

ANILDO RAMOS MARTINS

**METODOLOGIA PARA O PROJETO DE UM MOTOR DE
INDUÇÃO ANELAR**



**UNIVERSIDADE DO ALGARVE
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA
2018**

ANILDO RAMOS MARTINS

**METODOLOGIA PARA O PROJETO DE UM MOTOR DE
INDUÇÃO ANELAR**

Dissertação apresentado ao curso de Mestrado em Engenharia Elétrica e Eletrónica, Ramo de Sistemas de Energia e Controlo da Universidade do Algarve, como requisito para a obtenção do Grau de Mestre.

Dissertação realizado sob a orientação de:

Professor Doutor Isménio Lourenço Eusébio
Martins



**UNIVERSIDADE DO ALGARVE
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA
2018**

METODOLOGIA PARA O PROJETO DE UM MOTOR DE INDUÇÃO ANELAR

DECLARAÇÃO DE AUTORIA DO TRABALHO

Declaro ser o autor deste trabalho, que é original e inédito. Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da listagem de referências bibliográfica incluída.



© 2018, ANILDO RAMOS MARTINS

A Universidade do Algarve reserva para si o direito, em conformidade com o disposto no Código do Direito de Autor e dos Direitos Conexos, de arquivar, reproduzir e publicar a obra, independentemente do meio utilizado, bem como de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição para fins meramente educacionais ou de investigação e não comerciais, conquanto seja dado o devido crédito ao autor e editor respetivos.

Dedicatória

*in memoriam do meu eterno Pá Lica,
À minha mãe, irmã e irmãos por TUDO
À minha esposa e filho.*

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus pela saúde e inteligência que me concedeu durante a dura caminhada que é o curso de Mestrado.

Um profundo agradecimento vai à minha querida e amada mãe Maria Augusta Ramos Martins pelo amor, carinho e por saber aguentar esses longos e duros dois anos da minha ausência.

Agradeço ao Instituto Superior de Engenharia da Universidade do Algarve, pela oportunidade concedida para a realização do meu mestrado.

Ao departamento de Engenharia do ISE e professores que contribuíram para a minha formação académica. Ao meu orientador professor Doutor Isménio Lourenço Eusébio Martins pelos ensinamentos e conselhos.

À minha esposa Vanda Martins pela paciência e amor que teve comigo nas minhas ausências.

À minha sogra Maria José Soares pela colaboração e carinho de sempre.

À Tia Bia de Jesus, Tio Manuel e primas Eliane e Cristina pelo carinho demonstrado durante esta minha caminhada.

Aos meus irmãos e irmã pelo carinho, preocupação e confiança em mim depositada.

Ao amigo Emanuel Inocêncio, um muito obrigado por tudo.

Ao amigo Dario Medina pela colaboração na formatação desta dissertação.

Ao meu amado filho Junior Anildo Gomes Martins, agradeço a amabilidade de sempre que teve com o seu papá.

Agradeço a todos que de uma forma ou de outra me ajudaram nesta caminhada.

À minha família pela união e força de sempre!

A todos, muito obrigado!

RESUMO

Nesta dissertação é criada uma metodologia de projeto de motores de indução anelares, destinados a ser utilizados como propulsor em embarcações com acionamento elétrico. Pretende-se com esta metodologia, dimensionar um motor anelar utilizando uma técnica de cálculo iterativo baseada em elementos finitos. Para tal, começa-se com a criação de um algoritmo de cálculo iterativo, onde são estabelecidos os parâmetros e restrições iniciais para a criação do desenho do motor.

O desenho do motor é feito de forma automática mediante o uso de expressões matemáticas. Com o modelo de elementos finitos do motor anelar já criado, calculam-se os parâmetros do circuito equivalente a fim de se obter um modelo do motor.

O modelo equivalente é utilizado para determinar o comportamento do motor sem se recorrer à construção de um protótipo. Se o modelo do motor criado não corresponder às necessidades do projeto em estudo, volta-se à etapa inicial onde os parâmetros e restrições iniciais sofrem variações até se conseguir o resultado pretendido.

No sistema tradicional, o propulsor do navio (o hélice) é acionado com o veio de um motor localizado no interior do navio, enquanto que no caso em estudo o motor e o hélice são um mecanismo único. Ou seja, o motor faz parte do hélice e como é obvio funciona submerso. Isto traz uma série de vantagens, entre as quais, menor ruído e melhor transmissão do calor produzido no rotor, devido às perdas, para o meio ambiente.

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos. No primeiro capítulo está a introdução onde se dá uma visão geral do projeto, o segundo capítulo é dedicado à metodologia de projeto do motor-hélice em estudo, no terceiro capítulo fala-se da implementação do algoritmo, o quarto capítulo é dedicado à simulação do motor anelar, e o último e quinto capítulo dedicado à conclusão e trabalhos futuros.

Palavras-chave: Método de elementos finitos; Motor de indução; Modelação de motores; Parâmetros de motores.

ABSTRACT

In this dissertation we intend to create an adequate methodology for the design of annular induction motors to be used as propellant in vessels with electric drive. It is intended with this methodology, to size an annular motor using the iterative calculation technique based on finite elements. For this, we begin with the creation of an iterative calculation algorithm, where the initial parameters and restrictions for the design of the engine are established.

The motor design is done automatically using mathematical expressions. With the finite element model of the annular motor already created, the parameters of the equivalent circuit are calculated to have an engine model.

With the equivalent model of the engine, it will be possible to determine the behaviour of the engine without resorting to the construction of a prototype. If the engine model created does not match the needs of the project under study, the initial stage is returned where the initial parameters and constraints are varied until the best result is achieved.

In the traditional system, the propeller of the ship is driven by a shaft by a motor located inside the ship, whereas in the technique under study the motor and the propeller are a unique mechanism. That is, the engine is part of the propeller and of course works submerged. This brings many advantages, among which, lower noise and better transmission of the heat produced in the rotor, due to losses, to the environment. This dissertation is organized in five chapters. In the first chapter is the introduction which gives an overview of the project, in the second chapter is devoted to the design methodology of the motor-propeller under study, in the third chapter is spoken of the implementation of the algorithm, the fourth chapter is dedicated to the simulation of ring motor, and lastly, we have the fifth chapter dedicated to completion and future work.

Keywords: Finite element method; Induction motor; Motor modeling; Motor parameters.

ÍNDICE GERAL

Agradecimento	ix
Resumo.....	xi
Abstract	xiii
1. Introdução	1
1.1. Problema	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Estrutura da dissertação	2
1.4. Estado da arte.....	3
1.4.1. A história da propulsão elétrica naval.....	4
1.4.2. A Propulsão elétrica naval nos dias de hoje.....	7
1.4.3. Vantagens da propulsão elétrica.....	9
1.4.4. O hélice como elemento do sistema de propulsão	9
1.4.4.1. Passo do hélice (<i>Pitch</i>)	10
1.4.4.2. Relação ‘passo’ versus desempenho do barco.....	10
1.4.4.3. Cálculo da velocidade do barco em função do passo do hélice	11
1.4.4.4. A Propulsão <i>Kort Nozzle</i>	11
1.5. O motor anelar	14
1.5.1. Princípio de funcionamento do motor anelar	15
1.6. O método de elementos finitos e o FEMM.....	16
1.6.1. O FEMM e o pré-processamento	17
1.6.2. O FEMM e o processamento.....	17
1.6.3. O FEMM e o pós-processamento.....	18
2. Metodologia de projeto.....	19
2.1. Construção automática do modelo FEM	19
2.2. Análise e obtenção dos parâmetros do esquema equivalente	27
2.2.1. O modelo do motor de indução aplicado ao FEM	27

2.2.2.	Obtenção dos parâmetros do modelo de elementos finitos	31
2.3.	Análise de funcionamento do motor com o esquema equivalente	33
2.4.	Conclusão	37
3.	Implementação do Algoritmo.....	39
3.1.	Sub-algoritmo de construção automática do modelo FEM.....	41
3.2.	Sub-algoritmo de análise e obtenção dos parâmetros do esquema equivalente do modelo FEM	45
3.2.1.	Dimensionamento dos enrolamentos do motor	45
3.2.2.	Obtenção dos parâmetros do esquema equivalente do modelo FEM....	49
3.3.	Sub-algoritmo de análise de funcionamento do motor com o esquema equivalente	52
3.3.1.	Curvas do binário em função da velocidade.....	52
3.3.2.	Curvas da corrente no estator em função da velocidade	53
3.3.3.	Curvas do fator de potência do motor	53
3.3.4.	Cálculo do rendimento do motor	54
3.4.	Conclusão	55
4.	Simulação e resultados	57
4.1.	Exemplo de aplicação:	57
4.1.1.	Análise do motor pelo esquema equivalente	59
5.	Conclusão e trabalho futuro	67
5.1.	Conclusão	67
5.2.	Trabalho futuro.....	68
	Referências	69
	APÊNDICE A – Construção automática do motor anelar.....	71
	APÊNDICE B – Ensaio do M.I.T e a validação do modelo de elementos finitos	75
	APÊNDICE C – Análise do comportamento dos rotores anelares em motores de indução	89
	APÊNDICE D – Algoritmos	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Propulsor do submarino da marinha chinesa [1].	4
Figura 1.2- Navio carvoeiro USS “ <i>Júpiter</i> ” [2], [3].	4
Figura 1.3 - O navio USS “ <i>New México</i> ” [2], [3].	6
Figura 1.4 – Navio francês “ <i>Normandie</i> ” em 1932 [2], [3].	6
Figura 1.5. Motor de indução avançado (AIM) [2].	8
Figura 1.6. Analogia entre o passo do parafuso e do hélice [5].	10
Figura 1.7. Tubo de <i>Kort</i> de aceleração [7].	12
Figura 1.8. Sistema de propulsão em tubo de <i>kort</i> da <i>Caterpillar</i> [9].	13
Figura 1.9. Robô oceanográfico da <i>Nautilo</i> [10].	14
Figura 1.10. Representação da estrutura do motor anelar em estudo.	15
Figura 1.11. Divisão da geometria do problema em triângulos.	17
Figura 1.12. Análise do modelo FEM.	18
Figura 1.13. Resultados da análise.	18
Figura 2.1. Representação esquemática do motor anelar com hélice interior.	20
Figura 2.2. Dimensões geométricas do motor anelar.	21
Figura 2.3. Vista em corte do motor anelar.	22
Figura 2.4. Circuito equivalente para o motor monofásico em função das indutâncias (adaptado de [15]).	28
Figura 2.5. Circuito equivalente do motor de indução em função das reactâncias.	34
Figura 2.6. Circuito equivalente de <i>Thévenin</i> do esquema equivalente do motor anelar.	35
Figura 3.1. Fluxograma do algoritmo principal da metodologia de projeto do motor de indução anelar.	40
Figura 3.2. Fluxograma do sub-algoritmo de construção automática do modelo FEM.	42
Figura 3.3. Desenho do modelo FEM gerado automaticamente.	44
Figura 3.4. Fluxograma do sub-algoritmo de dimensionamento dos enrolamentos do motor.	46
Figura 3.5. Fluxograma do ciclo de variação da espessura do rotor para o cálculo dos parâmetros do modelo FEM.	48

Figura 3.6. Fluxograma geral do cálculo dos parâmetros do motor.....	50
Figura 4.1. Binário do motor-hélice em função da velocidade.	61
Figura 4.2. Corrente do estator do motor-hélice em função da velocidade do motor.....	62
Figura 4.3. Fator de potência do motor-hélice.	63
Figura 4.4. Rendimento do motor-hélice.....	64
Figura 4.5. Potência de entrada do motor-hélice.....	64
Figura 4.6. Potência do entreferro do motor-hélice.....	65
Figura 4.7. Potência de saída do motor-hélice.	65
Figura B. 1 Motor de indução usado para validar o FEMM	75
Figura B. 2. Características do motor indução trifásico em estudo [16]......	77
Figura B. 3. Teste corrente contínua para a medição da resistência R1 (adaptado de [16]).	78
Figura B. 4. Teste de rotor bloqueado do motor de indução trifásico [16].	79
Figura B. 5. Ensaio laboratorial - teste do motor em vazio.....	80
Figura B. 6. Ensaio laboratorial - teste do motor com rotor bloqueado.	81
Figura B. 7. Esquema equivalente do motor de indução recomendado pelo IEEE	81
Figura B. 8. Circuito equivalente do motor em vazio	82
Figura B. 9. Esquema equivalente do motor com rotor bloqueado	83
Figura B. 10. Modelo de elementos finitos do motor de indução trifásico usado em ensaios laboratoriais	86

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.I. Parâmetros Iniciais para o Cálculo do Motor Anelar	22
Tabela 2.II. Dimensões de Motor Anelar Obtidas por Cálculo	24
Tabela 2.III. Parâmetros usados no dimensionamento das bobinas do estator ...	26
Tabela 3.I. Dimensões de saída do modelo FEM gerado automaticamente	44
Tabela 4.I. Dados de entrada de projeto para o motor-hélice	57
Tabela 4.II. Dados de saída de projeto.....	58
Tabela 4.III.Dados de saída de projeto (dimensões do motor).	59
Tabela B. I Características do motor de indução trifásico em estudo.....	76
Tabela B. II. Dados experimentais obtidos dos ensaios laboratoriais.....	80
Tabela B. IV. Parâmetros do esquema equivalente do modelo FEM	86
Tabela B. V. Parâmetros do esquema equivalente do motor real	87
Tabela C. I. Parâmetros do circuito equivalente do motor anelar para rotor em alumínio	89
Tabela C. II. Características elétricas do motor anelar com rotor em alumínio .	90
Tabela C. III. Características mecânicas do motor anelar com rotor em alumínio	90
Tabela C. IV. Características elétricas do motor anelar para rotor de ferro macio	94
Tabela C. V. Parâmetros do circuito equivalente do motor anelar para rotor de ferro macio	95

