



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE
COMPUTAÇÃO



Hugo Emerenciano Santos

Redução do *Cogging Torque* por Meio da Otimização da Segmentação dos Polos na Máquina Síncrona de Ímãs Permanentes no Rotor

Goiânia – GO

2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

☒ Dissertação ☐ Tese

2. Nome completo do autor

Hugo Emerenciano Santos

3. Título do trabalho

"Redução do Cogging Torque por Meio da Otimização da Segmentação dos Polos na Máquina Síncrona de Ímãs Permanentes no Rotor"

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento ☒ SIM ☐ NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(a) autor(a) e ao(a) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Geyverson Teixeira De Paula, Professor do Magistério Superior**, em 22/01/2021, às 16:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **HUGO EMERENCIANO SANTOS, Discente**, em 22/01/2021, às 16:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1821545** e o código CRC **9775F91C**.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE
COMPUTAÇÃO



Hugo Emerenciano Santos

Redução do *Cogging Torque* por Meio da Otimização da Segmentação dos Polos na Máquina Síncrona de Ímãs Permanentes no Rotor

Dissertação de mestrado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Federal de Goiás, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação.

Orientador: Prof. Dr. Geyverson Teixeira de Paula

Universidade Federal de Goiás – UFG

Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação

Goiânia – GO

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Santos, Hugo Emerenciano

Redução do Cogging Torque por Meio da Otimização da Segmentação
dos Polos na Máquina Síncrona de Ímãs Permanentes no Rotor
[manuscrito] / Hugo Emerenciano Santos. - 2020.

lxxxi, 81 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Geyverson Teixeira de Paula.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola
de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Goiânia,
2020.

Bibliografia.

Inclui siglas, fotografias, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas,
lista de figuras, lista de tabelas.

1. Otimização. 2. Redução do Cogging Torque. 3. Segmentos em
Bloco Retangulares. 4. Segmentação de Polos.. I. de Paula, Geyverson
Teixeira, orient. II. Título.

CDU 621.3



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº **014/2020** da sessão de Defesa de Dissertação de Hugo Emerenciano Santos, que confere o título de Mestre em **Engenharia Elétrica e de Computação**, na área de concentração em **Engenharia Elétrica**.

Aos **quatro dias do mês de dezembro de dois mil e vinte**, a partir das **14h00min.**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada “**Redução do Cogging Torque por Meio da Otimização da Segmentação dos Polos na Máquina Síncrona de Ímãs Permanentes no Rotor**”. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor **Geyverson Teixeira de Paula (EMC/UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor **Bernardo Pinheiro de Alvarenga (EMC/UFG)**, membro titular interno e Professor Doutor **Wander Gonçalves da Silva (EMC/UFG)**, membro titular externo, **cuja participação ocorreu através de video conferência**. Após a apresentação do trabalho pelo candidato foi realizada a arguição pelos membros da banca que **não fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho, no entanto, foram feitas sugestões de correções e alterações no texto. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor **Geyverson Teixeira de Paula**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos **quatro dias do mês de dezembro de dois mil e vinte**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Geyverson Teixeira De Paula, Professor do Magistério Superior**, em 04/12/2020, às 17:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wander Gonçalves Da Silva, Professor do Magistério Superior**, em 04/12/2020, às 17:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Bernardo Pinheiro De Alvarenga, Professor do Magistério Superior**, em 04/12/2020, às 17:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **HUGO EMERENCIANO SANTOS, Discente**, em 04/12/2020, às 22:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site



https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0,
informando o código verificador **1722882** e o código CRC **9F9EB570**.

Referência: Processo nº 23070.050616/2020-55

SEI nº 1722882

a Jesus Cristo, meu senhor

Agradecimentos

A Deus quem me susteve nos momentos de luta.

Aos meus pais, irmã e demais familiares pela fé e carinho.

Ao Prof. Dr. Geyverson Teixeira de Paula pela orientação, paciência e suporte.

A incentivo de meus amigos, em especial ao Khristian e Mizael pelo companheirismo

“Do or do not, there is no try.”
(Yoda, Star Wars: The Empire Strikes Back)

Resumo

O presente trabalho trata da aplicação de otimização na segmentação de polos de máquinas síncronas de ímãs permanentes no rotor com o intuito de se minimizar o *cogging torque* obtendo parâmetros construtivos ótimos da máquina. Como será apresentada ao longo desta dissertação, a segmentação tem um impacto negativo na densidade de fluxo, podendo acarretar em considerável redução da mesma, provocando redução no torque médio desenvolvido. Modelou-se, então, o comportamento da densidade de fluxo ao longo do entreferro em função da distribuição de segmentos magnéticos no rotor em função da posição angular relativa do rotor. De posse dessa distribuição, obteve-se também a expressão analítica do *cogging torque*. Observando-se uma carência de estudos sobre a segmentação de polos aplicada a ímãs em blocos retangulares, o comportamento da densidade de fluxo para formas de blocos retangulares foi investigado e os resultados também presentes neste trabalho. Uma vez obtida as expressões analíticas, foram realizadas três propostas de otimização. A primeira proposta se base na segmentação de polos sendo o tamanho de cada segmento replicado para todos os demais, assim como as distâncias entre eles. Na segunda proposta, os segmentos de cada polos podem apresentar tamanhos distintos, assim como as distâncias entre eles. E por fim, para analisar a eficácia do uso de blocos retangulares, os mesmos são submetidos a otimização e seus resultados comparados com a segmentos em arco. Os modelos matemáticos obtidos, juntamente como as propostas de otimização, foram validados por meio de simulações em elementos finitos onde os resultados obtidos foram comparados com projetos de máquinas de referência não-segmentadas. Observou-se reduções significativas no *cogging torque* em todos as propostas, obtendo reduções de até 84%. A aplicação de otimização também garantiu a preservação da densidade de fluxo em todos os casos estudados, chegando a apresentar uma preservação de 96% do fluxo. Vale ressaltar que a utilização de ímãs em formato de bloco retangulares se mostrou um opção viável na segmentação, apresentando resultados satisfatórios, tanto na redução do *cogging torque*, de até 79%, quanto na preservação do fluxo, de até 91%.

Palavras-chave: motor de ímãs permanentes no rotor, otimização, redução do *cogging torque*, segmentos em bloco retangulares, segmentação de polos.

Abstract

This work presents an application of an optimization technique in the pole segmentation of permanent magnet synchronous machines with the purpose of minimizing the cogging torque by acquiring optimal design parameters of the machine. As will be presented pole segmentation has a negative impact regarding the reduction of airgap flux density, which decreases the average value of the developed torque. The behavior of the airgap flux density is then modeled considering the distribution of magnet segments and the angular position of the rotor. After obtaining the flux distribution function model, the analytic expression of the cogging torque derived. Due to a lack of studies regarding pole segmentation applied to rectangular shaped magnets, the behavior of airgap flux density is deeply investigated and the results are presented in this work. Three different optimization scenarios are proposed. The first one considers all pole segments (arc shaped) having equal space between them as well as having same dimensions. The second one considers the possibility of different dimensions and different distances between them. Finally, to analyse the efficacy of the usage of rectangular segments, they are submitted to an optimization process and the results are compared to those with arc shaped. The proposed mathematical models, as well as the optimization proposals, are validated by means of finite elements analysis, where the results are compared to the reference (non-segmented rotor). It is observed a several reduction in the cogging torque peak values in all methods, up to 84%. The application of an optimization process has ensured the preservation of the airgap flux density in all cases, with the best case maintaining 96% of the reference flux density. It is worth mentioning that the usage of rectangular magnets achieved satisfactory results proving to be a suitable option in segmentation, with reduction of cogging torque up to 79%, and preserving 91% of the reference flux density.

Keywords: cogging torque reduction, optimization, pole segmentation, rectangular segments.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Influência da relação entre número de ranhuras e polos.	21
Figura 2 – Exemplo de distribuição assimétrica de polos.	22
Figura 3 – Exemplo de <i>skewing</i> dos polos.	23
Figura 4 – Exemplo de segmentação de polos	23
Figura 2.1 – Forma de onda ideal de B_{sl} - Polo não-segmentado	27
Figura 2.2 – Forma de onda da permeância	28
Figura 2.3 – Forma da densidade de fluxo B_g	28
Figura 2.4 – Forma de onda ideal de B_{sl} - Polo segmentado	31
Figura 2.5 – Segmentação em detalhe	31
Figura 2.6 – Densidade de fluxo no entreferro obtida analiticamente e por elementos finitos	34
Figura 2.7 – <i>Cogging torque</i> obtido analiticamente e por elementos finitos	35
Figura 3.1 – Exemplo de ímã com diferentes formatos e aplicado a raios diferentes	36
Figura 3.2 – Motor <i>brushless</i> comercial com ímãs em formato de bloco retangular.	37
Figura 3.3 – Modelo de 4-polos para segmentos de ímãs em arco	38
Figura 3.4 – Blocos retangulares em detalhe	38
Figura 3.5 – Variação do Entreferro	39
Figura 3.6 – Redução do entreferro máximo	40
Figura 3.7 – Distribuição da densidade de fluxo analítica e simulada	41
Figura 3.8 – Representação em blocos retangulares a partir de representação em arco	42
Figura 3.9 – Comparação da distribuição da densidade de fluxo para segmentos em arco e bloco retangular	43
Figura 3.10 – Modelo de máquinas em segmentos retangulares	43
Figura 3.11 – Componentes harmônicas da distribuição B^2 , para as diferentes geometrias de ímãs	44
Figura 4.1 – Exemplo de modelo com segmentos de tamanho fixo	47
Figura 4.2 – Exemplo de modelo com segmentos de tamanho desigual	50
Figura 4.3 – Exemplo de modelo com blocos retangulares	51
Figura 4.4 – Fluxograma do Algoritmo Genético	52
Figura 4.5 – Trecho do código de otimização	52
Figura 5.1 – Modelos de Referência	54
Figura 5.2 – Modelos de 4-polos para segmentos fixos	55
Figura 5.3 – Proposta I - Evolução do Processo de Otimização por Algoritmo Genético (4-Polos)	56
Figura 5.4 – Proposta I (4-Polos): Forma de onda do <i>cogging torque</i>	57
Figura 5.5 – Proposta I (4-Polos): Forma de onda do fluxo concatenado	57

Figura 5.6 – Proposta I (4-Polos): Forma de onda da força contra-eletromotriz . . .	58
Figura 5.7 – Proposta I (4-Polos): Forma de onda do torque desenvolvido	58
Figura 5.8 – Modelos de 8-polos para segmentos fixos	60
Figura 5.9 – Proposta I - Evolução do Processo de Otimização por Algoritmo Gené- tico (8-Polos)	60
Figura 5.10–Proposta I (8-Polos): Forma de onda do <i>cogging torque</i>	61
Figura 5.11–Proposta I (8-Polos): Forma de onda do fluxo concatenado	61
Figura 5.12–Proposta I (8-Polos): Forma de onda da força contra-eletromotriz . . .	62
Figura 5.13–Proposta I (8-Polos): Forma de onda do torque desenvolvido	63
Figura 5.14–Modelo de 4-Polos: Rotor do Caso IIIb	64
Figura 5.15–Proposta II - Evolução do Processo de Otimização por Algoritmo Gené- tico (4-Polos)	64
Figura 5.16–Proposta II (4-Polos): Forma de onda do <i>cogging torque</i>	65
Figura 5.17–Proposta II (4-Polos): Forma de onda do fluxo concatenado	65
Figura 5.18–Proposta II (4-Polos): Forma de onda da força contra-eletromotriz . . .	66
Figura 5.19–Proposta II (4-Polos): Forma de onda do torque desenvolvido	66
Figura 5.20–Modelo de 8-Polos: Rotor do Caso III (Segmentos Desiguais)	67
Figura 5.21–Proposta II - Evolução do Processo de Otimização por Algoritmo Gené- tico (8-Polos)	68
Figura 5.22–Proposta II (8-Polos): Forma de onda do <i>cogging torque</i>	69
Figura 5.23–Proposta II (8-Polos): Forma de onda do fluxo concatenado	69
Figura 5.24–Proposta II (8-Polos): Forma de onda da força contra-eletromotriz . . .	70
Figura 5.25–Proposta II (8-Polos): Forma de onda do torque desenvolvido	70
Figura 5.26–Modelo de 4-Polos: Rotor do Caso III (Segmentos em bloco retangular)	72
Figura 5.27–Proposta III - Evolução do Processo de Otimização por Algoritmo Genético (4-Polos)	72
Figura 5.28–Proposta III (4-Polos): Forma de onda do <i>cogging torque</i>	73
Figura 5.29–Proposta III (4-Polos): Forma de onda do fluxo concatenado	73
Figura 5.30–Proposta III (4-Polos): Forma de onda da força contra-eletromotriz . .	74
Figura 5.31–Proposta III (4-Polos): Forma de onda do torque desenvolvido	74
Figura 5.32–Modelo de 8-Polos: Rotor do Caso III (Segmentos em bloco retangular)	75
Figura 5.33–Proposta III - Evolução do Processo de Otimização por Algoritmo Genético (8-Polos)	76
Figura 5.34–Proposta III (8-Polos): Forma de onda do <i>cogging torque</i>	76
Figura 5.35–Proposta III (8-Polos): Forma de onda do fluxo concatenado	77
Figura 5.36–Proposta III (8-Polos): Forma de onda da força contraeletromotriz . . .	77
Figura 5.37–Proposta III (8-Polos): Forma de onda do torque desenvolvido	78

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Valor de γ_{min} em função do tamanho dos segmentos	45
Tabela 5.1 – Parâmetros das máquinas de referência.	54
Tabela 5.2 – Proposta I: Resultados para a maquina 4-polos.	59
Tabela 5.3 – Proposta I: Resultados para a maquina 8-polos.	63
Tabela 5.4 – Proposta II: Resultados para a maquina 4-polos.	67
Tabela 5.5 – Proposta II: Resultados para a maquina 8-polos.	71
Tabela 5.6 – Proposta III: Resultados para a maquina 4-polos.	75
Tabela 5.7 – Proposta III: Resultados para a maquina 8-polos.	78

Lista de símbolos

A_m	Área da superfície do ímã $[m]$
A_g	Área do entreferro sobre o ímã $[m]$
B	Densidade de fluxo no entreferro $[T]$
B_g	Valor máximo da densidade de fluxo no entreferro $[T]$
B'_{gr}, B'_{gt}	Componente radial e tangencial da densidade de fluxo do entreferro com ranhuras obtidas com análise em elementos finitos $[T]$
B_{gr}, B_{gt}	Componente radial e tangencial da densidade de fluxo do entreferro com ranhuras $[T]$
B_r, B_t	Componente radial e tangencial da densidade de fluxo do entreferro sem ranhuras $[T]$
B'_r, B'_t	Componente radial e tangencial da densidade de fluxo do entreferro sem ranhuras obtidas com análise em elementos finitos $[T]$
B_{res}	Densidade de fluxo residual dos ímãs $[T]$
B_{sl}	Densidade de fluxo no entreferro sem ranhuras $[T]$
B_1	Amplitude da harmônica fundamental da densidade de fluxo no entreferro $[W]$
i	Corrente fluindo pelo enrolamento $[A]$
L_{stk}	Comprimento do pacote magnético $[m]$
H_m	Espessura do ímã $[m]$
k_a	Relação entre área da superfície do ímã e área do respectivo entreferro.
M_n	Coefficiente da série de Fourier da magnetização dos ímãs
N_C	número de espiras-série de uma bobina
N_L	Mínimo múltiplo comum entre o número de polos e ranhuras
N_s	Número de ranhuras
$2p$	Número de polos

s_m	Número de segmentos por polo
g	Comprimento do entreferro [m]
R'	Raio qualquer do entreferro [m]
R_m	Raio externo dos ímãs [m]
R_s	Raio interno do estator [m]
T_C	<i>Cogging torque</i> [$N.m$]
V	Volume do entreferro [m^3]
V_M	Volume dos ímãs [m^3]
W	Energia do entreferro [J]
α	Ângulo de rotação do rotor [rad]
σ_k	Posição angular do segmento de ímã [rad]
α_m	Tamanho angular dos polos [rad]
β	Tamanho angular do segmentos em bloco retangular acrescido da distância mínima angular. [rad]
γ	Distância angular entre segmentos [rad]
γ_{min}	Distância angular mínima entre segmentos em bloco retangular [rad]
δ	Comprimento angular do segmento de ímã [rad]
θ	Posição angular do entreferro [rad]
θ_{min}	Posição angular mínima para calculo de g para segmentos em bloco retangular [rad]
θ_{max}	Posição angular máxima para calculo de g para segmentos em bloco retangular [rad]
G	Função permeância do entreferro
G_r, G_t	Componente radial e tangencial da permeância do entreferro
G'_r, G'_t	Componente radial e tangencial da permeância do entreferro obtidas com análise em elementos finitos
μ_r	Permeabilidade relativa do ímã [H/m]

μ_0	Permeabilidade do vácuo [H/m]
ω_r	Velocidade angular do rotor [rad/s]

Sumário

1	Introdução	20
	Introdução	20
2	Modelagem Matemática do <i>Cogging Torque</i> e Técnicas para Redução do seu Valor de Pico	26
2.1	Modelagem do <i>cogging torque</i> (torque de detenção	26
2.1.1	Distribuição da densidade de fluxo no entreferro	27
2.1.2	Efeitos das ranhuras e a Função Permeância de Entreferro	27
2.1.3	Modelagem Matemática do <i>Cogging Torque</i> (Torque de detenção)	29
2.2	Extrapolação da Modelagem do <i>Cogging Torque</i> para a Segmentação dos Polos	30
2.3	Modelagem Alternativa para o <i>cogging torque</i>	32
3	Segmentação em blocos retangulares	36
3.1	Variação do entreferro	38
3.1.1	Modelando o comportamento da densidade de fluxo	40
3.1.2	Harmônicas da Densidade de Fluxo para Segmentos Retangulares	41
3.1.3	Comparações da Densidade de Fluxo para Formato em Arco e Bloco Retangular	42
3.2	Restrição de Distância Mínima entre Segmentos	45
3.3	Segmentação em Bloco Retangular e a Variação de Volume dos ímãs no Rotor	46
4	Propostas de Otimização para a Segmentação dos Polos	47
4.1	Proposta I - Utilizando segmentos de arco com distâncias e comprimentos iguais	47
4.1.1	Restrições	49
4.2	Proposta II - Utilização de Segmentos de arco com comprimentos e distâncias independentes	49
4.3	Proposta III: Utilização de Blocos Retangulares	50
4.3.1	Restrições	51
4.4	Algoritmos Genéticos	51
5	Resultados em elementos finitos	54
5.1	Resultados da Proposta I	55
5.1.1	Modelo de 4-Polos	55
5.1.2	Modelo de 8-Polos	59
5.2	Resultados da Proposta II	63
5.2.1	Modelo de 4-Polos	63
5.2.2	Modelo de 8-Polos	67

5.3	Proposta III	71
5.3.1	Modelo de 4-Polos	71
5.3.2	Modelo de 8-Polos	75
Conclusão		79
Publicações		81
Referências		82

1 Introdução

As máquinas elétricas estão no coração das indústrias e são uma peça fundamental para a economia de um país. No Brasil, por exemplo, os motores são responsáveis por 60% do consumo elétrico da indústria, o que representa cerca de 26% da energia consumida [1]. Além disso, os motores estão presentes em todos os lugares, como em elevadores, eletrodomésticos e carros elétricos. Um outro ponto que renova a importância da pesquisa e desenvolvimento de motores é o processo de substituição dos combustíveis fósseis por fontes de energia renováveis.

Na Europa, países como França, Alemanha e Inglaterra se comprometeram a extinguir a produção de veículos movidos a combustíveis fósseis até 2040 [2]. Seguindo essa tendência, as montadoras de todo o mundo já estão voltando seus olhos para veículos elétricos. Como um grande exemplo desta migração a Volvo pretende trabalhar apenas com veículos elétricos ou híbridos no Brasil a partir de 2021 [3]. Devido à expectativa de uma substituição dos veículos à combustão pelos movidos a eletricidade, não é surpresa que a Tesla se tornou recentemente a montadora com o maior valor de mercado do mundo, superando a gigante Toyota [4].

Tendo em vista esse crescente interesse por motores elétricos e seu alto consumo de energia elétrica dentro das indústrias, existe uma demanda que pressiona as pesquisas por máquinas mais eficientes. Como resposta a essa necessidade, existem categorias de eficiência, como a proposta para motores CA pela *International Electrotechnical Commission (IEC)*, indo das classes IE1 (Rendimento *Standard*) até IE4 (Rendimento *Super Premium*) e será lançado o IE5 (Rendimento *Ultra Premium*) [5]. O motivo de toda a preocupação por eficiência é o enorme quantidade de energia que se perde com a ineficiência somada de todos os motores que funcionam 24 horas por dia ao redor do mundo.

Dentro desse cenário, os motores síncronos de ímãs permanentes têm alcançado cada vez mais espaço e atua em diversas aplicações como em veículos elétricos, submarinos, e turbinas eólicas [6, 7]. Dentre suas vantagens destacam-se a ausência de escovas, eficiência e alta densidade de torque que permitem que motores de ímãs permanentes possuam um tamanho compacto e, para uma mesma potência, menor volume em relação a um motor de indução [6].

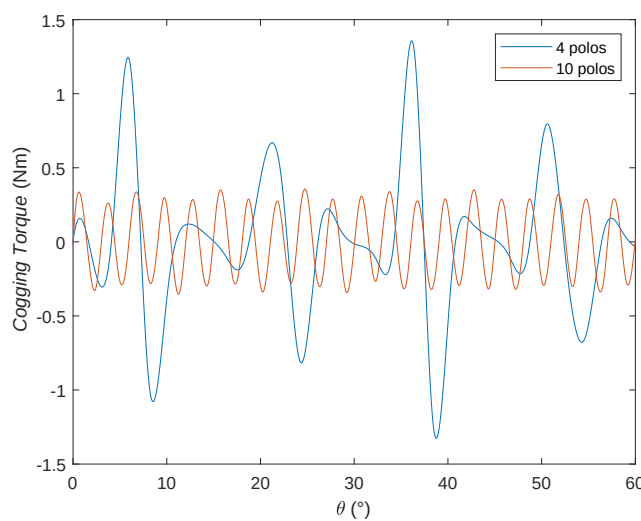
Na busca pela melhora do desempenho desse tipo de máquina, problemas como a redução das ondulações do torque ganham destaque. Essas ondulações são responsáveis por vibrações na máquina, o que provoca uma série de problemas. Entre eles estão ruídos, perdas mecânicas que contribuem para a redução da vida útil do motor [8]. Essas oscilações no torque, como mostrado em [9], têm como causas a presença de harmônicas na força

contra-eletromotriz (do inglês, *back-emf*) e na corrente, saturação magnética no material, e o *cogging torque* como sendo um dos fatores de principal relevância na oscilação do torque.

O *cogging torque*, também conhecido em português como torque de borda/detenção, é uma característica intrínseca à máquina de ímãs permanentes. Ele ocorre devido a uma tendência natural do fluxo dos ímãs do rotor de se alinharem com as ranhuras do estator na busca por um caminho de menor relutância, resultando num torque oscilante e de valor médio nulo. Existem diversas abordagens na literatura para redução do *cogging torque* via projeto de máquina [9–15]. São descritas na sequência algumas dessas técnicas.

Uma vez que o *cogging torque* está diretamente relacionado com o alinhamento dos ímãs dos polos com as ranhuras, a escolha adequada do número de polos e ranhuras pode mitigar esse problema. A razão entre número de polos e ranhuras inteira representa um maior número de alinhamentos do que uma razão fracionária [16]. Logo, quanto menor o valor dessa razão, menores serão os efeitos do *cogging torque*. A Fig. 1 apresenta duas máquinas, com as mesmas dimensões, onde uma possui 24 ranhuras e quatro polos e, na outra, mantém-se o número de ranhuras e aumenta-se o número de polos para 10.

Figura 1 – Influência da relação entre número de ranhuras e polos.



