maneira, o presente trabalho dá subsídios para determinar a máxima potência mássica possível atualmente como sendo 13,8 kW/kg para máquinas de alta velocidade, 11,8 kW/kg para máquinas de velocidade intermediária e 9,8 kW/kg para as consideradas de baixa velocidade.

Desenvolvimentos futuros e continuações desse trabalho podem considerar um modelo mais completo, que leve em consideração outros aspectos, como perdas mecânicas, carregamento térmico, outras massas, como a da carcaça, ou do epoxy que poderia estar presente nas ranhuras. O uso de outra função determinada estatisticamente também poderia ser uma fonte de melhoria. Com o polinômio usado atualmente, o modelo pode tender a ser otimista para o resfriamento direto com água e pessimista para as outras formas de resfriamento, pois ela considerou a média entre densidades de rotor de ambos os tipos. Enquanto mecanismos de resfriamento por água tornam o rotor mais denso, o contrário o corre para resfriamento por ar ou hidrogênio. Uma última opção aqui observada para desenvolvimentos futuros seria considerar também o tipo da estrutura do rotor, que poderia ter ímãs embutidos, tangencialmente embutidos, radialmente embutidos ou fixados superficialmente, dentre outras opções.

REFERÊNCIAS

©LAPLACE - GREM3. **ASSESSMENT OF ELECTRIC MOTOR TECHNOLOGIES FOR LONG-TERM AIRCRAFT PROPULSION**. (Confidencial) - Laplace. Toulouse.

ALL3DP. The Types of 3D Printing Technology in 2020. **ALL3DP**, 2020. Disponível em: <<https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>>. Acesso em: 23 dezembro 2020.

BERNARD, N.; OLIVIER, J.-C. Méthodologie de dimensionnement sur cycle d'une machine synchrone rapide à aimants permanents - Application au stockage inertielle longue durée. **Symposium de Génie Electrique**, Cachan, França, julho 2014. Disponível em: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01065185>>. Acesso em: 9 janeiro 2021.

BROCKHAUSS MEASUREMENTS. **Measuring Unit MPG 100 D**. [S.l.].

CHIKAZUMI, S.; GRAHAM, C. D. **Physics of Ferromagnetism**. 2^a. ed. [S.l.]: Clarendon Press, 1997.

DANIEL, L. **Modélisation multi-échelle du comportement magnéto-mécanique des matériaux ferromagnétiques texturés**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola Normal Superior de Cachan (ENS Cachan). [S.l.]. 2003.

DURAKOVIC, B. Design for Additive Manufacturing: Benefits, Trends and Challenges. **Periodicals of Engineering and Natural Sciences**, 2018. 179-191, Vol. 6, No. 2.

EL-REFAIE, A.; OSAMA, M. **High specific power electrical machines: A system perspective**. CES Transactions On Electrical Machines and Systems. [S.l.]: [s.n.]. 2019. p. Vol. 3, No. 1.

EXONE. ExOne Metal 3D Printing Process, 2014. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=L6Rd9diIkrs>>. Acesso em: 23 dez. 2020.

FRAZIER, W. E. Metal Additive Manufacturing: A Review. **ASM International, JMEPEG**, 2014. ISSN 23:1917-1928.

FRAZIER, W. E.; POLAKOVICS, D.; KOEGEL, W. Qualifying of Metallic Materials and Structures for Aerospace Applications. **JOM**, v. 53, p. 16-18, 2001.

GEBISA, A. W.; LEMU, H. G. A case study on topology optimized design for additive manufacturing. **First Conference of Computational Methods in Offshore Technology (COTech2017), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 276**, Stavanger, Noruega, 30 de novembro a 1 de dezembro 2017. Disponível em:

<<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/276/1/012026>>. Acesso em: 5 janeiro 2021.

GILL, P. E.; MURRAY, W.; SAUNDERS, M. A. Snopt: an SQP algorithm for large-scale constrained optimization. **Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM) - Journal on Optimization**, v. 12, n. 4, p. 979-1006, 2002.

GOTTLIEB, I. **Practical Transformer Handbook**: for Electronics, Radio and Communications Engineers. 1^a. ed. [S.l.]: Newnes, 1998.

GUSCHLBAUER, R. et al. Process development of 99.95% pure copper processed via selective electron beam melting and its mechanical and physical properties. **Elsevier Inc.**, 2018. ISSN 1044-5803.

IBTISSAM, B. et al. Magnetic Field Analysis of Halbach Permanent Magnetic Synchronous Machine. **International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT'14)**, Susa, Tunísia, 22 a 25 março 2014.

KALLASTE, A.; VAIMANN, T.; RASSÖLKIN, A. Additive Design Possibilities of Electrical Machines. **IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)**, 2018.

KANE, M. M. **Determination of B-H Curve of Core Material of Transformer**. Instruções para experimento - Instituto Indiano de Tecnologia de Bombay (IITB). Mumbai, Índia. 2015.

LEFÈVRE, Y. et al. Performance assessment tool based on loadability concepts. **International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics**, v. 59, p. 687-694, 2019.

LEVKIN, D. Permanent magnet synchronous motor. **Engineering Solutions: Electromechanics For Engineers**, 2019. Disponível em: <<https://en.engineering-solutions.ru/motorcontrol/pmsm/>>. Acesso em: 16 janeiro 2021.

LI, Q. et al. Correlation between particle size/domain structure and magnetic properties of highly crystalline Fe₃O₄ nanoparticles. **Scientific Reports**, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-017-09897-5>>. Acesso em: 13 janeiro 2021.

LIU, L. et al. Design and Additive Manufacturing of Multi-Permeability Magnetic Cores. **IEEE**, 2017. ISSN 978-1-5090-2998-3.

LORENZ, F.; RUDOLPH, J.; WERNER, R. High Temperature Operation and Increased Cooling Capabilities of Switched Reluctance Machines using 3D Printed Ceramic Insulated Coils. **IEEE**, 2018. ISSN 978-1-5386-3048-8.

MAILHÉ, B. J. **Characterization and modeling of the magnetic behaviour of electrical steel under mechanical stress**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). [S.l.]. 2018.

MATHWORKS. fmincon. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html>>. Acesso em: 13 janeiro 2021.

MATHWORKS. How GlobalSearch and MultiStart Work. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/gads/how-globalsearch-and-multistart-work.html>>. Acesso em: 13 janeiro 2021.

MESSINE, F. **S8 - Physique Numérique et Systèmes Mécatroniques: Numerical Algorithms using Gradient Steps to Solve Optimization Problems with Constraints**. Aula ministrada - Instituto Nacional Politécnico de Toulouse - Escola Nacional de Ensino Superior de Eletrotécnica, Eletrônica, Informática, Hidráulica e de Telecomunicações (INPT-ENSEEIH). Toulouse. 2020.

METAL AM MAGAZINE. Background to Additive Manufacturing. Disponível em: <<https://www.metal-am.com/introduction-to-metal-additive-manufacturing-and-3d-printing/background-to-additive-manufacturing/>>. Acesso em: 18 dezembro 2020.

MILLER, T. J. E. **SPEED's Electric Motors: An Outline of Some of the Theory in the SPEED Software for Electric Machine Design (With Problems and Solutions)**. [S.l.]: SPEED Consortium University of Glasgow, 2002.

MRAD, A. **Consolidation of the design of a surface mounted permanent magnet synchronous motor with high specific power**. Relatório interno - Laplace. Toulouse. 2018.

MULTON, B.; BONAL, J. Les entraînements électromécaniques directs : diversité, contraintes et solutions. **Colloque Conversion Electromécanique Directe (CEMD)**, Cachan, França, fevereiro 1999. 95-100. Disponível em: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00674081>>. Acesso em: 9 janeiro 2021.

NOURDINE, A. **Modélisation de l'hystérésis dans les matériaux magnétiques et Introduction de modèles dans le logiciel de simulation aux éléments finis Flux3D**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Instituto Nacional Politécnico de Grenoble (INPG). Grenoble, França. 2002.

NUMERICAL ALGORITHMS GROUP (NAG). Interior Point Method for Nonlinear Optimization. Disponível em: <https://www.nag.com/industryarticles/nlp_ipm_mk26_v1.1.2.pdf>. Acesso em: 22 janeiro 2021.

PHAM, T. Q. et al. Additive Manufacturing of High Performance Ferromagnetic Materials. **IEEE**, 2018. ISSN 978-1-4799-7312-5/18.

PYRHONEN, J.; JOKINEN, T.; HRABOVCOVA, V. **Design of rotating electrical machines**. 2ª. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008. ISBN ISBN 978-1-118-58157-5.

ROLLS-ROYCE. Rolls-Royce Trent XWB-97 completes first test flight, 2015. Disponível em: <<https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2015/pr-06-11-2015-rolls-royce-trent-xwb-97-completes-first-test-flight.aspx>>. Acesso em: 18 dezembro 2020.

SILVA, J. M. H. **Impressora 3D para fabrico de peças de grandes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa. Lisboa, Portugal. 2017.

STRATASYS DIRECT MANUFACTURING. How it Works: Direct Metal Laser Sintering (DMLS), 2017. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=yiUUZxp7bLQ&feature=emb_logo>. Acesso em: 23 dezembro 2020.

TIISMUS, H. et al. Challenges of Additive Manufacturing of Electrical Machines. **IEEE**.

TIISMUS, H. et al. Preliminary Analysis of Soft Magnetic Material Properties for Additive Manufacturing of Electrical Machines.

VAC© VACUUMSCHMELZE. Soft magnetic Cobalt-iron Alloys Vacoflux. Disponível em: <<https://vacuumschmelze.com/Assets/Cobalt-Iron%20Alloys.pdf>>. Acesso em: 19 janeiro 2021.

VINAGRE, M. D. P. **Otimização de projetos de motores síncronos a ímãs permanentes**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 1991.

WOHLERS ASSOCIATES, INC. Wohlers Report 2018 Shows Dramatic Rise in Metal Additive Manufacturing and Overall Industry Growth of 21%. **Wohlers Associates**, 2018. Disponível em: <<https://wohlersassociates.com/press74.html>>. Acesso em: 17 dezembro 2020.

WOHLERS, T. **Wohlers Report 2005**. Wohlers Associates, Inc. [S.l.]. 2005.

APÊNDICE A – Programa de otimização *Opt6*

Este Apêndice apresenta *Opt6*, a última versão do programa de otimização que utilizou o modelo da Seção 4, que não leva em consideração o entreferro . O programa segue os seguintes passos sequencialmente em Código 1, com todos os *scripts* referenciados mostrados em Código 2 até Código 10:

- Declara variáveis globais;
- Chama *Param*, onde os coeficientes, limites e parâmetros de execução são definidos;
- Cria vetores com os limites superiores e inferiores para as variáveis;
- Computa um valor inicial para a função objetivo;
- Define vetores que permitem a verificar a adequação às restrições;
- Define as opções para *GlobalSearch* e *fmincon*;
- Inicia um *loop for*, onde novos pontos de partida são definidos a cada iteração, recriando-se o problema de otimização a ser resolvido com *fmincon*, com as soluções sendo registradas conforme alguns critérios para atualizar a solução determinada até o momento: PM da iteração atual maior do que a PM atualmente registrada como superior, *flag* de saída positivo e restrições respeitadas;
- Chama *Fobj* em *fmincon*, um *script* que facilita trocas entre funções objetivo, caso desejado;
 - Neste trabalho ateu-se principalmente à PM como função objetivo, logo *Fobj* chama *Pm* nesse caso, que corresponde ao cálculo da PM;
 - No cálculo da PM, é chamado o *script Rho_m_rot*, a função para densidade mássica do rotor;
- Chama *Contraintes* em *fmincon*, que calcula as restrições do problema de otimização;
 - Chama *Pj*, que computa as perdas Joule;
 - Chama *Pfer*, que computa as perdas no ferro;
 - Chama *ps*, a equação de Bertotti;
- Chama *Affichage*, que imprime os resultados.