ÍNDICE DE ALGORITMOS

Algoritmo D. 1. Declaração e inicialização das variáveis locais e globais.....	103
Algoritmo D. 2. Código do sub-algoritmo de desenho automática do modelo FEM.	104
Algoritmo D. 3. Código para o cálculo da secção e número de espira.	105
Algoritmo D. 4. Geração de frequências de escorregamento do motor.....	106
Algoritmo D. 5. código de obtenção da indutância $L(\omega_s)$	107
Algoritmo D. 6. Cálculo dos parâmetros C1 e C2 usando a técnica mínimos quadrados.	107
Algoritmo D. 7. Obtenção dos parâmetros do circuito equivalente do modelo FEM.	108
Algoritmo D. 8. Inicialização dos parâmetros do esquema equivalente.....	108
Algoritmo D. 9. Aplicação do método de <i>Thévenin</i>	109
Algoritmo D. 10. Geração dos valores de escorregamento do motor.	109
Algoritmo D. 11. Código para o traçado de quatro curvas do binário.....	110
Algoritmo D. 12. Código para a impressão das curvas na tela do computador.	110
Algoritmo D. 13. Código para o cálculo das correntes do estator.	111
Algoritmo D. 14. Código de impressão das curvas de corrente do estator na tela.	111
Algoritmo D. 15. Código para o cálculo do fator de potência.	112
Algoritmo D. 16. Código para a impressão das curvas de fator de potência na tela.	112
Algoritmo D. 17. Código para o cálculo do rendimento.....	112

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIM	<i>Advanced Induction Motor</i>
f.e.m	Força eletromotriz
FEM	<i>Finite Element method</i>
FEMM	<i>Finite Element Method Magnetic</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineering</i>
M.I.T	Motor Indução Trifásico
SEE	Sistema Energia Elétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

b	Constante
B_M	Comprimento do motor, [mm]
C_1	Constante
C_2	Constante
d_c	Diâmetro do condutor da bobinagem, [mm]
D_{int}	Diâmetro interno do hélice, [mm]
D_S	Diâmetro interno do estator, [mm]
D_{ST}	Diâmetro externo do estator, [mm]
f	Frequência da fonte de alimentação, [Hz]
F	Força, [N]
f_f	Frequência de teste final (desejada), [Hz]
f_r	Frequência induzida no rotor, [Hz]
f_{test}	Frequência de teste, [Hz]
h_{coroa}	Altura da coroa do estator, [mm]
h_D	Altura do dente, [mm]
h_f	Espessura do rotor final (desejada), [mm]
h_R	Espessura total do rotor, [mm]
h_{R1}	Espessura do anel interno do rotor, [mm]
h_{R2}	Espessura do anel externo do rotor, [mm]
h_{test}	Espessura do rotor em teste, [mm]
I_1	Corrente do estator, [A]
I_2	Corrente do rotor, [A]
I_{bloq}	Corrente da fase com o rotor bloqueado, [A]
I_m	Corrente magnetização, [A]

I_n	Corrente nominal, [A]
I_{TC}	Corrente total na cava, [A]
I_{TCC}	Corrente total de arranque, [A]
$K_{D/C}$	Relação dente/cava
k_e	Coefficiente de enchimento da cava
$K_{LD/HD}$	Relação largura do dente/altura do dente
L	Indutância do motor, [H]
$L(\omega_s)$	Indutância na frequência de escorregamento, [H]
L_l	Indutância do estator, [H]
L_C	Largura da cava, [mm]
L_{C-D}	Comprimento cava-dente, [mm]
L_D	Largura do dente, [mm]
l_g	Entreferro de ar, [mm]
L_{Im}	Indutância imaginária, [H]
L_m	Indutância de magnetização do motor, [H]
L_{real}	Indutância real, [H]
m	Constante
N	Número de espiras por cava
N_C	Número de cavas
$N_{C/P}$	Número de cavas por polo
N_D	Número de dentes
$N_{D/P}$	Número de dentes por polo
N_F	Número de fases da fonte de alimentação
n_{syn}	Velocidade de sincronismo, [rpm]
P	Número de polos por fase
p	Par de polos por fase

P_{bloq}	Potência do motor com rotor bloqueado, [W]
P_{conv}	Potência convertida (no veio do motor), [W]
P_{EF}	Potência do entreferro, [W]
P_{in}	Potência de entrada (potência elétrica), [W]
P_{out}	Potência de saída (mecânica), [W]
P_{rot}	Potência de perdas rotacionais, [W]
R'_o	Resistência equivalente no vazio, [Ω]
R_1	Resistência do estator, [Ω]
R_2	Resistência do rotor, [Ω]
R_{bloq}	Resistência com o rotor bloqueado, [Ω]
R_{Th}	Resistência de <i>Thévenin</i> , [Ω]
s	Escorregamento
s_c	Secção do condutor da bobina, [mm ²]
T	Binário, [N.m]
V	Tensão da fase, [V]
V_{bloq}	Tensão do motor com o rotor bloqueado, [V]
V_{DC}	Tensão corrente continua, [V]
V_P	Tensão de pico, [V]
V_{Th}	Tensão <i>Thévenin</i> , [V]
X'_o	Reactância do motor no vazio, [Ω]
X_1	Reactância de dispersão do estator, [Ω]
X_2	Reactância de dispersão do rotor, [Ω]
X_{bloq}	Reactância do motor com o rotor bloqueado, [Ω]
X_m	Reactância de magnetização do motor, [Ω]
X_{Th}	Reactância de <i>Thévenin</i> , [Ω]
Z'_o	Impedância do motor em vazio, [Ω]

Z_{bloq}	Impedância do motor com rotor bloqueado, [Ω]
Z_{eq}	Impedância equivalente do circuito, [Ω]
Z_{Th}	Impedância de <i>Thévenin</i> , [Ω]
δ	Densidade de corrente, [A/mm^2]
η	Rendimento do motor, [%]
τ	Constante de tempo do rotor, [s]
Φ	Fluxo concatenado, [Wb]
φ	Angulo de fase, [$^\circ$]
ω	Frequência elétrica da rede, [rad/s]
ω_r	Velocidade angular do rotor, [rad/s]
ω_s	Frequência de escorregamento, [rad/s]
ω_{syn}	Velocidade síncrona, [rad/s]

1. INTRODUÇÃO

Com o presente trabalho pretende-se criar uma metodologia adequada ao projeto de motores de indução anelares destinados a ser utilizados como propulsor em embarcações com acionamento elétrico. No sistema tradicional, o veio do motor aciona o hélice. No caso em estudo, o motor e o hélice são um mecanismo único. Ou seja, o motor faz parte do hélice e como é obvio funciona submerso. Isto traz uma série de vantagens, entre as quais, menor ruído. Para o projeto do motor, será utilizado uma metodologia de projeto baseado em análises por elementos finitos.

1.1. Problema

O dimensionamento dos motores de indução foi, durante muito tempo, feito utilizando técnicas de cálculos empíricas. Com o passar dos tempos e com o surgimento da análise pelo método de elementos finitos aplicados a máquinas elétricas, o projeto de motores elétricos passou a ser mais eficiente, traduzindo assim em motores de menores dimensões e com maiores densidades de potência comparados com os calculados pelo método empírico.

A necessidade de se ter uma ferramenta de projeto e análise de motores de indução sem se ter de recorrer, numa primeira abordagem, a ensaios laboratoriais, e que seja de custo reduzido, levou à formulação da metodologia de análise de motores de indução pelo método de elementos finitos apresentada neste estudo.

1.2. Objetivos

O objetivo principal desta dissertação de mestrado é a criação de uma metodologia de projeto de motores de indução anelares. A metodologia terá como base a realização da análise do funcionamento de um motor de indução anelar (*hollow motor*) a partir do seu esquema equivalente, obtido a partir dos parâmetros obtidos de um modelo de análise por elementos finitos.

O motor anelar proposto destina-se, entre outros, a ser utilizado como acionador do propulsor de embarcações elétricas. Com este tipo de construção espera-se obter uma

maior força de propulsão a baixa velocidade, ao mesmo tempo que se facilita a transmissão do calor produzido no rotor, devido às perdas, para o meio ambiente.

Deste trabalho faz parte a criação de uma metodologia de projeto iterativa, na base da análise por elementos finitos, culminando na simulação numérica do motor e da respetiva avaliação do funcionamento obtido no modelo.

1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos. No primeiro capítulo expõe-se a visão geral da metodologia de projeto de motores de indução anelares desenvolvida durante a dissertação, ainda durante este capítulo faz-se o levantamento do problema em estudo, traçam-se os objetivos gerais definidos para a dissertação, apresenta-se a estrutura geral da dissertação, é feito o estudo do estado da arte, fazendo-se o levantamento histórico da propulsão elétrica naval e o estudo do hélice como elemento do sistema de propulsão do navio. Também, de forma resumida, fala-se do motor anelar, do método de elementos finitos e do software FEMM.

No segundo capítulo apresenta-se a metodologia para o projeto de um motor de indução anelar, onde se fala da construção automática do modelo de elementos finitos e da formulação matemática e geométrica para a construção do modelo FEM do motor anelar. Ainda, neste capítulo, são abordados a análise e a obtenção dos parâmetros do esquema equivalente a partir do modelo de elementos finitos e a análise do funcionamento do motor com o esquema equivalente.

No terceiro capítulo fala-se da implementação do algoritmo e da técnica de programação utilizada para a obtenção dos resultados.

O quarto capítulo, dedica-se à aplicação da metodologia desenvolvida na simulação do motor-hélice.

E por último, no quinto capítulo apresentam-se as conclusões e o trabalho futuro.

1.4. Estado da arte

Atualmente, existe uma vasta gama de informação disponível e publicada sobre o projeto de motores de indução convencionais. Seja em forma de livros, revistas técnicas, trabalhos de conclusão de cursos, teses e artigos científicos. No que diz respeito ao projeto de motores anelares (*hollow motors*), a informação é escassa e quase inexistente. No entanto, a dissertação em estudo não se debruça sobre o projeto de motores de indução convencionais, nem tão pouco no dimensionamento de um simples motor anelar. Conforme o plano da dissertação, pretende-se criar uma metodologia de projeto de motores de indução anelares, usando a análise por elementos finitos. O método de cálculo e projeto de motores de indução tradicionais baseia-se em métodos empíricos, o que se traduz em motores com menor eficiência quando comparados com os projetados com elementos finitos.

A criação dos algoritmos necessários para o dimensionamento e simulação do motor anelar, além de ter o suporte no conhecimento de técnicas de programação, adquiridas ao longo da vida acadêmica, também têm como suporte publicações científicas e em técnicas de modelação por elementos finitos.

Constata-se, de toda a pesquisa bibliográfica efetuada sobre o tema, que não existe uma metodologia de projeto iterativa usando ferramentas de simulação livre, ou de baixo custo, de análise pela técnica de elementos finitos, como a utilizada no presente trabalho.

Da pesquisa bibliográfica, constatou-se a existência de um propulsor marítimo com semelhanças com o motor que se pretende projetar no presente trabalho. Trata-se de um propulsor lançado pela marinha chinesa em julho de 2017. No entanto, não se sabe nada a respeito do propulsor (não há informação técnica), a não ser a notícia publicada pela revista eletrônica *next Big Futur* [1]. Na Figura 1.1, ilustra-se o propulsor criado pela marinha chinesa.



Figura 1.1. Propulsor do submarino da marinha chinesa [1].

1.4.1. A história da propulsão elétrica naval

Há informações históricas [2], que o primeiro navio a utilizar a propulsão elétrica ocorreu no século XIX na Rússia. Após esse acontecimento histórico, a propulsão elétrica começou a ser cada vez mais explorada dado que apresenta melhores resultados operacionais, com custos de manutenção mais baixos do que sistemas a *diesel*. Inicialmente, a propulsão elétrica foi utilizada nos navios de superfície de grande porte da marinha de guerra dos Estados Unidos [2], [3]. Em 1913 o navio carvoeiro USS “*Júpiter*” (ver Figura 1.2) tinha uma propulsão elétrica experimental.

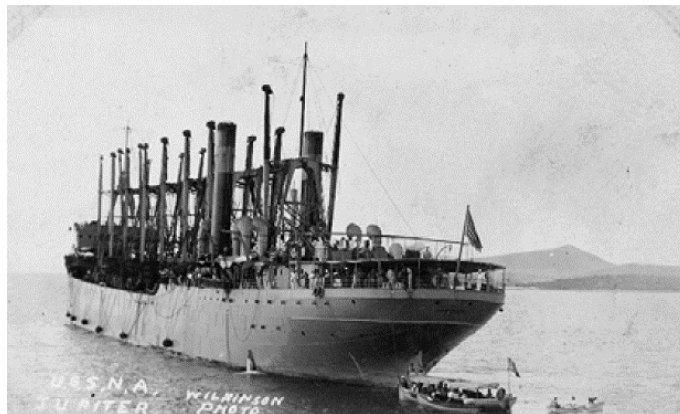


Figura 1.2- Navio carvoeiro USS “*Júpiter*” [2], [3].

Tratava-se de um navio dotado de um sistema de propulsão elétrica composto por um turbogerador de corrente alternada de 5.5 Mw que alimentava dois motores de indução que eram diretamente acoplados aos dois veios do navio. Os motores de indução

utilizados eram motores de rotor bobinados com comutadores deslizantes onde o binário do motor era controlado por um mecanismo de inserção de resistência no circuito do rotor. O controlo da velocidade era conseguido, a partir da variação de velocidade do turbogerador, sendo a inversão de marcha possível graças à inversão de duas fases do motor de indução de rotor bobinado [2], [3].

Devido ao facto de o sistema antigo ser pouco eficaz e de ação lenta, verificou-se a necessidade de ter um maior controlo sobre a velocidade do navio, principalmente a baixas velocidades, o que impulsionou a realização de novos experimentos e avanços tecnológicos.

A fim de ter velocidades mais baixas e sem variar a velocidade do turbogerador, teve-se a ideia de aumentar o número de polos do motor de indução [2] associado aos veios, como forma de reduzir a velocidade. Com esta técnica, o sucesso e a eficácia deste navio aumentou a ponto de ser convertido num navio porta-aviões [3] em 1922 para a marinha americana.

Com o sucesso da propulsão elétrica no navio Júpiter, a marinha norte americana construiu mais 50 navios entre a primeira e segunda guerra mundial [3], entre os quais se destacou o navio *USS "New México"* (ver Figura 1.3), que era um navio de 32000 T e com velocidade de 21 nós. Este navio foi projetado com dois turbogeradores de 11.5 Mw cada que alimentavam quatro motores de indução diretamente acoplados aos quatro veios de propulsão do navio. Neste navio, os motores de indução utilizados eram de gaiola de esquilo, apresentavam a vantagem de terem um binário dezassete vezes maior [3] do que os motores de rotor bobinado da época, e o binário era praticamente constante ao longo de toda a faixa de operação [2].



Figura 1.3 - O navio USS “*New México*” [2], [3].