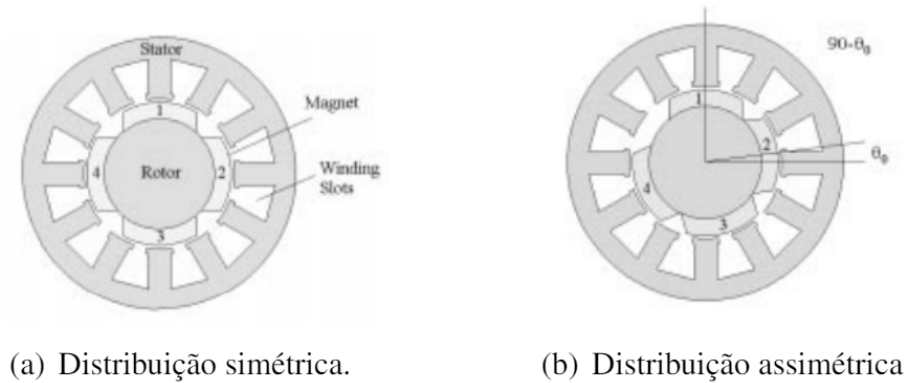
Fonte: Próprio autor, 2020

A Fig. 1 mostra como o pico do *cogging torque* pode ser reduzido quando o número de polos de uma máquina de 24 ranhuras é alterado de 4 para 10. Trata-se de uma técnica bastante simples e de fácil aplicação, contudo apresenta algumas desvantagens. Essa técnica restringe as combinações de polos e ranhuras a serem utilizadas pelo projetista e possui limitado poder de redução do *cogging torque*. Se o projetista quiser valores menores para a amplitude de oscilação, se faz necessário lançar mão de outros métodos.

Outra opção para redução do *cogging torque* é a utilização de distribuição assimétrica de polos e/ou ranhuras onde o problema de alinhamentos entre polos e ranhuras é

solucionado, como o próprio nome sugere, pela distribuição assimétrica de polos no rotor e/ou aberturas de ranhuras do estator. A Fig. 2 ilustra a distribuição assimétrica dos polos.

Figura 2 – Exemplo de distribuição assimétrica de polos.



Fonte: retirado de Breton, C., Bartolome (2000)

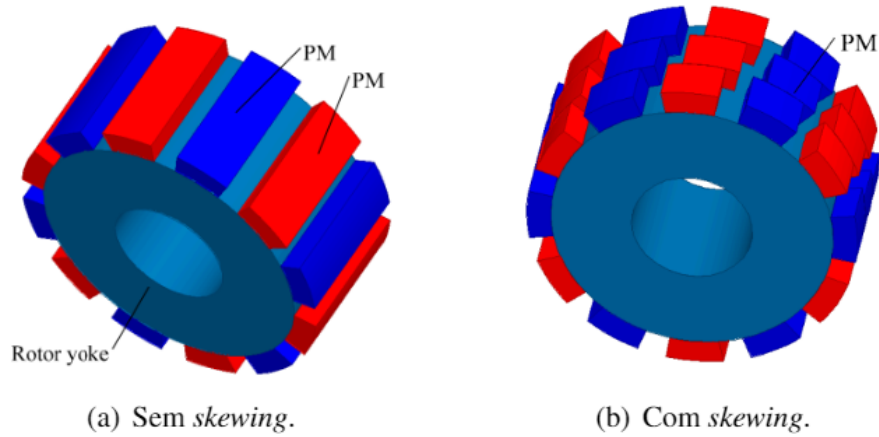
A distribuição assimétrica de polos, embora eficaz na mitigação do *cogging torque*, resulta em problemas mecânicos e construtivos. Esse tipo de abordagem, quando aplicada ao rotor, desloca o seu centro de massa, provocando vibrações indesejadas na máquina. Todavia, é possível contornar tal problema removendo partes do rotor em determinados lugares, aumentando a complexidade do projeto desse tipo de máquina.

A técnica de inclinação, mais conhecida como *skewing*, busca reduzir o número de alinhamentos entre ímãs e ranhuras por meio do deslocamento dos polos ou de lâminas do estator. Mais uma vez o objetivo é controlar a interação entre os ímãs dos polos e as aberturas de ranhuras do estator. Essa técnica se baseia na redução de harmônicas da densidade de fluxo, alterando a quantidade de polos percebida pelas ranhuras/bobinas. Na Fig. 3 é possível observar em detalhe a técnica aplicada ao rotor.

Essa abordagem tem como desvantagem, além do aumento da complexidade de projeto, a perda de fluxo magnético causados pela inclinação. Como mostrado em [17], não é possível reduzir essas harmônicas sem reduzir sua componente fundamental no processo.

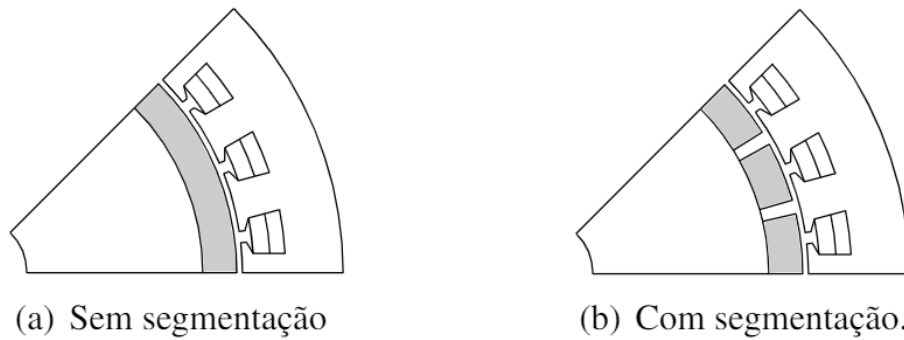
A técnica da segmentação de polos busca particionar os polos de uma máquina em um conjunto de ímãs menores (segmentos) de mesmo polo (norte ou sul). Esta técnica se volta exclusivamente para distribuições de ímãs na superfície do rotor. Por meio da disposição de segmentos de ímãs, busca-se reduzir as harmônicas da densidade de fluxo no entreferro responsáveis pela produção do *cogging torque*. A Fig. 4 exemplifica essa técnica por meio da divisão de um polo em três segmentos.

Essa técnica consiste em uma solução simples, de fácil implementação e reprodução computacional, contudo a complexidade da montagem da máquina real aumenta conforme o número de segmento cresce. Além disso, essa técnica acarreta em uma perda de fluxo

Figura 3 – Exemplo de *skewing* dos polos.

Fonte: Imagem retirada de Liu, C.(2017)

Figura 4 – Exemplo de segmentação de polos



Fonte: Próprio autor, 2020.

magnético no entreferro e, conseqüentemente, uma redução do torque desenvolvido.

Com foco nessa técnica, o presente trabalho propõe um processo de otimização de forma a se determinar o número de segmentos, seu comprimento e distância entre eles de forma a se garantir que a densidade de fluxo não sofra uma alta depreciação, enquanto o valor de pico do *cogging torque* é minimizado.

A principal motivação desse trabalho é o estudo do comportamento do *cogging torque* e fornecer meios para reduzi-lo utilizando processos de otimização aplicados à segmentação dos polos. Tem-se nos trabalhos de Labet, R. et al [18] e Ashabani, M. et al [9] como uma das principais fontes de inspiração para a pesquisa realizada e aqui apresentada.

No trabalho apresentado em [18], foi realizada uma modelagem e proposto a redução da harmônica fundamental do *cogging torque*. Embora eficaz na redução da oscilação, o impacto nas demais harmônicas não foi considerado, o que possibilitaria em uma redução mais significativa da amplitude do *cogging torque*. Além disso, não foram apresentados neste

trabalho os impactos inerentes ao fluxo da máquina e demais parâmetros de desempenho da mesma.

Já em [9], há uma maior sofisticação na redução do *cogging torque* onde busca-se a otimização da segmentação dos polos. neste, indo além do apresentado em [18], o objetivo é obter o menor *cogging torque* não focando somente na fundamental. Além disso, a preservação da densidade de fluxo é levada em consideração. Contudo, neste trabalho, os autores limitam-se ao estudo dos casos de dois e três segmentos. Além do mais, seu estudo limita-se apenas a segmentos em uma disposição simétrica em cada polo.

Apesar da simplicidade de implementação e eficácia na redução do *cogging torque*, a segmentação resulta em uma redução sensível da densidade de fluxo e consequentemente na diminuição do torque médio desenvolvido. Tendo em vista esse contraponto, busca-se formas de se mitigar esse problema por meio da aplicação de otimização na distribuição dos segmentos. Dessa forma, obter redução do *cogging torque* mantendo a redução do fluxo dentro de parâmetros aceitáveis estabelecidos pelo projetista.

No presente trabalho, indo além do apresentado em [9], o número de segmentos não é limitado a apenas dois ou três elementos. Será implementado a utilização de segmentos com tamanhos e espaços distintos. Todos esses acréscimos tem como finalidade fornecer uma maior gama de combinações e, consequentemente, a localização de um melhor ponto ótimo.

Observando-se também uma carência de estudos na literatura especializada sobre a segmentação de polos em blocos de seções retas (doravante chamados de blocos retangulares), este trabalho busca inovação ao modelar o comportamento da densidade de fluxo em segmentos com esse tipo de formato, além de aplicar métodos otimização.

Dessa forma, os objetivos do presente trabalho foram divididos em principal e secundários, sendo os mesmos apresentados a seguir:

1. Objetivo Principal

- Otimizar a redução do cogging torque, preservando a densidade de fluxo de entreferro.

2. Objetivos Secundários

- Modelar a distribuição da densidade de fluxo no entreferro para motores cujos ímãs de superfície possuam formato em arco e bloco retangular
- Estabelecer para quais tanhos de segmentos de bloco retangular, os mesmos podem ser aproximados de arco
- Testar métodos com análise em elementos finitos a fim de observar a relação entre os modelos teóricos e simulados e, assim, validar a proposta desse trabalho.

- Comparar as formas de onda do cogging torque, fluxo concatenado, back-emf e torque desenvolvido produzidos pelos projetos de motores obtidos.

A continuação do presente trabalho está organizado como se segue. No Capítulo 2 é desenvolvida a modelagem do *cogging torque* e sua expressão extrapolada para o caso específico da técnica de segmentação. São apresentados dois modelos, sendo o primeiro baseado em um comportamento ideal da densidade de fluxo, e um segundo mais preciso, onde são incorporados efeitos de distorção.

O caso particular de segmentação utilizando ímãs em formato de blocos retangulares é demonstrada no Capítulo 3 onde as particularidades dessa geometria são apresentadas, como por exemplo, a variação do entreferro e suas implicações na distribuição da densidade de fluxo no entreferro. Nesse capítulo, busca-se modelar o comportamento da distribuição da densidade de fluxo no entreferro, assim como estabelecer as condições onde um bloco retangular pode ser aproximado por segmentos em arco.

As propostas de otimização são descritas no Capítulo 3, onde as funções e objetivos utilizados, suas restrições e técnica de otimização utilizadas são apresentadas. Os projetos de máquinas obtidos pelas propostas de otimização são separados em casos e seus resultados, em análise em elementos finitos, obtidos são apresentados e discutidos no Capítulo 4. Na Conclusão as considerações finais são realizadas a cerca de todo o trabalho e seus resultados, apresentando se os objetivos foram atingidos, quais foram os melhores resultados e sugestões de trabalhos futuros.

2 Modelagem Matemática do *Cogging Torque* e Técnicas para Redução do seu Valor de Pico

Este capítulo tem como objetivo obter uma expressão analítica do *cogging torque* a partir da energia armazenada no entreferro da máquina síncrona de ímãs permanentes montados na superfície do rotor. Como mostrado ao longo do capítulo, algumas considerações foram feitas a fim de permitir um equacionamento simples do *cogging torque*. Sendo parte importante do presente trabalho, um equacionamento do *cogging torque* para a técnica de segmentação dos polos foi desenvolvida.

2.1 Modelagem do *cogging torque*(torque de detenção)

Em máquinas com ímãs de superfície, o *cogging torque* surge da tendência natural de alinhamento entre bordas de ímãs e abertura de ranhuras. É possível obter uma expressão aproximada de seu valor ao modelar a variação de energia no entreferro, $W(J)$, em relação à posição angular do rotor, $\alpha(rad)$, considerando a máquina a vazio, com corrente i nula, conforme (2.1) [13].

$$T_C = - \left. \frac{\partial W}{\partial \alpha} \right|_{i=0} \quad (2.1)$$

Vale ressaltar que a expressão (2.1) é válida uma vez que a variação da energia da máquina corresponde praticamente à variação da energia do entreferro nesse tipo de máquina.

Já a energia do entreferro é obtida pela integral da densidade de energia, $B_g^2/2\mu_0(J/m^3)$, ao longo do volume $V(m^3)$ do entreferro, como mostrado em (2.2).

$$W = \frac{1}{2\mu_0} \int_V B_g^2 dV \quad (2.2)$$

sendo $B_g(T)$ a distribuição de densidade de fluxo magnético no entreferro e $\mu_0(H/m)$ a permeabilidade do vácuo.

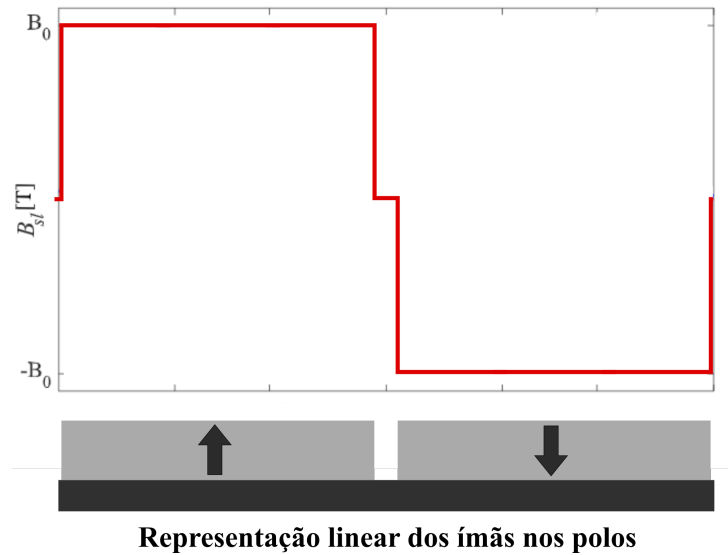
Para o desenvolvimento de (2.2) Propõe-se considerar a densidade de fluxo de entreferro como sendo o produto de duas grandezas [19]. A primeira representa a densidade de fluxo de entreferro associada aos ímãs. A segunda é a permeância de entreferro.

2.1.1 Distribuição da densidade de fluxo no entreferro

Considerando uma máquina sem ranhuras no estator, tem-se que a forma de onda da distribuição B_g é determinada exclusivamente pela distribuição dos ímãs ao longo do rotor. Essa distribuição de densidade de fluxo na máquina sem ranhuras é referida como B_{sl} .

Como proposto por Wu, L. J. et al [19], a componente tangencial de B_{sl} e os efeitos de espraçamento e dispersão são desconsiderados. Feitas tais considerações, o comportamento ideal da densidade de fluxo radial no entreferro é como mostrado na Fig. 2.1. Nessa figura são considerados ímãs com comprimento menor que o passo polar.

Figura 2.1 – Forma de onda ideal de B_{sl} - Polo não-segmentado



Fonte: Próprio autor, 2020

Idealmente, nos espaços entre polos, o valor de B_{sl} é nulo e constante na presença de ímãs, como observado na Fig. 2.1. Como visto, o modelo ideal da densidade de fluxo do entreferro, desconsiderado o efeito das ranhuras, tem a forma de pulsos retangulares.

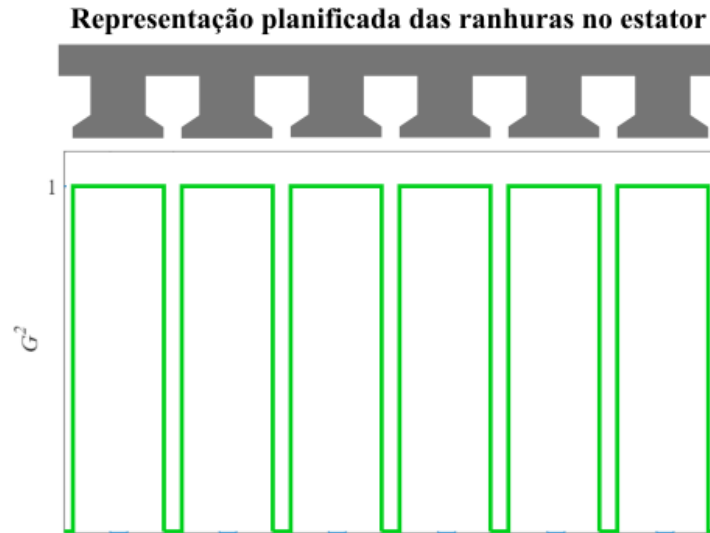
2.1.2 Efeitos das ranhuras e a Função Permeância de Entreferro

As aberturas de ranhura possuem uma relutância consideravelmente alta uma vez que esse caminho é composto de ar. Como consequência disso, as linhas de fluxo evitam essas regiões, o que resulta numa drástica redução da densidade de fluxo nesse ponto.

É possível modelar esse efeito, numa máquina com ranhuras, obtendo, assim, o comportamento da densidade de fluxo, ao se multiplicar a função B_{sl} por uma função moduladora G . Essa função moduladora é conhecida como permeância do entreferro. Idealmente, essa função G possui valor unitário na presença de dentes do estator e nulo

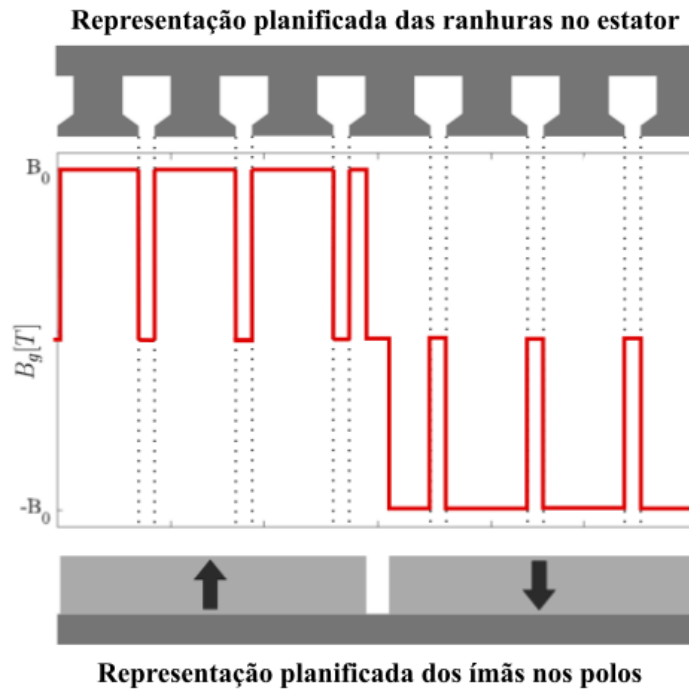
em caso contrário. A Fig.2.2 mostra a forma ideal de G^2 como função da posição medida ao longo do entreferro.

Figura 2.2 – Forma de onda da permeância



Fonte: Próprio autor, 2020

Figura 2.3 – Forma da densidade de fluxo B_g



Fonte: Próprio autor, 2020

Assim, a densidade de fluxo no entreferro B_g para a máquina com ranhuras é dada como o produto de G e B_{sl} , na forma de (2.3) e sua forma de onda exemplificada na Fig.

2.3.

$$B_g = GB_{sl} \quad (2.3)$$

2.1.3 Modelagem Matemática do *Cogging Torque* (Torque de detenção)

De posse do modelo para B_g , substitui-se (2.3) em (2.2), que resulta em (2.4)

$$W = \frac{\pi L_{stk}}{4\mu_0} (R_s^2 - R_m^2) \int_0^{2\pi} G^2 B_{sl}^2 d\theta \quad (2.4)$$

em que R_s é o raio interno do estator, R_m o raio externo dos ímãs, L_{stk} o comprimento do pacote de lâminas do estator e θ a posição angular do entreferro.

Para simplificar o desenvolvimento da integral em (2.4), as funções G^2 e B_{sl}^2 podem ser expressas por suas respectivas séries de Fourier, como em (2.6) e (2.5), respectivamente [9, 13]. Nessas equações, N_s é o número de ranhuras, p é o número de pares de polos, e m e n são inteiros positivos representando as ordens harmônicas. B_0 , G_0 , B_{m2p} e G_{kN_s} são os termos das séries de Fourier.

$$B_{sl}^2 = B_0 + \sum_{m=1}^{\infty} B_{m2p} \cos[m2p(\theta - \alpha)] \quad (2.5)$$

$$G^2 = G_0 + \sum_{k=1}^{\infty} G_{kN_s} \cos(kN_s\theta) \quad (2.6)$$

Tem-se que a integral do produto de duas funções cosseno ou duas funções seno ao longo de uma revolução só possui valor não nulo quando seus argumentos são iguais ($m2p = kN_s$). Aplicando as equações (2.5) e (2.6) em (2.4) e utilizando essa propriedade de ortogonalidade, obtém-se (2.8), sendo N_L o mínimo múltiplo comum entre pares de ranhuras e polos, dado por (2.7) [13].

$$N_L = \text{mmc}(N_s, 2p) \quad (2.7)$$

$$W(\alpha) = \frac{\pi L_{stk}}{4\mu_0} (R_s^2 - R_m^2) \left[2\pi G_0 B_0 + \sum_{n=1}^{\infty} B_{nN_L} G_{nN_L} \cos(nN_L\alpha) \right] \quad (2.8)$$

Onde B_{nN_L} e G_{nN_L} são as componentes de Furrier de B_{sl}^2 e G^2 respectivamente

Por fim, o *cogging torque* pode ser obtido substituindo (2.8) em (2.1) e realizando a derivação, obtendo-se (2.9).

$$T_C(\alpha) = \frac{\pi L_{stk}}{4\mu_0} (R_s^2 - R_m^2) \sum_{n=1}^{\infty} nN_L B_{nN_L} G_{nN_L} \sin(nN_L\alpha) \quad (2.9)$$

Embora a expressão (2.9) seja simples, ela serve de ponto de partida em uma variedade de técnicas para reduzir o valor do *cogging torque* via projeto da máquina. A alteração dos valores de N_L , B_{nN_L} e G_{nN_L} constituem diferentes formas de se reduzir o *cogging torque*. A escolha de uma relação adequada de polos e ranhuras permite ajustar N_L , enquanto técnicas como distribuição assimétrica, *skewing* e a segmentação de polos buscam, por meio das distribuições de polos ou ranhuras, obter componentes B_{nN_L} e G_{nN_L} tais que sua relação reduzam o cogging torque.

No caso específico da segmentação de polos, trabalha-se com a distribuição dos ímãs no rotor e altera-se somente a densidade de fluxo produzida pelos rotor. Como mostrado na (2.10), as harmônicas G_{nN_L} possuem valores reduzidos para altas ordens, e o objetivo na segmentação é reduzir as harmônicas de baixa ordem de B_{sl} para que, dessa forma, o produto entre elas seja minimizado. A seguir, a expressão para o *cogging torque* será extrapolada para esse tipo de técnica.

2.2 Extrapolação da Modelagem do *Cogging Torque* para a Segmentação dos Polos

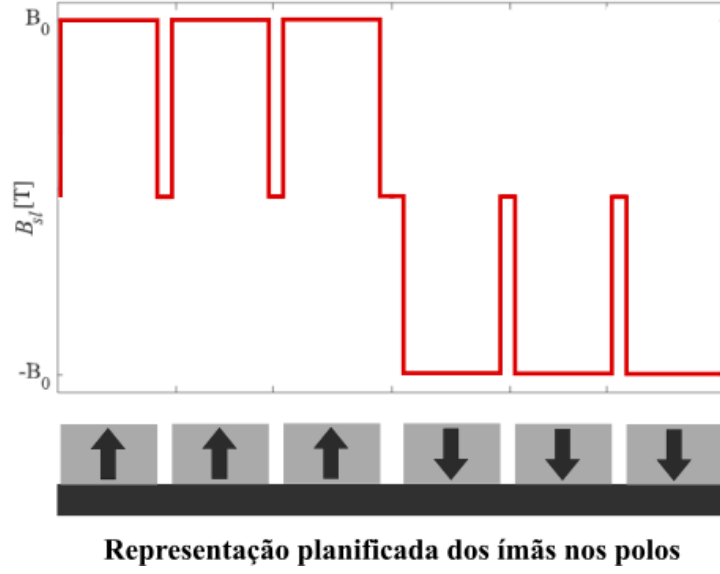
Para melhor entendimento do porquê a segmentação dos polos reduz o *cogging torque*, uma expressão para os coeficientes G_{nN_L} e B_{nN_L} deve ser desenvolvida para o caso particular de segmentação. Considerando que a forma de onda da permissividade é como mostrado na Fig. 2.2, e que na segmentação a forma do estator permanece sempre inalterada, a expressão para G_{nN_L} se mantém análoga a (2.6) e é reescrita em (2.10), sendo w_s pares de ranhuras.

$$G_{nN_L} = \frac{2N_s}{n\pi N_L} (-1)^{N_L/N_s} \text{sen}(nN_L w_s) \quad (2.10)$$

Nota-se por (2.10) que a amplitude dos coeficientes G_{nN_L} para ordens harmônicas elevadas possuem valor reduzido, de forma que, com o aumento de N_L , ocorre também uma redução dos coeficientes de G^2 . Este último fato corrobora a influência da escolha da relação entre o número de polos e ranhuras na intensidade do *cogging torque*.