Código 1 – Script principal, Main, da versão Opt6.

```

%% Maximisation puissance massique
% MATLAB script pour maximiser puissance massique de machine synchrone a
% aimants permanents.

%% Fermeture des onglets et nettoyage de la memoire
close all
clear all
clc

%% Declaration des variables globales
global A_rms_min j_rms_min B_rms_min R_min Bt_min By_min kform_min
p_min A_rms_max j_rms_max B_rms_max R_max Bt_max By_max kform_max
p_max;
global N Npoints Neval;
global Tol;

%% Initialisation parametres fixes :
Param

%% Bornes pour les variables :
a = [A_rms_min j_rms_min B_rms_min R_min Bt_min By_min kform_min
p_min]; %valeurs minimales
b = [A_rms_max j_rms_max B_rms_max R_max Bt_max By_max kform_max
p_max]; %valeurs maximales

X0 = a + (b-a).*rand(1,length(a));

%% Initialisations des variables utilisees pour la mise en memoire du
minimum
% Valeur min de la fonction : variable Fmin
% Vecteur parametres permettant cette valeur minimale : VectMin
Fmin = Pm(X0);
VectMin = X0;
[Verif_ineg,Verif_eg] = Contraintes(VectMin);

%% Vecteur permettant de verifier les conditions d'egalite
% Precision souhaitee
N_eg = length(Verif_eg); %Nombre d'egalites
N_ineg = length(Verif_ineg); %Nombre d'inegalites
V_eg = [1e-4]; %*Tol %Vecteur tolerance egalites
V_ineg = zeros(1,N_ineg); %Vecteur tolerance inegalites

%% Maximisation
% Ici on maximise la puissance massique.

gs = GlobalSearch('NumTrialPoints',Npoints,'Display','off'); %
Algorithme du solver run
options = optimset('Algorithm','sqp','MaxFunEvals',Neval); % Options
optimisation Fmincon

Compteur = 0; % Compteur de nombre de remplacements de la
solution optimale
CompteurMinimales = 0; % Compteur de points minimales trouves
tic; % Commence a compter le temps d'execution
for k=1:N

```

```

    %Generation d'un X aleatoire respectant les bornes min et max
    imposees
    X1 = a + (b-a).*rand(1,length(X0));

    %Creation du probleme d'optimisation
    problem = createOptimProblem('fmincon','objective',@FObj,'x0', X1,
    'lb', a, 'ub',b,'nonlcon',@Contraintes,'options',options);

    %Minimisation de -Pm
    try
        [ms, Fs, Flag, Outf, allmins] = run(gs,problem);
        [Ineg,Eg] = Contraintes(ms);
        if (Flag >= 1) && all(abs(Eg)<=V_eg) && all(Ineg<=V_ineg) %
Si les contraintes sont respectees et le flag de sortie de fmincon est
bon, un point minimal a ete trouve
            CompteurMinimales = CompteurMinimales + length(allmins);
            if (Fs < Fmin) %
Si la solution trouve est meilleur que celle qu'on avait deja, un
nouveau vecteur solution est sauvegarde
                Fmin = Fs;
                VectMin = ms;
                Verif_eg = Eg;
                Verif_ineg = Ineg;
                OutfMin=Outf;
                Compteur = Compteur + 1;
            end
        end
    end
end
end
end
end
end
end
end
end
end

temps = toc;

%% Affichage resultats
disp(['Nombre points minimales : ' num2str(CompteurMinimales)]);
disp(['Nombre entrees boucle memoire : ' num2str(Compteur)]);
disp(['Temps execution : ' num2str(temps)]);

disp(['Egalites respectees pour ce vecteur : '
num2str((all(abs(Verif_eg)<=V_eg)))]);
disp(['Inegalites respectees pour ce vecteur : '
num2str((all(Verif_ineg<=V_ineg)))]);
fprintf('\n')

Affichage(VectMin);

```

Fonte: próprio autor.

Código 2 – Script Param, da versão Opt6.

```

%% Variables globales
% Ici on definit les variables globales du probleme

%% Divers coefficients
global kw khw kfill kh kc ke;
kw = 0.9; %Coefficient de bobinage
khw = 1.4; %Coefficient de tete de bobine
kfill = 0.6; %Facteur de remplissage (on pourra monter a 0.7)
kh = 4.905e-2; %Coefficient de perte d'hysteresis

```

```

kc = 4.449e-5;           %Coefficient de perte par courants de Foucault
ke = 0;                 %Coefficient de perte excedentaire

%% Proprietes des materiaux
global Rho_cu_20 alpha_cu Bsat Rho_m_vac Rho_m_cu;
Rho_cu_20 = 1.75e-8;    %Resistivite du cuivre a 20 oC (Ohm.m)
alpha_cu = 0.00381;    %Coefficient de resistivite du cuivre a la
temperature (K^-1)
Bsat = 2;              %Densite de flux de saturation (T) %Champ mag
de saturation dans le fer
Rho_m_vac = 8120;      %Densite massique du stator (Kg.m^-3)
Rho_m_cu = 8920;      %Densite massique du cuivre (Kg.m^-3)

global Twin Rho_cu;
Twin = 180;            %Temperature de bobinage
definissant la classe de bobinage(oC)
Rho_cu = Rho_cu_20*(1+alpha_cu*(Twin-20)); %Resistivite du cuivre a la
temperature de bobinage

%% Puissance de la machine
global Pmeca;
Pmeca = 1e6; %en W

%% Bornes
global A_rms_min j_rms_min B_rms_min R_min Bt_min By_min kform_min p_min
A_rms_max j_rms_max B_rms_max R_max Bt_max By_max kform_max p_max;

A_rms_min = 150e3;
j_rms_min = 7e6;
B_rms_min = 0.5/sqrt(2);
% Torque_min = 1;
R_min = 40e-3;
Bt_min = 0.6;
By_min = 0.6;
kform_min = 1;
p_min = 8;

A_rms_max = 200e3;
j_rms_max = 10e6;
B_rms_max = 1.05/sqrt(2);
% Torque_max = 1e5;
R_max = 200e-3;
Bt_max = 1.5;
By_max = 1.5;
kform_max = 4;
p_max = 30;

%% Contraintes
global Aj_max Aj_eq_max ft_min ft_max v_max pourcentageDents_min
pourcentageDents_max;

Aj_max = 1.5e12;
Aj_eq_max = 2.2e12;
ft_min = 8.5e4;
ft_max = 148.5e3;
v_max = 70;

```

```

pourcentageDents_min = 0.2;
pourcentageDents_max = 0.8;

%% Parametres d'optimisation
global N Npoints Neval;

N = 2; % Numero executions GlobalSearch
Npoints = 1000; % Numero points de depart GlobalSearch
Neval = 3000; % Numero evaluations fmincon

%% Tolerance
global Tol;
Tol = 0.01;

```

Fonte: próprio autor.

Código 3 – Script *Fobj*, da versão *Opt6*.

```

%% Fonction pour la fonction objectif
function res = FObj(X)
    res = -Pm(X); %Negatif car on maximise
end

```

Fonte: próprio autor.

Código 4 – Script *Pm*, da versão *Opt6*.

```

%% Fonction pour la puissance massique

function [res] = Pm(X)

%% Declaration des variables globales
global kw khw kfill;
global Rho_m_vac Rho_m_cu;
global Pmeca;

%% Attribution du vecteur d'entree a chaque variable
% X = [A_rms, j_rms, B_rms, R, Bt, By, kform, p]
A_rms = X(1);
j_rms = X(2);
B_rms = X(3);
R = X(4);
Bt = X(5);
By = X(6);
kform = X(7);
p = X(8);

%% Calcul d'autres parametres
ft = kw*A_rms*B_rms; %Densite de force magnetique
tangentielle

L = 2*R/kform; %Longueur active de la
machine

Torque = 2*pi*R^2*L*ft; %Couple
Omega = Pmeca/Torque; %Vitesse angulaire

V_rot = Torque/(2*ft); %Volume du rotor

```

```

% Phi_p = 2*R*L*B_rms*sqrt(2)/p;           %Flux par pole (Wb)
% Phi_y = 0.5 * Phi_p;                     %Flux de la culasse
statorique (Wb)

Ns_wt = 4*sqrt(2)*R*B_rms/Bt;             %Longueur peripherique
totale des dents
Ns_ws = (2*pi*R - Ns_wt);                 %Longueur peripherique
totale des encoches

hy = R*sqrt(2)*B_rms / (p*By);
hs = 2*pi*R*A_rms/(Ns_ws*kfill*j_rms);

Re = (R + hs + hy);

%% Calcul de la masse du rotor
M_rot = Rho_m_rot(p)*V_rot ;

%% Calcul de la masse de la culasse
My = Rho_m_vac*pi*L*(Re^2-(R+hs)^2);

%% Calcul de la masse de cuivre
Ms = khw*kfill*L*hs*Rho_m_cu*Ns_ws;

%% Calcul de la masse des dents
Mt = Ns_wt*hs*L*Rho_m_vac;

%% Puissance massique
res = Torque*Omega/(M_rot + My + Mt + Ms);
end

```

Fonte: próprio autor.

Código 5 – Script *Rho_m_rot*, da versão *Opt6*.

```

%% Fonction statistique densite massique du rotor
function res = Rho_m_rot(p)

if (1 <= p) && (p<= 10)
    Rho = -431.67*p+7932;
elseif (10<p) && (p<=50)
    Rho = 1.09*p^2-117.45*p+4681;
elseif p > 50
    Rho = 1600;
end

res = Rho;
end

```

Fonte: próprio autor.