O controlo de velocidade no navio *USS “New México”*, era feito através de comutadores de polos, o que permitia variar o número de polos destes motores de indução de rotor em gaiola de esquilo de 24 polos para 36 polos. Com esta técnica conseguia-se controlar a velocidade bruta do navio, sendo a velocidade mais baixa controlada pela variação da rotação do turbo gerador [2], [3].

A marinha mercante também não ficou de fora da corrida à propulsão elétrica. Em 1932 foi lançado, em França, o navio “*Normandie*” [3] (ver Figura 1.4). Tratava-se de um cruzeiro com uma velocidade de 32.2 nós, com quatro turbo geradores com uma potência total disponível de 119.3 Mw que alimentavam quatro motores síncronos. Neste navio, o controlo de velocidade era possível variando a velocidade dos turbogeradores.



Figura 1.4 – Navio francês “*Normandie*” em 1932 [2], [3].

Com o avanço da tecnologia mecânica, mais precisamente no setor de desenvolvimento de sistemas de engrenagem para aplicação no setor naval e militar, o sistema de propulsão elétrica já não era mais competitivo face a engrenagens de menores dimensões e com melhoramento acústico.

A baixa eficiência dos geradores e motores de indução da época face ao peso e volume que apresentavam foi outro ponto decisivo para a mudança para sistemas de propulsão mecânica com caixas de engrenagens.

1.4.2. A Propulsão elétrica naval nos dias de hoje

Entre 1980 e 1990, os avanços na eletrônica de potência e na construção de motores elétricos, mais compactos e eficientes, permitiram o retorno ao emprego da propulsão elétrica naval.

Assim, novas técnicas de projeto para a propulsão marítima têm sido investigadas [2], tendo como principais requisitos a obtenção de motores elétricos com:

- Formato compacto
- Peso e volume reduzido
- Elevadas faixas de potência, geradas para binários específicos
- Resistência ao choque
- Baixo ruído

Os avanços tecnológicos existentes na atualidade nos ramos da engenharia dos materiais e da eletrônica potência, têm propiciado a intensificação de pesquisas no setor da propulsão elétrica naval.

Segundo Alves [2], a marinha americana investe elevados recursos financeiros em quatro frentes de pesquisa em motores para a propulsão naval, que são:

- Motores de indução avançados
- Motores síncronos de magnetos permanentes
- Motores síncronos com materiais supercondutores de alta temperatura

- Motores homopolares

O motor de indução avançado é caracterizado pela sua alta densidade de potência e robustez. É um motor polifásico (constituído na maioria das vezes por quinze fases) que tem sido aplicado na propulsão elétrica naval e com resultados satisfatórios. Na Figura 1.5 apresenta-se o motor de indução avançado escolhido pela marinha Inglesa [2] para o seu navio de escolta *Type 45*.



Figura 1.5. Motor de indução avançado (AIM) [2].

O motor síncrono de magnetos permanentes, apresenta maior densidade de potência quando comparado com os motores de indução de iguais dimensões, sendo os outros tipos de motores mencionados anteriormente, menos utilizados e ainda em fase de estudos de aplicação.

1.4.3. Vantagens da propulsão elétrica

Na propulsão mecânica de navios, sabe-se que a rotação do hélice ocorre em função da rotação do motor de combustão interna. Segundo Alves [2], dependendo do perfil de operação do navio, o motor pode não operar na faixa de rendimento ótimo, provocando desperdício de combustível e desgaste mecânico.

Com o uso da propulsão elétrica, este tipo de inconveniente deixa de existir e o motor primário (motor de combustão) deixa de estar associado ao hélice, podendo assim funcionar na faixa de operação ótima.

As vantagens no uso da propulsão elétrica são: a redução da tripulação; a redução dos custos de manutenção; e a redução de emissão de poluentes, entre outras.

1.4.4. O hélice como elemento do sistema de propulsão

Há muita controvérsia sobre o aparecimento do primeiro hélice. Mas há quem defenda que o hélice teve a sua origem no antigo Egito [4] onde também surgiram os primeiros barcos. Isto, apesar de existirem indícios de que os hélices já eram utilizados na antiga china para propulsionar embarcações.

Mas o hélice, tal como hoje o conhecemos, teve a sua origem na Grécia, no século III a.C. onde um filósofo chamado Arquimedes desenvolveu um mecanismo helicoidal para a captação da água dos poços. Este invento ficou conhecido na história da humanidade como o parafuso de Arquimedes. Foi com o aperfeiçoamento do parafuso de Arquimedes que se chegou à forma do hélice atual.

O hélice como elemento do sistema de propulsão do navio, é o responsável por transformar a energia gerada pelo motor em força de propulsão. Caso seja mal dimensionado, o hélice pode influenciar negativamente o rendimento do motor.

1.4.4.1. Passo do hélice (*Pitch*)

Fazendo uma analogia com um parafuso para madeira, uma volta do parafuso resulta em um movimento para a frente, dependendo do seu passo. De forma análoga, o hélice tem um passo que pode ser comparado ao ângulo das lâminas do hélice (ângulo de inclinação) que, na Figura 1.6 , são desenhadas no mesmo ângulo tanto para o propulsor como para o parafuso.

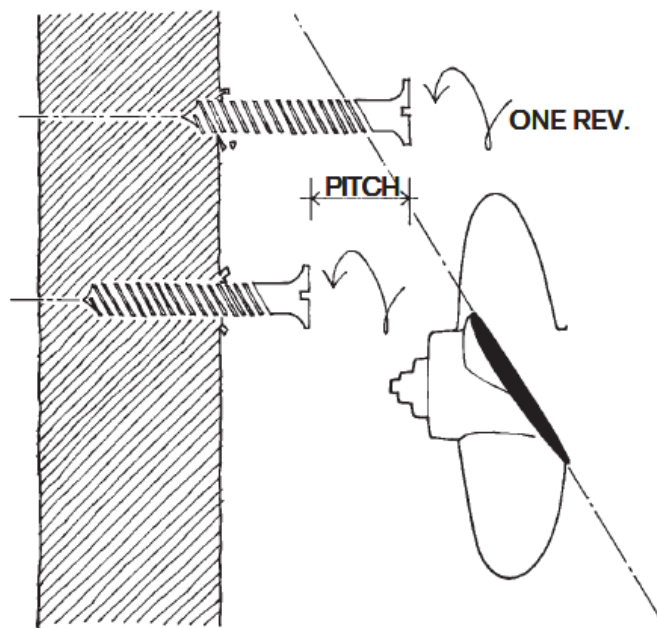


Figura 1.6. Analogia entre o passo do parafuso e do hélice [5].

Para um melhor entendimento, pode-se dizer que o passo do hélice é a distância percorrida por este quando dá uma volta completa.

1.4.4.2. Relação ‘passo’ versus desempenho do barco

Pode-se dizer que quando o passo do hélice é pequeno, a rotação do motor aumenta e a eficiência do hélice é baixa [6]. No caso do passo do hélice for maior do que o recomendado pelo fabricante do motor, o motor trabalha com maior esforço em baixas velocidades e a aceleração é baixa. Logo, conclui-se que ter um motor com passo do hélice não adequado, é ter um motor com altos índices de consumo de energia.

1.4.4.3. Cálculo da velocidade do barco em função do passo do hélice

Ter um motor de grande potência, não é sinónimo de velocidade. Para isso, é preciso ter um bom conversor dessa energia em propulsão, e é o hélice o responsável por isso.

Para o cálculo da velocidade de uma embarcação, deve-se ter em atenção, a rotação do motor, a relação de transmissão do motor para o hélice e o passo do hélice.

Se dividirmos a velocidade de rotação do motor pela relação de transmissão, obtemos a velocidade de rotação do hélice [6].

Por último, se multiplicarmos a velocidade, em rotações por minuto, do hélice pelo seu passo, em polegadas, encontramos a velocidade da embarcação em polegadas por minuto, que a nosso critério poderá ou não ser convertido em nós [6].

1.4.4.4. A Propulsão *Kort Nozzle*

A ideia de construir um sistema de propulsão elétrica usando o motor anelar como sistema de propulsão advém do uso do sistema *kort nozzle* (*tubo de Kort*) na propulsão de navios. Neste sistema, o hélice do navio é cercado por um tubo metálico fixo, onde o hélice gira no seu interior. Com isso, surgiu a ideia de usar um motor anelar submerso, onde o tubo de *Kort* é o rotor do motor e tem no seu interior as pás do hélice, formando assim no seu todo um sistema de propulsão *Kort Nozzle* (*tubo de -Kort*).

O sistema de propulsão em tubo de *Kort* teve a sua origem em 1934 [7], onde *L.Kort* teve a ideia de cercar o hélice por um bocal (tubo). *L.Kort* constatou experimentalmente que o uso de um tubo à volta do hélice aumentava a eficiência de hélices em navios pesadamente carregados [7]. Ou seja, a proporção de potência fornecida pelo hélice para a potência de saída do motor aumentava com este sistema. Trata-se de um sistema de propulsão muito usado em rebocadores, em navios de desembarque da marinha, entre outros.

O sistema em tubo de *Kort* transmite uma maior impulsão de arranque. Pois, neste sistema, o fluxo de água é canalizado numa determinada direção, garantindo assim uma maior força de propulsão.

Também com este sistema, consegue-se uma maior agilidade em manobras, onde os lados do tubo de *Kort* servem de lemes. Trata-se de um sistema muito usado em baixas velocidades, e permite aliviar o efeito de o hélice puxar o barco para o lado da rotação do hélice. Com este sistema, o hélice fica protegido contra choques mecânicos, e permite aliviar a força de sucção ao redor do hélice, permitindo assim a sua utilização em águas rasas.

Na Figura 1.7 ilustra-se o sistema *Kort Nozzle* em corte, usado em propulsão de navios.

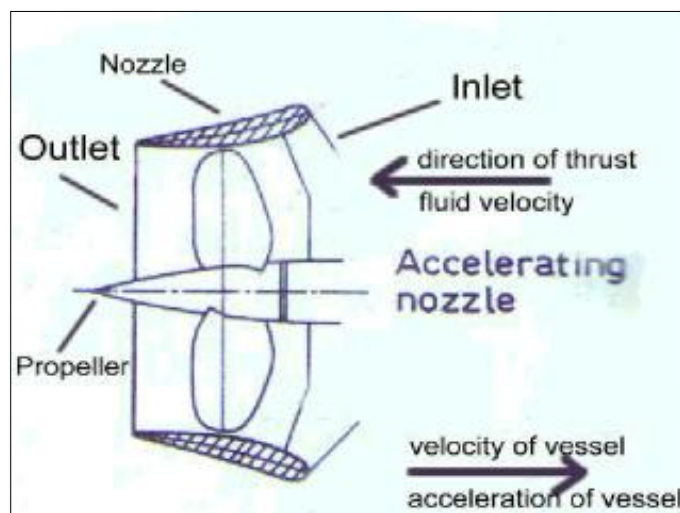


Figura 1.7. Tubo de *Kort* de aceleração [7].

Segundo *Strauhs* [8]:

Com o uso de tubos de *Kort*, consideráveis ganhos de impulsão e economia de combustível podem ser atingidos. Um rebocador com tubo de *Kort* pode ter um aumento de até **40%** de *bollard pull* em relação a outro com hélice convencional. Além da economia de combustível, o tubo de *Kort* também proporciona maior velocidade final.

Vantagens [8]:

- Aumento da impulsão e *bollard pull* (força de tração estática)
- Maior eficiência da propulsão
- Proteção do hélice contra impactos
- Menor vibração

Na Figura 1.8 encontra-se ilustrado o uso do sistema tubo de *kort* utilizado num rebocador portuário que usa a tecnologia híbrida da *Caterpillar*. Na figura, pode-se ver que os dois propulsores são acionados cada um com um motor *diesel* através de um veio. Na parte traseira do rebocador, vê-se que os propulsores poderão ser acionados cada um com um motor de indução de grande potência. Na figura em análise, o sistema de propulsão é híbrido e o seu funcionamento não faz parte do escopo do presente trabalho científico. Servindo apenas, como elemento ilustrativo da aplicação do sistema *Kort Nozzle*.

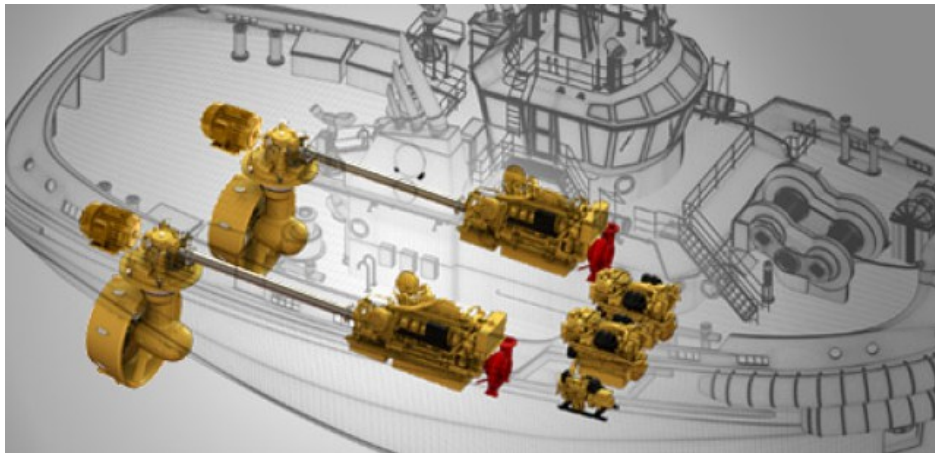


Figura 1.8. Sistema de propulsão em tubo de *kort* da *Caterpillar* [9].



Figura 1.9. Robô oceanográfico da *Nautilo*[10].

Na Figura 1.9 ilustra-se uma possível aplicação do motor anelar em estudo. Trata-se de um robô oceanográfico utilizado na investigação marinha. Como se pode ver na figura, este veículo usa o sistema de propulsão *Kort Nozzle*. Pois, permite uma maior agilidade nas manobras e uma maior força de propulsão a baixas velocidades.

1.5. O motor anelar

Informações sobre os motores anelares são escassas e quase inexistentes. Praticamente, quase toda a informação existente sobre este tipo de motores é não científica. O motor de indução anelar aplicado neste estudo é representado na Figura 1.10 onde, este é composto por um estator e por um rotor em forma de anel. O estator é composto por bobinas indutoras de correntes, ligadas à rede elétrica trifásica. O rotor por sua vez é composto por dois anéis de materiais diferentes, sendo o anel externo h_{R2} constituído em alumínio e o anel interno h_{R1} em ferro.

O alumínio é usado na parte externa do rotor como forma de proporcionar o aumento das correntes induzidas no rotor, aumentando assim o campo magnético produzido por este.