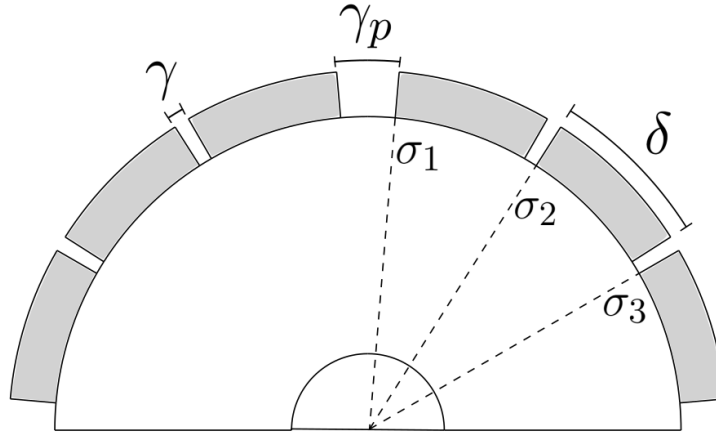
A expressão (2.9) obtida para o *cogging torque* no começo do capítulo pode ser aplicada também na segmentação dos polos. Entretanto, a forma de onda de B_{sl} não é mais como mostrado na Fig. 2.1 pois agora há um conjunto de ímãs distribuídos em cada polo e não mais uma única peça, como mostrado na Fig. 2.4.

A Fig. 2.5, apresenta um exemplo de distribuição. O comprimento do k -ésimo segmento é representado por δ_k , enquanto a distância entre os segmentos k e $k+1$ é representada por γ_k e a distância entre os polos por γ_p .

Figura 2.4 – Forma de onda ideal de B_{sl} - Polo segmentado


Fonte: Próprio autor, 2020

Figura 2.5 – Segmentação em detalhe



Fonte: Próprio autor, 2020

A expressão das componentes de Fourier da densidade de fluxo B_{sl} , apresentadas em (2.5), podem se reescritas para o caso particular de segmentação. Dessa forma, tendo como exemplo a Fig. 2.5, é possível então obter B_{nN_L} , mostrada em (2.11), que são as componentes de Fourier de B_{sl} para o caso específico de segmentação de polos.

$$B_{nN_L} = \frac{2pB_0^2}{n\pi N_L} \sum_{k=1}^N \text{sen}\left(nN_L \frac{\delta_k}{2}\right) \cos\left[nN_L \left(\sigma_k + \frac{\delta_k}{2}\right)\right] \quad (2.11)$$

onde B_0 é o máximo valor da densidade de fluxo no entreferro, N é o número total de segmentos e σ_k representa a posição angular do início do k -ésimo segmento.

Pela expressão de B_{nN_L} , percebe-se que é possível eliminar determinadas harmônicas

geradoras do *cogging torque* por meio da escolha do comprimento dos segmentos (termo em seno) ou de sua distribuição ao longo do polo (termo em cosseno). Além disso, também é possível executar a segmentação dos polos de forma que as harmônicas de B_{sl}^2 possuam uma alta ordem, reduzindo o *cogging torque* por meio da redução natural na amplitude das harmônicas de G^2 . Afinal, como mostrado anteriormente, com o aumento da ordem, os coeficientes G_{nN_L} diminuem sua amplitude.

Conforme já citado, um dos principais problemas da segmentação dos polos é a redução da densidade de fluxo no entreferro. Para verificar os efeitos dessa técnica sobre a densidade de fluxo no entreferro, sua série de Fourier pode ser obtida, desprezando efeitos de dispersão e espraçamento mais uma vez por meio das Figs. 2.4 e 2.5. A expressão obtida é da forma mostrada em (2.12). Nota-se que, de fato, a segmentação dos polos pode acarretar uma redução na densidade de fluxo do entreferro da máquina. Isto se deve ao fato de B_{sl} ser, como evidenciado em (2.12), dependente da distribuição dos segmentos.

$$B_{sl} = B_{nN_L} \sin(np\theta) \quad (2.12)$$

Outra consequência da segmentação dos polos, contudo positiva, trata-se da redução do volume de ímãs permanentes, V_M , utilizados no rotor. A expressão que fornece o volume dos ímãs é dada por (2.13). Percebe-se que quanto menor a soma total dos comprimento dos segmentos, menor o volume utilizado de ímãs. Isso se dá devido a presença de espaços vazios onde antes estava completamente preenchido por material magnético duro.

$$V_M = L_{stk} (R_s^2 - R_m^2) \sum_{k=1}^N \delta_k \quad (2.13)$$

2.3 Modelagem Alternativa para o *cogging torque*

A modelagem apresentada nas seções anteriores possuem uma série de considerações adotadas. Elas foram necessárias a fim de se obter uma expressão simples como apresentadas em (2.9). Contudo, uma vez desconsiderados os efeitos da componente tangencial da densidade de fluxo no entreferro, assim como espraçamento e dispersão, esse modelo se torna mais limitado e menos preciso.

Buscando melhorar esse aspecto, esta seção tem por objetivo empregar formulações analíticas para as componentes radial e tangencial da densidade de fluxo no entreferro no cálculo do *cogging torque*.

No trabalho apresentado por Zhu, Z. Q. et al [20], o processo de obtenção das formulações para as componentes radial e tangencial da densidade de fluxo no entreferro para máquinas sem ranhuras é descrito em detalhes. De forma simples, equações de Laplace e quasi-Poisson são resolvidas para obtenção do potencial magnético escalar para determinadas condições de fronteira. Uma vez obtido expressões para esse potencial, é

possível determinar as componentes radiais e tangenciais da densidade de fluxo no entreferro. As expressões obtidas por esse método foram replicadas aqui em (2.14) e (2.15) que apresentam as componentes radial e tangencial da densidade de fluxo, respectivamente. Para demonstrar a precisão das equações (2.14) e (2.15), a Fig. 2.6 apresenta uma comparação entre a densidade de fluxo obtida por meio de simulações em elementos finitos e pelas equações apresentadas nessa Seção, para uma máquina de 24 ranhuras e 4 polos montados na superfície.

$$B_r(r, \theta) = \sum_{n \text{ ímpar}}^{\infty} \frac{\mu_0 M_n}{\mu_r} \frac{np}{(np)^2 - 1} \cdot \left\{ \frac{(np-1) + 2 \left(\frac{R_r}{R_m} \right)^{np+1} - (np+1) \left(\frac{R_r}{R_m} \right)^{2np}}{\frac{\mu_r + 1}{\mu_r} \left[1 - \left(\frac{R_r}{R_s} \right)^{2np} \right] - \frac{\mu_r - 1}{\mu_r} \left[\left(\frac{R_m}{R_s} \right)^{2np} - \left(\frac{R_r}{R_m} \right)^{2np} \right]} \right\} \cdot \left[\left(\frac{r}{R_s} \right)^{np-1} \left(\frac{R_m}{R_s} \right)^{np+1} + \left(\frac{R_m}{r} \right)^{np+1} \right] \cos(np\theta) \quad (2.14)$$

$$B_t(r, \theta) = \sum_{n \text{ ímpar}}^{\infty} -\frac{\mu_0 M_n}{\mu_r} \frac{np}{(np)^2 - 1} \cdot \left\{ \frac{(np-1) + 2 \left(\frac{R_r}{R_m} \right)^{np+1} - (np+1) \left(\frac{R_r}{R_m} \right)^{2np}}{\frac{\mu_r + 1}{\mu_r} \left[1 - \left(\frac{R_r}{R_s} \right)^{2np} \right] - \frac{\mu_r - 1}{\mu_r} \left[\left(\frac{R_m}{R_s} \right)^{2np} - \left(\frac{R_r}{R_m} \right)^{2np} \right]} \right\} \cdot \left[\left(\frac{r}{R_s} \right)^{np-1} \left(\frac{R_m}{R_s} \right)^{np+1} - \left(\frac{R_m}{r} \right)^{np+1} \right] \sen(np\theta) \quad (2.15)$$

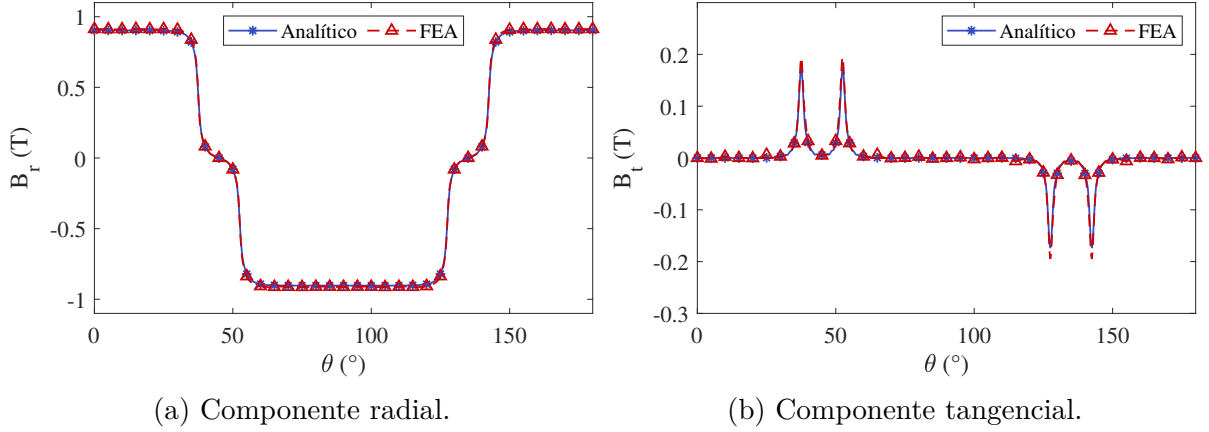
sendo B_r e B_t respectivamente a densidade radial e tangencial de fluxo, μ_r a permeabilidade relativa do ímã, R_s o raio interno do estator, R_r o raio externo do rotor, r o raio onde se deseja obter a densidade do fluxo, sendo que $R_m < r < R_s$, e M_n é obtida por meio de

$$M_n = 2 \frac{B_r}{\mu_0} \alpha_p \frac{\sen\left(\frac{n\pi\alpha_p}{2}\right)}{\frac{n\pi\alpha_p}{2}}$$

em que M_n representa o coeficiente da série de Fourier da magnetização dos ímãs, no caso radial, e α_p é a razão entre o arco do segmento de ímã e o passo polar.

Obtida as expressões da densidade de fluxo, o próximo passo consiste na obtenção da função permeância do entreferro. Considerando que essa função é de variáveis complexas, transformações conforme podem ser empregadas para obtenção analítica de suas componentes radial, G_r , e tangencial, G_t [21]. Realizando simulações para a máquina com e sem ranhura e utilizando a densidade de fluxo no entreferro ao longo de um passo de ranhura, por meio das expressões (2.16) e (2.17), são obtida as componentes G_r e G_t da

Figura 2.6 – Densidade de fluxo no entreferro obtida analiticamente e por elementos finitos



Fonte: retirado de K. M. de Andrade, 2020

permeância.

$$G_r = \frac{B'_{gr} B'_r + B'_{gt} B'_t}{B_r'^2 + B_t'^2} \quad (2.16)$$

$$G_t = \frac{B'_{gr} B'_t - B'_{gt} B'_r}{B_r'^2 + B_t'^2} \quad (2.17)$$

Onde B'_{gr} e B'_{gt} são respectivamente a componente radial e tangencial da densidade de fluxo do entreferro com ranhuras, B'_r e B'_t da densidade de fluxo do entreferro sem ranhuras. Todos os quatro termos obtidos com análise em elementos finitos.

A utilização de análise em elementos finitos para a obtenção da expressão da permeância se justifica no presente trabalho devido as máquinas avaliadas não possuírem variações em seu estator. Em outras palavras, esse processo de obtenção das componentes só se dá uma vez no processo de otimização.

Obtido as componentes radial e tangencial da permeância do entreferro, por meio do processo descrito, as densidades de fluxo radial e tangencial da máquina com ranhura, B'_r e B'_t , são obtidas por meio das eqs. (2.18) e (2.19).

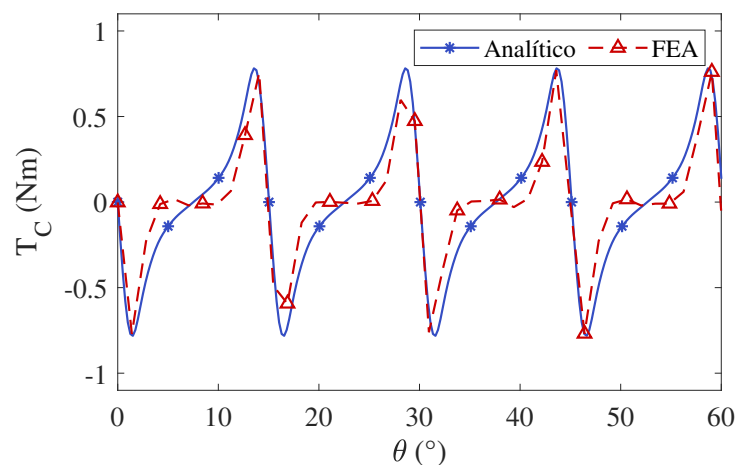
$$B'_r = B_r G_r + B_t G_t \quad (2.18)$$

$$B'_t = -B_r G_t + B_t G_r \quad (2.19)$$

De posse dos valores de B'_r e B'_t , o *cogging torque* pode ser obtido por meio do cálculo do tensor de Maxwell, conforme (2.20). Para mostrar a acurácia das expressões analíticas a Fig. 2.7 mostra uma comparação entre o *cogging torque* obtido por elementos finitos e a expressão analítica apresentada aqui.

$$T_C(\alpha) = \frac{L_{stk} r^2}{\mu_0} \int_0^{2\pi} B'_g(r, \theta, \alpha) B'_g(r, \theta, \alpha) d\theta \quad (2.20)$$

Figura 2.7 – Cogging torque obtido analiticamente e por elementos finitos



Fonte: retirado de K. M. de Andrade, 2020.

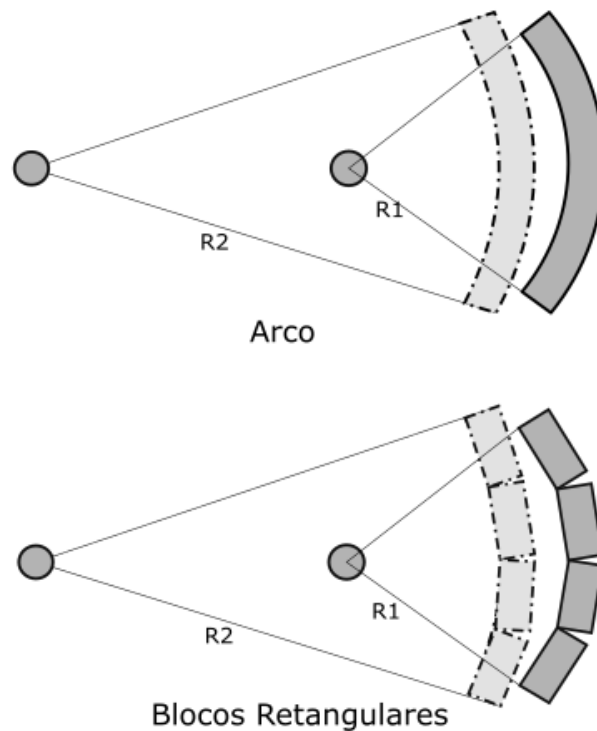
Embora nessa seção o equacionamento do torque tenha melhorado ao incluir efeitos desconsiderados anteriormente, ainda existem algumas limitações como a saturação do ferro não considerada, em especial a saturação das sapatas dos dentes.

3 Segmentação em blocos retangulares

Na construção de motores de ímãs permanentes de superfície, obter polos com ímãs com formato curvo, não sempre é uma tarefa fácil. Isto se deve ao fato de cada peça em formato de arco possuir um raio e abertura de ângulo associado. Logo, peças com curvatura tem seu uso limitado a aspectos construtivos da máquina para qual foi projetada. Para um caso particular de projeto de máquina, pode se necessitar de tipos de ímãs em arco muito específicos que poderiam demandar peças feitas sob medida.

Tendo em vista esse desafio, projetistas podem utilizar no lugar de ímãs em arco, uma série de ímãs em bloco retangulares. Um conjunto de ímãs de bloco retangular possui como grande vantagem não ter a restrição de curvaturas impostas pelos formatos em arco. Isso permite uma maior simplificação na produção, além de uma mesma peça poder ser aplicada a uma gama de máquinas de diferentes dimensões. É possível observar na Fig. 3.1 que para o caso do formato em arco, para duas máquinas de raios $R1$ e $R2$ distintos, são necessários tipos específicos de ímãs para cada caso. Para um conjunto de segmentos em blocos retangulares é possível realizar adaptações para ambos os raios.

Figura 3.1 – Exemplo de ímã com diferentes formatos e aplicado a raios diferentes



Fonte: Próprio autor, 2020.

Contudo, como ponto negativo no uso de formato em bloco retangular para ímãs de superfície é que este formato produz um entreferro com distância variável, ao contrário do

formato em arco. Apesar disso, encontram-se disponíveis comercialmente motores em que os ímãs utilizados são em formato de bloco retangular. A Fig. 3.2 apresenta um exemplo de aplicação real, que devido a quantidade de polos, os segmentos de blocos retangulares são suficientemente pequenos para a variação do entreferro possa ser desconsiderada. Como é apresentado nesse capítulo, para blocos retangulares suficientemente pequenos, é possível sua utilização fazendo uma aproximação de segmentos em arco.

Figura 3.2 – Motor *brushless* comercial com ímãs em formato de bloco retangular.



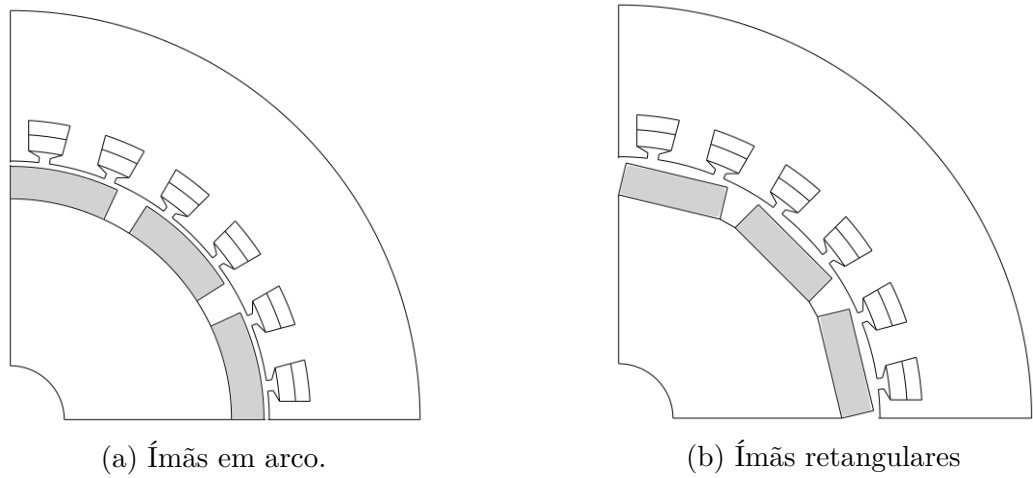
Fonte: Retirado de m.racerstar.com

Com a alteração do formato dos ímãs, surge questões como qual o comportamento do fluxo no entreferro no formato em bloco retangular? A partir de que tamanho de segmento de bloco retangular a aproximação com segmento em arco é válida? Quais os impactos no desempenho da máquina?

Em uma busca na literatura, não foram encontrados estudos específicos sobre esse assunto que respondessem tais questões. Por essa razão foi realizado um estudo mais específico e nesse capítulo foi desenvolvido um estudo e modelagem desse caso particular de segmentação.

Para deixar claro a diferença entre os dois tipos de formatos, a Fig. 3.3 apresenta o modelo de uma mesma máquina de quatro polos, três segmentos e 24 ranhuras para o formado em arco e bloco retangular, respectivamente.

Figura 3.3 – Modelo de 4-polos para segmentos de ímãs em arco

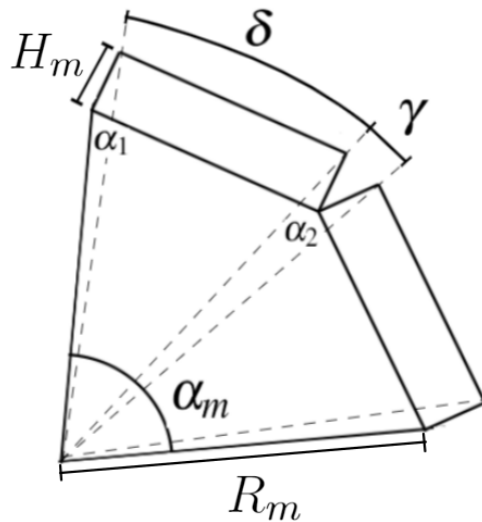


Fonte: Próprio autor, 2020.

3.1 Variação do entreferro

Para entender o comportamento da densidade de fluxo no entreferro, é preciso determinar o comportamento do entreferro. Como se trata de um entreferro com comprimento variável, se faz necessário obter uma função $g(\theta)$ que modele essa variação. A Fig. 3.4 representa em detalhes um único polo segmentado em blocos retangulares e suas características geométricas.

Figura 3.4 – Blocos retangulares em detalhe

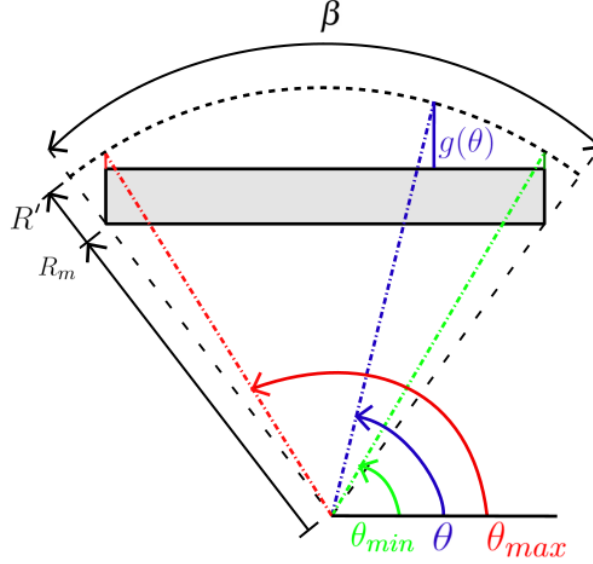


Fonte: Próprio autor, 2020.

A partir da análise da geometria de um único segmento, apresentado em Fig. 3.5, observa-se que a distância do entreferro, perpendicular à superfície do ímã, pode ser escrita em função do ângulo θ . Esta função do entreferro, $g(\theta)$, foi obtida pelo autor por uma

análise geométrica e apresentada em (3.1). O entreferro varia entre os pontos θ_{min} e θ_{max} que correspondem aos extremos do bloco e dados por (3.2) e (3.3), respectivamente.