Código 6 – Script *Contraintes*, da versão *Opt6*.

```

%% Fonction pour les contraintes du probleme

function [Inegalite,Egalite] = Contraintes(X)

%% Declaration des variables globales
global kw khw kfill;
global Rho_cu;

```



```

global Pmeca;
global Aj_max Aj_eq_max ft_min ft_max v_max pourcentageDents_min
pourcentageDents_max;

%% Attribution du vecteur d'entree a chaque variable
% X = [A_rms, j_rms, B_rms, R, Bt, By, kform, p]
A_rms = X(1);
j_rms = X(2);
B_rms = X(3);
R = X(4);
Bt = X(5);
By = X(6);
kform = X(7);
p = X(8);

%% Calcul d'autres parametres
ft = kw*A_rms*B_rms; %Densite de force magnetique
tangentielle

L = 2*R/kform; %Longueur active de la
machine

Torque = 2*pi*R^2*L*ft; %Couple
Omega = Pmeca/Torque; %Vitesse angulaire

V_rot = Torque/(2*ft); %Volume du rotor

% Phi_p = 2*R*L*B_rms*sqrt(2)/p; %Flux par pole (Wb)
% Phi_y = 0.5 * Phi_p; %Flux de la culasse
statorique (Wb)

Ns_wt = 4*sqrt(2)*R*B_rms/Bt; %Longueur peripherique
totale des dents
Ns_ws = (2*pi*R - Ns_wt); %Longueur peripherique
totale des encoches

hy = R*sqrt(2)*B_rms / (p*By);
hs = 2*pi*R*A_rms/(Ns_ws*kfill*j_rms);

Re = (R + hs + hy);

%% Egalites
Egalite(1) = sin(p*pi);
%Egalite sur le nombre de poles

%% Inegalites
Inegalite (1) = A_rms*j_rms - Aj_max;
%Contrainte sur le produit Aj
Inegalite (2) = (Pj(X)+Pfer(X))/(2*pi*R*L*Rho_cu*khw) - Aj_eq_max;
%Contrainte sur le produit (A.j)eq
Inegalite (3) = ft_min - ft;
%Contrainte sur la densite de force magnetique tangentielle (min)
Inegalite (4) = ft - ft_max;
%Contrainte sur la densite de force magnetique tangentielle (max)

```

```

Inegalite (5) = Omega*R - v_max; %m/s
%Contrainte sur la vitesse peripherique
Inegalite (6) = pourcentageDents_min - Ns_wt/(2*pi*R);
%Contrainte sur la pourcentage des dents dans le rayon d'alesage du
stator (min)
Inegalite (7) = Ns_wt/(2*pi*R) - pourcentageDents_max;
%Contrainte sur la pourcentage des dents dans le rayon d'alesage du
stator (max)

end

```

Fonte: próprio autor.

Código 7 – Script Pj, da versão Opt6.

```

%% Fonction pour les pertes Joule

function [res] = Pj(X)

%% Declaration des variables globales
global khw;
global Rho_cu;

%% Attribution du vecteur d'entree a chaque variable
% X = [A_rms, j_rms, B_rms, R, Bt, By, kform, p]
A_rms = X(1);
j_rms = X(2);
B_rms = X(3);
R = X(4);
Bt = X(5);
By = X(6);
kform = X(7);
p = X(8);

%% Calcul d'autres parametres
L = 2*R/kform;

%% Pertes Joule
res = Rho_cu*2*pi*R*khw*L*j_rms*A_rms;
end

```

Fonte: próprio autor.

Código 8 – Script Pfer, da versão Opt6.

```

%% Fonction pour les pertes fer

function [res] = Pfer(X)

%% Declaration des variables globales
global kw kfill;
global Rho_m_vac;
global Pmeca;

%% Attribution du vecteur d'entree a chaque variable
% X = [A_rms, j_rms, B_rms, R, Bt, By, kform, p]
A_rms = X(1);
j_rms = X(2);

```

```

B_rms = X(3);
R = X(4);
Bt = X(5);
By = X(6);
kform = X(7);
p = X(8);

%% Calcul d'autres parametres
ft = kw*A_rms*B_rms; %Densite de force magnetique
tangentielle

L = 2*R/kform; %Longueur active de la
machine

Torque = 2*pi*R^2*L*ft; %Couple
Omega = Pmeca/Torque; %Vitesse angulaire

V_rot = Torque/(2*ft); %Volume du rotor

% Phi_p = 2*R*L*B_rms*sqrt(2)/p; %Flux par pole (Wb)
% Phi_y = 0.5 * Phi_p; %Flux de la culasse
statorique (Wb)

Ns_wt = 4*sqrt(2)*R*B_rms/Bt; %Longueur peripherique
totale des dents
Ns_ws = (2*pi*R - Ns_wt); %Longueur peripherique
totale des encoches

hy = R*sqrt(2)*B_rms / (p*By);
hs = 2*pi*R*A_rms/(Ns_ws*kfill*j_rms);

Re = (R + hs + hy);

%% Calcul de la masse de la culasse
My = Rho_m_vac*pi*L*(Re^2 - (R+hs)^2);

%% Calcul de la masse des dents
Mt = Ns_wt*hs*L*Rho_m_vac;

%% Calcul de la frequence electrique
f = p*Omega/(2*pi);

%% Pertes fer
res = My*ps(By, f) + Mt*ps(Bt, f);

end

```

Fonte: próprio autor.

Código 9 – Script ps, da versão Opt6.

```

%% Fonction de Bertotti pour calculer les pertes fer
function res = ps(B, f) %Puissance specifique
global kh kc ke;

res = kh*B^2*f+kc*(B*f)^2+ke*(B*f)^1.5;
end

```

Fonte: próprio autor.

Código 10 – Script *Affichage*, da versão *Opt6*.

```

%% Fonction pour afficher les resultats
function [] = Affichage(X)

global kw khw kfill;
global Rho_m_vac Rho_m_cu;
global Rho_cu;
global Pmeca;

%% Attribution du vecteur d'entree a chaque variable
% X = [A_rms, j_rms, B_rms, R, Bt, By, kform, p]
A_rms = X(1);
j_rms = X(2);
B_rms = X(3);
R = X(4);
Bt = X(5);
By = X(6);
kform = X(7);
p = X(8);

%% Calcul d'autres parametres
ft = kw*A_rms*B_rms; %Densite de force magnetique
tangentielle

L = 2*R/kform;

Torque = 2*pi*R^2*L*ft;
Omega = Pmeca/Torque;

V_rot = Torque/(2*ft); %Volume du rotor

Phi_p = 2*R*L*B_rms*sqrt(2)/p; %Flux par pole (Wb)
Phi_y = 0.5 * Phi_p; %Flux de la culasse
statorique (Wb)

Ns_wt = 4*sqrt(2)*R*B_rms/Bt; %Longueur peripherique
totale des dents
Ns_ws = (2*pi*R - Ns_wt);

hy = R*sqrt(2)*B_rms / (p*By);
hs = 2*pi*R*A_rms/(Ns_ws*kfill*j_rms);

Re = (R + hs + hy);

M_rot = Rho_m_rot(p)*V_rot ;
My = Rho_m_vac*pi*L*(Re^2 - (R+hs)^2);
Mt = Ns_wt*hs*L*Rho_m_vac;
Ms = kfill*L*hs*Rho_m_cu*Ns_ws*khw;
Mtot = M_rot + My + Mt + Ms;

% Affichage resultats
fprintf(' ----- Results ----- \n')
%disp(['Vecteur : ' num2str(X)]);
disp(['Vitesse (en tour/minute) : ' num2str(Omega*60/(2*pi))]);
fprintf('\n')

```

```

fprintf(' ----- Loads ----- \n')
fprintf('Arms = %.4e\n', A_rms)
fprintf('jrms = %.4e\n', j_rms)
fprintf('ft = %.4e\n', ft)
fprintf('Aj = %.4e\n', A_rms*j_rms)
fprintf('Aj_eq = %.4e\n', (Pj(X)+Pfer(X))/(2*pi*R*L*Rho_cu*khw))
fprintf('Brms = %.4e\n', B_rms)
fprintf('By = %.4e\n', By)
fprintf('Bt = %.4e\n', Bt)
fprintf('\n')

fprintf(' ----- Dimensions ----- \n')
fprintf('hy = %.4e\n', hy)
fprintf('hs = %.4e\n', hs)
fprintf('L = %.4e\n', L)
fprintf('R = %.4e\n', R)
fprintf('\n')

fprintf(' ----- Masses ----- \n')
fprintf('Mcu = %.4e\n', Ms)
fprintf('Mfer = %.4e\n', My+Mt)
fprintf('Mrotor = %.4e\n', M_rot)
fprintf('\n')

fprintf(' ----- Performances ----- \n')
fprintf('Couple specifique = %.4e\n', Torque/Mtot)
fprintf('Pm = %.4e\n', Pm(X))
fprintf('Vitesse lineaire peripherique = %.4e\n', R*Omega)
fprintf('Pertes Joules = %.4e\n', Pj(X))
fprintf('Pertes fer = %.4e\n', Pfer(X))
fprintf('Rendement = %.2e\n', Pmeca/(Pmeca+Pj(X)+Pfer(X)))
fprintf('\n')

fprintf(' ----- Parametres ----- \n')
fprintf('Facteur de forme = %.4e\n', kform)
printf('Tau = %.4e\n', Ns_ws/(Ns_ws+Ns_wt))
printf('nombre paire de poles = %.4e\n', p)
printf('frequence electrique fe = %.4e\n', p*Omega/(2*pi))
printf('\n')

```

Fonte: próprio autor.

APÊNDICE B – Programa de otimização *LikeOpt6*

Este Apêndice apresenta *LikeOpt6*, o equivalente de *Opt6*, então o entreferro também não foi considerado. Uma particularidade deste *software*, como já mencionado brevemente no durante o texto do TCC, é que ele não funciona com variáveis intermediárias, chamadas ao longo do texto de parâmetros calculados, então pode ser oneroso de avaliar o código, já que todas as expressões são escritas a partir das variáveis principais do problema, apenas. Os *scripts* seguem a mesma estrutura descrita na Seção 2.4.5, aqui nomeadas como: *LikeOpt6.run*, *machine_design6.mod* e *machine_design6.dat*, mostrados abaixo em Código 11 a Código 13.

Código 11 – Script *LikeOpt6.run*, da versão *LikeOpt6*.

```
# Executable utilisant Multistart avec ipopt

reset;

### Charger le modele de la machine ###

model machine_design6.mod;

### Charger les parametres du modele de la machine ###

data machine_design6.dat

### Resolution du probleme ###

#option solver couenne;
#option solver snopt;
option solver ipopt;

# definitions de variables supplementaires que
#pour le multistart et pas pour couenne
var fmax := -1e100; # - infini
var sArms:=0;
var sjrms:=0;
var sBrms:=0;
var sR:=0;
var sBt:=0;
var sBy:=0;
var skform:=0;
var sp:=0;

# Multistart
for {1..10} {
  let Arms := Uniform(150e3,200e3);
  let jrms := Uniform(7e6,10e6);
  let Brms := Uniform (0.5/sqrt(2) ,1.05/sqrt(2));
  let R := Uniform(0.040,0.200);
  let Bt := Uniform (0.6,1.5);
  let By := Uniform (0.6,1.5);
  let kform:= Uniform (kform_min,kform_max);
  let p := Uniform (p_min,p_max);
```

```

# resolution
for {1..10}
{
  solve;
  if (fmax<Pm) then
  {
    let fmax := Pm;
    let sArms := Arms;
    let sjrms := jrms;
    let sBrms := Brms;
    let sR := R;
    let sBt := Bt;
    let sBy := By;
    let skform:=kform;
    let sp := p;
  }
}
}

```

Fonte: próprio autor.