1.5.1. Princípio de funcionamento do motor anelar

O motor de indução anelar em estudo (ver Figura 1.10) é uma máquina assíncrona rotativa de corrente alternada, constituída basicamente por duas partes. A parte fixa, que não possui movimento é chamada de estator, e a outra parte móvel responsável pela transmissão do movimento mecânico, chamada de rotor.

Do ponto de vista elétrico, esta máquina é composta por um conjunto de enrolamentos na parte fixa (estator) onde é feita a conexão com o circuito elétrico exterior do Sistema de Energia Elétrica, SEE. É no enrolamento do estator que é produzido o campo magnético girante responsável pela indução da corrente no circuito da parte móvel (rotor). Com isso, um campo magnético é criado no rotor e tenderá a seguir o campo magnético giratório, produzindo assim o movimento.

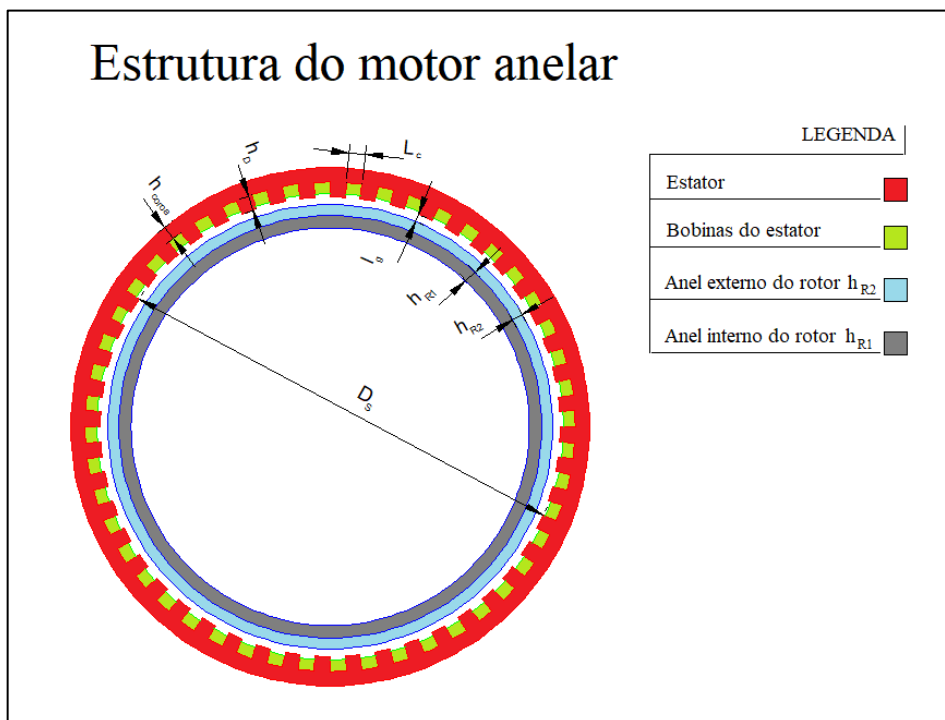


Figura 1.10. Representação da estrutura do motor anelar em estudo.

1.6. O método de elementos finitos e o FEMM

A resposta para inúmeros problemas de engenharia, é hoje possível graças ao desenvolvimento tecnológico alcançado nas ciências computacionais. Em pleno século XXI, é praticamente impossível viver sem os computadores, seja em casa, escolas, universidades ou em grandes centros de pesquisa e desenvolvimento, onde o computador é utilizado para resolver problemas concretos e reais. Com isso, o uso da simulação computacional é cada vez maior, e tem sido utilizada em várias frentes para a realização de análises e melhoramento de produtos, sendo grande parte dessas análises realizadas pela técnica de análises por elementos finitos proposto nos anos 40 e que só anos mais tarde foi usada no estudo de máquinas elétricas.

A análise por elementos finitos, é uma análise matemática [11] que tem como objetivo, dividir a geometria do material em estudo em várias partes, de tamanho reduzido, chamadas de elementos ‘finitos’, passando assim a formar um domínio contínuo de pequenos pontos reduzidos dessa geometria, mantendo as propriedades originais. Com isso, um problema de geometria complexa passa a ser encarado pelo computador como um problema mais simples e com resolução mais precisa. Sendo a geometria dessas pequenas divisões, de vários tipos e formas, entre os quais, triângulos, retângulos, quadriláteros, etc.

Os pequenos elementos (elementos finitos) derivados da ‘discretização’ da geometria em estudo, são representados por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos de forma que sejam obtidos os resultados desejados [11].

No presente trabalho, foi utilizado um software designado por FEMM (*Finite Element Method Magnetics*) para a criação e análise do modelo de elementos finitos do motor de indução anelar. Este software, criado por David Meeker, dmeeker@ieee.org, divide o modelo a ser analisado em pequenos elementos sem alterar a geometria e a propriedade dos materiais. A análise da geometria do problema é feita usando as equações de Maxwell [12], entre outras, conforme pode ver em [13].

O programa é composto por três etapas: o pré-processamento; o processamento; e o pós-processamento [13].

1.6.1. O FEMM e o pré-processamento

É no pré-processamento que o modelo de elementos finitos é criado. É nesta etapa que se definem as propriedades dos materiais e se faz a divisão da geometria do problema em pequenos triângulos, conforme se pode ver da Figura 1.11.

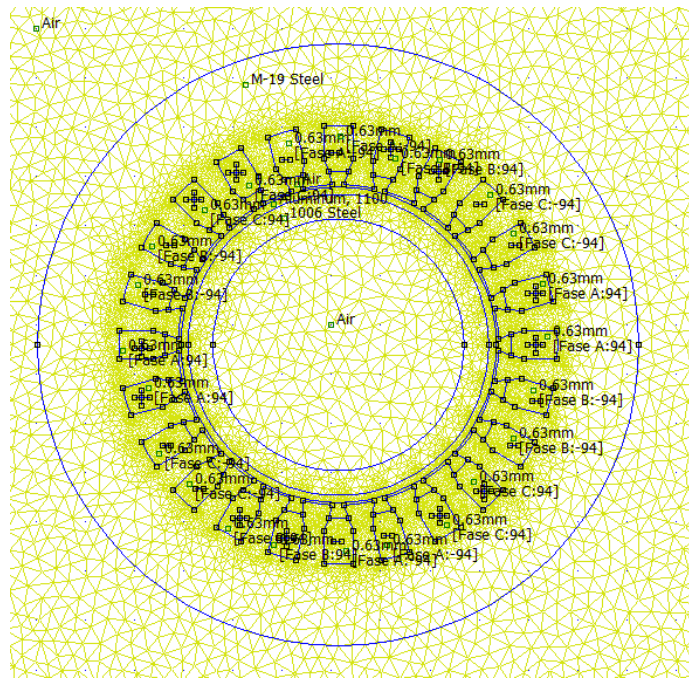


Figura 1.11. Divisão da geometria do problema em triângulos.

1.6.2. O FEMM e o processamento

É nesta fase do processamento que os cálculos são realizados. Para que isso ocorra, nesta fase do projeto, o modelo já deve estar criado e dividido em elementos de dimensões finitas. Na Figura 1.12 está ilustrada a etapa de análise de um modelo de elementos finitos, retratando assim o momento do processamento do problema pelo FEMM.

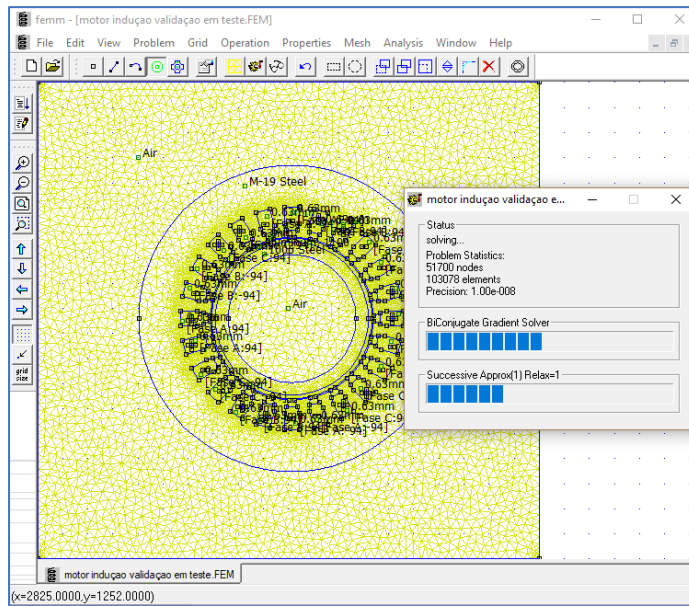


Figura 1.12. Análise do modelo FEM.

1.6.3. O FEMM e o pós-processamento

Nesta etapa de processamento, após a análise do modelo de elementos finitos, o FEMM gera os resultados. Na Figura 1.13 pode-se ver a densidade de fluxo magnético, a cores, gerada pelo FEMM.

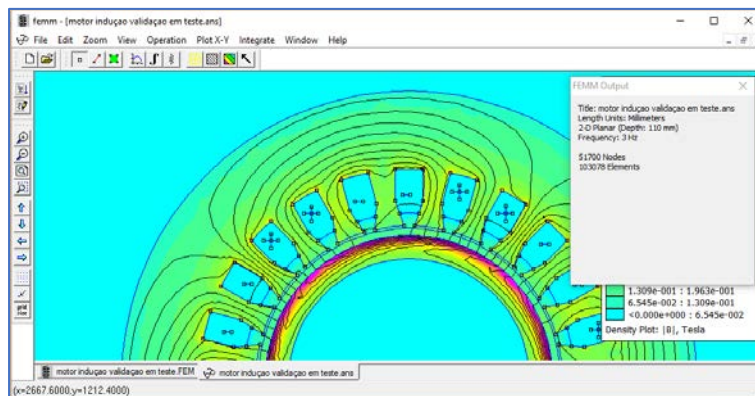


Figura 1.13. Resultados da análise.

2. METODOLOGIA DE PROJETO

Pretende-se, com esta metodologia, dimensionar um motor anelar usando uma técnica de cálculo iterativo baseado em elementos finitos. Para tal, começa-se com a criação de um algoritmo de cálculo iterativo no Matlab, onde são estabelecidos os parâmetros e restrições iniciais para a criação do desenho do motor.

O desenho do motor é feito de forma automática mediante o uso de expressões matemáticas. Com o modelo de elementos finitos do motor anelar já criado, calculam-se os parâmetros do circuito equivalente do motor.

Com a criação do modelo equivalente do motor, é possível determinar aproximadamente o comportamento do motor sem se ter de recorrer à construção de um protótipo. Se o modelo do motor criado não corresponder aos resultados impostos pelo projeto em estudo, volta-se à etapa inicial onde os parâmetros iniciais são variados, iterativamente, até se conseguir o resultado pretendido.

Com a metodologia de construção automática do modelo de elementos finitos do motor em estudo, pretende obter-se o desenho automático do motor anelar em função dos dados de entrada. Para que isso ocorra, é necessário assegurar a construção automática do modelo de elementos finitos do motor, com um mecanismo gráfico e automático que permita desenhar o motor anelar mediante os dados de entrada. Para isso, recorre-se ao uso de formulação matemática e geométrica para a criação de um algoritmo destinado à obtenção do desenho do motor.

2.1. Construção automática do modelo FEM

A construção automática do desenho do motor anelar, baseada em relações matemáticas, permitirá que um algoritmo possa modificar as dimensões geométricas do modelo viabilizando, deste modo, a otimização do desempenho da máquina. Com esta metodologia pretende-se que o modelo seja construído a partir de alguns, poucos, parâmetros de entrada.

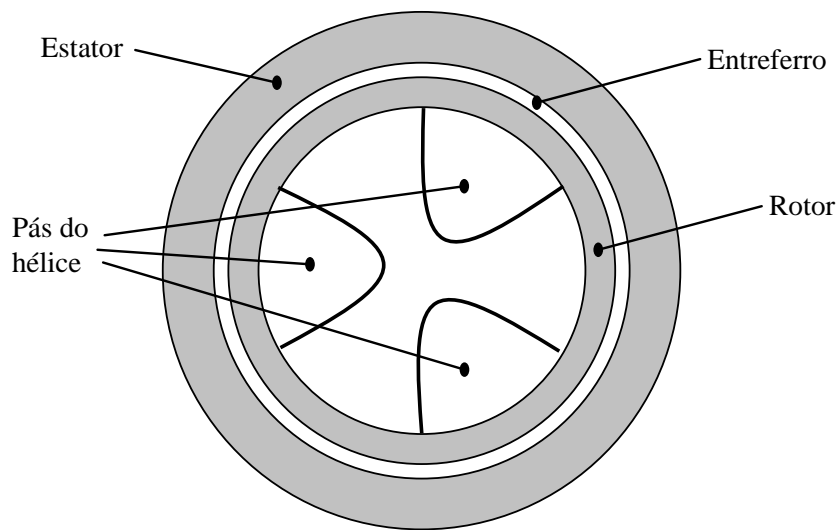


Figura 2.1. Representação esquemática do motor anelar com hélice interior.

Como se pode ver na Figura 2.1, o diâmetro interior do anel do rotor é definido pelo diâmetro exterior do hélice, logo por razões hidrodinâmicas e que se encontram fora do escopo desta dissertação. Assim, o diâmetro interior do rotor D_{int} é definido pelo diâmetro do hélice e constitui um valor fixo para cada motor.

Outro parâmetro também definido pela hidrodinâmica é a velocidade nominal de rotação do hélice. Ora, considerando que à velocidade nominal com o binário nominal o escorregamento não deverá ser superior a **5%**, pode fixar-se, sem grande erro, a velocidade de sincronismo n_{syn} . Assim, a velocidade de sincronismo constitui outro parâmetro fixo ao longo do cálculo de um dado motor para uma dada hélice.

Assim, pode fixar-se o número de fases N_F e a frequência da fonte de alimentação f , correspondente à velocidade nominal.