Figura 3.5 – Variação do Entreferro



Fonte: Próprio autor, 2020.

$$g(\theta) = R' \sin(\theta) - (R_m \cos(\beta/2) + H_m) \quad (3.1)$$

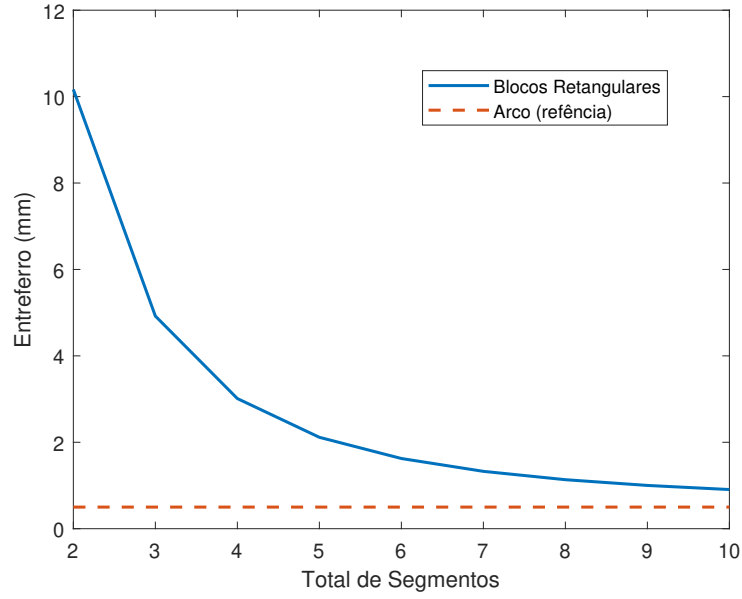
$$\theta_{min} = \frac{\pi}{2} - \text{sen}^{-1} \left(\frac{R_m \sin(\beta/2)}{R'} \right) \quad (3.2)$$

$$\theta_{max} = \pi - \theta_{min} \quad (3.3)$$

A expressão obtida possui uma simetria em $\pi/2$ e vou obtida baseado na posição ilustrada na Fig. 3.5. Computacionalmente, ao se simular ímãs com posições diferente, é possível fazer uma rotação em θ e obtendo-se a mesma representação.

Percebe-se por (3.1) que a variação do entreferro é ditada pela componente $R' \sin(\theta)$, sendo os limites de θ definidos por β . Dessa forma, conforme o tamanho angular do segmento, δ , se reduz, β por consequência diminui. Como consequência da redução de β , os limites θ_{min} e θ_{max} se aproximam resultando numa menor variação de θ e uma menor variação de $g(\theta)$. Logo para segmentos suficientemente pequenos a variação do entreferro é praticamente desprezível. A Fig. 3.6 mostra o comprimento máximo do entreferro para blocos retangulares, obtido por (3.1), a medida que se aumenta o número total de segmento. Percebe-se uma aproximação com a distância referencia, mostrando uma redução da amplitude de variação do entreferro.

Figura 3.6 – Redução do entreferro máximo



Fonte: Próprio autor, 2020.

3.1.1 Modelando o comportamento da densidade de fluxo

Uma vez obtida a expressão de $g(\theta)$ para um segmento de bloco retangular, é possível então descrever o comportamento da densidade de fluxo magnético ao longo do entreferro. Desprezando efeitos de espraio e dispersão, a densidade de fluxo no entreferro, B , pode ser modelado por (3.4) como apresentado em MILLER, T.J.E. et al. [16]. Por se tratar de um segmento bloco retangular, a relação entre as áreas da superfície do ímã A_m e área A_g do respectivo entreferro deixa de ser unitária. Por isso torna-se necessário o fator de correção $k_A = A_m/A_g$ em (3.4), principalmente para blocos retangulares relativamente grandes.

$$B_{sl}(\theta) = \frac{H_m}{H_m + g(\theta)k_A} B_r \quad (3.4)$$

Observando-se (3.4), uma vez que $g(\theta)$ possua baixa variação, a distribuição B_{sl} se torna mais constante. A partir de um pouco onde a variação do comprimento de entreferro possa ser considerado dispersível, por consequência B_{sl} pode ser considerado constante.

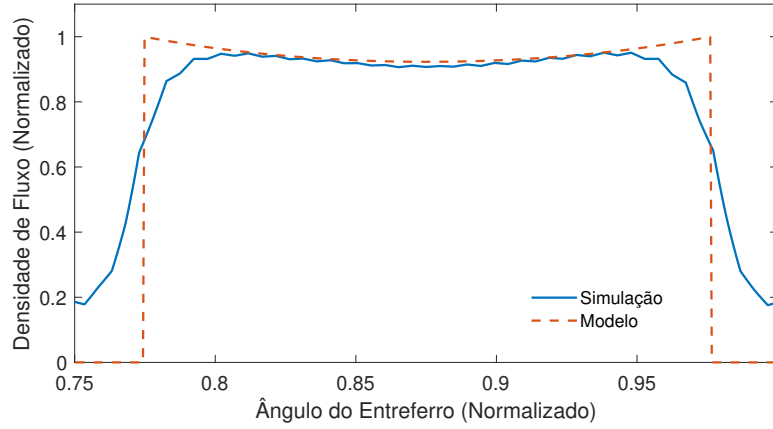
Substituindo (3.1) em (3.4) e realizando-se simplificações matemáticas, a expressão ideal de B^2 para blocos retangulares desenvolvida neste trabalho, é dada por (3.5).

$$B_{sl}^2(\theta) = \frac{H_m^2 B_r^2}{(C + k_A R' \sin \theta)^2} \quad (3.5)$$

onde $C = (1 - k_A)H_m - k_A R_m \cos \beta/2$

Utilizando-se de (3.5), o comportamento ideal da densidade de fluxo no entreferro foi obtido e comparado com uma simulação em elementos finitos de uma máquina de 2 polos e 7 segmentos. Para essa máquina simulada, tem-se $\delta = 21,79^\circ$, $\beta = 25,71^\circ$, $R' = 39$, $R_m = 33mm$ e $H_m = 6mm$, e o resultado dessa comparação são mostrados na Fig. 3.7.

Figura 3.7 – Distribuição da densidade de fluxo analítica e simulada



Fonte: Próprio autor, 2020.

Nota-se que o comportamento simulado se diferencia do modelo ideal nas bordas do segmento de ímã, fato esse esperado devido aos fenômenos de espraçamento e dispersão. Nota-se ainda que essas distorções acabaram por beneficiar positivamente, quanto à forma de onda, ao proporcionar à densidade de fluxo no entreferro, B_{sl} , uma maior suavidade.

3.1.2 Harmônicas da Densidade de Fluxo para Segmentos Retangulares

Sendo a função B_{sl}^2 uma função par, pode-se obter a sua representação por série de Fourier aplicando-se a expressão de B_{sl}^2 obtida em (3.5) na transformada (3.6) e, após simplificações matemáticas, obtém-se (3.7).

$$B_n = \frac{2p}{\pi} \sum_{k=1}^{s_m} \int_{\alpha_k}^{\alpha_k + \delta_k} B_{sl}^2(\theta) \cos(n2p\theta) d\theta \quad (3.6)$$

$$B_n = \frac{2pH_m^2 B_r^2}{\pi} \sum_{k=1}^{s_m} \int_{\alpha_k}^{\alpha_k + \delta_k} \frac{\cos(n2p\theta)}{(C + k_A R' \sin \theta)^2} d\theta \quad (3.7)$$

Observa-se que devido a presença de variações na densidade de fluxo de entreferro, ao se aplicar a transformada de Fourier, obteve-se uma expressão mais complexa e sem solução analítica. A diferença para segmentos em arco é devido a constância da densidade de fluxo, o que simplifica a obtenção das séries de Fourier.

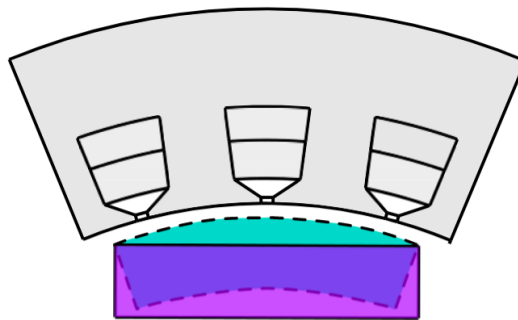
Uma vez que, ao se reduzir o tamanho dos blocos retangulares, os mesmo se aproximem de um arco, é possível assumir que a distribuição B^2 tenha um comportamento mais próximo do retangular, uma vez que o entreferro se torna praticamente constante. Uma implicação direta disso é que, sendo os blocos retangulares suficientemente pequenos, todas as expressões de segmentos em arco, obtidas na Seção 2.1.3 seriam válidas para os blocos retangulares.

A seguir, na próxima Seção, é investigada a similaridade das distribuições entre os dois tipos de formatos, e determinada para que tamanho de blocos retangulares as aproximações para segmentos de arco poderia ser aplicadas.

3.1.3 Comparações da Densidade de Fluxo para Formato em Arco e Bloco Retangular

Como apresentado na Seção 3.1.1, conforme se reduz o tamanho do bloco retangular, menores são as variações da densidade de fluxo. Com essa redução dos segmentos, as formas de onda para ímãs com formato em bloco se assemelham ao formato em arco. Para demonstrar essas semelhanças foi simulado em elementos finitos a distribuição da densidade de fluxo magnético no entreferro para dois modelos. Um dos modelos é uma máquina de 24 ranhuras, quatro polos, quatro segmentos em arco de $19,06^\circ$ de tamanho e todos espaçados em $3,44^\circ$. O segundo modelo possui as mesmas características, diferindo apenas quanto ao formato de seus segmentos, sendo no caso em bloco retangulares. A Fig. 3.8 mostra o modo como a representação em bloco retangular é feita a partir de uma representação em arco. A Fig. 3.9 mostra o resultado da simulação desses dois modelos.

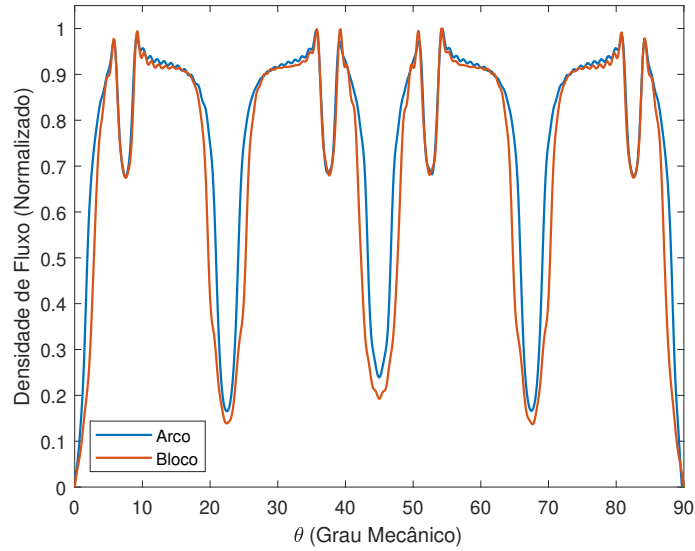
Figura 3.8 – Representação em blocos retangulares a partir de representação em arco



Fonte: Próprio autor, 2020.

Fica evidente pela Fig. 3.9 a semelhança de ambas as distribuições em arco e bloco retangular, estando em diversos pontos praticamente sobrepostas para segmentos com $\delta = 19,06^\circ$. Para observar essa aproximação entre as duas formas de ondas foram simulados para diferentes tamanhos de segmento e obtido o perfil harmônico da densidade de fluxo no

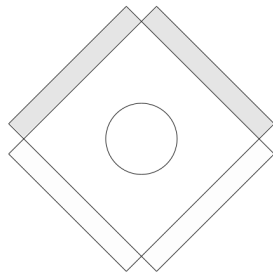
Figura 3.9 – Comparação da distribuição da densidade de fluxo para segmentos em arco e bloco retangular



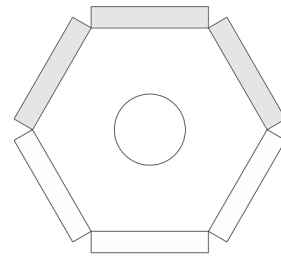
Fonte: Próprio autor, 2020.

entreferro. Foi utilizado nessa comparação uma máquina de dois polos, onde, inicialmente, utilizou-se dois segmentos ($\delta = 77,51^\circ$) e aumentando-se o numero de segmentos. Os modelos blocos retangulares utilizados se encontram na Fig. 3.10 e os resultados obtidos na Fig. 3.11.

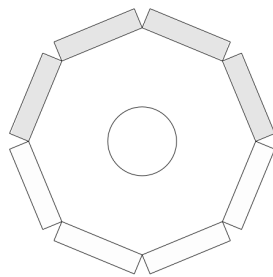
Figura 3.10 – Modelo de máquinas em segmentos retangulares



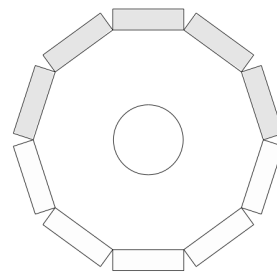
(a) 2 Polos e 2 segmentos ($\delta = 77,51^\circ$)



(b) 2 Polos e 3 segmentos ($\delta = 51,18^\circ$)

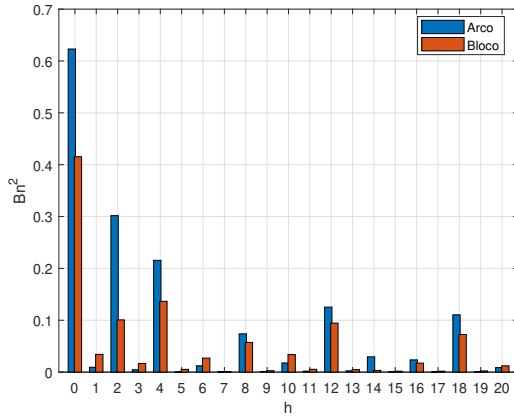
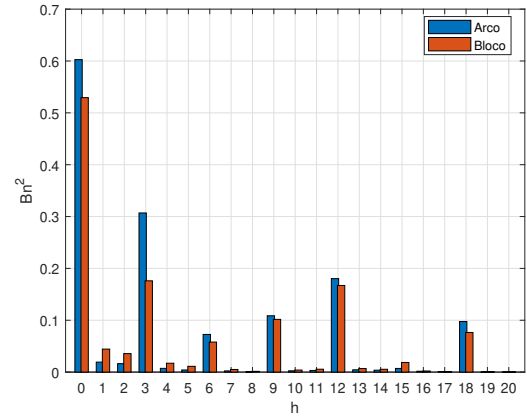
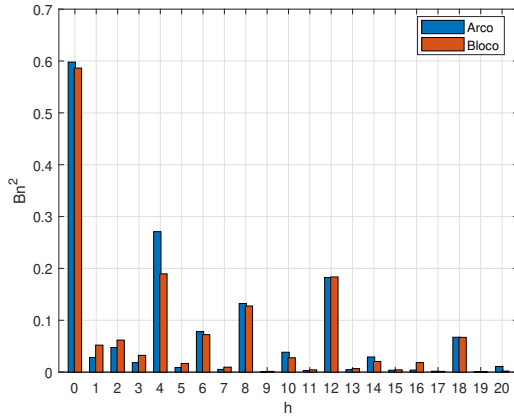
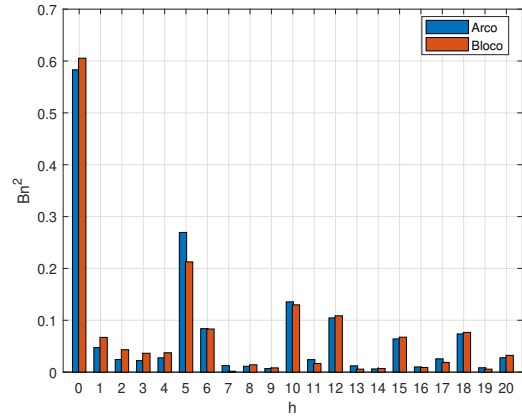


(c) 2 Polos e 4 segmentos ($\delta = 38,25^\circ$)



(d) 2 Polos e 5 segmentos ($\delta = 30,55^\circ$)

Fonte: Próprio autor, 2020.

Figura 3.11 – Componentes harmônicas da distribuição B^2 , para as diferentes geometrias de ímãs(a) 2 Polos e 2 segmentos ($\delta = 77,51^\circ$)(b) 2 Polos e 3 segmentos ($\delta = 51,18^\circ$)(c) 2 Polos e 4 segmentos ($\delta = 38,25^\circ$)(d) 2 Polos e 5 segmentos ($\delta = 30,55^\circ$)

Fonte: Próprio autor, 2020.

A Fig. 3.10 ilustra como o formato de blocos retangulares, para segmentos de ímãs muito grandes, resulta em polos com formatos não usuais (Fig. 3.10a e Fig. 3.10b) e, conforme o tamanho dos blocos retangulares se reduzem, menor variação de entreferro. Como se pode observar na Fig. 3.11, o perfil harmônico da distribuição da densidade de fluxo dos modelos anteriormente apresentados demonstra uma grande similaridade com a distribuição equivalente em arco. Para o caso inicial de dois segmentos (Fig. 3.10a) há uma notável diferença. Contudo, essa diferença se reduz com o aumento de segmentos e diminuição do comprimento dos blocos retangulares. A partir de quatro segmentos (Fig. 3.10c) a semelhança harmônica é significativa, semelhança esta que se mantém com 5 segmentos (Fig. 3.10d) com $\delta = 30,55^\circ$.

Da utilização de diversos tamanhos, chega-se a conclusão que, para comprimento angular, δ , de bloco retangular inferiores a 20° , as diferenças no comportamento de densidade de fluxo para segmentos com formatos retangulares e arco se tornam desprezíveis.

Para efeitos de simplificações, pode-se considerar blocos retangulares com comprimentos menores que esse valor como sendo arcos. Como consequência disso, as expressões para a densidade de fluxo e *cogging torque*, apresentadas no Capítulo 2, podem ser aplicadas em rotores com segmentos em bloco retangular com $\delta < 20^\circ$.

3.2 Restrição de Distância Mínima entre Segmentos

Ao se utilizar blocos retangulares, devido à forma em seções retas, existe uma distância angular mínima, γ_{min} , entre os segmentos, como mostrado na Fig. 3.4. Por meio da geometria da distribuição dos segmentos no rotor o autor obteve uma expressão de γ_{min} , em radianos, é dada por (3.8).

$$\gamma_{min} = 2\text{sen}^{-1}\left[\frac{H_m}{R_m}\sin\left(\frac{a_m}{s_m}\right)\right] \quad (3.8)$$

Onde $a_m = \pi/2p$ e s_m é o número de segmentos por polo

Por meio da expressão 3.8 é possível obter a distância mínima necessária para uma distribuição de segmentos em formato retangular. A Tabela 3.1 foi construída partindo da premissa que todos os segmentos possuem o mesmo tamanho e que a máquina possui passo polar completo.

Tabela 3.1 – Valor de γ_{min} em função do tamanho dos segmentos

Total de Segmentos	γ_{min}	δ
4	12,49°	77,51°
6	8,82°	51,18°
8	6,75°	38,25°
10	5,45°	30,55°
12	4,56°	25,44°
14	3,92°	21,79°
16	3,44°	19,06°
18	3,06°	16,94°
20	2,76°	15,24°

Percebe-se que a distância mínima entre segmentos se torna menor com o aumento do número de segmentos distribuídos. Como essa distância mínima é uma limitação construtiva, quanto menor seu valor mais liberdade se tem para projetar uma máquina. Essa liberdade se dá pelo maior número de combinações dos tamanhos de segmentos e espaços entre eles. Para o caso de segmentos de ímãs com tamanhos diferentes entre si, o calculo de γ_{min} se tornaria um pouco mais complexo e particular à distribuição estudada.

Como exemplo, se fosse projetada uma máquina com quatro polos e quatro segmentos (total de 16 segmentos de ímãs), utilizando a Tabela 3.1, tem-se que os segmentos em blocos retangulares de ímãs possuiriam δ inferiores à 20° , atendendo o critério apresentado.

3.3 Segmentação em Bloco Retangular e a Variação de Volume dos ímãs no Rotor

De forma similar à apresentada no capítulo anterior, o volume do rotor está relacionado à soma total do volume dos segmentados. Levando em consideração a geometria apresentada na Fig. 3.4, obtém-se (3.9).

$$V_M = 2L_{stk}H_mR_m\cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (3.9)$$

Devido à geometria de segmentos em arcos e blocos retangulares serem diferentes, as Equações (2.13) e (3.9) são distintas. A relação entre o volume de segmentos em bloco retangular e arco mostra que, para um mesmo δ , o volume de ímãs é maior para o primeiro tipo. Contudo, para blocos retangulares com tamanho angular δ infinitesimal ($\delta = 0$), essa relação se torna unitária.

A partir do conjunto de equações obtidas neste capítulo e no Capítulo 2, se tornou possível desenvolver métodos de otimização. A descrição de tais métodos será apresentada no Capítulo 4.

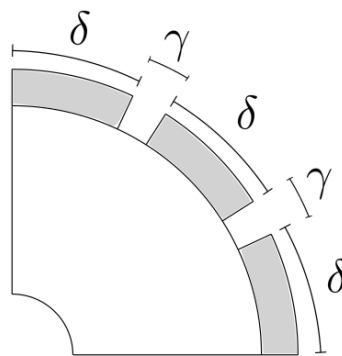
4 Propostas de Otimização para a Segmentação dos Polos

Como explicado no Capítulo 2, a componente fundamental da densidade de fluxo do entreferro, B_1 , sofre uma redução com a segmentação dos polos. Então, com o intuito de se reduzir o *cogging torque* e garantir que B_1 não sofra uma grande redução, um processo de otimização deve ser aplicado. Este capítulo apresenta três propostas para processos de otimização considerando a segmentação dos polos da máquina síncrona de ímãs permanentes montados na superfície do rotor. A proposta I considera a segmentação com comprimento de segmentos e distâncias entre eles iguais. A proposta II considera dimensões e espaçamento dos segmentos diferentes. Por fim, a proposta III utiliza-se de segmentos com formato retangular.

4.1 Proposta I - Utilizando segmentos de arco com distâncias e comprimentos iguais

A primeira proposta considera que os segmentos possuem todas as mesmas dimensões e estão espaçados igualmente entre si em um mesmo polo. Para esse caso de segmentos e distâncias iguais entre si, as três variáveis livre de influências são o número de segmentos por polos, s_m , e o comprimento de segmento, δ , e também a distância entre polos, γ_p que é mantida livre para ser ajustada pela busca. De posse dessas variáveis independentes é possível calcular todas as demais variáveis relacionadas ao problema, como o caso da distância entre segmentos, γ . A Fig. 4.1 exemplifica uma distribuição dentro de um polo.

Figura 4.1 – Exemplo de modelo com segmentos de tamanho fixo



Fonte: Próprio autor, 2020

A primeira função objetivo desta proposta é OF_1 , baseada em (2.9) e apresentada em (4.1). Sua função é reduzir as onze primeiras harmônicas de B_{sl}^2 , e, assim, garantir que

o *cogging torque* sofra significativa atenuação. Esse número de harmônicas foi escolhido tendo em vista a baixa ordem de grandeza das harmônicas de ordens superiores, contudo, se uma maior acurácia for necessário esse número pode ser aumentado.

$$OF_1 = \sum_{n=1}^{11} \sum_{k=1}^N \left| \sin \left(nN_L \frac{\delta_k}{2} \right) \cos \left[nN_L \left(\sigma_k + \frac{\delta_k}{2} \right) \right] \right| \quad (4.1)$$

Já a segunda função objetivo dentro desta mesma proposta, OF_2 , busca introduzir melhorias à otimização. Esta segunda função compreende numa função de otimização, inicialmente de multiobjetivos, aglutinada em uma única e apresentada em (4.2). OF_2 é composta de três funções, começando pelo volume dos ímãs (V_M), a fundamental da densidade de fluxo no entreferro (B_1) e a amplitude de *cogging torque* (T_B) [9], que será explicada em detalhes abaixo.

$$OF_2 = \frac{V_M T_B^3}{B_1^2} \quad (4.2)$$

O objetivo de OF_2 é incluir na função objetivo a influência do volume e da densidade de fluxo no entreferro. Dessa forma, busca-se obter uma distribuição de segmentos que faça com que a máquina possua menor *cogging torque*, menor redução do torque desenvolvido, devido à perda de fluxo magnético, e mais leve e barata ao se utilizar de menos material magnético duro.

Os coeficientes geométricos da função OF_2 foram obtidos a fim de se ajustar a contribuição individual. Relevância é dada pelo valor dos expoente, sendo a maior relevância dada ao *cogging torque*, seguida da fundamental da densidade de fluxo no entreferro e tendo como menor contribuição, o volume do material magnético.

Em um primeiro momento, as equações mais simples obtidas nas Seções 2.1.3 e 2.2 considerando um comportamento ideal, desprezando os efeitos da dispersão e espraçamento, são utilizadas. O cálculo da amplitude da primeira harmônica da densidade de fluxo no entreferro é dado por meio de (4.3). Por sua vez, T_B é calculado por meio de (4.4).

$$B_1 = \frac{4B_M}{\pi} \sum_{k=1}^N \sin \left(p \frac{\delta_k}{2} \right) \sin \left[pN_L \left(\sigma_k + \frac{\delta_k}{2} \right) \right] \quad (4.3)$$

$$T_B = \max \left[nN_L G_{nN_s} B_{sl_{nN_L}} \sin(nN_L \alpha) \right] \quad (4.4)$$

Em um segundo momento, equações com maior acurácia são utilizadas, as mesmas apresentadas na Seção 2.3. Aqui, a amplitude da primeira harmônica da densidade de fluxo no entreferro é calculada por (4.5), enquanto T_B é obtido por meio de (2.20).