Código 12 – Script *machine_design6.mod*, da versão *LikeOpt6*.

```

param kw;
param kwh;
param kfill;
param kh;
param kc;
param ke;
param rhom_vac;
param rhom_cu;
param Twin;
param rho_cu20;
param alpha_cu;
param pi;

param Aj_max;
param Aj_eq_max;
param ft_min;
param ft_max;
param v_max;
param pourcentageDents_min;
param pourcentageDents_max;

param kform_min;
param kform_max;
param p_min;
param p_max;

param Pmec;

# Definitions des variables du probleme d'optimisation
var Arms >=150e3 <=200e3 ;
var jrms >=7e6 <=10e6;
var Brms >=0.5/sqrt(2) <=1.05/sqrt(2);
var R >=0.040 <=0.200;

```

```

var Bt >=0.6 <=1.5;
var By >=0.6 <=1.5;
var kform >=kform_min <=kform_max;
var p >=p_min <=p_max integer;

maximize Pm: Pmec/(((if p<10 then -431.67*p+7932 else 1.09*p^2-
117.45*p+4681) * (2*pi*(2*R/kform) * (kw*Arms*Brms) *R^2) / (2*kw*Arms*Brms))
+ (rhom_vac*pi*(2*R/kform) * ((R+(2*pi*R*Arms/((2*pi*R -
(4*sqrt(2)*R*Brms/Bt)) *kfill*jrms)) + (R*sqrt(2)*Brms / (p*By)))^2-
(R+(2*pi*R*Arms/((2*pi*R - (4*sqrt(2)*R*Brms/Bt)) *kfill*jrms)))^2)) +
((4*sqrt(2)*R*Brms/Bt) * (2*pi*R*Arms/((2*pi*R -
(4*sqrt(2)*R*Brms/Bt)) *kfill*jrms)) * (2*R/kform) * rhom_vac) +
(kfill*(2*R/kform) * (2*pi*R*Arms/((2*pi*R -
(4*sqrt(2)*R*Brms/Bt)) *kfill*jrms)) * rhom_cu*(2*pi*R -
(4*sqrt(2)*R*Brms/Bt)) *kwh));

subject to c1 : Arms*jrms <= Aj_max;
subject to c2 : (((rho_cu20*(1+alpha_cu*(Twin-
20)) * 2*pi*kwh*(2*R/kform) *R*jrms*Arms) + ((rhom_vac*pi*(2*R/kform) * ((R+
(2*pi*R*Arms/((2*pi*R -
(4*sqrt(2)*R*Brms/Bt)) *kfill*jrms)) + (R*sqrt(2)*Brms / (p*By)))^2-
(R+(2*pi*R*Arms/((2*pi*R -
(4*sqrt(2)*R*Brms/Bt)) *kfill*jrms)))^2)) * (kh*By^2*(p*(Pmec/(2*pi*(2*R/
kform) * (kw*Arms*Brms) *R^2) / (2*pi)) + kc*(By*p*(Pmec/(2*pi*(2*R/kform) * (
kw*Arms*Brms) *R^2) / (2*pi))^2) + ((4*sqrt(2)*R*Brms/Bt) * (2*pi*R*Arms/((2
*pi*R -
(4*sqrt(2)*R*Brms/Bt)) *kfill*jrms)) * (2*R/kform) * rhom_vac) * (kh*Bt^2*(p*
(Pmec/(2*pi*(2*R/kform) * (kw*Arms*Brms) *R^2) / (2*pi)) + kc*(Bt*(p*(Pmec/(
2*pi*(2*R/kform) * (kw*Arms*Brms) *R^2) / (2*pi))^2)) / (2*pi*R*(2*R/kform
) * (rho_cu20*(1+alpha_cu*(Twin-20)) *kwh) <= Aj_eq_max;
subject to c3 : ft_min <= kw*Arms*Brms <= ft_max;
subject to c4: R*(Pmec/(2*pi*(2*R/kform) * (kw*Arms*Brms) *R^2)) <=
v_max;
subject to c5: pourcentageDents_min <= (4*sqrt(2)*R*Brms/Bt)/(2*pi*R)
<= pourcentageDents_max ;
subject to c6: (p-2)*(p-3)*(p-4) = 0;

```

Fonte: próprio autor.

Código 13 – Script *machine_design6.dat*, da versão *LikeOpt6*.

```

#param kw = 0.9;
param kwh = 1.4;
param kfill = 0.6;
param kh = 4.905e-2;
param kc = 4.449e-5;
param ke = 0;
param rhom_vac = 8120;
param rhom_cu = 8920 ;
param Twin = 180 ;
param rho_cu20 = 1.75e-8;
param alpha_cu = 0.00381 ;
param pi=3.1415;

param Aj_max = 1.5e12;
param Aj_eq_max = 2.2e12;
param ft_min = 8e4;
param ft_max = 9e4;

```



```
param v_max = 150;  
param pourcentageDents_min = 0.2;  
param pourcentageDents_max = 0.8;  
  
param kform_min = 0.5;  
param kform_max = 0.7;  
param p_min = 2;  
param p_max = 4;  
  
param Pmec = 1e6;
```

Fonte: próprio autor.

APÊNDICE C – Modelo direto

Aqui apresenta-se o *script* MATLAB® do modelo direto. Existe um *script* principal, chamado *Modele_directe*, que chama outros 8 *sub-scripts*:

- Entradas: *Moteur*, *Coefficients* e *Loads*;
- Cálculos intermediários: *Prophys*, *MoreSizes*, *Volumes* e *Masses*;
- Valores eletromagnéticos: *ChampMag*;

Os *scripts* são mostrados abaixo, em Código 14 a Código 23, observando-se que o Código 19, referente a um *script* não mencionado, o *rho*, é apenas a função usada para calcular a densidade mássica do rotor, a partir do estudo estatístico mencionado.

Código 14 – *Script Modele_directe*, do modelo direto.

```

%
=====
% Modele directe rapide de calcul des performances de moteur
% Les entrées sont:

% Parametres moteur
%   - p:   Nombre de paires de poles
%   - taue: Taux d'encoche au niveau de l'alésage stator
%   - r3:  Rayon d'alésage du stator
%   - Lm:  Longueur du paquet de toles stator
%   - hy:  Epaisseur de culasse stator
%   - hs:  Hauteur radiale d'une encoches supposée rectangulaire
% Propriétés physiques des matériaux:
%   - rhocu: Résistivité du cuivre à la température du bobinage
%   MV_cuivre: Masse volumique du cuivre
%   MV_fer:   Masse volumique du fer
%   MV_rotor: Masse volumique du rotor
% Divers coefficients:
%   - xg:  Rapport entre l'entrefer et le rayon d'alésage
%   - kw:  Coefficient de bobinage
%   - kfill: Coefficient de remplissage d'une encoche
%   - ktb: Coefficient de tete de bobine
%   - kh:  Coefficient de pertes par hysteresis
%   - kc:  Coefficient de pertes par courants de Foucault
%   - ke:  Coefficient de pertes par excès
% Loads:
%   - Bm:  Amplitude champ magnetique inducteur l'alesage stator (T)
%   - ft:  Force tangentielle (N/m2)
%   - vlin: vitesse linéaire du rotor (m/s)
%   - Tbob: Température de bobinage
%
=====

clear all
close all
clc

```

```

% Unites
mm=1.e-3;
rpm=2*pi/60.0;
mu0=4.0*pi*1.0e-7;

% -----
% Definition des entrées --
% -----
[p,taue,r3,Lm,hy,hs]=Moteur(mm);           % Parametres et dimensions du
moteur
[xg,kw,kfill,ktb,kh,kc,ke]=Coefficients; % Coefficients (bobinage,
gemotriques,..etc)
[Bm,ft,Tbob,vlin]=Loads;                 % Les chargements: Magnétique,
électrique, thermique et mécanique

% -----
% Calcul intermédiaires --
% -----
[rhocu,MV_cuivre,MV_fer,MV_rotor]=Prophys(p,Tbob);
% Proprietes physiques des materiaux
[re,g,r2,ntws,ntwt]=MoreSizes(p,r3,Lm,hs,hy,taue,kfill,xg);
% Les autres dimensions
[Vcuivre,Vcs,Vdents,Vrotor]=Volumes(ktb,kfill,Lm,r2,re,hy,hs,ntws,ntwt);
% Volumes des parties actives
[Mcuivre,Mcs,Mdents,Mrotor,Moteur]=Masses(p,MV_cuivre,MV_fer,MV_rotor,Vcu
ivre,Vcs,Vdents,Vrotor); % Masses des parties actives

% -----
% Grandeurs électromagnétiques --
% -----
Krms=sqrt(2.0)*ft/Bm;                     % Charge linéique
Km=sqrt(2.0)*Bm;
Arms=sqrt(2.0)*ft/(kw*Bm);               % Charge linéique
[By,Bt]=ChampMag(Bm,p,r3,Lm,hy,ntwt); % Champs magnétiques dans les dents
et la culasse
jrms=2.0*pi*r3*Arms/(kfill*hs*ntws); % Valeur efficace d'induit de
courant

% -----
% Calcul des performances --
% -----
C=2.0*pi*r3*r3*Lm*ft; % Couple
Omega=vlm/r2; % Vitesse de rotation
Pmec=C*Omega; % Puissance mécanique
fs=p*Omega/(2.0*pi); % fréquence électrique
N=Omega/rpm;

SP=Pmec/Moteur; % Puissance spécifique (W/kg)
ST=C/Moteur; % Couple spécifique (N.m/kg)

% -----
% Calcul des pertes --
% -----
Pfc=Mcs*(kh*By^2*fs+kc*(By*fs)^2+ke*(By*fs)^1.5); % Pertes fer dans
la culasse
Pfd=Mdents*(kh*Bt^2*fs+kc*(Bt*fs)^2+ke*(Bt*fs)^1.5); % Pertes fer dans
les dents

```

```
Pfer=Pfcs+Pfde; % Pertes fer
stator
Pj=rhocu*ktb*jrms*Arms*2.0*pi*r3*Lm; % Pertes Joule
rendement=Pmec/(Pmec+Pj+Pfer);
```

Fonte: próprio autor.

Código 15 – Script *Moteur*, do modelo direto.

```
function [p,taue,r3,Lm,hy,hs]=Moteur(mm)

% p: nombre de paires de poles
% taue: Taux d'encoche au niveau de l'alésage stator
% r3: Rayon d'alésage du stator
% Lm: Longueur du paquet de tole stator
% hy: Epaisseur de culasse stator
% hs: Hauteur radiale d'une encoches supposée rectangulaire

% Parametres moteur
p=10;
taue=0.71; % Taux d'encoches

% Dimension du moteur
r3=134.99*mm;
Lm=2.0*r3/2.34;
hy=10.098*mm;
hs=35.479*mm;
```

Fonte: próprio autor.

Código 16 – Script *Coefficients*, do modelo direto.

```
function [xg,kw,kfill,ktb,kh,kc,ke] = Coefficients
% xg: Rapport entre l'entrefer et le rayon d'alésage
% kw: Coefficient de bobinage
% kfill: Coefficient de remplissage d'une encoche
% ktb: Coefficient de tete de bobine
% kh: Coefficient de pertes par hysteresis
% kc: Coefficient de pertes par courants de Foucault
% ke: Coefficient de pertes par excès

% Coefficients
xg=0.01; % g=xg*r3;
kw=0.9; % Coefficient de bobinage
kfill=0.6; % Coefficient de remplissage
ktb=1.4; % Coefficient de tete de bobine
kh=0.049058; % coefficient des pertes par hysteresis
kc=4.44997e-5; % coefficient des pertes par courant de foucault
ke=0.0; % coefficient des pertes supplementaires
```

Fonte: próprio autor.