Pode, agora, ser introduzido um conjunto de parâmetros que poderá ser modificado ao longo do processo de projeto otimização do motor. Estes parâmetros adquirem um valor dado à partida, numa primeira aproximação, mas vão sendo modificados pelo algoritmo de projeto do motor. Este conjunto de parâmetros contém: o comprimento do entreferro l_g ; espessura do rotor h_R ; o número de cavas por polo $N_{C/P}$, igual ao número de dentes por polo $N_{D/P}$; a largura do dente L_D sobre a largura da cava e do dente L_{D-C} , designada por relação dente/cava-dente $K_{D/C}$.

$$K_{D/CD} = \frac{L_D}{L_{D-C}} = \frac{L_D}{L_D + L_C} \quad (1)$$

A relação entre a largura do dente e a altura do dente é designada por $K_{LD/HD}$

$$K_{LD/LC} = \frac{L_D}{L_C} \quad (2)$$

Na Figura 2.2 mostram-se as principais dimensões do motor anelar.

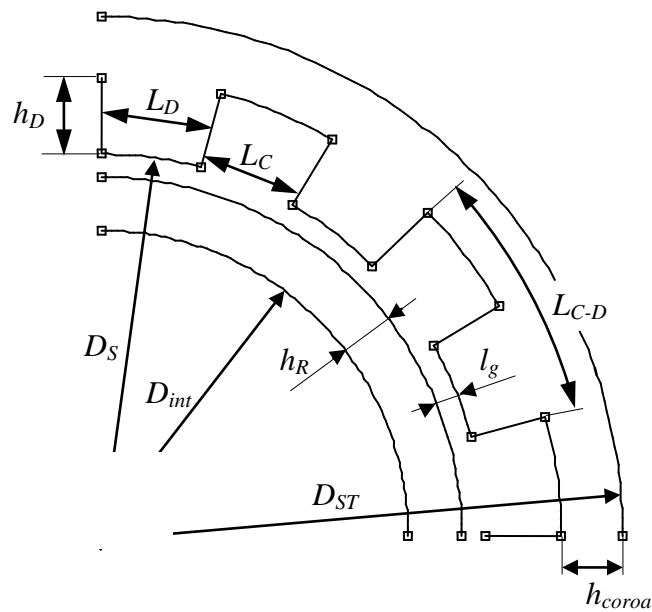


Figura 2.2. Dimensões geométricas do motor anelar.

Outro valor a ter em consideração é o comprimento do motor B_M . Este valor, em princípio, deverá ser igual ou superior à maior dimensão axial do hélice (ver Figura 2.3). É um valor do qual dependem a potência e o binário do motor.

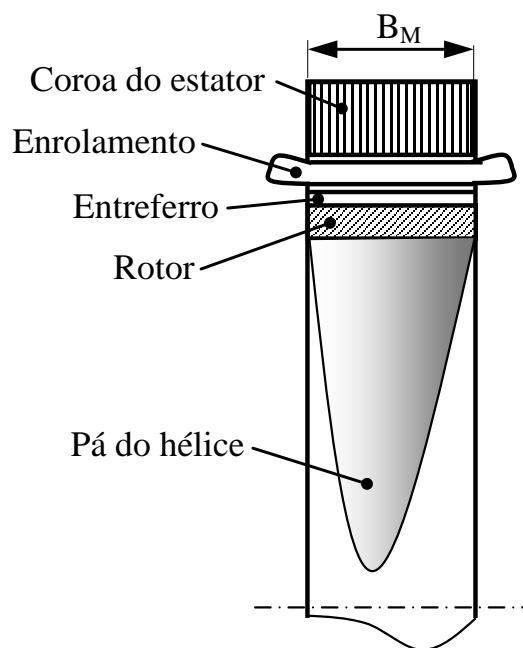


Figura 2.3. Vista em corte do motor anelar.

Na Tabela 2.I reúnem-se os parâmetros estabelecidos para um dado motor, assim como aqueles que, adquirindo um valor à partida, serão posteriormente modificados pelo algoritmo.

Tabela 2.I. Parâmetros Iniciais para o Cálculo do Motor Anelar.			
Símbolo	Designação	Observação	Exemplo
D_{int}	Diâmetro interior do hélice	Dado	440 mm
n_{syn}	Velocidade de sincronismo	Dado	1500 r.p.m.
N_F	Número de fases da fonte de alimentação	Dado	3
f	Frequência da fonte de alimentação	Dado	50 Hz
l_g	Comprimento do entreferro de ar	Valor inicial dado	1 mm
h_R	Espessura do rotor	Valor inicial dado	5 mm
$N_{C/P}$	Número de cavas por polo	Valor inicial dado	4
$N_{D/P}$	Número de dentes por polo	$N_{D/P} = N_{C/P}$	4
$K_{D/C}$	Relação dente/cava-dente	Valor inicial dado	0,5
$K_{LD/HD}$	Relação largura do dente/altura do dente	Valor inicial dado	1
B_M	Comprimento do motor	Valor inicial dado	100 mm

Os valores da Tabela 2.I podem ser utilizados para determinar os restantes parâmetros e dimensões do motor anelar. Pode calcular-se o número de polos P do motor:

$$P = \frac{120 \cdot f}{n_{syn}} \quad (3)$$

O diâmetro interior do estator D_S pode ser determinado a partir da espessura do rotor h_R e do comprimento do entreferro l_g :

$$D_S = D_{int} + 2h_R + 2l_g \quad (4)$$

O número total de cavas N_C é o produto do número de polos P pelo número de fases N_F e pelo número de cavas por polo $N_{C/P}$:

$$N_C = P \cdot N_F \cdot N_{C/P} \quad (5)$$

O número de dentes N_D é igual ao número de cavas:

$$N_D = N_C \quad (6)$$

Definindo o perímetro interior do estator como πD_S e dividindo-o pelo número de cavas N_C (ou pelo número de dentes N_D), obtém-se o comprimento de uma cava com um dente:

$$L_{C-D} = \frac{\pi \cdot D_S}{N_C} \quad (7)$$

Os valores já obtidos permitem calcular o comprimento do dente L_D como:

$$L_D = \frac{K_{D/C} L_{C-D}}{1 + K_{D/C}} \quad (8)$$

Sendo o comprimento da cava L_C dado por:

$$L_C = L_{C-D} - L_D \quad (9)$$

E a altura do dente h_D , e da cava, dados por:

$$h_D = \frac{L_D}{K_{LD/HD}} \quad (10)$$

A altura da coroa h_{coroa} é calculada, numa primeira aproximação, considerando que pela mesma passa metade fluxo magnético do polo correspondente. Assim, obtém-se

um valor correspondente à metade do produto entre número de dentes por polo $N_{D/P}$ e o comprimento do dente L_D ,

$$h_{coroa} = \frac{N_{D/P} \cdot L_D}{2} \quad (11)$$

Pode, agora, ser calculado o diâmetro externo do estator D_{ST} (ver Figura 2.2), como:

$$D_{ST} = D_S + 2h_D + 2h_{coroa} \quad (12)$$

Na Tabela 2.II reúnem-se os parâmetros calculados a partir dos valores dados. Os valores das Tabelas 2.I e 2.II permitem que o motor possa ser desenhado de modo automático, utilizando, por exemplo, os comandos em "script" do Programa LUA (<http://www.lua.org>) do FEMM.

Tabela 2.II. Dimensões de Motor Anelar Obtidas por Cálculo.			
Símbolo	Designação	Fórmula	Exemplo
P	Número de polos por fase	$P = \frac{120f}{n_{syn}}$	$\frac{120 \times 50}{1500} = 4$
D_S	Diâmetro interior do estator	$D_s = D_{int} + 2h_R + 2l_g$	$440 + 2 \times 5 + 2 \times 1 = 452$ mm
N_C	Número de cavas	$N_C = P \cdot N_F \cdot N_{C/P}$	$4 \times 3 \times 4 = 48$
N_D	Número de dentes	$N_D = N_C$	48
L_{C-D}	Comprimento cava-dente	$L_{C-D} = \frac{\pi \cdot D_S}{N_C}$	$\frac{\pi \cdot 452}{48} = 29,568$ mm
L_D	Comprimento do dente	$L_D = \frac{K_{D/C} L_{C-D}}{1 + K_{D/C}}$	$\frac{0,5 \times 29,568}{1 + 0,5} \approx 10$ mm
L_C	Comprimento da cava	$L_C = L_{C-D} - L_D$	$29,568 - 10 = 19,568$ mm
h_D	Altura do dente	$h_D = \frac{L_D}{K_{LD/HD}}$	$\frac{10}{1} = 10$ mm
h_{coroa}	Altura da coroa	$h_{coroa} = \frac{N_{D/P} \cdot L_D}{2} \quad (*)$	$4 \times 10 / 2 = 20$ mm
D_{ST}	Diâmetro externo do estator	$D_{ST} = D_S + 2h_D + 2h_{coroa}$	$452 + 2 \times 10 + 2 \times 20 = 512$ mm

Após o desenho da estrutura mecânica do motor (desenho do rotor e estator) anelar em estudo, o algoritmo de construção automática do modelo FEM procede ao cálculo e desenho do circuito elétrico do motor.

Numa primeira abordagem faz-se uma estimativa da corrente elétrica total permitida nas cavas do estator. Para isso, estima-se o valor da densidade de corrente δ , aplicando os valores calculados de altura do dente h_D e largura da cava L_C e entrando em consideração com o coeficiente de enchimento dos enrolamentos k_e . Assim, a corrente total estimada I_{TC} para as cavas do estator do motor é calculada de acordo com a equação (13).

$$I_{TC} = h_D \cdot L_C \cdot \delta \cdot k_e \quad (13)$$

Procede-se, então, ao cálculo das bobinas do estator, onde numa primeira abordagem são dados os valores iniciais para o diâmetro do condutor da bobinagem d_c , a tensão da fase, a corrente da fase e o número de espiras (o número de espiras inicial é obtido de um ciclo de geração e variação do número de espiras do algoritmo de dimensionamento do motor).

Recorrendo ao cálculo iterativo, um algoritmo de dimensionamento do motor usa esses valores iniciais de projeto para o dimensionamento final do circuito elétrico do motor, onde são apresentados os valores finais da secção do condutor e o número de espiras otimizados para o projeto. Na equação (14) está representada a equação de base para o cálculo da secção do condutor da bobinagem s_c , e na equação (15) a equação para o cálculo do número de espiras N .

$$s_c = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} \quad (14)$$

$$N = \frac{h_D \cdot L_C \cdot k_e}{s_c} \quad (15)$$

As bobinas do estator do motor de indução, devem suportar uma corrente de arranque total por fase que se estima ser de aproximadamente seis vezes a corrente total nas cavas do estator de acordo com a equação (16).

$$I_{TCC} = 6 I_{TC} \quad (16)$$

Segundo Martinha [14], isto é causado devido ao fato de o enrolamento do rotor (neste estudo o rotor está em curto circuito) em gaiola de esquilo ser de tão baixa resistência que quando o motor está parado corresponde a um curto-circuito no secundário dum transformador. Portanto, se o motor estiver ligado diretamente à linha de alimentação a corrente de arranque é grande, o que, no caso de motores de grande potência, causa grande perturbação na linha de alimentação.

Ainda segundo [14], os motores com potência até 7.5 HP (5.595 Kw) são estimados para correntes de arranque de **6 a 7 vezes** o valor normal de consumo de plena carga.

Na Tabela 2.III, reúnem-se os parâmetros para o cálculo do circuito elétrico do motor.

Tabela 2.III. Parâmetros usados no dimensionamento das bobinas do estator.			
Símbolo	Designação	Fórmula	Exemplo
I_{TC}	Corrente total na cava (I_{\max} fase A)	$I_{TC} = h_D \cdot L_C \cdot \delta \cdot k_e$	$10 \times 19,668 \times 20 \times 0,65 = 2557$ A
I_{TCC}	Corrente total de arranque (estimada)	$I_{TCC} = 6I_{TC}$	$2557 \times 6 = 15532$ A
d_c	Secção do condutor de bobinagem	Algoritmo iterativo	
s_c	Secção do condutor de bobinagem	$s_c = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4}$	
N	Número de espiras por cava	$N = \frac{h_D \cdot L_C \cdot k_e}{s_c}$	

No Apêndice A encontra-se um capítulo dedicado à construção automática do modelo FEM, reforçando assim o entendimento do processo construtivo.

2.2. Análise e obtenção dos parâmetros do esquema equivalente

O método de elementos finitos, é um método muito utilizado atualmente no cálculo dos parâmetros do motor de indução. Com esta técnica, é possível calcular e simular corretamente diversos parâmetros do motor ainda na fase do projeto sem ter que construir fisicamente um protótipo, economizando custos antes de ter um projeto final.

Bose et al. [15] afirma que, antigamente, para se obter os parâmetros do motor de indução, calculavam-se as correntes do rotor e do estator utilizando o modelo do circuito equivalente do motor. Sendo esta técnica conhecida como cálculo por abordagem do circuito. Trata-se de uma técnica bastante teórica, sem grandes resultados práticos, devido ao fato de considerar as correntes induzidas no rotor como elementos integrantes do cálculo.

Ainda segundo [15], a abordagem alternativa, que é muito utilizada atualmente, envolve o cálculo das correntes do estator como mencionado anteriormente, mas o cálculo da corrente do rotor é feito considerando essa corrente como correntes de perdas, mais precisamente, como correntes de *Foucoult* (*Eddy currents*).

O presente capítulo, tem como propósito descrever um método para a determinação dos parâmetros do modelo do motor de indução em diferentes condições de operação.

Será utilizada uma técnica que permita determinar a indutância de magnetização do motor, bem como os valores reais das indutâncias de dispersão do estator. Valores que não podem ser separados com medições clássicas.

2.2.1. O modelo do motor de indução aplicado ao FEM

Para o estudo do motor de indução trifásico, utiliza-se no presente trabalho o modelo equivalente do motor de indução recomendado pelo IEEE. É um modelo monofásico que representa o motor de indução no estado estacionário (frequência constante e velocidade constante). Realça-se que os cálculos feitos para a obtenção dos parâmetros do circuito equivalente pela técnica de elementos finitos são baseados nos

trabalhos científicos de Mayukh Bose, Anshuman Bhattacharjee e de Sudha R. [15], publicados em 2012, e David Meeker [12] publicado em 2004.

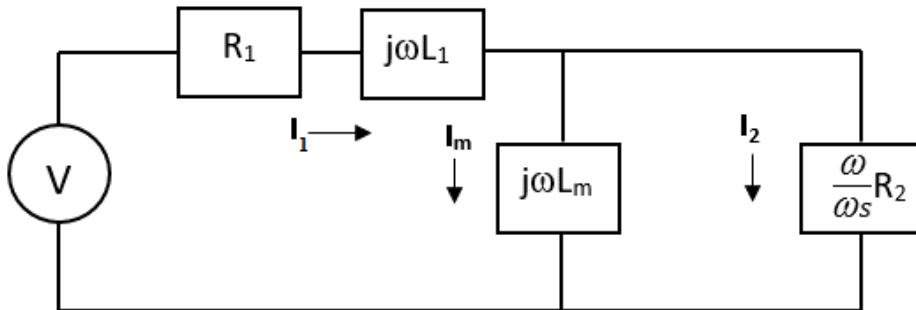


Figura 2.4. Circuito equivalente para o motor monofásico em função das indutâncias (adaptado de [15]).