Por fim, a expressão (2.13), apresentada no Capítulo 2 é utilizada para o cálculo do volume do material magnético, V_M .

$$B_1(r, \theta) = \sum_{k=1}^N 2 \frac{B_r}{\mu_r} \alpha_{p_k} \frac{\sin \left(\frac{\pi \alpha_p}{2} \right)}{\frac{\pi \alpha_p}{2}} \frac{p}{p^2 - 1}.$$

$$\begin{aligned}
& \cdot \left\{ \frac{(p-1) + 2 \left(\frac{R_r}{R_m} \right)^{p+1} - (p+1) \left(\frac{R_r}{R_m} \right)^{2p}}{\frac{\mu_r + 1}{\mu_r} \left[1 - \left(\frac{R_r}{R_s} \right)^{2p} \right] - \frac{\mu_r - 1}{\mu_r} \left[\left(\frac{R_m}{R_s} \right)^{2p} - \left(\frac{R_r}{R_m} \right)^{2p} \right]} \right\} \\
& \cdot \left[\left(\frac{r}{R_s} \right)^{p-1} \left(\frac{R_m}{R_s} \right)^{p+1} + \left(\frac{R_m}{r} \right)^{p+1} \right] \cos[p(\theta - \sigma_k)]
\end{aligned} \tag{4.5}$$

4.1.1 Restrições

Para garantir a viabilidade do ponto ótimo, do ponto de vista construtivo, bem como direcionar o processo de otimização, uma série de restrições foi adotada para ambas as funções objetivo e estão listadas a seguir:

1. O número de segmentos deve estar entre a faixa de 2 a 10;
2. O comprimento dos segmentos devem ser maiores que $12^\circ/2p$ e inferiores à $90^\circ/2p$;
3. Distância entre segmentos maiores que $0,5^\circ$
4. A amplitude da harmônica fundamental da densidade de fluxo do entreferro deve ser no mínimo 95% do valor de referência.

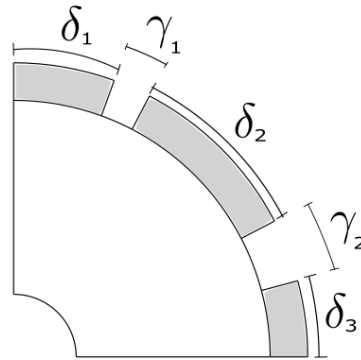
As três primeiras restrições tem como objetivo impedir que o processo de otimização resulte num número de segmentos exageradamente grande, segmentos muito pequenos ou próximos demais uns dos outros. A última restrição, sobre a amplitude da fundamental da densidade de fluxo do entreferro, é para assegurar que a redução do *cogging torque* não seja feita em detrimento de uma acentuada redução da densidade de fluxo no entreferro da máquina. Os valores limites dessas restrições foram estabelecidos a fim de guiar o processo de otimização. Tais valores podem ser revistos para casos específicos de máquinas ou a critério do projetista.

4.2 Proposta II - Utilização de Segmentos de arco com comprimentos e distancias independentes

A segunda proposta consiste em retirar a limitação da proposta I, onde todos os segmentos possuem tamanhos fixos, assim como a distância entre eles. Como efeito desse maior grau de liberdade na busca, aumenta-se o número de variáveis independentes sendo agora acrescido a o comprimento do segmentos, δ . Dessa forma as quatro variáveis independentes de interesse a serem otimizadas são número de segmentos, s_m , comprimento de segmento, δ , e distância entre polos, γ_p e comprimento do segmentos, δ . Vale ressaltar

que essa distribuição com segmentos variados é replicada para todos os demais polos. Assim, a simetria da máquina é mantida, bem como seu equilíbrio. A Fig. 4.2 ilustra essas distâncias e espaços variáveis.

Figura 4.2 – Exemplo de modelo com segmentos de tamanho desigual



Fonte: Próprio autor, 2020

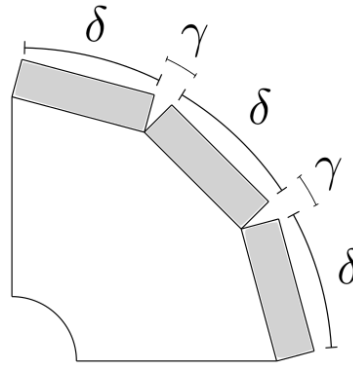
A principal justificativa para aumentar o grau de liberdade das disposições de segmentos é poder explorar o maior número de combinações e encontrar, dentre elas, a melhor. Por outro lado, o número de variáveis, assim como o espaço amostral de otimização, aumenta significativamente. Isto significa que o tempo de busca do ponto ótimo para essa proposta é sensivelmente maior que as demais.

4.3 Proposta III: Utilização de Blocos Retangulares

Nessa proposta são utilizados segmentos de ímãs com formato retangular com o intuito de se avaliar a utilização desse formato de ímãs na redução do *cogging torque*. Como se trata de uma geometria mais complexa, optou-se por utilizar uma otimização com os comprimentos de segmentos e distância entre eles iguais entre si, como realizado para a primeira proposta. Nesse caso, de forma análoga à Proposta I, as três variáveis livres são o número de segmentos por polo, s_m , a distância entre polos, γ_p , e o comprimento de segmentos δ . A Fig. 4.3 exemplifica essa distribuição.

Como demonstrado no Capítulo 3, para segmentos suficientemente pequenos, o comportamento da densidade de fluxo no entreferro para a geometria retangular pode ser aproximado para segmentos de ímãs em arco. Uma vez que as restrições consigam garantir segmentos em que essa aproximação se torne válida, as funções objetivos apresentadas na Seção 4.1 podem ser aplicadas.

Figura 4.3 – Exemplo de modelo com blocos retangulares



Fonte: Próprio autor, 2020

4.3.1 Restrições

As restrições aplicadas a essa terceira proposta têm como principal objetivo garantir que o comportamento do fluxo seja aproximadamente igual ao de arco, além de atender às peculiaridades da segmentação em bloco retangular e garantir a viabilidade do ponto ótimo, do ponto de vista construtivo. Essas restrições são listadas a seguir:

1. O número de segmentos deve estar entre a faixa de 2 a 10;
2. O comprimento dos segmentos deve ser maiores que $12^\circ/2p$ e inferiores à 20° ;
3. Distância entre segmentos maiores que 0.5° e maior que γ_{min} calculado.
4. A amplitude da harmônica fundamental da densidade de fluxo do entreferro deve ser no mínimo 95% do valor de referência.

Note que foram acrescentadas às restrições da seção 4.1 duas novas restrições construtivas. São estas a restrição de um tamanho máximo aos segmentos ($\delta < 20^\circ$) para que a validade das aproximações seja garantida e as expressões de OF_1 e OF_2 sejam aplicadas. A outra restrição consiste na distância mínima não ser inferior à distância mínima γ_{min} imposta pela geometria em bloco e explicada no Capítulo 3.

4.4 Algoritmos Genéticos

Para encontrar o ponto ótimo, uma busca por algoritmo genético foi aplicada às propostas apresentadas na seção anterior. A busca por algoritmo genético trata-se de uma técnica de otimização heurística que se inspira na teoria da seleção natural das espécies [22].

Na natureza, os indivíduos de uma população que foram melhores adaptados ao meio ambiente possuem maior chance de sobreviverem e passar seus genes adiante. Dessa forma, novas populações são geradas e o ciclo continua por incontáveis gerações e

determinadas características são estimuladas no processo. De forma simples, os algoritmos genéticos essa mesma ideia é seguida.

Inicialmente é proposto um conjunto de candidatos à solução de um problema. Essa é a chamada população inicial. Por meio de uma função avaliadora, essas soluções são testadas e uma amostra contendo os melhores candidatos são combinadas entre si para dar origem a uma novo conjunto de candidatos à solução. É por meio de diversas gerações que uma solução satisfatória é obtida para o problema. Trata-se do chamado ponto ótimo. A Fig. 4.4 ilustra o fluxograma do algoritmo genético.

Figura 4.4 – Fluxograma do Algoritmo Genético



Fonte: André Pacheco, 2020

Neste trabalho, para a otimização por algoritmos genéticos, foi utilizada a função `ga()` da biblioteca do Matlab. Outros métodos de busca poderiam ser implementados, contudo o foco deste trabalho foi obter modelos, funções objetivos e conjuntos de restrições adequados. A função `ga()` foi adotada como meio de busca para o ponto ótimo devido à facilidade de implementação. Neste trabalho, parâmetros permaneceram todos com os valores padrão da função. Dessa forma o número inicial da população foi de 50 indivíduos, e o limite de gerações permitidas de 300, tolerância de restrição é de 1.10^{-3} [23]. podem ser consultadas em Os detalhes da utilização da função `ga()` na otimização da segmentação estão descritos em maiores detalhes na Fig.4.5.

Figura 4.5 – Trecho do código de otimização

```

44 - dadosB = [ tau_p, Brem, mu_0, p, Rr, Rm, Rs, mu_r, r, nmax, r, lef, alphay, W, yq, Ns, q];
45 - lambda = [ lambdaR; lambdaT];
46
47 - lb = [ 2, 12/p, 0];
48 - ub = [ 10, 90/p, 60/p];
49 - x0 = lb;
50
51 [ x, fval] = ga(@(x)OF(x,dadosB,lambda,theta),3,[],[],[],[],lb,ub,@(x)con1(x,dadosB,B1thrs,theta,gammaThrs),1);
52

```

Fonte: Próprio autor, 2020

A linha 51 do código na Fig. 4.5 trata-se da otimização da função objetivo `OF`. A

função objetivo é definida no programa de acordo com a Proposta utilizada, assim como suas restrições. As variáveis lb e ub são vetores que armazenam respectivamente os limites inferiores e superiores das variáveis utilizadas no problema.

São essas variáveis independente, para as Propostas I e III, o número de segmentos por polo, s_m , tamanho dos segmentos, δ e a distância entre segmentos, γ . E devido ao maior grau de liberdade da Proposta II, uma quarta variável independente é acrescentada: a distância entre segmentos, γ . Sendo todas essas variáveis armazenadas pelo vetor x , como mostrado na Fig.4.5. A restrição não linear, da fundamental da densidade de fluxo, $B1$, é dada pela função "con1", onde seu valor é calculado para cada candidato a solução dados pelo vetor de variáveis x .

5 Resultados em elementos finitos

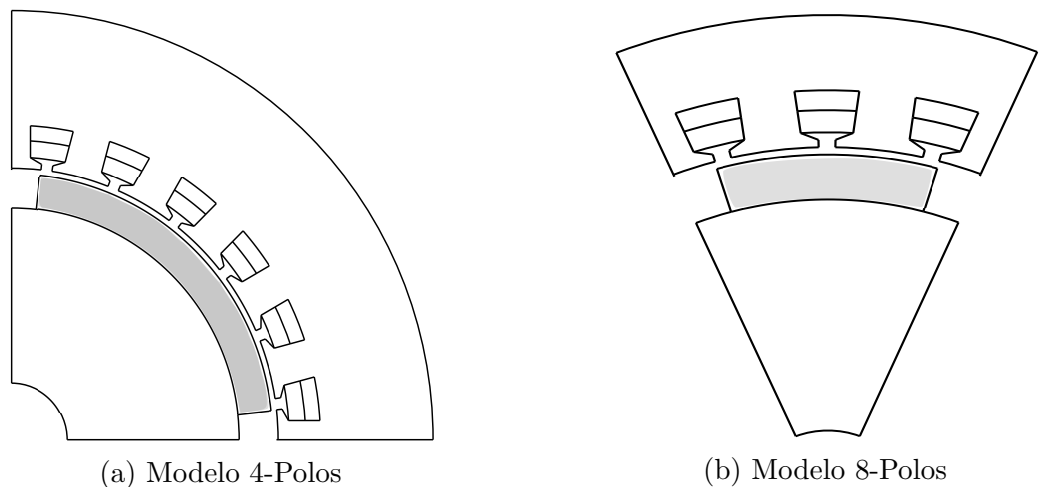
Com o intuito de se validar as propostas de processo de otimização apresentadas no Capítulo 4, simulações em elementos finitos foram realizadas para máquinas de quatro e oito polos cujos parâmetros estão listados na Tabela 5.1. O presente capítulo apresenta os resultados obtidos por meio de tais análises, bem como comparações entre os resultados e discussões sobre eles.

Tabela 5.1 – Parâmetros das máquinas de referência.

Parâmetro	Valor
Diâmetro interno do estator [mm]	96
Comprimento do pacote magnético [mm]	102
Entreferro [mm]	1
Abertura das ranhuras [mm]	2
Número de polos	4, 8
Número de ranhuras	24
Velocidade nominal [rpm]	1500
Potência nominal [W]	736

Para fins de validação, os resultados das máquinas cujo formato dos polos emprega a metodologia proposta no presente trabalho foram comparados com máquinas de referência. Essas máquinas possuem polos não segmentados, sendo o comprimento polar dos ímãs da máquina de quatro polos igual a $77,55^\circ$ e da máquina de oito igual a $32,55^\circ$, conforme a Fig. 5.1.

Figura 5.1 – Modelos de Referência



Fonte: Próprio autor, 2020

Vale ressaltar que os valores de comprimento polar do ímã, β , das máquinas de referência foram obtidos considerando o proposto em [18], cuja equação utilizada é apresentada aqui, em (5.1), por conveniência, com o intuito de se reduzir o valor de pico do *cogging torque*.

$$\beta = \left(b \frac{N_s}{N_L} + 0.17 \right) \frac{2\pi}{N_s}, \quad b = 1, 2, \dots \quad (5.1)$$

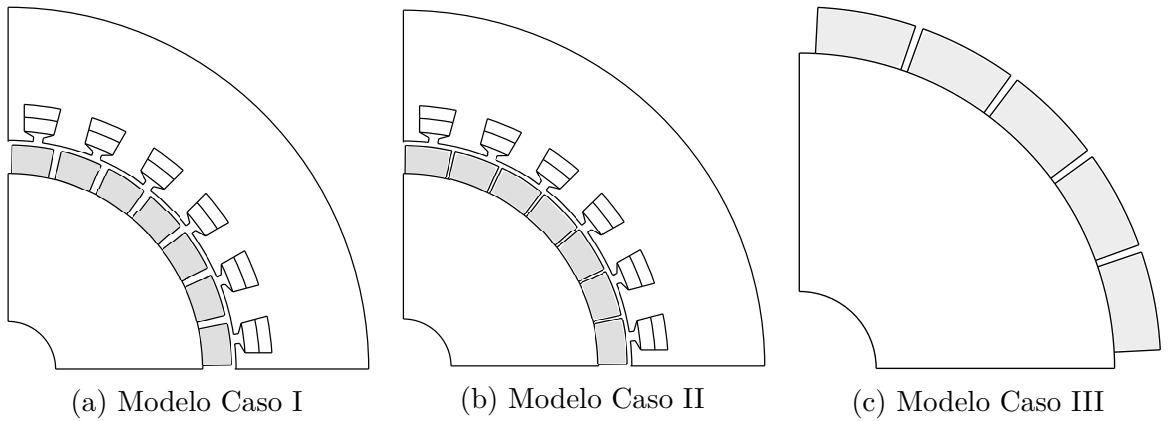
5.1 Resultados da Proposta I

Na Proposta I, como realizado pelo autor em [24], as funções objetivo (4.1) e (4.2) presentes em 4, foram otimizadas por meio de algoritmos genéticos utilizando a função `ga()` no Matlab.

5.1.1 Modelo de 4-Polos

Os modelos criados a partir de (4.1) e (4.2) foram chamados de Caso I e II, onde foram utilizadas as funções OF1 e OF2 respectivamente, ambos utilizando a expressão (2.9) do *cogging torque* e são mesmos presentes em [24]. Posteriormente, como mostrado na Seção 2.3, uma nova expressão para o *cogging torque* foi obtida. Essa expressão foi então aplicada à função objetivo 4.2 a ser otimizada. Ao modelo criado por esse último processo, deu-se o nome de Caso III. Os modelos, para a máquina de 4-Polos, estão presentes na Fig. 5.2.

Figura 5.2 – Modelos de 4-polos para segmentos fixos

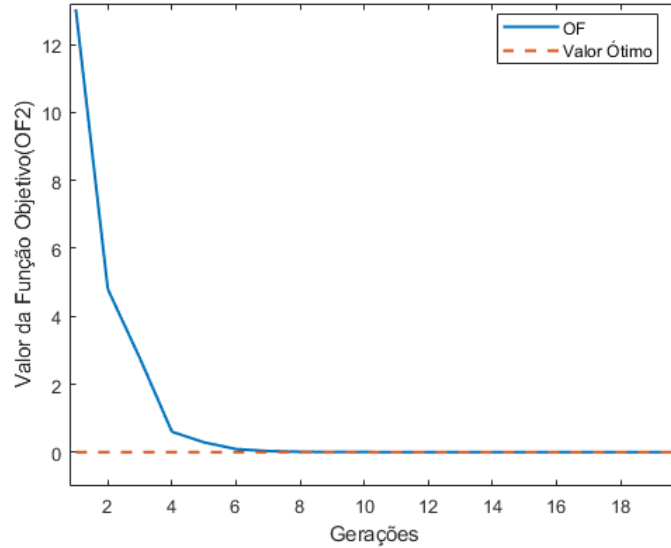


Fonte: Próprio autor, 2020

O processo de otimização utilizado na obtenção dos parâmetros da máquina do Caso III, está presente na Fig. 5.3. Foram utilizadas 138 gerações, onde para cada geração, um valor médio da OF2 é obtido e apresentado no gráfico da Fig. 5.3 as primeiras 20 gerações apresentadas para melhor visualização. Percebe-se uma rápida minimização da função dentro das primeiras 10 gerações, sendo a busca mais precisa continuada dentro

das vizinhanças do ponto ótimo até se estabilizar no valor ótimo da função encontrado de 0,0044.

Figura 5.3 – Proposta I - Evolução do Processo de Otimização por Algoritmo Genético (4-Polos)

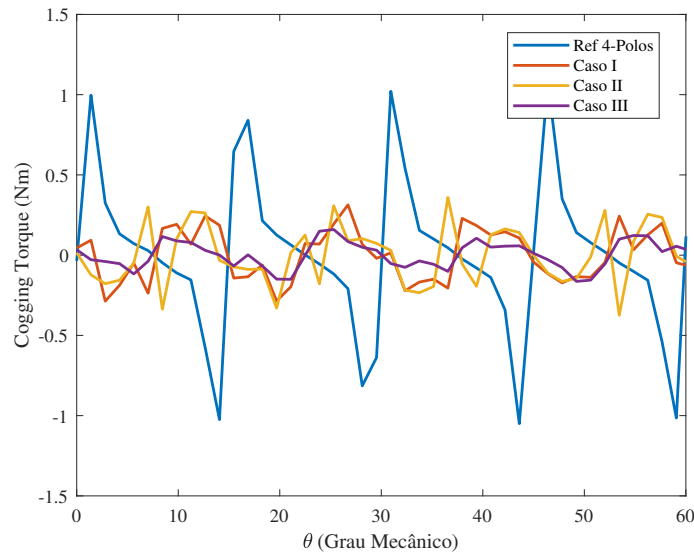


Fonte: Próprio autor, 2020

Após os modelos obtidos (Ref, Casos I, II e III) serem simulados, por meio de elementos finitos, os resultados obtidos foram reunidos nas Fig. de 5.4 a 5.7, onde são comparadas as formas de onda do *cogging torque*, fluxo concatenado, força contra-eletromotriz e torque desenvolvido. Além disso, os parâmetros construtivos desses modelos, bem como os valores da amplitude do *cogging torque*, volume total dos ímãs, harmônica fundamental, $B1$, torque médio desenvolvido e sua oscilação estão presentes na Tabela 5.2.

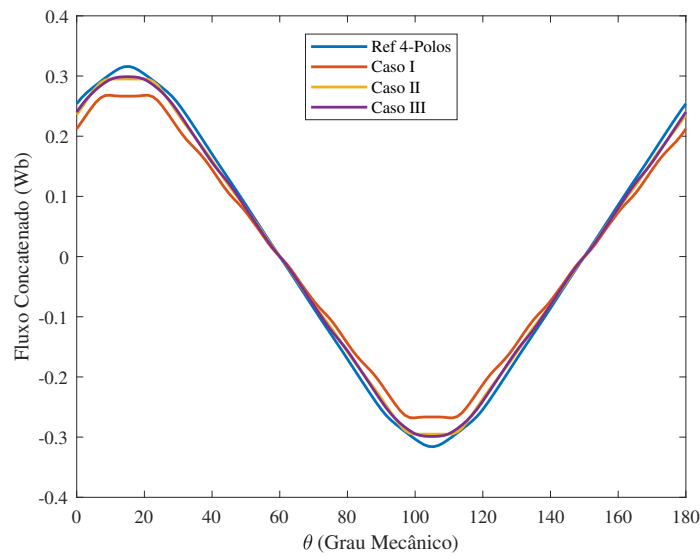
As formas de onda do *cogging torque* para os três casos, bem como a máquina de referência, são apresentadas na Fig. 5.4, onde os ângulos são limitados até 60° para melhor visualização. Observa-se que todos os casos conseguiram reduzir a amplitude do *cogging torque*. Além disso, a presença de uma maior oscilação na forma de onda evidencia a eliminação (ou redução) das suas harmônicas de baixa ordem.

Por sua vez, o fluxo concatenado pelos enrolamentos é apresentando na Fig. 5.5. A partir de seus valores de pico é possível notar que, de fato, a técnica de segmentação dos polos afeta negativamente a densidade de fluxo do entreferro. Todavia, note que essa redução, como evidenciado nos casos II e III, pode ser mitigada por meio de um processo de otimização.

Figura 5.4 – Proposta I (4-Polos): Forma de onda do *cogging torque*

Fonte: Próprio autor, 2020

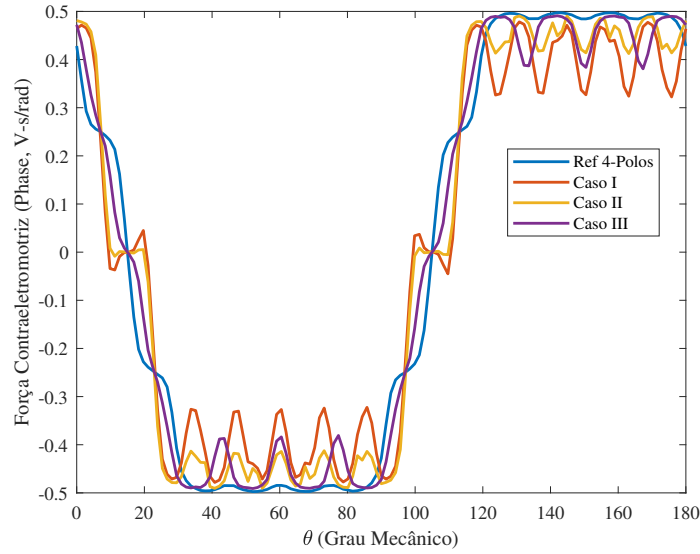
Figura 5.5 – Proposta I (4-Polos): Forma de onda do fluxo concatenado



Fonte: Próprio autor, 2020

As formas de onda da força contra-eletromotriz de todos os casos e da máquina de referência podem ser visualizadas na Fig. 5.6. Nota-se uma ligeira atenuação em sua amplitude nos casos de I a III, devido à atenuação na fundamental da densidade de fluxo do entreferro. Além disso, percebe-se que possuem maior oscilação, fato decorrente do espaçamento entre os segmentos. Pela Tabela 5.2, verifica-se que o caso I apresenta o maior valor de distância entre segmentos, sendo este justamente o que possui a força contra-eletromotriz com maior oscilação.