Código 17 – Script *Loads*, do modelo direto.

```
function [Bm,ft,Tbob,vlin]=Loads

% Les loads définissent les niveaux technologiques
% Bm: Amplitude du champ magnetique d'u à l'aimant dans l'entrefer (T)
% ft: Densité de force tangentielle (N/m2)
% vlin: Vitesse linéaire du rotor
```

```

% Tbob: Température de bobinage

Bm=0.64*sqrt(2);
ft=87119;
vlin=98.09;
Tbob=180.0;

```

Fonte: próprio autor.

Código 18 – Script *Prophys*, do modelo direto.

```

function [rhocu,MV_cuivre,MV_fer,MV_rotor]=Prophys(p,Tbob)

% rhocu: Résistivité du cuivre à la température du bobinage
% MV_cuivre: Masse volumique du cuivre
% MV_fer: Masse volumique du fer

% Parametres physiques
% Proprietes des materiaux
rhocu20=1.72e-8; % Resistivite du cuivre a 20°C (en Ohm.m)
Tamb=40;
Delta_T=140;
alpha=3.93e-3;
T=Tamb+Delta_T;
T=Tbob;
rhocu=rhocu20*(1+alpha*(T-20)); % Resistivite a la temperature de
bobinage

% Masses volumiques
MV_cuivre=8920.0; % Masse volumique du cuivre (en kg/m3)
MV_fer=8120.0; % Masse volumique du fer (en kg/m3)
MV_rotor=rho(p); % Masse volumique du rotor (en kg/m3)

```

Fonte: próprio autor.

Código 19 – Script *rho*, do modelo direto.

```

function [MV_rotor]=rho(p)
if p <= 10
    MV_rotor=-431.67*p+7932;
elseif (p >10) && p <=50
    MV_rotor=1.09*(p^2)-117.45*p+4681;
else
    MV_rotor=1600;
end

```

Fonte: próprio autor.

Código 20 – Script *MoreSizes*, do modelo direto.

```

function [re,g,r2,ntws,ntwt]=MoreSizes(p,r3,Lm,hs,hy,taue,kfill,xg)

% -----
% Calcul des autres dimensions --
% -----

re=r3+hs+hy; % Rayon externe
g=xg*r3; % Entrefer
r2=r3-g; % Rayon externe du rotor
ntws=taue*2.0*pi*r3; % Largeur totale des encoches (slot)

```

```
ntwt=(2.0*pi*r3)-ntws; % Largeur totale des dents (teeth)
```

Fonte: próprio autor.

Código 21 – Script *Volumes*, do modelo direto.

```
function [Vcuivre,Vcs,Vdents,Vrotor]=Volumes(ktb,kfill,Lm,r2,re,hy,hs,ntws,ntwt)

% Volumes des parties actives
Vcuivre=ktb*kfill*hs*Lm*ntws; % Volume cuivre (m3)
Vcs=pi*Lm*((re^2-(re-hy)^2)); % Volume de la culasse (m3)
Vdents=ntwt*hs*Lm; % Volume de l'ensemble des dents
Vfer=Vcs + Vdents; % Volume du fer statorique
Vrotor=pi*r2*r2*Lm;
```

Fonte: próprio autor.

Código 22 – Script *Masses*, do modelo direto.

```
function [Mcuivre,Mcs,Mdents,Mrotor,Moteur]=Masses(p,MV_cuivre,MV_fer,MV_rotor,Vcuivre,Vcs,Vdents,Vrotor)

% Masses actives du stator
Mcuivre=MV_cuivre*Vcuivre; % Masse du cuivre
Mcs=MV_fer*Vcs; % Masse du fer statorique
Mdents=MV_fer*Vdents; % Masse des dents
Mstat=Mcuivre+Mcs+Mdents; % Masse du stator
Mrotor=MV_rotor*Vrotor; % Masse du rotor (en kg)

% Masse totale
Moteur=Mstat+Mrotor;
```

Fonte: próprio autor.

Código 23 – Script *ChampMag*, do modelo direto.

```
function [By,Bt]=ChampMag(Bm,p,r3,Lm,hy,ntwt)

% Champ magnétique By
% fluxp=2.0*Lm*r3*Bm/p; % Flux/ pole
% fluxy=Lm*hy*Bt; % Flux dans la culasse
% fluxy=fluxp/2.0; % Loi de conservation du flux
By=r3*Bm/(p*hy); % Champ magnetique dans la culasse

% Champ magnétique Bt
% fluxp=2.0*Lm*r3*Bm/p;
% fluxt=nswt*Lm*Bt;
% fluxt=2.0*p*fluxp;
Bt=4.0*r3*Bm/ntwt; % Champ magnetique dans la dent
```

Fonte: próprio autor.

APÊNDICE D – Programa de otimização *Opt8*

Aqui é apresentada a versão definitiva do programa de otimização: *Opt8*. Ela é similar a *Opt6*, com a diferença no nome da função que calcula a densidade de massa do rotor, que passa a ser chamada *MVrot*, e na adição da função *Masse* para calcular a massa total da máquina, como opção para resolver um problema de minimização da massa em vez da maximização da potência mássica. Os *scripts* são mostrados em Código 24 a Código 31.

Código 24 – *Script Main, de Opt8.*

```

%% Maximisation puissance massique
% MATLAB script pour maximiser puissance massique de machine synchrone
a
% aimants permanents.

%% Fermeture des onglets et nettoyage de la memoire
close all
clear all
clc

global p_min lambda_min Bm_min vlin_min jrms_min Aj_min By_min Bt_min;
global p_max lambda_max Bm_max vlin_max jrms_max Aj_max By_max Bt_max;
global N Npoints Neval;
global Tol;

%% Initialisation parametres fixes :
Param

%% Bornes pour les variables :
a = [p_min lambda_min Bm_min vlin_min jrms_min Aj_min By_min Bt_min];
%valeurs minimales
b = [p_max lambda_max Bm_max vlin_max jrms_max Aj_max By_max Bt_max];
%valeurs maximales

X0 = a + (b-a).*rand(1,length(a));

%% Initialisations des variables utilisees pour la mise en memoire du
minimum
% Valeur min de la fonction : variable Fmin
% Vecteur parametres permettant cette valeur minimale : VectMin
Fmin = Pm(X0);
VectMin = X0;
[Verif_ineg,Verif_eg] = Contraintes(VectMin);

%% Vecteur permettant de verifier les conditions d'egalite
% Precision souhaitee

N_eg = length(Verif_eg); %Nombre d'egalites
N_ineg = length(Verif_ineg); %Nombre
d'inegalites
V_eg = [Tol]; %*Tol %Vecteur tolerance
egalites
V_ineg = ones(1,N_ineg)*0; %Vecteur tolerance
inegalites

```

```

%% Maximisation
% Ici on maximise la puissance massique.

gs = GlobalSearch('NumTrialPoints',Npoints,'Display','off'); %
Algorithme du solver run
options = optimset('Algorithm','sqp','MaxFunEvals',Neval); % Options
optimisation Fmincon %sqp

Compteur = 0;
CompteurMinimales = 0;
tic;
for k=1:N
    %Generation d'un X aleatoire respectant les bornes min et max
imposees
    X1 = a + (b-a).*rand(1,length(X0));

    %Creation du probleme d'optimisation
    problem = createOptimProblem('fmincon','objective',@FObj,'x0', X1,
'lb', a, 'ub',b,'nonlcon',@Contraintes,'options',options);

    %Minimisation de -Pm
    try
        [ms, Fs, Flag, Outf, allmins] = run(gs,problem);
        [Ineg,Eg] = Contraintes(ms);
        if (Flag >= 1) && all(abs(Eg)<=V_eg) && all(Ineg<=V_ineg)
            CompteurMinimales = CompteurMinimales + length(allmins);
            if (Fs < Fmin)
                Fmin = Fs;
                VectMin = ms;
                Verif_eg = Eg;
                Verif_ineg = Ineg;
                OutfMin=Outf;
                Compteur = Compteur + 1;
            end
        end
    end
end
end
end
end
temps = toc;

%% Affichage resultats
disp(['Nombre points minimales : ' num2str(CompteurMinimales)]);
disp(['Nombre entrees boucle memoire : ' num2str(Compteur)]);
disp(['Temps execution : ' num2str(temps)]);

disp(['Egalites respectees pour ce vecteur : '
num2str((all(abs(Verif_eg)<=V_eg)))]);
disp(['Inegalites respectees pour ce vecteur : '
num2str((all(Verif_ineg<=V_ineg)))]);
fprintf('\n')

Affichage(VectMin);

```

Fonte: próprio autor.

Código 25 – Script Param, de Opt8.

```
%% Variables globales
```



```

% Ici on definit les variables globales du probleme

%% Divers coefficients
global kw khw kfill kh kc ke xg;
kw = 0.9; %Coefficient de bobinage
khw = 1.4; %Coefficient de tete de bobine
kfill = 0.6; %Facteur de remplissage (on pourra monter a 0.7)
kh = 4.905e-2; %Coefficient de perte d'hysteresis
kc = 4.449e-5; %Coefficient de perte par courants de Foucault
ke = 0; %Coefficient de perte excedentaire
xg = 0.03; %g=xg*r3;

%% Proprietes des materiaux
global Rho_cu_20 alpha_cu MVfer MVcu;
Rho_cu_20 = 1.75e-8; %Resistivite du cuivre a 20 oC (Ohm.m)
alpha_cu = 0.00381; %Coefficient de resistivite du cuivre a la
temperature (K^-1)
MVfer = 8120; %Densite massique du stator (Kg.m^-3)
MVcu = 8920; %Densite massique du cuivre (Kg.m^-3)

global Twin Rho_cu;
Twin = 180; %Temperature de bobinage
definissant la classe de bobinage( oC)
Rho_cu = Rho_cu_20*(1+alpha_cu*(Twin-20)); %Resistivite du cuivre a la
temperature de bobinage

%% Puissance de la machine
global Pmeca;
Pmeca = 1e6; %en W

%% Bornes
global p_min lambda_min Bm_min vlin_min jrms_min Aj_min By_min Bt_min;
global p_max lambda_max Bm_max vlin_max jrms_max Aj_max By_max Bt_max;

p_min = 1;
lambda_min = 0.1;
Bm_min = 0.5;
vlin_min = 20;
jrms_min = 7e6;
Aj_min = 0.5e12;
By_min = 0.6;
Bt_min = 0.6;

p_max = 30;
lambda_max = 4;
Bm_max = 1.05;
vlin_max = 150;
jrms_max = 10e6;
Aj_max = 2e12;
By_max = 1.5;
Bt_max = 1.5;

%% Contraintes
global Aj_eq_max xlp_min taue_min taue_max;

```

```

Aj_eq_max = 2.2e12;
xlp_min = 3e-2;
taue_min = 0.05;
taue_max = 0.95;

%% Parametres d'optimisation
global N Npoints Neval;

N = 50; % Numero executions GlobalSearch
Npoints = 3000; % Numero points de depart GlobalSearch
Neval = 3000; % Numero evaluations fmincon

%% Tolerance
global Tol;
Tol = 1e-4;

```

Fonte: próprio autor.