Na Figura 2.4 mostra-se o circuito equivalente de um motor de indução utilizado para a determinação dos parâmetros do motor, sendo:

- R_1 – Resistência do estator.
- L_1 – Indutância de dispersão do estator.
- L_m – Indutância de magnetização.
- R_2 – Resistência do rotor referido ao primário.
- ω – Frequência elétrica da rede (rad/s).
- ω_s – Frequência de escorregamento (*slip frequency*).
- ω_r – Velocidade mecânica do veio do motor (velocidade angular).
- V – Tensão eficaz da fase.
- I_1 – Corrente eficaz do estator.
- I_2 – Corrente do rotor.
- I_m – Corrente de magnetização

Onde a velocidade mecânica do veio do motor ω_r , para uma dada frequência de escorregamento ω_s e frequência da rede elétrica, pode ser obtido com a expressão (17).

$$\omega_s = \omega - p\omega_r \quad (17)$$

Para a modelação matemática do motor de indução, recorre-se ao modelo do circuito equivalente do motor de indução da Figura 2.4, onde as equações do motor são deduzidas. Para isso, faz-se a análise do circuito da figura e calcula-se a impedância do circuito equivalente do motor Z_{eq} , conforme a expressão (18).

$$Z_{eq} = R_1 + j\omega L_1 + \left(\frac{j\omega L_m \frac{\omega}{\omega_s} R_2}{j\omega L_m + \frac{\omega}{\omega_s} R_2} \right) \quad (18)$$

Fazendo as devidas simplificações da equação (18), obtém-se a expressão (19).

$$Z_{eq} = R_1 + j\omega L_1 + \left(\frac{j\omega L_m}{1 + j \frac{\omega_s L_m}{R_2}} \right) \quad (19)$$

Da análise da equação (19), constata-se que a razão entre a indutância de magnetização e a resistência do rotor se traduz numa constante de tempo τ , denominada de contante de tempo do rotor [15].

Logo, fazendo $L_m / R_2 = \tau$ na equação (19), obtém-se:

$$Z_{eq} = R_1 + j\omega \left(L_1 + \frac{L_m}{1 + j\tau\omega_s} \right) \quad (20)$$

Com a expressão final da impedância equivalente da equação (20), obtém-se a indutância do circuito equivalente do motor L (indutância do motor) conforme se pode ver da equação (21).

$$L = L_1 + \frac{L_m}{1 + j\tau\omega_s} \quad (21)$$

Calculando o fluxo concatenado por fase do motor de indução, chega-se à expressão (22);

$$\phi = L \times I_1 \quad (22)$$

Onde:

ϕ – Representa o fluxo concatenado por fase do motor,

L – Representa a indutância do motor.

Fazendo um rearranjo na equação (21) com a equação (22), obtém-se o fluxo concatenado por fase do motor, conforme se mostra na equação (23).

$$\phi = \left(L_1 + \frac{L_m}{1 + j\tau\omega_s} \right) \times I_1 \quad (23)$$

O fluxo concatenado é facilmente calculado e com alta precisão usando o software de elementos finitos FEMM [15]. O fluxo concatenado obtido do FEMM, é dividido pela corrente eficaz da fase para obtenção da indutância L na frequência de escorregamento ω_s , e passa a ser denominado de indutância $L(\omega_s)$ do motor na frequência de escorregamento (isto porque é uma indutância dependente de ω_s , conforme se pode ver da equação (21)).

O valor de $L(\omega_s)$, conforme exposto anteriormente, é o da equação (21), e passa a ser representado pela equação (24):

$$L(\omega_s) = L_1 + \frac{L_m}{1 + j\tau\omega_s} \quad (24)$$

Separando $L(\omega_s)$ em termos de componentes reais e imaginária, obtém-se:

$$L(\omega_s) - L_1 = \frac{L_m(1 - j\tau\omega_s)}{(1 + j\tau\omega_s)(1 - j\tau\omega_s)} \quad (25)$$

E com as devidas simplificações matemáticas passa a ser:

$$L(\omega_s) = \left[L_1 + \left(\frac{L_m}{1 + (\tau\omega_s)^2} \right) \right] - j \left(\frac{\tau\omega_s L_m}{1 + (\tau\omega_s)^2} \right) \quad (26)$$

A equação (26), permite-nos identificar os parâmetros do motor a diferentes frequências de escorregamento ω_s .

Fazendo as relações mostradas em (27) e (28);

$$C_1 = \tau \times L_m \quad (27)$$

$$C_2 = \tau^2 \quad (28)$$

Obtém-se:

$$L(\omega_s) = \left[L_1 + \left(\frac{L_m}{1 + C_2 \omega_s^2} \right) \right] - j \left(\frac{\omega_s C_1}{1 + C_2 \omega_s^2} \right) \quad (29)$$

A parte imaginária da indutância $L(\omega_s)$ da equação (29), é utilizada para a obtenção do valor da indutância de magnetização L_m do motor, e a parte real utilizada para a obtenção da indutância do estator L_1 .

Separando a parte imaginária da equação (29), obtém-se a indutância imaginária do motor para uma determinada frequência de escorregamento ω_s , conforme mostrado na equação (30).

$$L_{\text{Im}} = - \left(\frac{\omega_s C_1}{1 + C_2 \omega_s^2} \right) \quad (30)$$

Simplificando a equação (30), obtém-se:

$$L_{\text{Im}} + C_2 \omega_s^2 L_{\text{Im}} = - \omega_s C_1 \quad (31)$$

Com as devidas simplificações, obtém-se uma equação linear, composta pelas constantes C_1 e C_2 necessárias ao cálculo dos parâmetros do esquema equivalente do motor pelo método FEM, o que será mostrado nos próximos subcapítulos.

$$C_1 \omega_s + C_2 \omega_s^2 L_{\text{Im}} = - L_{\text{Im}} \quad (32)$$

2.2.2. Obtenção dos parâmetros do modelo de elementos finitos

O modelo de elementos finitos do motor, é construído com base em dimensões físicas. É um modelo criado por um algoritmo de cálculo iterativo.

Com a simulação do modelo de elementos finitos do motor anelar em estudo numa gama de doze frequências, (**0.25 a 3 Hz**) obtêm-se as correspondentes indutâncias $L(\omega_s)$.

Estas correspondem à gama de frequências elétricas do rotor com o motor em movimento, ($f_r = sf$). Assim, simula-se o comportamento elétrico do motor em movimento, dado que no FEMM a análise é efetuada com o rotor estático (bloqueado).

Aplicando o método dos mínimos quadráticos aos valores das indutâncias $L(\omega_s)$, obtêm-se os parâmetros C_1 e C_2 necessários ao cálculo da indutância de dispersão L_l e de magnetização L_m .

Usando o método de mínimos quadrados pode deduzir-se que:

$$m = \begin{bmatrix} \omega_{s,1} & L_{Im,1} \omega_{s,1}^2 \\ \omega_{s,2} & L_{Im,2} \omega_{s,2}^2 \\ \vdots & \vdots \\ \omega_{s,n} & L_{Im,n} \omega_{s,n}^2 \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$b = \begin{bmatrix} -L_{Im,1} \\ -L_{Im,2} \\ \vdots \\ -L_{Im,n} \end{bmatrix} \quad (34)$$

Onde os parâmetros C_1 e C_2 podem ser obtidos de acordo com o método em análise, conforme se pode ver das expressões (35) e (36).

$$m \begin{Bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{Bmatrix} = b \quad (35)$$

$$\begin{Bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{Bmatrix} = (m^T m)^{-1} m^T b \quad (36)$$

Com isso, consegue-se obter o valor da indutância de magnetização L_m conforme é mostrado nas equações (27) e (28).

Para o cálculo da indutância de dispersão do estator L_l , utiliza-se a parcela real da indutância do motor $L(\omega_s)$ da equação (29), conforme se pode ver na equação (37).

$$L_{real} = \left[L_1 + \left(\frac{L_m}{1 + (\tau \omega_s)^2} \right) \right] \quad (37)$$

Fazendo um rearranjo na equação (37), obtém-se:

$$L_1 = \left[L_{real} - \left(\frac{L_m}{1 + (\tau \omega_s)^2} \right) \right] \quad (38)$$

Bose et al. [15] afirmam que para o cálculo da indutância de dispersão do estator L_1 , o melhor ajuste se verifica com a média das indutâncias L_1 calculadas nas respectivas frequências de escorregamento.

Para o cálculo da resistência do estator R_1 , recorre-se à média das resistências R_1 obtidas do FEMM nas respectivas frequências de escorregamento.

O valor da resistência do rotor R_2 calcula-se a partir da expressão (39).

$$R_2 = \frac{L_m}{\tau} \quad (39)$$

2.3. Análise de funcionamento do motor com o esquema equivalente

Calculados os parâmetros do circuito equivalente do motor de indução pelo método de elementos finitos, é possível modelar o motor de indução a fim de estudá-lo teoricamente sem ter que recorrer-se ao protótipo real (numa primeira abordagem) para a obtenção das respostas pretendidas. Algumas das perguntas feitas ainda na fase de projeto poderão ser: como o motor se irá comportar mecanicamente? Ou, mais precisamente, qual será o binário de arranque do motor, qual será o binário máximo, o escorregamento ou ainda qual será a velocidade do veio do motor? Todas estas perguntas, podem ser respondidas utilizando o modelo do circuito equivalente. Para a análise de funcionamento do motor, obtido do modelo de elementos finitos, utiliza-se o esquema equivalente mostrado na Figura 2.5.

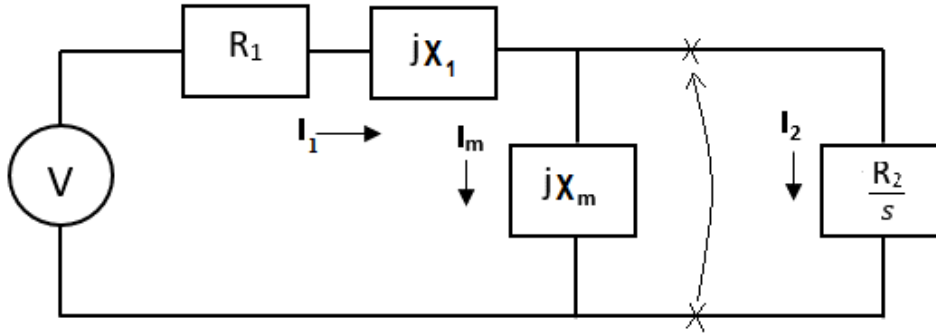


Figura 2.5. Circuito equivalente do motor de indução em função das reactâncias.

O esquema equivalente pode ser utilizado para calcular o binário do motor, a corrente de arranque, o fator de potência, o rendimento do motor, as potências de entrada e saída, a potência consumida no entreferro e as respetivas curvas de funcionamento.

Para analisar o motor, pode recorrer-se ao equivalente de *Thévenin* do esquema equivalente da Figura 2.5 conforme se pode ver na Figura 2.6.

Da análise de circuito elétrico pelo método de *Thévenin*, [16] que não é explicado ao pormenor neste trabalho, obtém-se a tensão de *Thévenin* V_{Th} e a impedância de *Thévenin* Z_{Th} do esquema equivalente da Figura 2.5 conforme se mostra nas equações (40) e (41), respetivamente.

$$V_{Th} = V \frac{X_m}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}} \quad (40)$$

$$Z_{Th} = R_{Th} + jX_{Th} = \frac{jX_m (R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \quad (41)$$

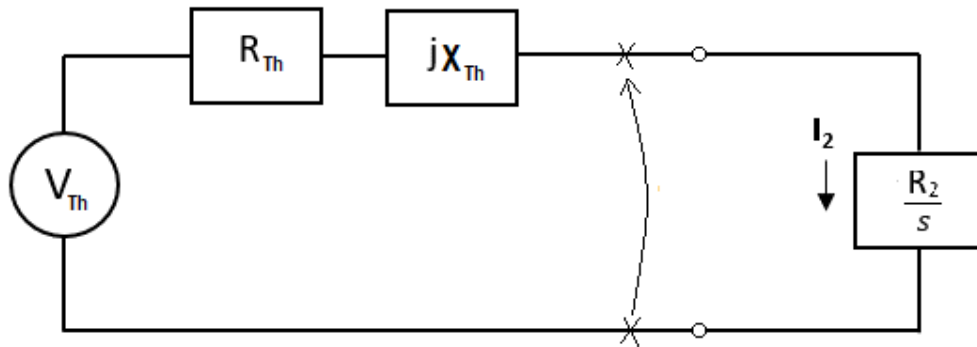


Figura 2.6. Circuito equivalente de *Thévenin* do esquema equivalente do motor anelar.

Calculando a corrente no rotor I_2 , obtém-se:

$$I_2 = \frac{V_{Th}}{Z_{eq}} = \frac{V_{Th}}{\sqrt{\left(R_{Th} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{Th}^2}} \quad (42)$$

Onde,

Z_{eq} – Impedância equivalente do circuito da Figura 2.6;

X_{th} – Reactância de *Thévenin*;

R_{th} – Resistência de *Thévenin*.

Com o conhecimento da velocidade síncrona e da potência no entreferro do motor anelar, obtém-se o binário do motor [16].

A velocidade síncrona é expressa pela equação (3), enquanto que a potência no entreferro pela equação (43).

$$P_{EF} = 3 I_2^2 \frac{\omega}{\omega_s} R_2 \quad (43)$$

Sabendo que $\Omega/\Omega_s = 1/s$, fica:

$$P_{EF} = 3 I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (44)$$

Substituindo a equação (42) na equação (44) obtém-se a expressão final para a potência no entreferro, conforme se vê nas equações (45) e (46).

$$P_{EF} = 3 \left(\frac{V_{Th}}{\sqrt{\left(R_{Th} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{Th}^2}} \right)^2 \frac{R_2}{s} \quad (45)$$

$$P_{EF} = \frac{3V_{Th}^2 \times \frac{R_2}{s}}{\left(R_{Th} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{Th}^2} \quad (46)$$

Da equação (3), pode-se obter a velocidade angular síncrona do motor ω_{syn} conforme mostra a equação (47).

$$\omega_{syn} = \frac{120f}{P} \times \frac{2\pi}{60} \quad (47)$$

Para o cálculo do binário do motor T , recorre-se à fórmula indicada na equação (48).

$$T = \frac{P_{EF}}{\omega_{syn}} \quad (48)$$

Substituído a potência do entreferro na equação (48), obtém-se:

$$T = \frac{3V_{Th}^2 \times \frac{R_2}{s}}{\omega_{syn} \left[\left(R_{Th} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{Th}^2 \right]} \quad (49)$$

A equação (49), é utilizada no algoritmo de análise do modelo de elementos finitos desenvolvido neste estudo. Com isso consegue-se obter o binário do motor em função da velocidade.