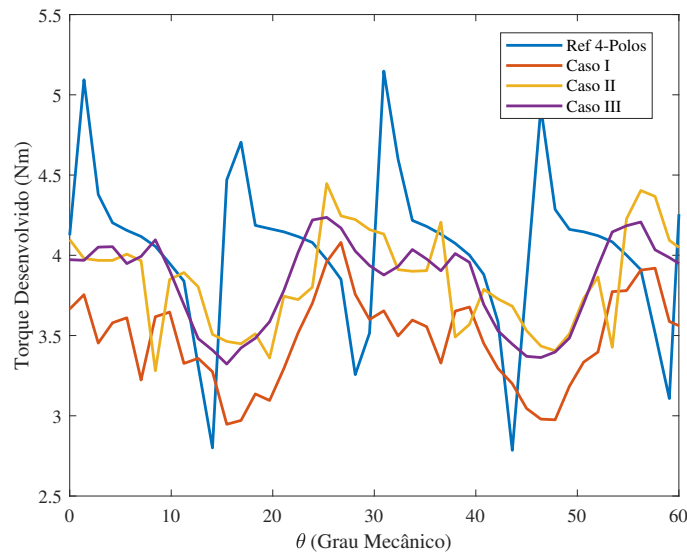
Figura 5.6 – Proposta I (4-Polos)s: Forma de onda da força contra-eletromotriz



Fonte: Próprio autor, 2020

Por fim, a forma de onda do torque eletromagnético desenvolvido pelas máquinas é apresentado na Fig. 5.7. Verifica-se que o valor médio do torque nos casos I, II e III é inferior ao valor de referência, efeito causado pela já mencionada redução na densidade de fluxo do entreferro. Além disso, percebe-se uma redução no pico da oscilação no torque desses casos, fenômeno causado pela diminuição da amplitude do *cogging torque*.

Figura 5.7 – Proposta I (4-Polos): Forma de onda do torque desenvolvido



Fonte: Próprio autor, 2020

Os valores referentes à geometria das máquinas de referência e dos três casos, bem como do pico do *cogging torque*, volume dos ímãs, amplitude da fundamental da densidade de fluxo no entreferro, valor médio do torque desenvolvido e sua oscilação, T_R ,

são apresentados na Tabela 5.2. Observa-se, primeiramente, que as restrições referentes à geometria foram atendidas. Também nota-se que os casos de I a III conseguiram reduzir o pico do *cogging torque*, sendo a maior redução de cerca de 72% no caso I, todavia esse foi o caso que apresentou maior degradação na densidade de fluxo, cerca de 14%.

Quanto à restrição referente à densidade de fluxo, nota-se que o caso I foi o único que não a atendeu. Tal fato decorre da limitação das equações utilizadas nesse caso, haja vista que muitas considerações são feitas para a obtenção das mesmas. Vale mencionar que o caso II utiliza as mesmas equações do caso I nesse quesito, todavia, a restrição foi atendida.

Observa-se que o volume dos ímãs sofreu aumento nos casos II e III quando comparados com o valor de referência. Isso ocorre pois não há restrição quanto seu valor máximo. Além disso, vale mencionar que esse maior valor de volume (cerca de 8% no pior caso) é acompanhado de redução nas oscilações do torque.

Por fim, pode-se observar que o valor médio do torque sofre redução bem similar àquela da densidade de fluxo no entreferro. O valor de tal redução é de cerca de 14%, 5% e 5% respectivamente para os casos I, II e III. Percebe-se também que as ondulações no torque são reduzidas e é válido mencionar que o caso III apresentou menor valor nesse quesito que o caso I graças ao seu maior valor médio do torque.

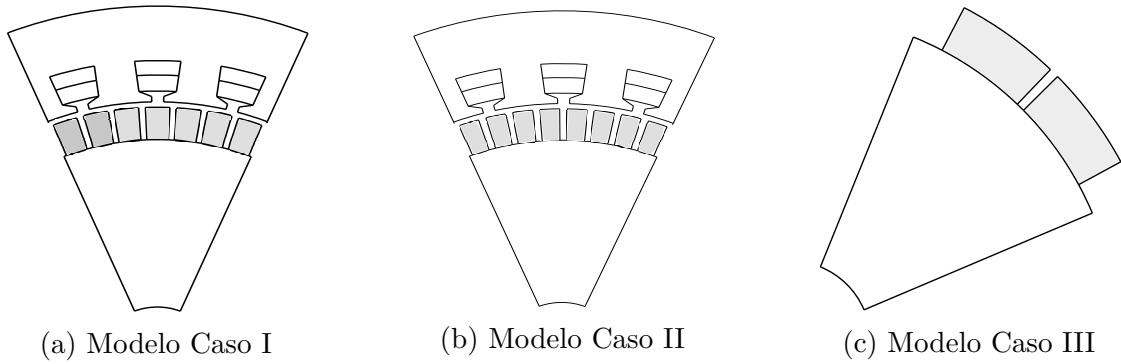
Tabela 5.2 – Proposta I: Resultados para a máquina 4-polos.

Parâmetro	Ref	Caso I	Caso II	Caso III
N	1	7	7	5
δ_k	77,55°	10,71°	11,97°	15,84 °
γ	—	2,14°	0,99°	1,23°
Passo polar	77,55°	87,86°	89,69°	84,12°
T_C [Nm]	1,066	0,300	0,367	0,323
V_M [dm ³]	0,146	0,141	0,158	0,149
B_1 [T]	1,120	0,964	1,064	1,065
T_D [Nm]	4,034	3,472	3,831	3,839
T_R [(%)]	58,58	32,64	30,44	23,81

5.1.2 Modelo de 8-Polos

O mesmo processo realizado na seção 5.1.1 é repetido para a máquina de 8-Polos. Como resultado são obtidos os modelos dos Casos I, II e III aplicados à máquina de 8-Polos. A Fig. 5.8 apresenta os modelos dos Casos I, II e III.

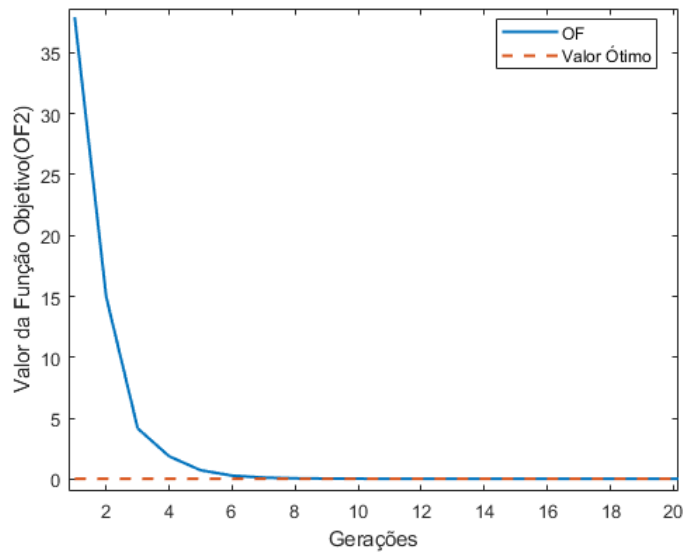
Figura 5.8 – Modelos de 8-polos para segmentos fixos



Fonte: Próprio autor, 2020.

No processo de otimização para obtenção dos parâmetros da máquina do Caso III foram necessários 142 gerações. Os resultados da minimização da função objetivo OF2 é apresentado nas primeiras 20 gerações na Fig. 5.9. O valor minimizado da função obtido foi de 0,0286.

Figura 5.9 – Proposta I - Evolução do Processo de Otimização por Algoritmo Genético (8-Polos)



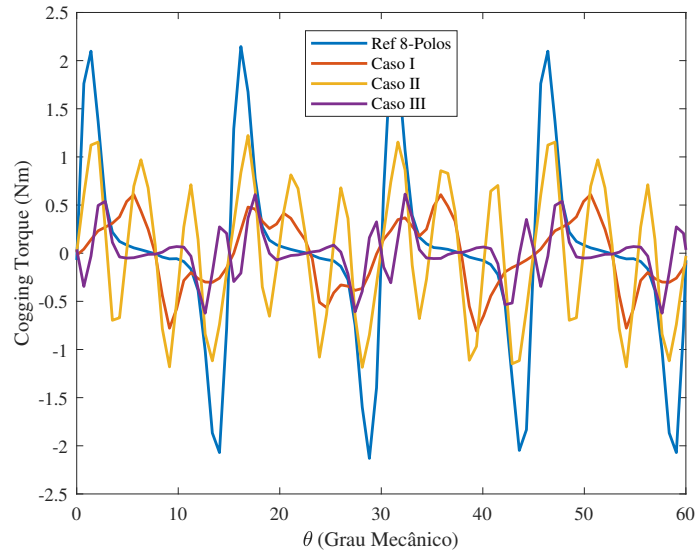
Fonte: Próprio autor, 2020

Os resultados são mostrados nas Fig. de 5.11 a 5.13 onde são comparadas as formas de onda do *cogging torque*, fluxo concatenado, força contra-eletromotriz e torque desenvolvido obtidas no modelo Ref além dos Casos I, II e III. A Tabela 5.3 reúne os parâmetros construtivos dos modelos utilizados e o resultado dos mesmo quanto à amplitude do *cogging torque*, volume total dos ímãs, harmônica fundamental $B1$, torque médio desenvolvido e sua oscilação.

A Fig. 5.10 apresenta as formas de onda do *cogging torque* para as máquinas de referência e dos casos I a III. Nota-se, primeiramente, a redução no seu valor de pico, bem

como mais oscilações, nas máquinas dos casos I, II e III. Tal fenômeno é causado pela eliminação ou redução da amplitude das harmônicas de baixa ordem do *cogging torque*.

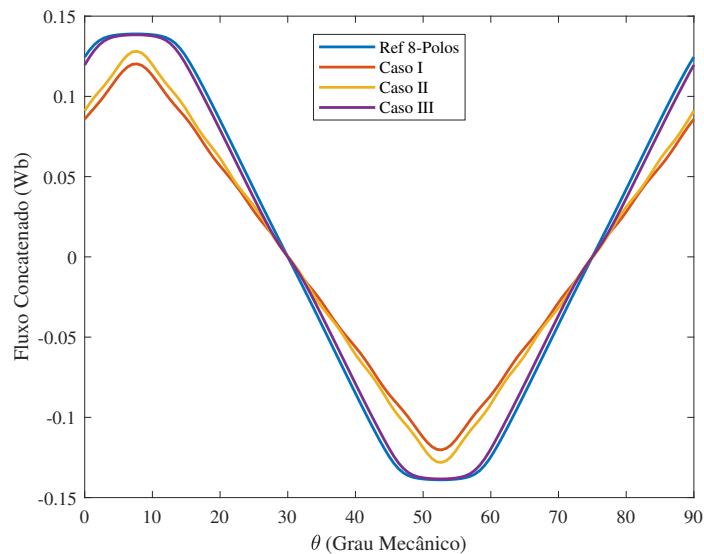
Figura 5.10 – Proposta I (8-Polos): Forma de onda do *cogging torque*



Fonte: Próprio autor, 2020

O comportamento do fluxo concatenado pelos enrolamentos para as máquinas descritas pode ser visualizado na Fig. 5.11. Nota-se, novamente, uma redução em seu valor de pico pros três casos graças à diminuição no fluxo da máquina. Além disso, a forma de onda dos Casos I e II possuem picos mais agudos, quando comparados a Ref e Caso III, devido ao maior valor de comprimento polar do ímãs que possuem.

Figura 5.11 – Proposta I (8-Polos): Forma de onda do fluxo concatenado

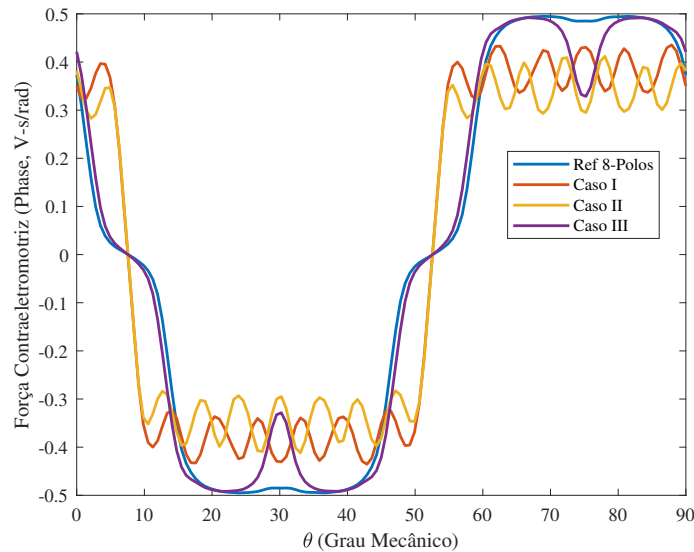


Fonte: Próprio autor, 2020

A forma de onda da força contra-eletromotriz é apresentada na Fig. 5.12 para todas

as máquinas mencionadas na presente seção. Verifica-se que os casos I e II apresentam elevada atenuação do patamar da força contra-eletromotriz causada pela diminuição no fluxo da máquina. Observa-se também que a forma de onda desses dois casos se difere dos demais, fenômeno causado pelo aumento do comprimento polar do ímãs nessas máquinas. Além disso, a força contra-eletromotriz dos três casos oscila mais que a de referência devido a distância entre os segmentos.

Figura 5.12 – Proposta I (8-Polos): Forma de onda da força contra-eletromotriz



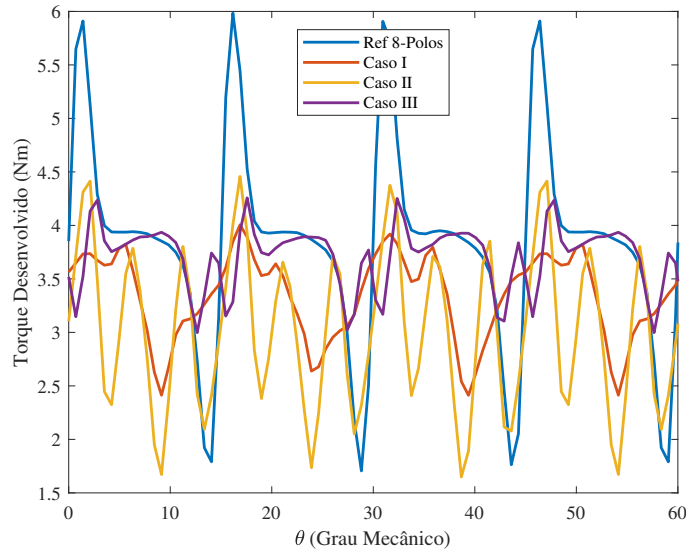
Fonte: Próprio autor, 2020

Por fim, as formas de onda do torque eletromagnético desenvolvido pelas máquinas são apresentadas na Fig. 5.13. Pode-se notar que o valor médio do torque sofreu redução nos três casos sendo o fenômeno responsável por tal diminuição o mesmo do fluxo concatenado e força contra-eletromotriz. Nota-se também uma redução no pico das oscilações do torque decorrente da atenuação na amplitude do *cogging torque*.

As dimensões das máquinas, bem como o valor de seus parâmetros de interesse, são apresentados na Tabela 5.3 para a máquina de oito polos. Nota-se primeiramente que as restrições geométricas são todas atendidas. Todavia, devido à limitação das equações utilizadas nos casos I e II, a restrição acerca da densidade de fluxo não foi atendida nesses casos, sendo o valor da redução cerca de 13% e 21%, respectivamente.

É possível verificar, novamente, que o torque médio sofre redução similar à da densidade de fluxo, sendo cerca de 13%, 21% e 3% para os casos I, II e III, nessa ordem. Verifica-se também que, em todos os três casos, as ondulações no torque foram reduzidas. A maior redução nas oscilações ocorreu no caso III, graças ao seu maior valor de torque médio e a maior redução no *cogging torque* (cerca de 71%). Observa-se também que o volume de ímãs do caso III é praticamente igual ao valor de referência.

Figura 5.13 – Proposta I (8-Polos): Forma de onda do torque desenvolvido



Fonte: Próprio autor, 2020

Tabela 5.3 – Proposta I: Resultados para a maquina 8-polos.

Parâmetro	Ref	Caso I	Caso II	Caso III
N	1	7	8	2
δ_k	32,55°	5,02°	4,04°	16,22°
γ	—	1,41°	1,69°	1,52°
Passo polar	32,55°	43,59°	44,12°	33,96°
T_C [Nm]	2,138	0,709	1,204	0,618
V_M [dm ³]	0,122	0,132	0,121	0,122
B_1 [T]	1,035	0,897	0,811	1,004
T_D [Nm]	3,844	3,342	3,019	3,710
T_R [(%)]	111,29	47,69	93,04	33,94

5.2 Resultados da Proposta II

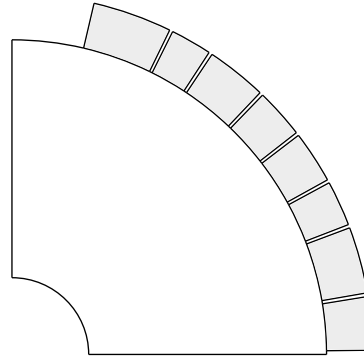
Na Proposta II é utilizado a função objetivo (4.2) e considerando a expressão mais completa do *cogging torque*, dada por (2.20), de forma análoga ao Caso III da Proposta I, contudo utilizando segmentos com tamanhos e distâncias variáveis. Para uma maior clareza, o caso proposto aqui foi chamado de Caso IIIb e o modelo do Caso III criado na Seção 5.1 foi rebatizado aqui para Caso IIIa.

5.2.1 Modelo de 4-Polos

Os modelos obtidos para a máquina de quatro polos do caso IIIb se encontram na Fig. 5.14. Os resultados para esse modelo se encontram nas Fig. de 5.16 a 5.19, onde são comparadas as formas de onda do *cogging torque*, fluxo concatenado, força contra-

eletromotriz e torque desenvolvido obtidas desse caso com o de Ref e caso IIIa. A Tabela 5.4 reúne os parâmetros construtivos dos modelos utilizados e o resultado dos mesmo quanto a amplitude do *cogging torque*, volume total dos ímãs, harmônica fundamental $B1$, torque médio desenvolvido e sua oscilação.

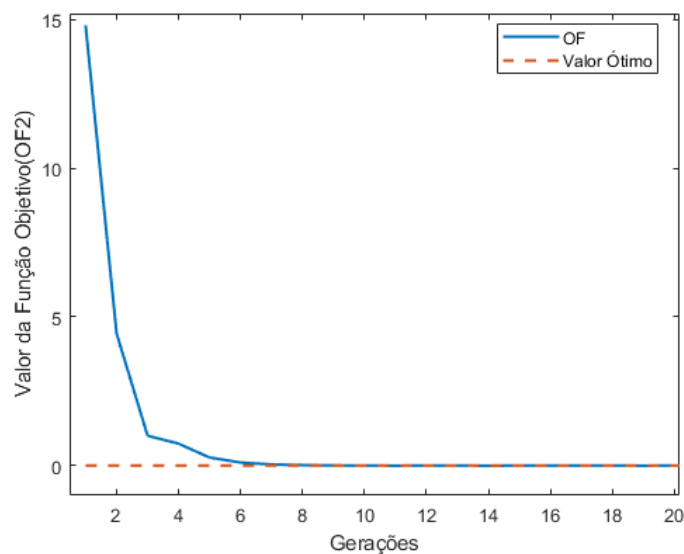
Figura 5.14 – Modelo de 4-Polos: Rotor do Caso IIIb



Fonte: Próprio autor, 2020

No processo de otimização para obtenção dos parâmetros da máquina do Caso II foram necessários 283 gerações. Valor mais alto que requisitado na Proposta I devido ao maior nível de complexidade da distribuição. Os resultados da minimização da função objetivo OF2 é apresentado nas primeiras 20 gerações na Fig. 5.15. O valor minimizado da função obtido foi de 0,0014.

Figura 5.15 – Proposta II - Evolução do Processo de Otimização por Algoritmo Genético (4-Polos)

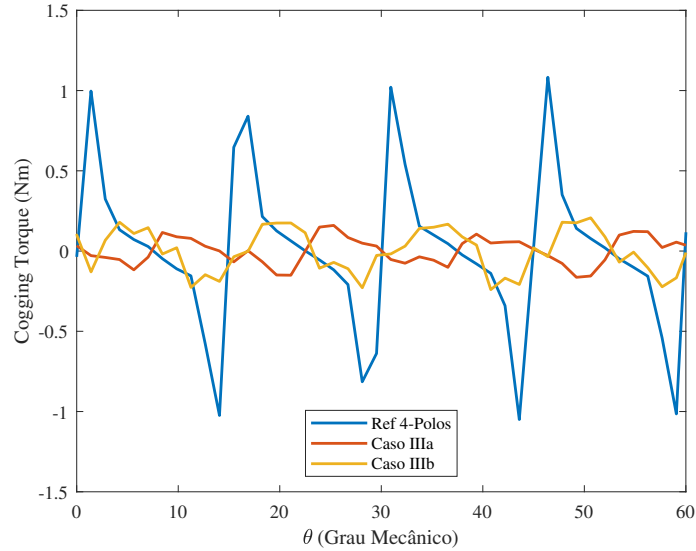


Fonte: Próprio autor, 2020

A forma de onda do cogging torque para a máquina de referência, caso IIIa e IIIb é apresentada na Fig. 5.16. Novamente, percebe-se que seu valor de pico sofre redução,

enquanto suas oscilações aumentam graças à evidenciação das harmônicas de alta ordem desse torque em detrimento daquelas de baixa ordem eliminadas/reduzidas.

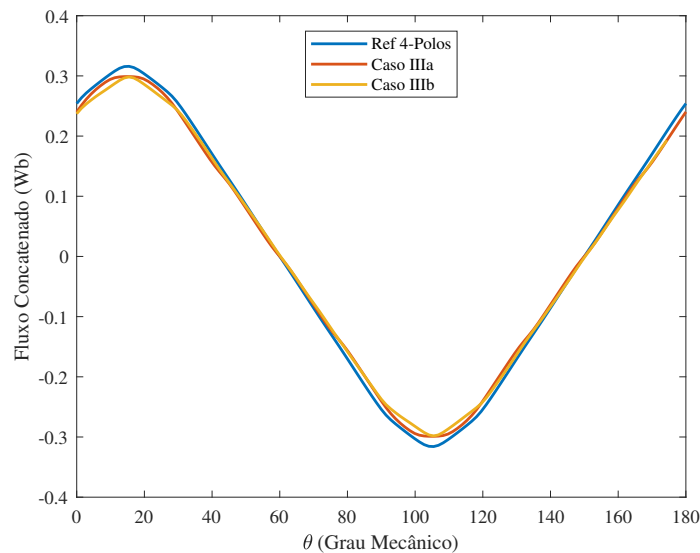
Figura 5.16 – Proposta II (4-Polos): Forma de onda do *cogging torque*



Fonte: Próprio autor, 2020

O efeito da segmentação dos polos no fluxo concatenado pelos enrolamentos quando se utiliza a Proposta II pode ser analisado pela Fig. 5.17. Mais uma vez percebe-se o efeito negativo da queda no fluxo da máquina causado pela segmentação dos polos.

Figura 5.17 – Proposta II (4-Polos): Forma de onda do fluxo concatenado

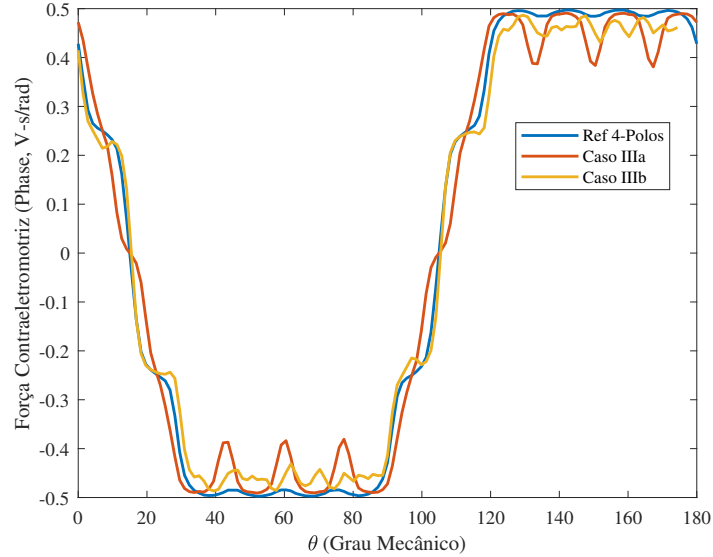


Fonte: Próprio autor, 2020

Por sua vez, o efeito da segmentação dos polos na força contra-eletromotriz nos casos IIIa e IIIb pode ser visto na Fig. 5.18. Como pode ser observado pela Tabela 5.3, a

distância entre segmentos do caso IIIb é inferior ao IIIa, por isso a força contra-eletromotriz nesse caso possui menor oscilação.