Código 26 – Script *Fobj*, de *Opt8*.

```

1 %% Fonction pour la fonction objectif
2 function res = FObj(X)
3     res = Masse(X);
4 end

```

Fonte: próprio autor.

Código 27 – Script *Pm*, de *Opt8*.

```

%% Fonction pour la puissance massique

function [res] = Pm(X)
%% Declaration des variables globales
global kw khw kfill kh kc ke xg;
global MVfer MVcu;
global Rho_cu;
global Pmeca;

%% Attribution du vecteur d'entree a chaque variable
% X = [p lambda Bm vlin jrms Aj By Bt]
p = X(1);
lambda = X(2); % = Lm/r2
Bm = X(3);
vlin = X(4);
jrms = X(5);
Aj = X(6);
By = X(7);
Bt = X(8);

%% Calcul d'autres charges
Arms = Aj/jrms; % Densite lineique courant
Krms = kw*Arms; % Valeur rms d'onde progressif de
densite de courant
ft = Bm*Krms/sqrt(2); % Densite de force tangentielle

%% Calcul dimensions
r3 = sqrt(Pmeca/(2*pi*lambda*vlin*ft)); % Rayon d'alesage stator

```

```

g = xg*r3; % Entrefer
r2 = r3 - g; % Rayon externe du rotor

Lm = lambda*r2; % Longuer actif du moteur

hy = r3*Bm/(p*By); % Epaisseur culasse

ntwt = 4*r3*Bm/Bt; % Longueur peripherique totale des
dents
ntws = (2*pi*r3 - ntwt); % Longueur peripherique totale des
encoches

taue = ntws/(2*pi*r3); % Taux d'encoche

hs = 2*pi*r3*Arms/(ntws*kfill*jrms); % Hauteur encoche

re = r3 + hs + hy; % Rayon externe

xlp = pi*r3/p; % Longueur d'un pole

%% Calcul volumes des parties actives
Vcu = khw*kfill*hs*Lm*ntws; % Volume cuivre
Vcs = pi*Lm*(re^2 - (re-hy)^2); % Volume culasse
Vde = ntwt*hs*Lm; % Volume des dents
Vrot = pi*Lm*r2^2; % Volume du rotor

%% Calcul des masses des parties actives
Mcu = MVcu*Vcu; % Masse cuivre
Mcs = MVfer*Vcs; % Masse fer statorique
Mde = MVfer*Vde; % Masse des dents
Mrot = MVrot(p)*Vrot; % Masse du rotor
Mtot = Mcu + Mcs + Mde + Mrot; % Masse totale

%% Calcul des performances
Omega = vlin/r2; % Vitesse de rotation
fs = p*Omega/(2*pi); % Frequence electrique

%% Calcul des pertes
Pfcs = Mcs*(kh*(By^2)*fs+kc*(By*fs)^2+ke*(By*fs)^1.5); % Pertes fer
dans la culasse
Pfde = Mde*(kh*(Bt^2)*fs+kc*(Bt*fs)^2+ke*(Bt*fs)^1.5); % Pertes fer
dans les dents
Pfer = Pfcs + Pfde; % Pertes fer
stator
Pj = Rho_cu*khw*jrms*Arms*2*pi*r3*Lm; % Pertes Joule
rendement=Pmeca/(Pmeca+Pj+Pfer);

%% Puissance massique
res = Pmeca/Mtot;
end

```

Fonte: próprio autor.

Código 28 – Script Masse, de Opt8.

```
%% Fonction pour la puissance massique
```

```

function [res] = Pm(X)
%% Declaration des variables globales
global kw khw kfill kh kc ke xg;
global MVfer MVcu;
global Rho_cu;
global Pmeca;

%% Attribution du vecteur d'entree a chaque variable
% X = [p lambda Bm vlin jrms Aj By Bt]
p = X(1);
lambda = X(2);      % = Lm/r2
Bm = X(3);
vlin = X(4);
jrms = X(5);
Aj = X(6);
By = X(7);
Bt = X(8);

%% Calcul d'autres charges
Arms = Aj/jrms;      % Densite lineique courant
Krms = kw*Arms;     % Valeur rms d'onde progressif de
densite de courant
ft = Bm*Krms/sqrt(2); % Densite de force tangentielle

%% Calcul dimensions
r3 = sqrt(Pmeca/(2*pi*lambda*vlin*ft)); % Rayon d'alesage stator

g = xg*r3;          % Entrefer
r2 = r3 - g;        % Rayon externe du rotor

Lm = lambda*r2;     % Longuer actif du moteur

hy = r3*Bm/(p*By); % Epaisseur culasse

ntwt = 4*r3*Bm/Bt; % Longueur peripherique totale des
dents
ntws = (2*pi*r3 - ntwt); % Longueur peripherique totale des
encoches

taue = ntws/(2*pi*r3); % Taux d'encoche

hs = 2*pi*r3*Arms/(ntws*kfill*jrms); % Hauteur encoche

re = r3 + hs + hy; % Rayon externe

xlp = pi*r3/p;      % Longueur d'un pole

%% Calcul volumes des parties actives
Vcu = khw*kfill*hs*Lm*ntws; % Volume cuivre
Vcs = pi*Lm*(re^2 - (re-hy)^2); % Volume culasse
Vde = ntwt*hs*Lm; % Volume des dents
Vrot = pi*Lm*r2^2; % Volume du rotor

%% Calcul des masses des parties actives
Mcu = MVcu*Vcu; % Masse cuivre
Mcs = MVfer*Vcs; % Masse fer statorique

```

```

Mde = MVfer*Vde; % Masse des dents
Mrot = MVrot(p)*Vrot; % Masse du rotor
Mtot = Mcu + Mcs + Mde + Mrot; % Masse totale

%% Calcul des performances
Omega = vlin/r2; % Vitesse de rotation
fs = p*Omega/(2*pi); % Frequence electrique

%% Calcul des pertes
Pfcs = Mcs*(kh*(By^2)*fs+kc*(By*fs)^2+ke*(By*fs)^1.5); % Pertes fer
dans la culasse
Pfde = Mde*(kh*(Bt^2)*fs+kc*(Bt*fs)^2+ke*(Bt*fs)^1.5); % Pertes fer
dans les dents
Pfer = Pfcs + Pfde; % Pertes fer
stator
Pj = Rho_cu*khw*jrms*Arms*2*pi*r3*Lm; % Pertes Joule
rendement=Pmeca/(Pmeca+Pj+Pfer);

%% Puissance massique
res = Mtot;
end

```

Fonte: próprio autor.

Código 29 – Script *MVrot*, de *Opt8*.

```

%% Fonction densite massique du rotor
function res = MVrot(p)
if (1 <= p) && (p<= 10)
    Rho = -431.67*p+7932;
elseif (10<p) && (p<=50)
    Rho = 1.09*p^2-117.45*p+4681;
elseif p > 50
    Rho = 1600;
end

res = Rho;
end

```

Fonte: próprio autor.

Código 30 – Script *Contraintes*, de *Opt8*.

```

%% Fonction pour les contraintes du probleme
function [Inegalite,Egalite] = Contraintes(X)
%% Declaration des variables globales
global kw khw kfill kh kc ke xg;
global MVfer MVcu;
global Rho_cu;
global Pmeca;
global Aj_eq_max xlp_min taue_min taue_max;

%% Attribution du vecteur d'entree a chaque variable
% X = [p lambda Bm vlin jrms Aj By Bt]
p = X(1);
lambda = X(2); % = Lm/r2
Bm = X(3);
vlin = X(4);

```

```

jrms = X(5);
Aj = X(6);
By = X(7);
Bt = X(8);

%% Calcul d'autres charges
Arms = Aj/jrms; % Densite lineique courant
Krms = kw*Arms; % Valeur rms d'onde progressif de
densite de courant
ft = Bm*Krms/sqrt(2); % Densite de force tangentielle

%% Calcul dimensions
r3 = sqrt(Pmeca/(2*pi*lambda*vlin*ft)); % Rayon d'alesage stator

g = xg*r3; % Entrefer
r2 = r3 - g; % Rayon externe du rotor

Lm = lambda*r2; % Longueur actif du moteur

hy = r3*Bm/(p*By); % Epaisseur culasse

ntwt = 4*r3*Bm/Bt; % Longueur peripherique totale des
dents
ntws = (2*pi*r3 - ntwt); % Longueur peripherique totale des
encoches

taue = ntws/(2*pi*r3); % Taux d'encoche

hs = 2*pi*r3*Arms/(ntws*kfill*jrms); % Hauteur encoche

re = r3 + hs + hy; % Rayon externe

xlp = pi*r3/p; % Longueur d'un pole

%% Calcul volumes des parties actives
Vcu = khw*kfill*hs*Lm*ntws; % Volume cuivre
Vcs = pi*Lm*(re^2 - (re-hy)^2); % Volume culasse
Vde = ntwt*hs*Lm; % Volume des dents
Vrot = pi*Lm*r2^2; % Volume du rotor

%% Calcul des masses des parties actives
Mcu = MVcu*Vcu; % Masse cuivre
Mcs = MVfer*Vcs; % Masse fer statorique
Mde = MVfer*Vde; % Masse des dents
Mrot = MVrot(p)*Vrot; % Masse du rotor
Mtot = Mcu + Mcs + Mde + Mrot; % Masse totale

%% Calcul des performances
Omega = vlin/r2; % Vitesse de rotation
fs = p*Omega/(2*pi); % Frequence electrique

%% Calcul des pertes
Pfcs = Mcs*(kh*(By^2)*fs+kc*(By*fs)^2+ke*(By*fs)^1.5); % Pertes fer
dans la culasse
Pfde = Mde*(kh*(Bt^2)*fs+kc*(Bt*fs)^2+ke*(Bt*fs)^1.5); % Pertes fer
dans les dents

```

```

Pfer = Pfcs + Pfde; % Pertes fer
stator
Pj = Rho_cu*khw*jrms*Arms*2*pi*r3*Lm; % Pertes Joule
rendement=Pmeca/(Pmeca+Pj+Pfer);

%% Egalites
Egalite(1) = sin(p*pi);
%Egalite sur le nombre de poles

%% Inegalites
Inegalite (1) = (Pj+Pfer)/(2*pi*r3*Lm*Rho_cu*khw) - Aj_eq_max;
%Contrainte sur le produit (A.j)eq
Inegalite (2) = xlp_min - xlp;
%Contrainte sur longueur d'un pole
Inegalite (3) = taue_min - taue;
%Contrainte sur la pourcentage des encoches dans le rayon d'alesage du
stator (min)
Inegalite (4) = taue - taue_max;
%Contrainte sur la pourcentage des encoches dans le rayon d'alesage du
stator (max)

end

```

Fonte: próprio autor.