2.4. Conclusão

Para o efeito da validação da metodologia de projeto desenvolvida nesta dissertação, no Apêndice B, foi feito um estudo de validação do método de elementos finitos usando o FEMM.

Neste estudo aplicado à metodologia de projeto, foi utilizado um motor de indução real. Foi construído o modelo de elementos finitos do motor (motor do laboratório) a fim de obter os parâmetros do circuito equivalente. Os valores, obtidos dos parâmetros do circuito equivalente do modelo do motor de indução, foram comparados com os parâmetros reais do motor. Da análise comparativa dos resultados obtidos, chegou-se à conclusão que a técnica de análise por elementos finitos usando o FEMM e a metodologia desenvolvida são válidas.

3. IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO

Neste capítulo descreve-se o princípio de funcionamento dos algoritmos desenvolvidos para a criação da metodologia de projeto de um motor de indução anelar. Os algoritmos são criados no *Matlab* e contêm instruções para o comando do software de elementos finitos FEMM, usando o *LUA script*.

Na Figura 3.1 encontra-se ilustrado o algoritmo desenvolvido para a metodologia de projeto de um motor de indução anelar. Conforme mencionado no capítulo 2 desta dissertação, pretende-se com esta metodologia de projeto de motores de indução anelares, dimensionar um motor usando a técnica de cálculo iterativo baseado em elementos finitos.

Para tal, e como é ilustrado no fluxograma da Figura 3.1, começa-se com a criação de um algoritmo de cálculo iterativo no Matlab, onde são estabelecidos os parâmetros e restrições iniciais para a criação do desenho do motor.

Após a recolha de dados de projeto pelo algoritmo, o desenho do motor é feito de forma automática mediante o uso de expressões matemáticas. Com o modelo de elementos finitos do motor anelar já criado, calculam-se os parâmetros do circuito equivalente a fim de se ter um modelo equivalente do motor.

Após a criação do modelo equivalente do motor, é realizada a análise do motor através do esquema equivalente sem se recorrer a construção de um protótipo. Se o modelo do motor criado não corresponder às necessidades do projeto em estudo, volta-se a etapa inicial onde os parâmetros e restrições iniciais são variados até se conseguir o melhor resultado.

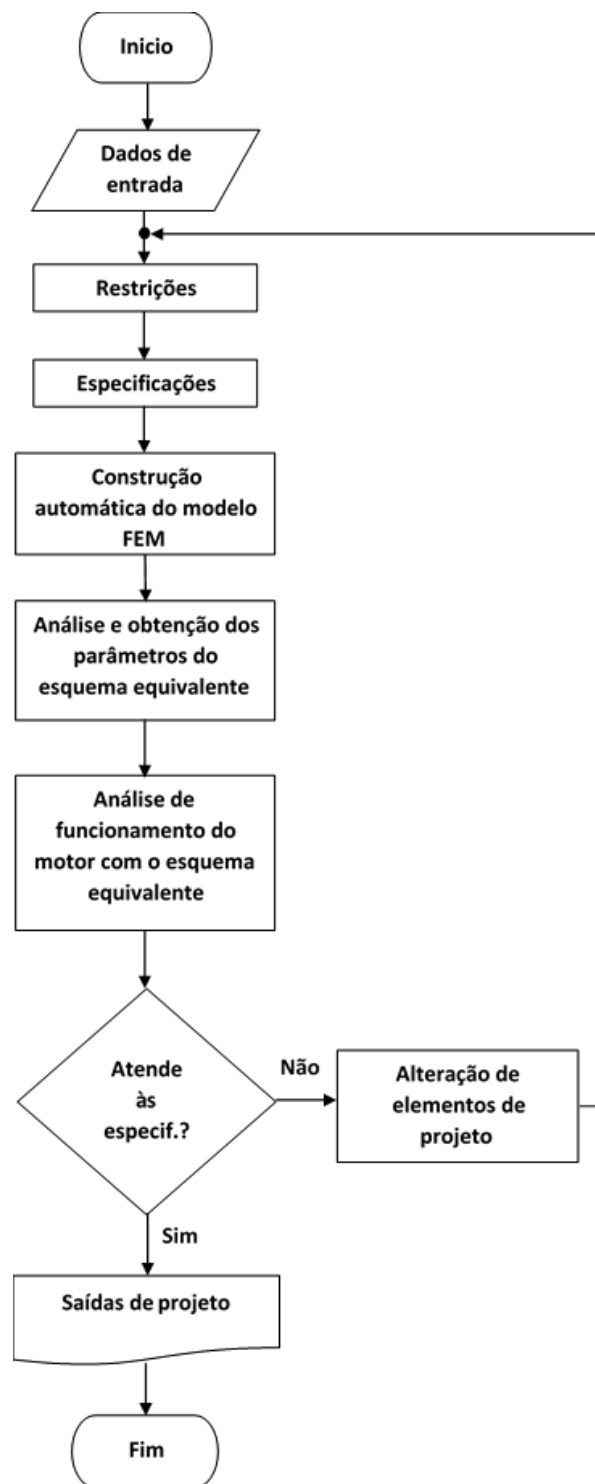


Figura 3.1. Fluxograma do algoritmo principal da metodologia de projeto do motor de indução anelar.

O algoritmo principal da metodologia de projeto de um motor de indução anelar desenvolvido neste estudo, está subdividido nos seguintes sub-algoritmos:

- Sub-algoritmo de construção automática do modelo FEM
- Sub-algoritmo de análise e obtenção dos parâmetros do esquema equivalente do modelo FEM
- Sub-algoritmo de análise de funcionamento do motor com o esquema equivalente

3.1. Sub-algoritmo de construção automática do modelo FEM

Na Figura 3.2 encontra-se ilustrado o sub-algoritmo para o desenho automático do modelo de elementos finitos desenvolvido nesta dissertação (explicado no subcapítulo 2.1.).

Este sub-algoritmo começa com a declaração das variáveis locais e globais de projeto. Após a criação das variáveis de projeto, estas são utilizadas para o armazenamento dos dados de entrada de projeto que são solicitados pelo algoritmo.

É neste sub-algoritmo que toda a formulação matemática e geométrica para a construção da geometria do motor é feita, mediante o uso das fórmulas já desenvolvidas nesta dissertação.

A fim de complementar a explicação do princípio de funcionamento da metodologia de projeto, no Apêndice D, apresenta-se parte dos códigos usados no Matlab para a implementação do algoritmo.

Nestes códigos, mostra-se como foi implementado o algoritmo para a metodologia de projeto em estudo.

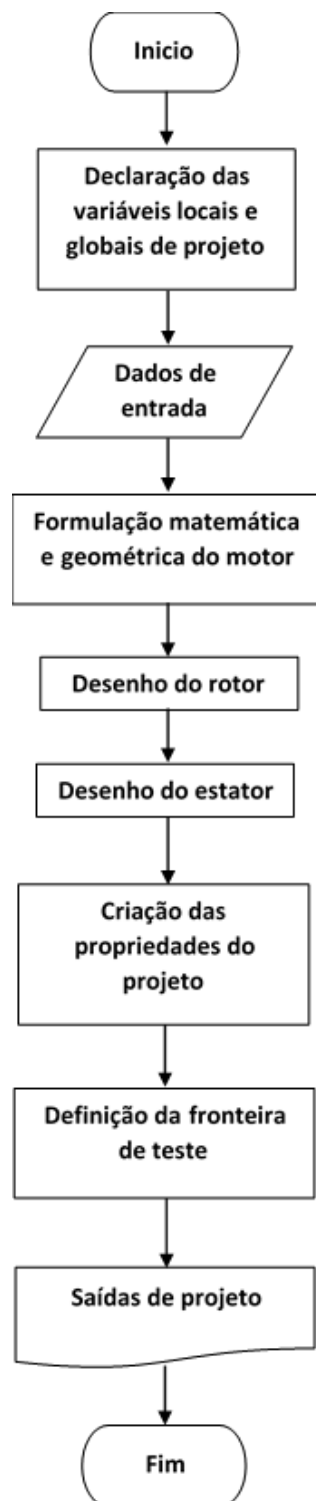


Figura 3.2. Fluxograma do sub-algoritmo de construção automática do modelo FEM.

O código desenvolvido para esta etapa do sub-algoritmo de construção automática do modelo de elementos finitos foi implementado num ficheiro-m do Matlab, onde as variáveis foram declaradas e inicializadas ao mesmo tempo, conforme se pode ver do trecho de código do Algoritmo D. 1 da página 103.

Devido a extensão das linhas de códigos dos sub-algoritmos, apenas os códigos com maior relevância são comentados ao longo deste estudo.

No Algoritmo D. 2 da página 104 encontra-se o código de construção automática do modelo de elementos finitos do motor anelar. O código começa com o comando de criação do diretório de trabalho e instruções para o acionamento do FEMM e criação do novo documento de trabalho no diretório já criado.

Também são definidas as variáveis globais do projeto necessárias ao bom funcionamento do algoritmo. Conforme se pode ver no código do Algoritmo D. 2, são criados ficheiros-m no Matlab com os códigos necessários à formulação matemática do desenho e com instruções para o desenho do motor.

Com o intuito de simplificar o sub-algoritmo, este é dividido em sub-rotinas alocadas em ficheiros-m, melhorando assim o aspeto visual dos códigos. São exemplos, as sub-rotinas para a formulação matemática da geometria do motor, as sub-rotinas para o desenho do rotor e estator, as sub-rotinas para a criação das bobinas e a definição das propriedades dos materiais, entre outras.

Concluídas todas as etapas de processamento da construção automática do modelo de elementos finitos do motor anelar, são apresentadas como saídas de projeto, o desenho do motor e as respetivas dimensões físicas.

Na Figura 3.3 é apresentado um exemplo de um modelo de elementos finitos gerado automaticamente pelo sub-algoritmo de construção automática, assim como os dados de saída referentes às dimensões do modelo apresentado, conforme se mostra na Tabela 3.I.

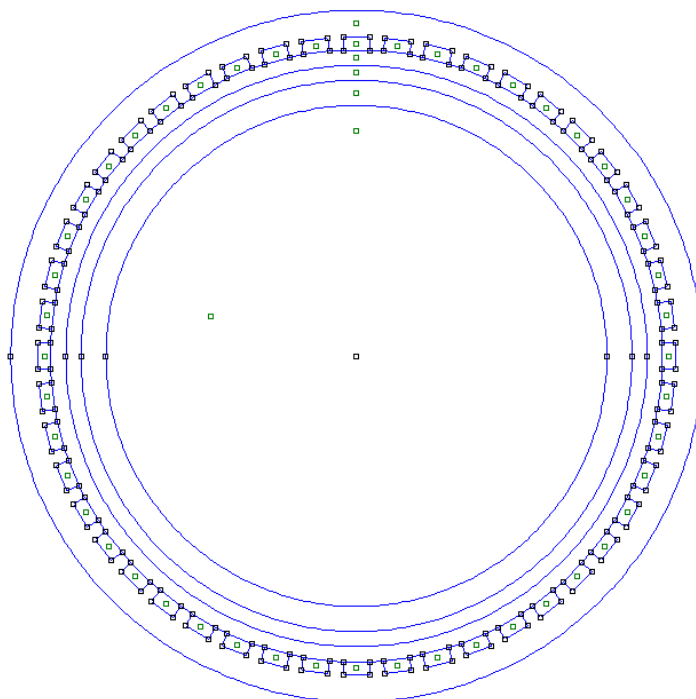


Figura 3.3. Desenho do modelo FEM gerado automaticamente.

Na Tabela 3.I encontra-se um exemplo das dimensões de saída geradas automaticamente pelo algoritmo de construção automática.

Tabela 3.I. Dimensões de saída do modelo FEM gerado automaticamente.		
Dimensões do motor em [mm]		
Designação	Unidade	Valor (exemplo)
Diâmetro do hélice	mm	431.8
Espessura do anel interno do rotor	mm	5
Espessura do anel externo do rotor	mm	1
Espessura total do rotor	mm	6
Diâmetro externo do rotor	mm	441.8
Diâmetro interno do estator	mm	445.8
Largura da cava	mm	19.5
Altura da cava	mm	9.7
Largura do dente	mm	9.7
Comprimento cava-dente	mm	29.2
Altura da coroa do estator	mm	19.5
Diâmetro externo do estator	mm	504.2
Diâmetro do condutor da bobinagem	mm	3

3.2. Sub-algoritmo de análise e obtenção dos parâmetros do esquema equivalente do modelo FEM

No subcapítulo 3.1 falou-se do sub-algoritmo de implementação automática do modelo de elementos finitos. Após a criação automática do modelo de elementos finitos do motor anelar, recorre-se à sua análise a fim da obtenção dos parâmetros do esquema equivalente do motor.

No entanto, antes da análise do motor para a obtenção dos parâmetros do esquema equivalente é necessário dimensionar os enrolamentos.

3.2.1. Dimensionamento dos enrolamentos do motor

Na Figura 3.4 encontra-se representado o algoritmo de dimensionamento dos enrolamentos do motor.

O algoritmo tem por objetivo calcular a secção do condutor da bobina do estator e o número de espiras por cava mediante os dados de entrada. O cálculo da secção do condutor da bobina é feito mediante a introdução da corrente nominal da fase e densidade da corrente estimada para o projeto. O cálculo do número de espiras é feito de forma iterativa, onde o algoritmo de dimensionamento da bobina gera um ciclo de variação do número de espiras no estator. Para cada valor da espira gerada no ciclo, é feita a análise do motor tendo como objetivo obter a tensão de fase do motor. O número de espiras calculado será o que corresponde à tensão de fase em concordância com os restantes dados do projeto.

Com esta técnica de cálculo, conseguem-se resultados difíceis de obter de forma analítica, devido às não linearidade existentes, associadas muitas vezes à alta saturação do material ferromagnético.