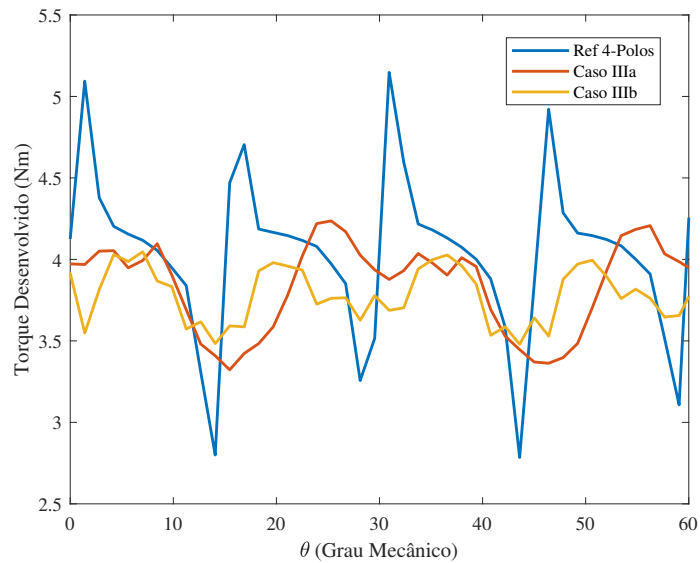
Figura 5.18 – Proposta II (4-Polos): Forma de onda da força contra-eletromotriz



Fonte: Próprio autor, 2020

Por fim, uma rápida comparação entre o torque da máquina de referência e os casos IIIa e IIIb, apresentada na Fig. 5.19, permite verificar a redução sofrida pelo torque desenvolvido pelas máquinas. Mais uma vez, tal efeito é causado pela atenuação na harmônica fundamental da densidade de fluxo do entreferro. Todavia, por consequência da diminuição do *cogging torque*, as ondulações no torque também sofrem redução.

Figura 5.19 – Proposta II (4-Polos): Forma de onda do torque desenvolvido



Fonte: Próprio autor, 2020

A Tabela 5.4 traz de, maneira sucinta, os resultados obtidos referentes à dimensão das máquinas e de seus parâmetros de saída. Verifica-se que todas as restrições geométricas foram atendidas. A utilização de segmentos com espaçamento e comprimento desiguais provoca uma redução de aproximadamente 79% no *cogging torque* da máquina de quatro polos, com redução de cerca de 6% no torque desenvolvido (aproximadamente 6% na densidade de fluxo do entreferro), além de também garantir uma redução no volume utilizado de ímãs.

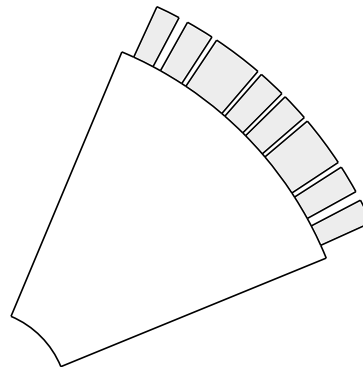
Tabela 5.4 – Proposta II: Resultados para a maquina 4-polos.

Parâmetro	Ref	Caso IIIa	Caso IIIb
N	1	5	8
δ_k	77,55°	15,84 °	12,77°; 6,67°; 9,77°; 8,03°; 8,45°; 7,32°; 10,70°; 8,58°
γ	—	1,23°	0,53°; 0,57°; 0,55°; 0,54°; 0,54°; 0,55°; 0,59°
Passo polar	77,55°	84,12°	76,16°
T_C [Nm]	1,066	0,323	0,224
V_M [dm ³]	0,146	0,149	0,136
B_1 [T]	1,120	1,065	1,052
T_D [Nm]	4,034	3,839	3,787
T_R [(%)]	58,58	23,81	15,28

5.2.2 Modelo de 8-Polos

O modelo obtido para a máquina de oito polos se encontra na Fig. 5.20 para o Caso IIIb.

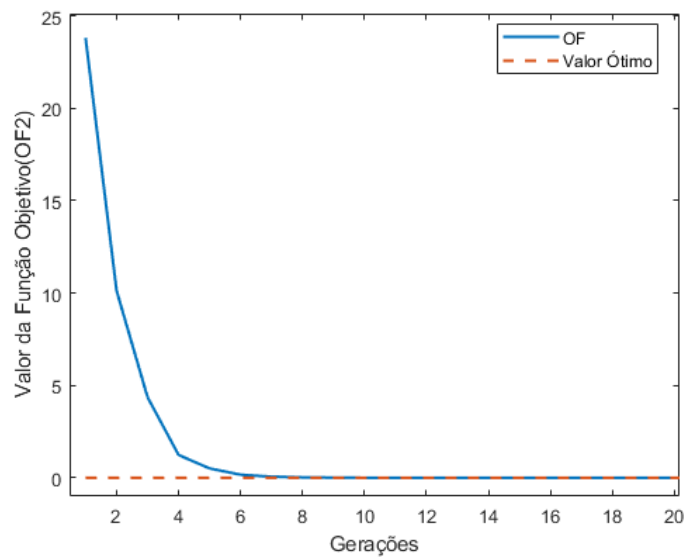
Figura 5.20 – Modelo de 8-Polos: Rotor do Caso III (Segmentos Desiguais)



Fonte: Próprio autor, 2020

Para a obtenção dos parâmetros da máquina do Caso IIIb foram necessários 297 gerações. O valor minimizado obtido foi de 0,0046. Os resultados da minimização da função objetivo OF2 é apresentado nas primeiras 20 gerações na Fig. 5.21.

Figura 5.21 – Proposta II - Evolução do Processo de Otimização por Algoritmo Genético (8-Polos)



Fonte: Próprio autor, 2020

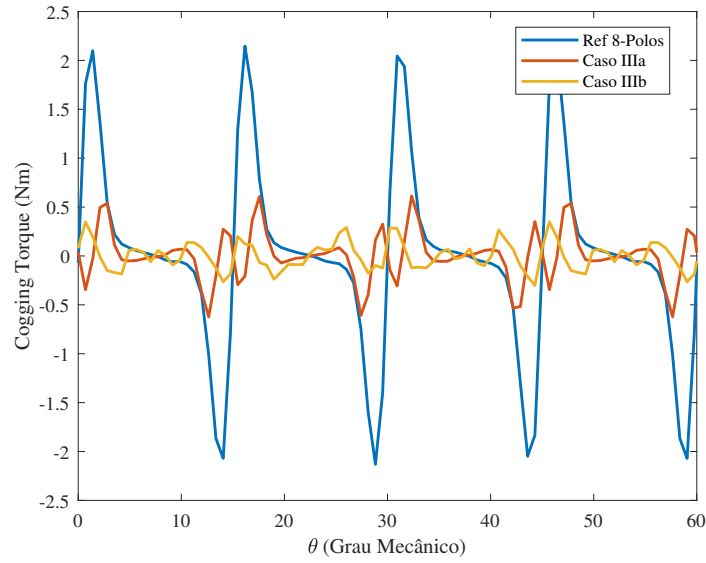
Os resultados para a máquina de 8-Polos se encontram nas Figs. de 5.22 a 5.25, sendo comparadas as formas de onda do *cogging torque*, fluxo concatenado, força contra-eletromotriz e torque desenvolvido obtidas para a máquina de referência e dos casos IIIa e IIIb. A Tabela 5.5 reúne os parâmetros construtivos dos modelos mencionados e o resultado dos mesmos, referentes à amplitude do *cogging torque*, volume total dos ímãs, harmônica fundamental $B1$, torque médio desenvolvido e sua oscilação.

As formas de onda do *cogging torque* para a referência e os casos IIIa e IIIb, são apresentadas na Fig. 5.22. Observa-se que ambos os casos conseguiram reduzir a amplitude do *cogging torque* bem como que essa parcela do torque oscila mais graças a eliminação de suas harmônicas de baixa ordem.

Por sua vez, o fluxo concatenado pelos enrolamentos é apresentando na Fig. 5.23. Observando seus valores de pico é notório que a técnica de segmentação dos polos afeta negativamente a densidade de fluxo do entreferro.

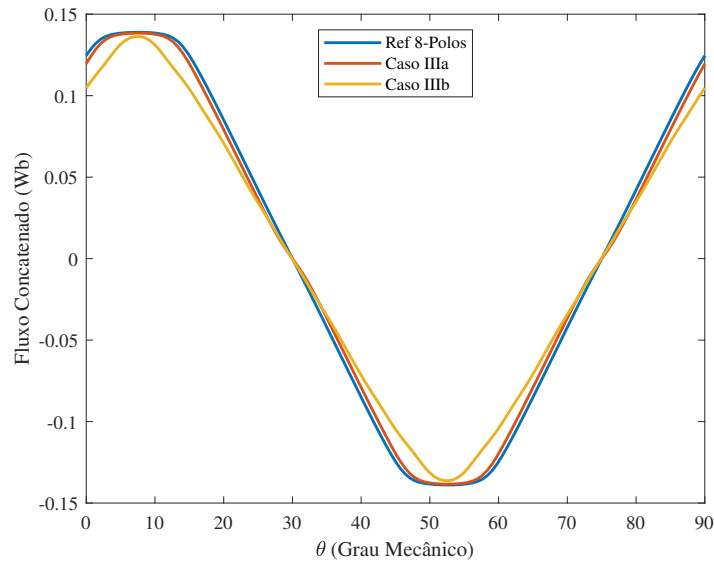
As formas de onda da força contra-eletromotriz das máquinas mencionadas podem ser visualizadas na Fig. 5.24. Verifica-se que ocorre uma atenuação na amplitude de seu patamar nos casos IIIa e IIIb devido à atenuação na fundamental da densidade de fluxo do entreferro. Além disso, percebe-se que a *back-emf* do caso IIIb tem uma oscilação de menor amplitude graças à menor distância entre seus segmentos.

Por último, a forma de onda do torque eletromagnético desenvolvido pelas máquinas é apresentado na Fig. 5.25. Verifica-se que o valor médio do torque em ambos os casos IIIa e IIIb é inferior ao valor de referência, efeito causado pela já mencionada redução na densidade de fluxo do entreferro. Além disso, percebe-se uma redução no pico da oscilação

Figura 5.22 – Proposta II (8-Polos): Forma de onda do *cogging torque*

Fonte: Próprio autor, 2020

Figura 5.23 – Proposta II (8-Polos): Forma de onda do fluxo concatenado



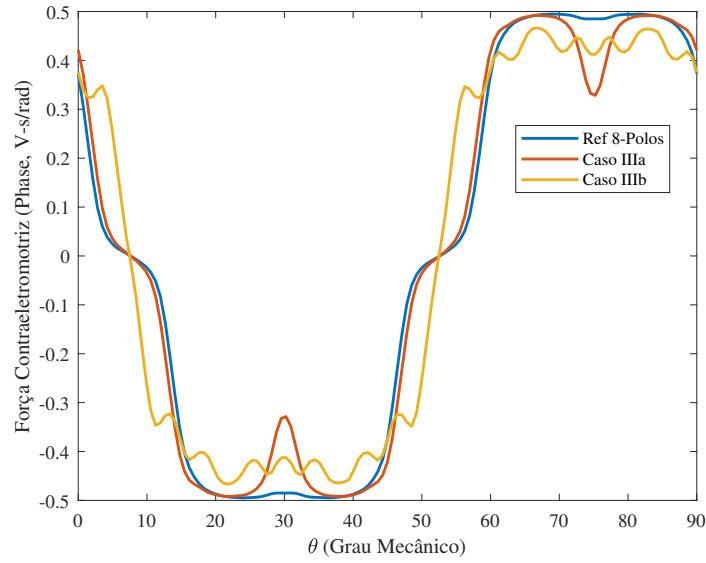
Fonte: Próprio autor, 2020

no torque desses casos causada pela diminuição da amplitude do *cogging torque*.

Os resultados do processo de otimização na geometria do caso IIIb, bem como os valores de seus parâmetros de saída obtidos pela simulação em elementos finitos, são apresentados na Tabela 5.5. A utilização de segmentos com espaçamento e comprimentos desiguais foi capaz de reduzir o *cogging torque* em cerca de 85%, ao custo de uma queda de aproximadamente 5% na fundamental da densidade de fluxo do entreferro, acarretando numa redução no valor médio de torque de cerca de 5%.

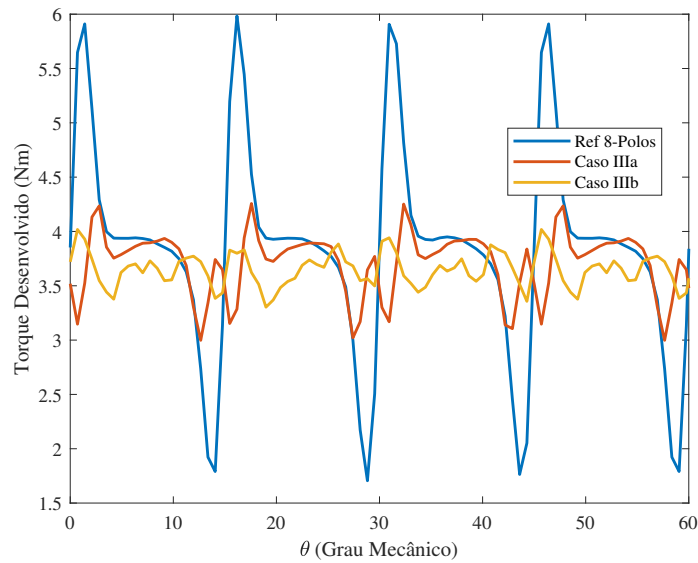
Nota-se, tanto na máquina de quatro quando na de oito polos, a utilização de

Figura 5.24 – Proposta II (8-Polos): Forma de onda da força contra-eletromotriz



Fonte: Próprio autor, 2020

Figura 5.25 – Proposta II (8-Polos): Forma de onda do torque desenvolvido



Fonte: Próprio autor, 2020

segmentos com espaçamento e comprimentos desiguais resultou em valores menores de amplitude do *cogging torque*. Devido a utilização de com segmentos de ímãs desiguais, assim como seus distanciamentos, há um considerável aumento na complexidade da máquina. Portanto, fica a critério do projetista sua utilização levando em consideração se sua maior performance justifica a maior complexidade na montagem da máquina, quando comparado a segmentos fixos.

Tabela 5.5 – Proposta II: Resultados para a maquina 8-polos.

Parâmetro	Ref	Caso IIIa	Caso IIIB
N	1	2	8
δ_k	32,55°	16,22 °	2x3,25°; 2x3,76°; 6,82°; 3,70°; 3,72°; 6,81°
γ	—	1,52°	1,28°; 0,75°; 0,61°; 0,60°; 0,61°; 0,74°; 1,28°
Passo polar	32,55°	33,96°	40,94°
T_C [Nm]	2,138	0,618	0,326
V_M [dm ³]	0,122	0,122	0,131
B_1 [T]	1,035	1,004	0,981
T_D [Nm]	3,844	3,710	3,648
T_R [(%)]	111,29	33,94	19,60

5.3 Proposta III

Na Proposta III é utilizada a função objetivo (4.2) e considerando a expressão mais completa do *cogging torque*, dada por (2.20), como realizado no Caso III da Proposta I, mantendo os tamanhos e distâncias fixas, contudo utilizando segmentos com formato retangular. Para evitar confusão, o caso proposto aqui foi chamado de Caso IIIB e o modelo do Caso III criado na Seção 5.1 foi rebatizado aqui para Caso IIIA.

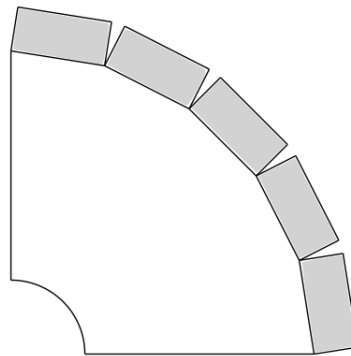
5.3.1 Modelo de 4-Polos

Como evidenciado na seção 3.1.3, a partir de um tamanho δ inferior a 20° um segmento de ímã em bloco retangular produz uma distribuição de densidade de fluxo no entreferro muito similar à gerada por segmentos de arco. Dessa forma, foram adicionadas às restrições o tamanho mínimo dos segmentos tal que se possa valer das expressões de arco e as distâncias mínimas γ_{min} imposta pela geometria dos segmentos e dada por (3.8). O modelo obtido com segmentos em bloco retangular, para a máquina de quatro polos, se encontra na Fig. 5.26 para o Caso IIIB.

Os parâmetros da máquina do Caso IIIB foram obtidos por meio de 129 gerações. O valor minimizado obtido foi de 0,0008. Os resultados da minimização da função objetivo OF2 é apresentado na Fig. 5.27 nas primeiras 20 gerações

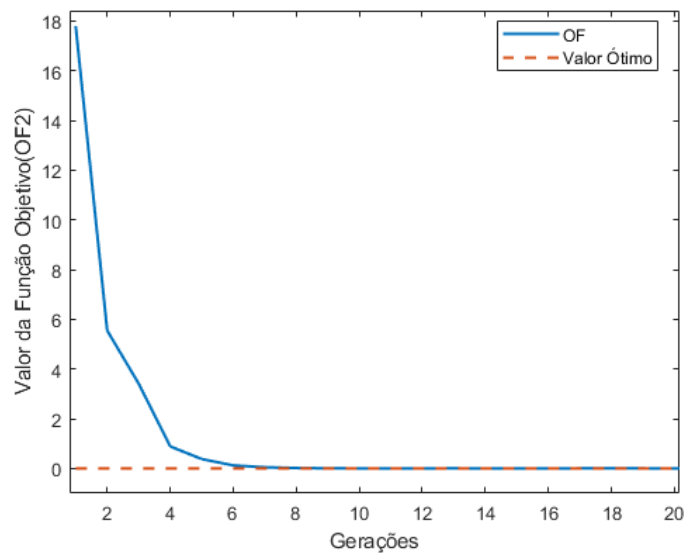
Os resultados para a máquina de 4-Polos se encontram nas Figs. de 5.28 a 5.31, sendo comparadas as formas de onda do *cogging torque*, fluxo concatenado, força contra-eletromotriz e torque desenvolvido obtidas para a máquina de referência e dos casos IIIA e IIIB. A Tabela 5.5 reúne os parâmetros construtivos dos modelos mencionados e o resultado dos mesmos, referentes à amplitude do *cogging torque*, volume total dos ímãs, harmônica fundamental B_1 , torque médio desenvolvido e sua oscilação.

Figura 5.26 – Modelo de 4-Polos: Rotor do Caso III (Segmentos em bloco retangular)



Fonte: Próprio autor, 2020

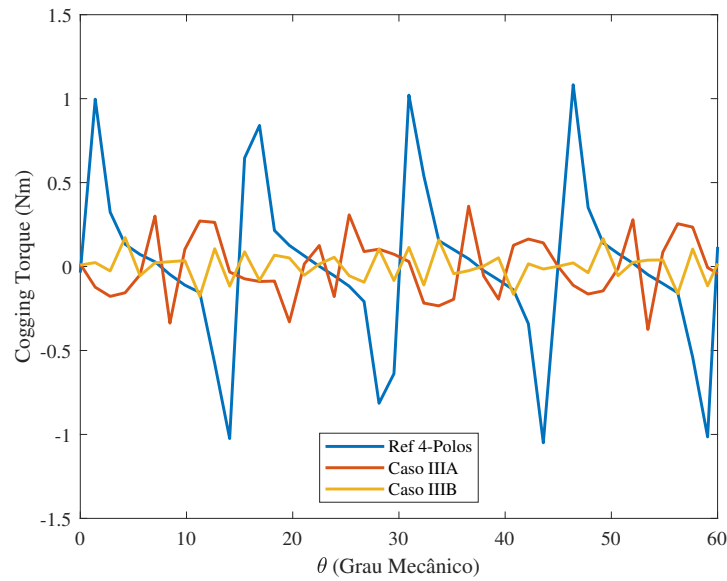
Figura 5.27 – Proposta III - Evolução do Processo de Otimização por Algoritmo Genético (4-Polos)



Fonte: Próprio autor, 2020

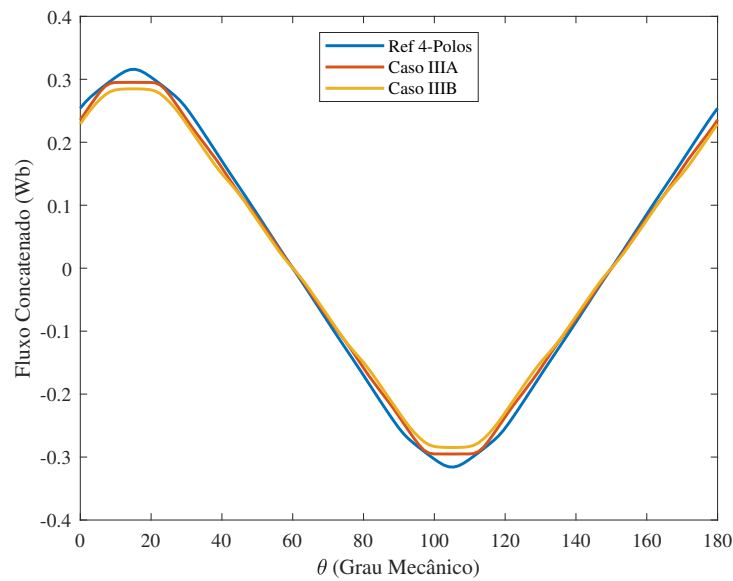
Nota-se, pela Fig. 5.28, que ambas as técnicas obtiveram uma significativa redução no valor de pico do *cogging torque*. A redução obtida com a aplicação de segmentos retangulares se destaca por ter um desempenho melhor ao reduzir em cerca de 84%, enquanto sua contra-partida em arco, reduziu o *cogging torque* em 70%. Assim como nos demais resultados apresentados até então, na segmentação em bloco retangular houve um aumento da frequência de vibração do *cogging torque*. Isto evidencia o aumento da contribuições das harmônicas de ordem superiores.

Quanto ao fluxo concatenado, como mostrado na Fig. 5.29, ocorreu uma redução da amplitude do fluxo para ambos os modelos segmentados. Como mostrado, não houve uma drástica redução do fluxo magnético, o que indica que a otimização para ambos os casos encontrou sucesso em preservar a densidade de fluxo. Vale destacar que para a segmentação em bloco retangular, a preservação do fluxo foi ligeiramente maior.

Figura 5.28 – Proposta III (4-Polos): Forma de onda do *cogging torque*

Fonte: Próprio autor, 2020

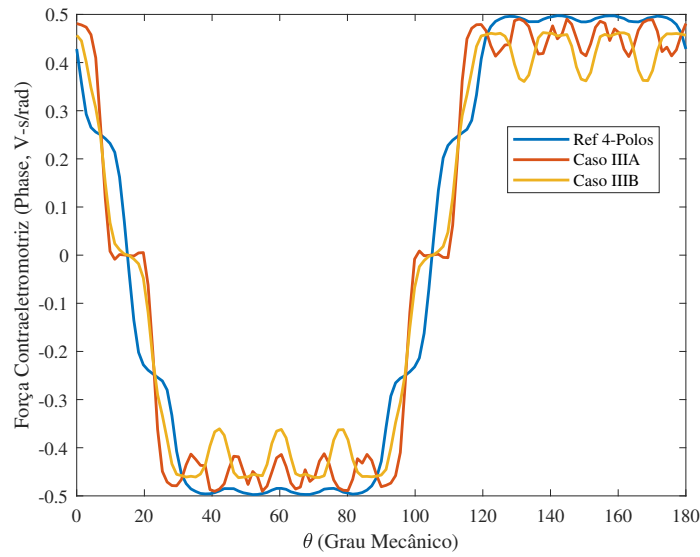
Figura 5.29 – Proposta III (4-Polos): Forma de onda do fluxo concatenado



Fonte: Próprio autor, 2020

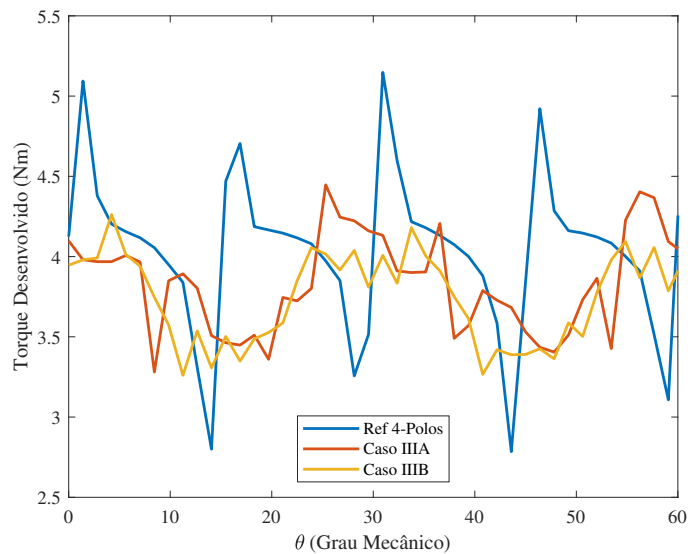
A Fig. 5.30 mostra uma redução, em relação à referência, da *back-emf* para ambos os casos. Além disso, há uma maior oscilação sofrida na forma de onda da *back-emf* para os segmentos em bloco retangular quando comparado aos segmentos em arco. Isto se deve a uma maior distância entre segmentos no Caso IIIB (veja a Tabela 5.6) em comparação com o Caso IIIA.