Código 31 – Script *Affichage*, de *Opt8*.

```

function [] = Affichage(X)
%% Declaration des variables globales
global kw khw kfill kh kc ke xg;
global MVfer MVcu;
global Rho_cu;
global Pmeca;

%% Attribution du vecteur d'entree a chaque variable
% X = [p lambda Bm vlin jrms Aj By Bt]
p = X(1);
lambda = X(2); % = Lm/r2
Bm = X(3);
vlin = X(4);
jrms = X(5);
Aj = X(6);
By = X(7);
Bt = X(8);

%% Calcul d'autres charges
Arms = Aj/jrms; % Densite lineique courant
Krms = kw*Arms; % Valeur rms d'onde progressif de
densite de courant
ft = Bm*Krms/sqrt(2); % Densite de force tangentielle

%% Calcul dimensions
r3 = sqrt(Pmeca/(2*pi*lambda*vlin*ft)); % Rayon d'alesage stator

g = xg*r3; % Entrefer
r2 = r3 - g; % Rayon externe du rotor

```

```

Lm = lambda*r2; % Longuer actif du moteur

hy = r3*Bm/(p*By); % Epaisseur culasse

ntwt = 4*r3*Bm/Bt; % Longueur peripherique totale des
dents
ntws = (2*pi*r3 - ntwt); % Longueur peripherique totale des
encoches

taue = ntws/(2*pi*r3); % Taux d'encoche

hs = 2*pi*r3*Arms/(ntws*kfill*jrms); % Hauteur encoche

re = r3 + hs + hy; % Rayon externe

xlp = pi*r3/p; % Longueur d'un pole

%% Calcul volumes des parties actives
Vcu = khw*kfill*hs*Lm*ntws; % Volume cuivre
Vcs = pi*Lm*(re^2 - (re-hy)^2); % Volume culasse
Vde = ntwt*hs*Lm; % Volume des dents
Vrot = pi*Lm*r2^2; % Volume du rotor

%% Calcul des masses des parties actives
Mcu = MVcu*Vcu; % Masse cuivre
Mcs = MVfer*Vcs; % Masse fer statorique
Mde = MVfer*Vde; % Masse des dents
Mrot = MVrot(p)*Vrot; % Masse du rotor
Mtot = Mcu + Mcs + Mde + Mrot; % Masse totale

%% Calcul des performances
Omega = vlin/r2; % Vitesse de rotation
fs = p*Omega/(2*pi); % Frequence electrique

%% Calcul des pertes
Pfcs = Mcs*(kh*(By^2)*fs+kc*(By*fs)^2+ke*(By*fs)^1.5); % Pertes fer
dans la culasse
Pfde = Mde*(kh*(Bt^2)*fs+kc*(Bt*fs)^2+ke*(Bt*fs)^1.5); % Pertes fer
dans les dents
Pfer = Pfcs + Pfde; % Pertes fer
stator
Pj = Rho_cu*khw*jrms*Arms*2*pi*r3*Lm; % Pertes Joule
rendement=Pmeca/(Pmeca+Pj+Pfer);

fprintf(' ----- Results ----- \n')
%disp(['Vecteur : ' num2str(X)]);
disp([num2str(Omega*60/(2*pi))]);
fprintf('\n')

fprintf(' ----- Loads ----- \n')
fprintf('%.4e\n', Arms)
fprintf('%.4e\n', jrms)
fprintf('%.4e\n', ft)
fprintf('%.4e\n', Arms*jrms)
fprintf('%.4e\n', (Pj+Pfer)/(2*pi*r3*Lm*Rho_cu*khw))
fprintf('%.4e\n', Bm/sqrt(2))

```



```

fprintf('%.4e\n', By)
fprintf('%.4e\n', Bt)
fprintf('\n')

fprintf(' ----- Dimensions ----- \n')
fprintf('%.4e\n', hy)
fprintf('%.4e\n', hs)
fprintf('%.4e\n', Lm)
fprintf('%.4e\n', r3)
fprintf('\n')

fprintf(' ----- Masses ----- \n')
fprintf('%.4e\n', Mcu)
fprintf('%.4e\n', Mcs+Mde)
fprintf('%.4e\n', Mrot)
fprintf('\n')

fprintf(' ----- Performances ----- \n')
fprintf('%.4e\n', (2*pi*Lm*(r3^2)*ft)/Mtot)
fprintf('%.4e\n', Pm(X))
fprintf('%.4e\n', vlin)
fprintf('%.4e\n', Pj)
fprintf('%.4e\n', Pfer)
fprintf('%.2e\n', rendement)
fprintf('\n')

fprintf(' ----- Parametres ----- \n')
fprintf('%.4e\n', 2/lambda)
fprintf('%.4e\n', taue)
fprintf('%.4e\n', p)
fprintf('%.4e\n', fs)
fprintf('\n')

end

```

Fonte: próprio autor.

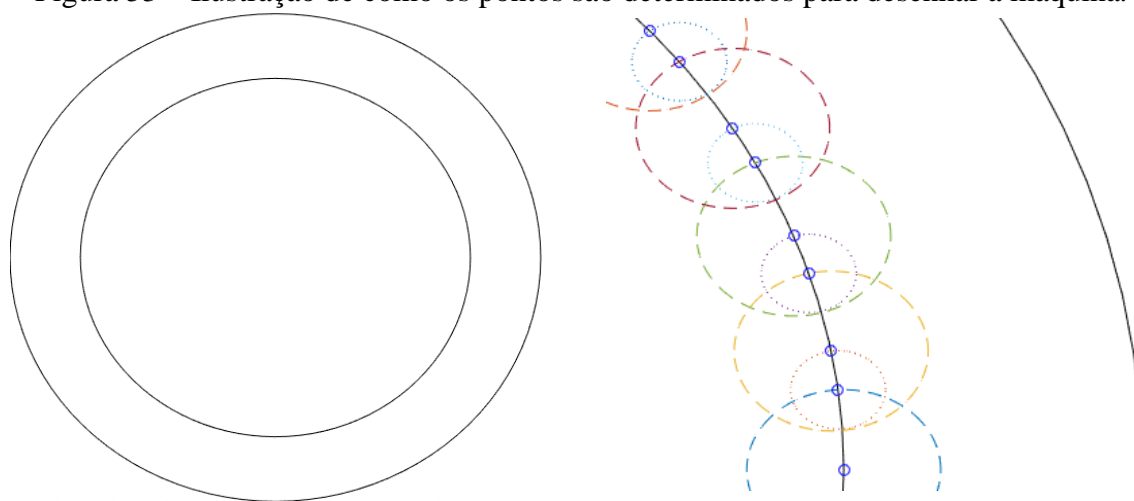
APÊNDICE E – Programa para desenho 2D em FEMM

O programa para desenhar máquinas em 2D a partir dos resultados do programa de otimização usa o *script main* para executar sequencialmente:

- *EntryData*: define os dados de entrada;
- *PointsDefinition*: determina os pontos necessários para desenhar a máquina, chamando o *sub-script*:
 - *circIntersect*: determina a intersecção entre dois círculos
- *DrawFEMM*: executa o desenho da máquina no software. Para isso, é necessário adicionar o caminho para os arquivos .m do FEMM ao MATLAB®.

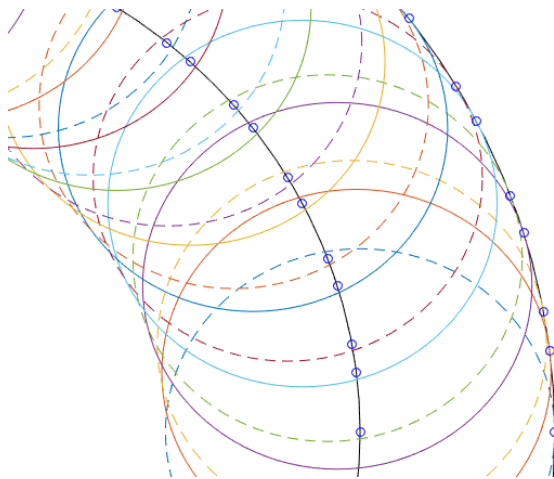
Os pontos são definidos no ambiente do FEMM baseando-se em intersecções entre pequenas circunferências de raio igual a w_s ou w_t e de raios r_3 e $R_m = r_3 + h_s$, o que explica por que o programa não considera as ranhuras como retangulares. A Figura 53 ilustra como a definição dos pontos do estator é feita.

Figura 53 – Ilustração de como os pontos são determinados para desenhar a máquina.

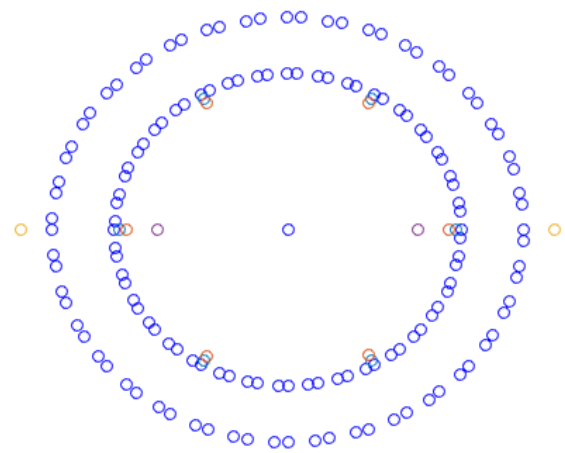


(a) Círculos de referência, de raios r_3 e R_m .

(b) Intersecção entre círculos para desenhar os pontos internos do estator. Dependendo do próximo ponto a ser definido, o círculo centrado no centro da máquina e de raio r_3 é intersectado com um círculo centrado no último ponto definido e de raio w_s ou w_t .



(c) Intersecção entre círculos para desenhar os pontos do estator no raio R_m . Um círculo de raio h_s e centrado em cada ponto do raio r_3 é intersectado com o círculo centrado no centro da máquina e de raio R_m .



(d) Todos os pontos determinados pelo programa.

Fonte: próprio autor.

Os *scripts* são mostrados em Código 32 a Código 36.

Código 32 – *Script main*, do programa que desenha a máquina no FEMM.

```
%% Main script

clear all
clc

%% Entry data
EntryData

%% Definition of points
PointsDefinition

%% Create FEMM file
DrawFEMM
```

Fonte: próprio autor.

Código 33 – *Script EntryData*, do programa que desenha a máquina no FEMM.

```
%% Entry data

%LowSpeedExample
R = 9.55e-2;
hy = 5.81e-3;
hs = 3.15e-2;
p = 10;
Brms = 0.645;
Bt = 1.5;
hMagnet = 7.49E-3; % Magnet radial length
xg=0.03; % g = xg*r3

q=2; % Slots per pole per phase
n=3; % Phases number
hyRot = hy; % Rotor yoke height
```

Fonte: próprio autor.