Figura 5.30 – Proposta III (4-Polos): Forma de onda da força contra-eletromotriz



Fonte: Próprio autor, 2020

Figura 5.31 – Proposta III (4-Polos): Forma de onda do torque desenvolvido



Fonte: Próprio autor, 2020

Por fim, a Fig. 5.31 apresenta o torque desenvolvido. Nota-se uma redução em ambos os casos, na amplitude das oscilações do torque sendo reduzido cerca de 59% e 54% para os Caso IIIA e IIIB respectivamente. Isto se deve em grande parte as reduções do *cogging torque*. Houve também uma redução no valor médio do torque desenvolvido, resultado direto da diminuição de fundamental do fluxo, B_1 , que foi reduzido em quase 5% e 9% para os Caso IIIA e IIIB respectivamente.

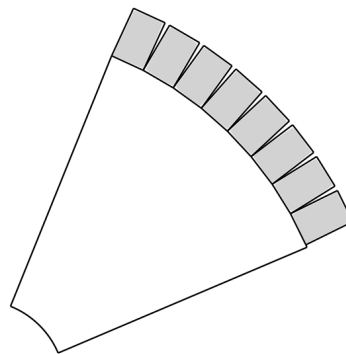
Tabela 5.6 – Proposta III: Resultados para a maquina 4-polos.

Parâmetro	Ref	Caso IIIA	Caso IIIB
N	1	5	5
δ_k	77,55°	15,84 °	18°
γ	–	1,23°	2,76°
Passo polar	77,55°	84,12°	87,24°
T_C [Nm]	1,066	0,323	0,175
V_M [dm ³]	0,146	0,149	0,157
B_1 [T]	1,120	1,065	1.021
T_D [Nm]	4,034	3,839	3,745
T_R [(%)]	58,58	23,81	26.75

5.3.2 Modelo de 8-Polos

O modelo obtido com segmentos em bloco retangular, para a máquina de quatro polos, se encontra na Fig. 5.32 para o Caso IIIB.

Figura 5.32 – Modelo de 8-Polos: Rotor do Caso III (Segmentos em bloco retangular)



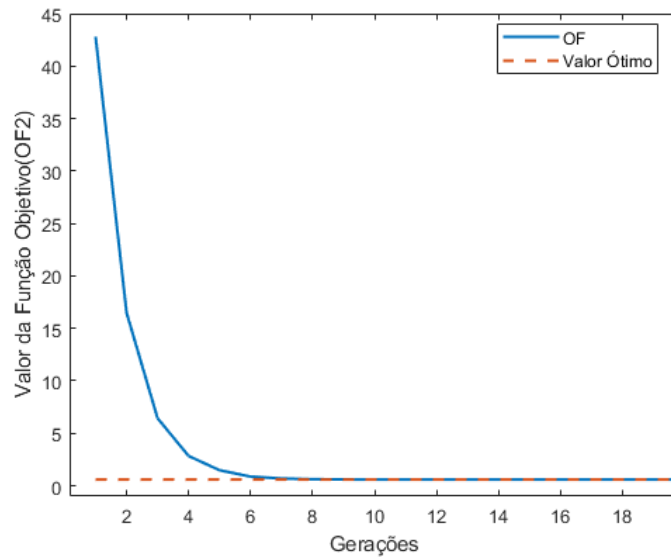
Fonte: Próprio autor, 2020

Os parâmetros da máquina do Caso IIIB foram obtidos por meio de 133 gerações. O valor minimizado final foi de 0,5881. A evolução do processo de minimização da função objetivo OF2 é apresentada na Fig. 5.33 ao longo das primeiras 20 gerações

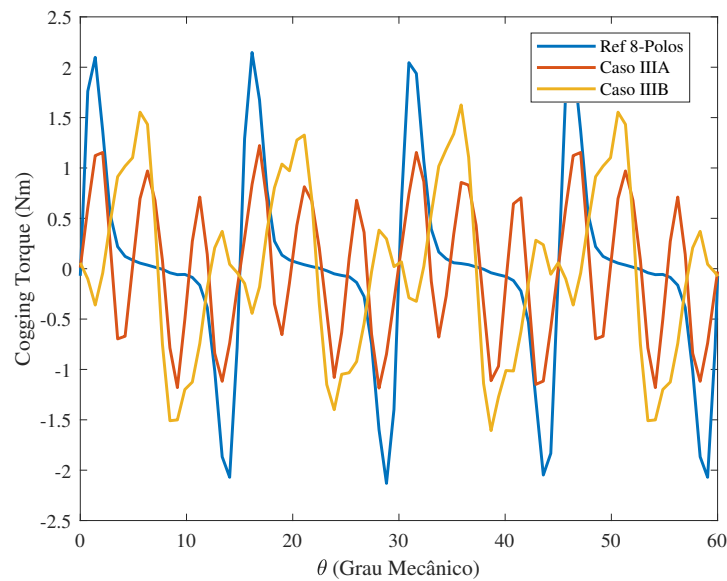
Os resultados para a máquina de 8-Polos se encontram nas Figs. de 5.34 a 5.37, sendo comparadas as formas de onda do *cogging torque*, fluxo concatenado, força contra-eletromotriz e torque desenvolvido obtidas para a máquina de referência e dos casos IIIA e IIIB. A Tabela 5.7 reúne os parâmetros construtivos dos modelos mencionados e o resultado dos mesmos, referentes à amplitude do *cogging torque*, volume total dos ímãs, harmônica fundamental B_1 , torque médio desenvolvido e sua oscilação.

A Fig. 5.28 mostra que, em ambos modelos, houve redução no valor de pico do *cogging torque*. A redução obtida com a aplicação de segmentos retangulares foi de

Figura 5.33 – Proposta III - Evolução do Processo de Otimização por Algoritmo Genético (8-Polos)



Fonte: Próprio autor, 2020

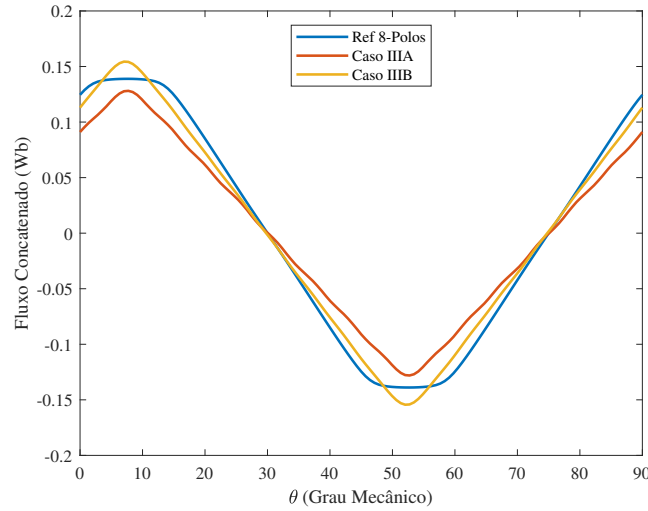
Figura 5.34 – Proposta III (8-Polos): Forma de onda do *cogging torque*

Fonte: Próprio autor, 2020

aproximadamente 24% em relação a referência. Já sua contra-partida, segmentos em arco, ocorreu uma redução de cerca de 42% e apresentou um resultado melhor.

A Fig. 5.35 apresenta o fluxo concatenado para os modelos e, curiosamente, a amplitude da forma de onda apresentada pelo Caso IIIB superou ao modelo de referência. Geralmente, como já explicado, a densidade de fluxo tende a reduzir com a segmentação, o que implica também numa redução do fluxo concatenado. O que acontece é que, devido a máquina de referência não ser de passo completo ($32,55^\circ$), a busca de otimização aplicada ao Caso IIIB localizou um ponto ótimo com um comprimento polar do ímãs maior ($44,13^\circ$)

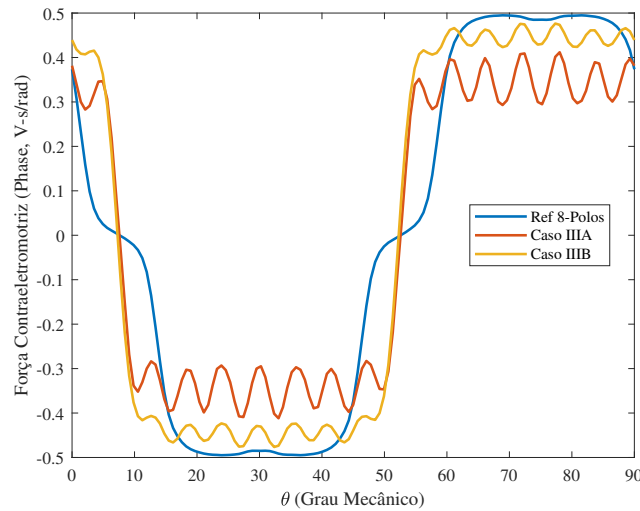
Figura 5.35 – Proposta III (8-Polos): Forma de onda do fluxo concatenado



Fonte: Próprio autor, 2020

e, associado à distribuição dos enrolamentos, acabou por produzir um fluxo com amplitude maior. Já o Caso IIIA, como esperado, teve uma pequena redução em sua amplitude.

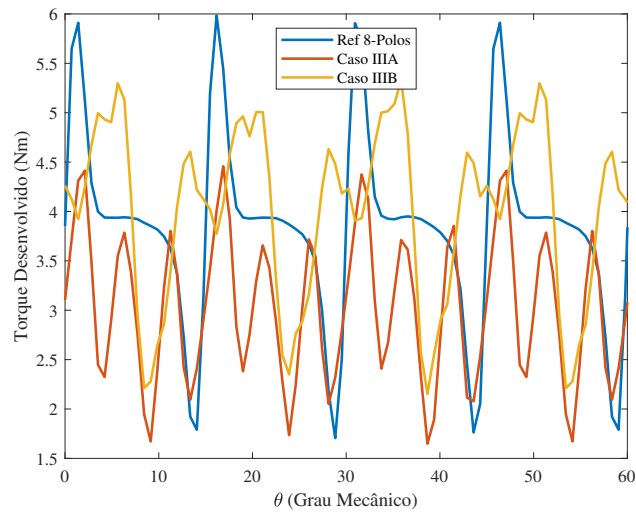
Figura 5.36 – Proposta III (8-Polos): Forma de onda da força contraeletromotriz



Fonte: Próprio autor, 2020

Para ambos os casos, como possível observar na Fig. 5.37, houve uma redução da amplitude da oscilação no torque desenvolvido que passou de 111% de *ripple* para quase 34% para o Caso IIIA e 79% no Caso IIIB. Isso se deve, em grande parte, à redução do *cogging torque*. Houve uma redução do valor médio do torque desenvolvido no modelo do Caso IIIA por volta de 3% em relação ao valor de referência, enquanto o Caso IIIB obteve um aumento de cerca de 4%. Esse acréscimo do valor médio para o modelo de segmentos de ímãs retangular é devido a um maior valor da densidade de fluxo. Como mostrado na Tabela 5.7, a fundamental de fluxo, B_1 , passou de 1,035 para 1,059 T.

Figura 5.37 – Proposta III (8-Polos): Forma de onda do torque desenvolvido



Fonte: Próprio autor, 2020

Tabela 5.7 – Proposta III: Resultados para a maquina 8-polos.

Parâmetro	Ref	Caso IIIA	Caso IIIB
N	1	2	8
δ_k	32,55°	16,22 °	4,76°
γ	—	1,52°	0,87°
Passo polar	32,55°	33,96°	44,13°
T_C [Nm]	2,138	1,237	1,617
V_M [dm ³]	0,122	0,122	0,156
B_1 [T]	1,035	1,004	1,059
T_D [Nm]	3,844	3,710	4,007
T_R [(%)]	111,29	33,94	79,35

Para os modelos de máquina de quatro polos, a utilização de segmentos com formato retangular, resultou em valores menores de amplitude do *cogging torque*. As restrições construtivas foram respeitadas e fica a critério do projetista sua utilização, podendo alterá-las ao levar em consideração a maior complexidade na montagem da máquina.

Conclusão

O presente trabalho apresentou a aplicação de otimização na técnica de segmentação de polos para a redução do *cogging torque*, também conhecido como torque de borda. A redução da oscilação do *cogging torque* é possível pela técnica de segmentação de polos ao se reduzir as harmônicas de baixa ordem da densidade de fluxo que geram essa parcela do torque. A otimização entra nessa técnica para obter o menor valor de oscilação com uma menor perda de fluxo magnético possível. Foram realizadas três propostas onde a modalidade de distribuição e o formato dos segmentos de ímãs foram alterados.

Todas as propostas foram aplicadas a uma máquina de 4 polos e outra de 8 polos, ambas com as mesmas dimensões e 24 ranhuras. Os modelos obtidos pelas otimizações foram comparados entre si e com os modelos de referência com polos não segmentados, utilizando análise em elementos finitos e os resultados utilizados para verificar a eficácia das propostas.

Na Proposta I, foram aplicadas otimizações à segmentação utilizando conjuntos de segmentos com iguais tamanhos e espaços entre si. Essa proposta foi subdividida em 3 casos. Aos dois primeiros casos foram aplicadas expressões analíticas e com aproximações matemáticas e a terceira foi aplicada uma expressão mais sofisticada que inclui em sua modelagem componentes tangenciais da densidade de fluxo e efeitos de borda. Os resultados apresentados demonstram um desempenho superior ao Caso III comparado com os demais, obtendo reduções do *cogging torque* de aproximadamente 70% e 71% para 4 e 8 polos, respectivamente, com perdas na harmônica fundamental da densidade de 4,9% e 3%, respectivamente, em relação às máquinas de referência. Visto o melhor desempenho da função objetivo $OF2$, em relação a $OF1$ e a superioridade apresentada do modelo mais sofisticado da densidade de fluxo, estes foram utilizados nas demais propostas.

Foi introduzida a busca por segmentos com tamanhos, assim como espaços entre eles, com valores distintos na Proposta II. O intuito com essa maior liberdade é permitir uma maior flexibilidade na busca e, assim, encontrar a melhor distribuição possível. Devido ao espaço de busca maior, o tempo de execução da otimização para essa proposta foi mais demorada que no caso equivalente da Proposta I. Quanto aos resultados, a Proposta III apresentou uma redução do *cogging torque* de aproximadamente 79% e 85% para as máquinas de 4 e 8 polos respectivamente. Já a redução da harmônica fundamental da densidade de fluxo na foi de 6,1% e 5,2% em relação à referência. Houve, então, extrapolação do limite de redução estabelecido, que era de 5%, em ambas as máquinas, sendo de apenas 0,2% em relação à máquina de 8 polos.

Para validar a similaridade prevista para a segmentação de polos utilizando ímãs

com formato retangular, chamado ao longo deste trabalho de bloco retangular, a Proposta III utilizou esse formato. Para essa distribuição, de forma análoga a Proposta I, os segmentos foram distribuídos com tamanhos iguais entre si, assim como distâncias iguais, respeitando os aspectos construtivos impostos pela geometria. A redução do cogging torque resultado dessa otimização foi de 84% e 24% para os modelos de 4 e 8 polos, respectivamente. Quanto à harmônica fundamental da densidade de fluxo, houve uma redução de 7% para modelo de 4 polos e um ganho de 4% para de 8 polos. Houve nessa proposta uma extrapolação do limite de redução para a máquina de 4 polos de 2%.

Todas as propostas alcançaram o objetivo de redução do cogging torque e preservação da densidade de fluxo. Devido ao menor grau de importância do volume na função objetivo $OF2$, este apresentou um comportamento variado nos modelos obtidos, sendo menor ou maior que a referência. Houve reduções superiores à estipulada para a fundamental da densidade de fluxo nas propostas II e III, sendo ambas explicadas por limitações associadas aos modelos utilizados. A proposta II apresentou o melhor conjunto de resultados, ao custo de um tempo de processamento mais elevado. Já a proposta III apresentou resultados satisfatórios e apresentou-se como uma solução, de fato, viável para a segmentação de polos. Para trabalhos futuros recomenda-se o aperfeiçoamento do modelo de densidade de fluxo, onde os efeitos de espraçamento e dispersão sejam levados em consideração. Também se recomenda a exploração de novas funções objetivo e o desenvolvimento de uma modelagem mais precisa em bloco retangular e sua aplicação.

Publicações

Os artigos produzidos pelo autor, relacionados com esse trabalho , aceitos ou já publicados, são listados a seguir:

- *H. E. Santos, K. M. de Andrade Júnior, W. M. Vilela, and G. T. de Paula, “Cogging Torque Reduction by Means of Pole Segmentation Optimization on the Permanent Magnet Synchronous Machine,” CBA 2020.*

Outros artigos produzidos pelo grupo de pesquisa ao qual o autor faz parte e com participação do mesmo, aceitos ou já publicadas, são listados a seguir:

- *K. M. de Andrade Júnior, H. E. dos Santos, W. M. Vilela, T. E. P. Almeida and G. T. de Paula, “PeMSyn: a Free Software to Assist the Design and Performance Assessment of Permanent Magnets Synchronous Machines,” COBEP 2019.*
- *K. M. de Andrade Júnior, H. E. dos Santos, W. M. Vilela, T. E. P. Almeida and G. T. de Paula, “PeMSyn – A Free Matlab-FEMM Based Educational Tool to Assist the Design and Performance Assessment Of Permanent Magnet Synchronous Machines,” in SOBRAEP.*
- *K. M. de Andrade Júnior, H. E. dos Santos, W. M. Vilela, T. E. P. Almeida and G. T. de Paula, ‘SPWM Techniques in Rotor Pole Segmentation to Reduce Permanent Magnet Synchronous Machine Torque Ripple,’ CBA 2020.*
- *W. M. Vilela, K. M. de Andrade Júnior, H. E. dos Santos and G. T. de Paula, “Controle de Torque de Motores de Relutância Chaveados Usando Transformação dqx ,” CBA 2020.*

Referências

- [1] WEG. *Motores eficientes geram economia de energia na indústria*. 2019. Disponível em: <<https://valor.globo.com/patrocinado/weg/weg/noticia/2019/12/02/motores-eficientes-geram-economia-de-energia-na-industria.ghml>>, <Acessado dia 04/11/2020>. Citado na página 20.
- [2] HODGES, J. UOL, 2018. Disponível em: <www.uol.com.br/carros/noticias/bloomberg/2018/02/20/carros-movidos-a-gasolina-podem-sumir-da-europa-ate-2040.htm>, <Acessado dia 04/11/2020>. Citado na página 20.
- [3] TELLES, D. *Volvo não terá nenhum carro só a combustão à venda no Brasil já em 2021*. Quatro Rodas, 2020. Disponível em: <<https://quatrorodas.abril.com.br/noticias/volvo-nao-tera-nenhum-carro-so-a-combustao-a-venda-no-brasil-ja-em-2021/>>, <Acessado dia 04/11/2020>. Citado na página 20.
- [4] BRASIL, F. *Tesla supera Toyota como montadora com maior valor de mercado*. Forbes Brasil, 2020. Disponível em: <<https://forbes.com.br/negocios/2020/07/tesla-supera-toyota-como-montadora-com-maior-valor-de-mercado/>>, <Acessado dia 04/11/2020>. Citado na página 20.
- [5] ELECTGO. *Difference between ie1, ie2, ie3, and ie4*. 2020. Disponível em: <<https://www.electgo.com/difference-between-ie1-ie2-ie3-and-ie4/>>, <Acessado dia 04/11/2020>. Citado na página 20.
- [6] Lateb, R. et al. Performances comparison of induction motors and surface mounted pm motor for pod marine propulsion. In: *Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005*. [S.l.: s.n.], 2005. v. 2, n. 10, pages=1342-1349 Vol. 2,. Citado na página 20.
- [7] ABBASZADEH, K.; ALAM, F. R.; SAIED, S. Cogging torque optimization in surface-mounted permanent-magnet motors by using design of experiment. *Energy Conversion and Management*, v. 52, p. 3075–3082, 2011. Citado na página 20.
- [8] BABAEI, M. et al. Torque ripple minimization with optimized i_{sx} estimation in vector control of current source inverter induction motor. *Electrical Engineering (Archiv für Elektrotechnik)*, v. 94, n. 1, p. 59–65, 2011. Citado na página 20.
- [9] Ashabani, M.; Mohamed, Y. A. I. Multiobjective shape optimization of segmented pole permanent-magnet synchronous machines with improved torque characteristics. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 47, n. 4, p. 795–804, 2011. Citado 6 vezes nas páginas 20, 21, 23, 24, 29 e 48.

- [10] MILLER, T. J. E.; JR., J. R. H. *Design of Brush-less Permanent-Magnet Motors*. 1. ed. Hillsboro, Ohio and New York: Magna Physics Div. Tridelta Industries Inc. and Oxford University Press Inc., 1995. Citado na página 21.
- [11] Wei Hua; Ming Cheng. Cogging torque reduction of flux-switching permanent magnet machines without skewing. In: *2008 International Conference on Electrical Machines and Systems*. [S.l.: s.n.], 2008. v. 4, n. 2, p. 3020–3025. Citado na página 21.
- [12] Breton, C. et al. Influence of machine symmetry on reduction of cogging torque in permanent-magnet brushless motors. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 36, n. 5, p. 3819–3823, 2000. Citado na página 21.
- [13] Lateb, R.; Takorabet, N.; Meibody-Tabar, F. Effect of magnet segmentation on the cogging torque in surface-mounted permanent-magnet motors. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 42, n. 3, p. 442–445, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 21, 26 e 29.
- [14] Mansouri, A.; Trabelsi, H. Effect of the number magnet-segments on the output torque and the iron losses of a smpm. In: *10th International Multi-Conferences on Systems, Signals Devices 2013 (SSD13)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–5. Citado na página 21.
- [15] Sang-Moon Hwang et al. Various design techniques to reduce cogging torque by controlling energy variation in permanent magnet motors. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 37, n. 4, p. 2806–2809, 2001. Citado na página 21.
- [16] JR, J. R. H.; MILLER, T. J. E. *Design of Brushless Permanent-Magnet Motors*. 1ª edição. ed. Hillsboro, Estados Unidos: Magna Physics and Clarendon Press, 1994. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 40.
- [17] MCPHERSON, G.; LARAMORE, R. D. *An Introduction to Electrical Machines and Transformers*. 2ª edição. ed. Estados Unidos: John Wiley and Sons, 1921. Citado na página 22.
- [18] LATEB, R.; TAKORABET, N.; MEIBODY-TABAR, F. Effect of magnet segmentation on the cogging torque in surface-mounted permanent-magnet motors. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 42, n. 3, p. 442–445, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 23, 24 e 55.
- [19] Wu, L. J. et al. Comparison of analytical models of cogging torque in surface-mounted pm machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 59, n. 6, p. 2414–2425, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- [20] Zhu, Z. Q. et al. Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet dc motors. i. open-circuit field. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 29, n. 1, p. 124–135, 1993. Citado na página 32.

- [21] Zarko, D.; Ban, D.; Lipo, T. A. Analytical calculation of magnetic field distribution in the slotted air gap of a surface permanent-magnet motor using complex relative air-gap permeance. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 42, n. 7, p. 1828–1837, 2006. Citado na página 33.
- [22] MELANIE, M. *An Introduction to Genetic Algorithms*. 1ª edição. ed. Massachusetts, Estados Unidos: MIT Press, 1996. Citado na página 51.
- [23] MATLAB. *ga function*. MatLab, 2020. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/gads/ga>>, <Acessado dia 29/12/2020>. Citado na página 52.
- [24] SANTOS, H. E. et al. Cogging torque reduction by means of polesegmentation optimization on the permanent magnet synchronous machine. *CBA 2020*, v. 2, n. 3, p. 2–8, 2020. Citado na página 55.