Código 34 – Script *PointsDefinition*, do programa que desenha a máquina no FEMM.

```

%% Define points of a PMSM

%% Number of slots
k = 2*q*p*n;

%% Calculation of slots and teeth width
Ns_wt = 4*sqrt(2)*R*Brms/Bt;
Ns_ws = 2*pi*R - Ns_wt;
wt = Ns_wt/k;
ws = Ns_ws/k;

%% Other calculations
Rout = R + hs + hy;
Rbound = 2*Rout;

%% Initial coordinates
x0 = 0;
y0 = 0;

center = [x0 y0];
start = [x0+R y0];

%% Initialization of arrays
% For inner circle
intersect1 = zeros(2,2);
point1 = zeros(1,2);
intersect2 = zeros(2,2);
point2 = zeros(1,2);

% Output vector of inner circle points
x = [center(1)];
y = [center(2)];

% For magnets positioning
airGap = xg*R; % Airgap radial length
Rrot = R - airGap;
magnetExtPoints = start - [airGap 0];
magnetIntPoints = start - [hMagnet+airGap 0];
countMagnet = 0;

% For outer circle
large_intersect_start = zeros(2,2);
large_point_start = zeros(1,2);
large_intersect1 = zeros(2,2);
large_point1 = zeros(1,2);
Rm = R + hs;

% Output vector of outer circle points
xm = [center(1)];
ym = [center(2)];

% Points for outer stator bore
xOutLeft = x0 - Rout;
xOutRight = x0 + Rout;
yOutBoth = y0;

```

```

xOut = [xOutLeft xOutRight];
yOut = [yOutBoth yOutBoth];

% Points for bound
xBoundLeft = x0 - Rbound;
xBoundRight = x0 + Rbound;
yBoundBoth = y0;

xBound = [xBoundLeft xBoundRight];
yBound = [yBoundBoth yBoundBoth];

% Points for rotor yoke
xRotYokeLeft = x0 - R + (airGap+hMagnet+hyRot);
xRotYokeRight = x0 + R - (airGap+hMagnet+hyRot);
yRotYokeBoth = y0;

xRotYoke = [xRotYokeLeft xRotYokeRight];
yRotYoke = [yRotYokeBoth yRotYokeBoth];

%% Loop to generate points
for i=1:k
    r1 = ws;
    r2 = wt;

    % Define first point of pole (start point already defined)
    % Intersection with inner circle
    intersect1 = circIntersect(x0,y0,R,start(1),start(2),r1);

    % Choose adequate intersection point
    if (start(1)>=x0) && (start(2)>=y0) % First quadrant
        point1(1) = min(intersect1(:,1));
        point1(2) = max(intersect1(:,2));
    elseif (start(1)<=x0) && (start(2)>=y0) % Second quadrant
        point1(1) = min(intersect1(:,1));
        point1(2) = min(intersect1(:,2));
    elseif (start(1)<=x0) && (start(2)<=y0) % Third quadrant
        point1(1) = max(intersect1(:,1));
        point1(2) = min(intersect1(:,2));
    elseif (start(1)>=x0) && (start(2)<=y0) % Fourth quadrant
        point1(1) = max(intersect1(:,1));
        point1(2) = max(intersect1(:,2));
    end

    % Define second point of pole
    % Intersection with inner circle
    intersect2 = circIntersect(x0,y0,R,point1(1),point1(2),r2);

    % Choose adequate intersection point
    if (point1(1)>=x0) && (point1(2)>=y0) % First quadrant
        point2(1) = min(intersect2(:,1));
        point2(2) = max(intersect2(:,2));
    elseif (point1(1)<=x0) && (point1(2)>=y0) % Second quadrant
        point2(1) = min(intersect2(:,1));
        point2(2) = min(intersect2(:,2));
    elseif (point1(1)<=x0) && (point1(2)<=y0) % Third quadrant

```

```

    point2(1) = max(intersect2(:,1));
    point2(2) = min(intersect2(:,2));
    elseif (point1(1)>=x0) && (point1(2)<=y0)    % Fourth quadrant
        point2(1) = max(intersect2(:,1));
        point2(2) = max(intersect2(:,2));
    end

    % Concatenate output vector of inner circle points
    x = [x start(1) point1(1)];
    y = [y start(2) point1(2)];

    % Define initial external point of each magnet in stator
    countMagnet = countMagnet + 1;
    if (countMagnet == k/(2*p))
        countMagnet = 0;
        angleMagnet = atan(point2(2)/point2(1));
        if (point2(1)>=x0) && (point2(2)>=y0)    % First quadrant
            magnetExtPoints = [magnetExtPoints ; point2 -
[airGap*cos(angleMagnet) , airGap*sin(angleMagnet)]];
            magnetIntPoints = [magnetIntPoints ; point2 -
[(hMagnet+airGap)*cos(angleMagnet) ,
(hMagnet+airGap)*sin(angleMagnet)]];
        elseif (point2(1)<=x0) && (point2(2)>=y0)    % Second quadrant
            magnetExtPoints = [magnetExtPoints ; point2 - [-
airGap*cos(angleMagnet) , -airGap*sin(angleMagnet)]];
            magnetIntPoints = [magnetIntPoints ; point2 - [-
(hMagnet+airGap)*cos(angleMagnet) , -
(hMagnet+airGap)*sin(angleMagnet)]];
        elseif (point2(1)<=x0) && (point2(2)<=y0)    % Third quadrant
            magnetExtPoints = [magnetExtPoints ; point2 - [-
airGap*cos(angleMagnet) , -airGap*sin(angleMagnet)]];
            magnetIntPoints = [magnetIntPoints ; point2 - [-
(hMagnet+airGap)*cos(angleMagnet) , -
(hMagnet+airGap)*sin(angleMagnet)]];
        elseif (point2(1)>=x0) && (point2(2)<=y0)    % Fourth quadrant
            magnetExtPoints = [magnetExtPoints ; point2 -
[airGap*cos(angleMagnet) , airGap*sin(angleMagnet)]];
            magnetIntPoints = [magnetIntPoints ; point2 -
[(hMagnet+airGap)*cos(angleMagnet) ,
(hMagnet+airGap)*sin(angleMagnet)]];
        end
    end

    % Print inner circles used for inner intersections
    %   circle(start(1),start(2),wt);
    %   circle(point1(1),point1(2),wt);

    % Makes radii of circles used to outer intersections slightly
    bigger,
    % to guarantee that an intersection occurs
    hsApprox = hs*1.001;

    % Define first outer point of pole (start point already defined)
    % Intersection with outer circle

```

```

    large_intersect_start =
    circIntersect(x0,y0,Rm,start(1),start(2),hsApprox);

    % Takes mean of intersection points
    large_point_start(1) = mean(large_intersect_start(:,1));
    large_point_start(2) = mean(large_intersect_start(:,2));

    % Intersection with inner circle
    large_intersect1 =
    circIntersect(x0,y0,Rm,point1(1),point1(2),hsApprox);

    % Takes mean of intersection points
    large_point1(1) = mean(large_intersect1(:,1));
    large_point1(2) = mean(large_intersect1(:,2));

    % Concatenate output vector of outer circle points
    xm = [xm large_point_start(1) large_point1(1)];
    ym = [ym large_point_start(2) large_point1(2)];

    % Print outer circles used to intersections
    %   circle(start(1),start(2),hs);
    %   circle(point1(1),point1(2),hs);

    % Defines second point found as start point for next iteration
    start = point2;
end

% Define points of inner circle
xy = [x;y];

% Define points of outer circle
xym = [xm;ym];

% Define points of external radius
xyOut = [xOut;yOut];

xyMagnetExt = [magnetExtPoints(:,1)';magnetExtPoints(:,2)'];
xyMagnetInt = [magnetIntPoints(:,1)';magnetIntPoints(:,2)'];

% Plot all points
plot(x,y,'ob');
hold on
plot(xm,ym,'ob ');
plot(magnetExtPoints(:,1),magnetExtPoints(:,2),'o');
plot(magnetIntPoints(:,1),magnetIntPoints(:,2),'o');
plot(xOut,yOut,'o');
plot(xRotYoke,yRotYoke,'o');
hold off

```

Fonte: próprio autor.

Código 35 – Script *circIntersect*, do programa que desenha a máquina no FEMM.

```

function intersect = circIntersect(Ax,Ay,b,Bx,By,a)

A = [Ax Ay];
B = [Bx By];

```

```

c = norm(A-B); %# distance between circles

cosAlpha = (b^2+c^2-a^2)/(2*b*c);

u_AB = (B - A)/c; % unit vector from first to second
center
pu_AB = [u_AB(2), -u_AB(1)]; % perpendicular vector to unit vector

% use the cosine of alpha to calculate the length of the
% vector along and perpendicular to AB that leads to the
% intersection point
intersect_1 = A + u_AB * (b*cosAlpha) + pu_AB * (b*sqrt(1-cosAlpha^2));
intersect_2 = A + u_AB * (b*cosAlpha) - pu_AB * (b*sqrt(1-cosAlpha^2));

intersect = [intersect_1;intersect_2];

end

```

Fonte: próprio autor.

Código 36 – Script DrawFEMM, do programa que desenha a máquina no FEMM.

```

%% Draw machine in FEMM

openfemm;

% 0 - Magnetic
% 1 - Electrostatics
% 2 - Heat flow
% 3 - Current flow
newdocument(0);

% Draw all points
for i=1:k*2+1
    mi_addnode(xy(:,i));
    mi_addnode(xym(:,i));
end

for i=1:2*p
    mi_addnode(xyMagnetExt(:,i));
    mi_addnode(xyMagnetInt(:,i));
end

% Draw external radius of stator bore
mi_addnode(xOut(1),yOut(1));
mi_addnode(xOut(2),yOut(2));
mi_addarc(xOut(1),yOut(1),xOut(2),yOut(2),180,0.01);
mi_addarc(xOut(2),yOut(2),xOut(1),yOut(1),180,0.01);

% Draw radial segments of slots and teeth
for i=2:2*k+1
    mi_addsegment(xy(:,i),xym(:,i));
end

% Draw arcs for slots and teeth
for i=2:k*2
    angle = atan(y(i+1)/x(i+1)) - atan(y(i)/x(i));
    if (rem(i,2)==0)

```



```

        mi_addarc(xm(i),ym(i),xm(i+1),ym(i+1),angle*180/pi,0.0005);
    else
        mi_addarc(x(i),y(i),x(i+1),y(i+1),angle*180/pi,0.0005);
    end
end

% Draw radial segments of magnets
for i=1:2*p
    mi_addsegment(xyMagnetInt(:,i),xyMagnetExt(:,i));
end

% Draw arcs for magnets
angle = atan(xyMagnetExt(2,2)/xyMagnetExt(1,2)) -
        atan(xyMagnetExt(2,1)/xyMagnetExt(1,1));
for i=1:2*p

mi_addarc(xyMagnetExt(1,i),xyMagnetExt(2,i),xyMagnetExt(1,i+1),xyMagnetExt(2,i+1),angle*180/pi,0.05);

mi_addarc(xyMagnetInt(1,i),xyMagnetInt(2,i),xyMagnetInt(1,i+1),xyMagnetInt(2,i+1),angle*180/pi,0.05);
end

angle = atan(y(2)/x(2)) - atan(y(length(y))/x(length(x)));
mi_addarc(x(length(x)),y(length(y)),x(2),y(2),angle,0.0005);

% Draw rotor yoke inner circle
mi_addnode(xRotYoke(1),yRotYoke(1));
mi_addnode(xRotYoke(2),yRotYoke(2));
mi_addarc(xRotYoke(1),yRotYoke(1),xRotYoke(2),yRotYoke(2),180,0.01);
mi_addarc(xRotYoke(2),yRotYoke(2),xRotYoke(1),yRotYoke(1),180,0.01);

% Draw problem bound
mi_addnode(xBound(1),yBound(1));
mi_addnode(xBound(2),yBound(2));
mi_addarc(xBound(1),yBound(1),xBound(2),yBound(2),180,0.01);
mi_addarc(xBound(2),yBound(2),xBound(1),yBound(1),180,0.01);

% closefemm;

```

Fonte: próprio autor.