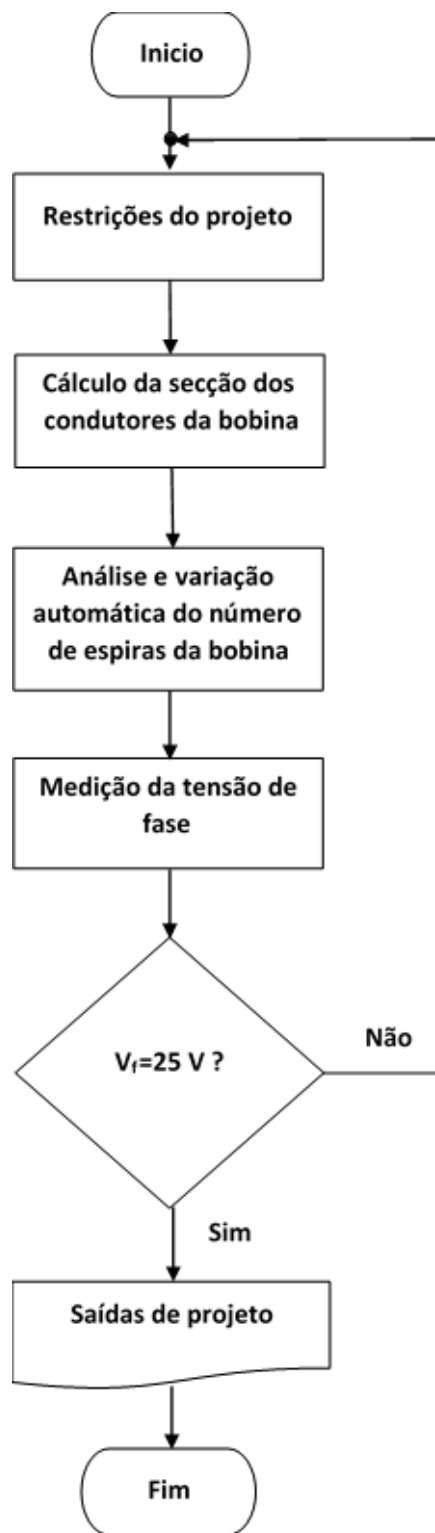


Figura 3.4. Fluxograma do sub-algoritmo de dimensionamento dos enrolamentos do motor.

No Algoritmo D. 3 da página 105 encontra-se o código usado para o dimensionamento do motor. O código mostra que após o cálculo da secção do condutor da bobina, é criado um ciclo para a variação do número de espiras do motor. Para cada variação do número de espiras, o motor é analisado, gerando as tensões de saída da fase necessárias para a comparação com a tensão da fase dada. O ciclo continua até que a condição da tensão da fase medida ser verdadeira, conforme se ilustra no fluxograma da Figura 3.4.

Terminado o processo de cálculo da secção do condutor e do número de espiras da bobina, o motor é analisado para a obtenção dos parâmetros do esquema equivalente.

No presente estudo, o motor é analisado para quatro espessuras diferentes dos anéis constituintes do rotor. Com isso pretende-se obter uma maior otimização do projeto do motor anelar em estudo.

Para isso, conforme vê-se no fluxograma da Figura 3.5, é gerado um ciclo de variação da espessura do rotor ou dos anéis constituintes do rotor (que é o caso) que permita obter o melhor resultado do motor a ser projetado.

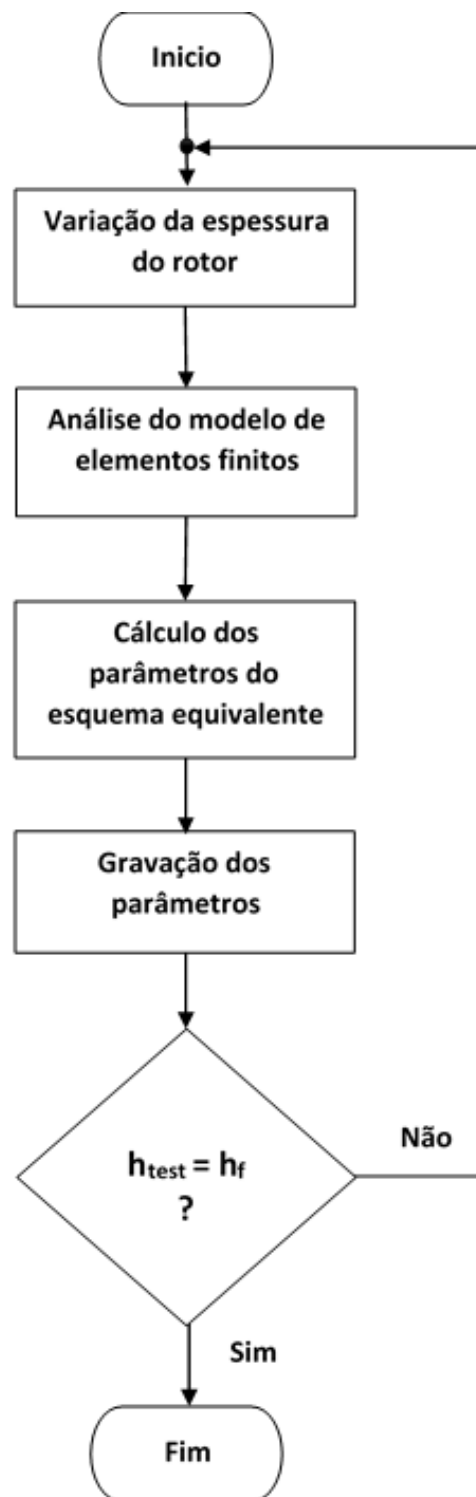


Figura 3.5. Fluxograma do ciclo de variação da espessura do rotor para o cálculo dos parâmetros do modelo FEM.

O fluxograma da Figura 3.5 explica o ciclo de variação da espessura dos anéis do rotor. Para cada espessura dos anéis do rotor, o motor é analisado e são obtidos os parâmetros do esquema equivalente que são gravados até que a condição da espessura máxima predefinida no projeto seja atingida.

3.2.2. Obtenção dos parâmetros do esquema equivalente do modelo FEM

No fluxograma da Figura 3.6 ilustra-se a análise e o cálculo dos parâmetros do esquema equivalente do motor de indução (trata-se de uma representação detalhada das etapas de análise e obtenção dos parâmetros do esquema equivalente do fluxograma da Figura 3.5). A técnica consiste em variar a frequência de teste do motor, perto das frequências que são induzidas no rotor durante o funcionamento normal do motor (frequência de escorregamento). Com isso, simula-se o movimento do rotor do motor que se encontra bloqueado no FEMM.

Para cada espessura dos anéis do rotor do motor, este é analisado para uma gama de doze frequência de escorregamentos diferentes. Com isso, consegue-se extrair a indutância do motor para cada espessura do rotor nas doze frequências de teste.

As indutâncias obtidas para cada espessura do rotor e nas doze frequências de teste, são gravadas e utilizadas posteriormente para o cálculo dos parâmetros do motor.

Do fluxograma da Figura 3.6 pode-se ver que a obtenção dos parâmetros do motor, só é conseguida, após a análise do modelo FEM nas doze frequências de teste (frequências de escorregamento).

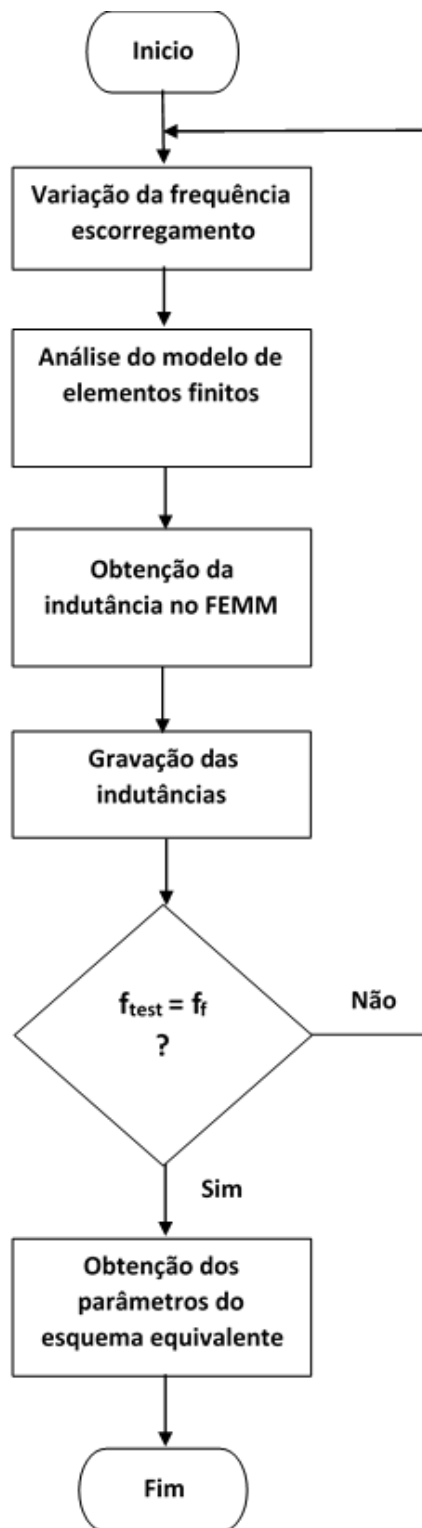


Figura 3.6. Fluxograma geral do cálculo dos parâmetros do motor.

À semelhança do que acontece nos laboratórios, para a obtenção dos parâmetros do motor, é necessário submetê-lo ao movimento. No entanto, no FEMM o rotor encontra-se bloqueado. Isso ocorre porque o FEMM é um software de análise magnetostático. Logo, com o intuito de resolver este problema, foi criado em [15] uma metodologia de variação de frequências para simular o movimento do rotor e superar o problema do rotor bloqueado. Neste trabalho, foi usada esta metodologia de variação de frequências, e é apresentada de seguida.

No Algoritmo D. 4 da página 106 representa-se parte do código criado para a geração das frequências de escorregamento do motor usadas no cálculo dos parâmetros do motor.

De modo resumido, pode-se dizer que, uma vez criado o mecanismo de simulação do movimento do motor no FEMM, o modelo é simulado na gama de frequências geradas (de **0.25** a **3 Hz**) a fim de obtenção das indutâncias do motor de elementos finitos nas respetivas frequências de escorregamento.

Para a obtenção da indutância do motor, o modelo é simulado para cada frequência de escorregamento gerada, obtendo do FEMM um total de doze indutâncias $L(\omega_s)$. Essas indutâncias obtidas do FEMM, são representadas pela equação (29) da página 31.

No Algoritmo D. 5 da página 107 encontra-se parte do código que precede o mecanismo de criação das frequências de escorregamento. Com este código do sub-algoritmo de análise e obtenção dos parâmetros do esquema equivalente do modelo de elementos finitos, pode-se ver que o modelo é analisado para cada frequência de escorregamento.

As indutâncias $L(\omega_s)$ obtidas do código do Algoritmo D.5 são expressas em forma de números complexos. A parte real e a parte imaginária dessas indutâncias são usadas para o cálculo da indutância de dispersão do estator L_l e indutância de magnetização do motor L_m conforme as equações (38) e (27) respetivamente.

No Algoritmo D. 6 da página 107, encontra-se o código de implementação da técnica de mínimos quadrados para a obtenção dos parâmetros C_1 e C_2 conforme as equações (33), (34), (35) e (36) explicados no subcapítulo 2.2.2 da página 32.

No Algoritmo D. 7 da página 108 apresenta-se o código de obtenção dos parâmetros do esquema equivalente do motor. Sendo a indutância de dispersão do estator representado pela equação (38) da página 33.

3.3. Sub-algoritmo de análise de funcionamento do motor com o esquema equivalente

A análise de funcionamento do motor com o esquema equivalente, é baseado nas equações de *Thévenin* (40) e (41).

Após a obtenção dos parâmetros do esquema equivalente do modelo FEM, são gerados como dados de saídas, um conjunto de gráficos que ilustram o comportamento do motor em função da velocidade.

Os gráficos apresentados, são constituídos por quatro curvas que representam quatro combinações diferentes da espessura dos anéis do rotor.

As curvas geradas são: Curvas do binário, da corrente do estator, do fator de potência, do rendimento, da potência de entrada, da potência no entreferro e da potência de saída, todas em função da velocidade do motor.

3.3.1. Curvas do binário em função da velocidade

Nesta secção apresenta-se os códigos do sub-algoritmo de análise de funcionamento do motor com o esquema equivalente, que permitem o traçado das curvas do motor do modelo de elementos finitos em função da espessura e da velocidade do rotor.

No Algoritmo D. 8 da página 108 apresenta-se o trecho do sub-algoritmo de análise de funcionamento do motor com o esquema equivalente. O sub-algoritmo começa com a inicialização das variáveis com os parâmetros do esquema equivalente já calculados.

Após a inicialização das variáveis com os parâmetros do motor já calculados, recorre-se à formulação matemática do problema. Para isso, usa-se as fórmulas derivadas do método do esquema equivalente de *Thévenin*, conforme pode-se ver no Algoritmo D. 9 da página 109.

No Algoritmo D. 10 da página 109 ilustra-se a parte do código do sub-algoritmo de análise de funcionamento do motor pelo esquema equivalente, responsável pela criação dos valores de escorregamento necessários à simulação. Neste código, são

gerados cinquenta e um valores de escorregamento situados entre zero e um. Com este intervalo de valores do escorregamento, consegue-se aumentar a precisão das medições.

Para o traçado das curvas do binário, o sub-algoritmo em análise usa a equação (49) da página 36, conforme pode-se ver do Algoritmo D. 11 da página 110.

Para finalizar, no Algoritmo D. 12 da página 110 encontra-se o código para a impressão das curvas do binário do motor na tela do computador.

3.3.2. Curvas da corrente no estator em função da velocidade

Para o cálculo da corrente no estator, recorre-se ao circuito equivalente do motor de indução da Figura 2.4 da página 28.

Onde a corrente no estator é definida pela equação (50). Sendo a impedância do circuito equivalente do motor definida pela equação (18) da página 29.

$$I_1 = \frac{V}{Z_{eq}} \quad (50)$$

A implementação do algoritmo para o cálculo da corrente do estator é baseada nestas duas equações, (18) e (50) conforme pode-se ver no trecho do Algoritmo D. 13 da página 111. Trata-se do código usado para o traçado das curvas da corrente do estator.

No Algoritmo D. 14 da página 111 encontra-se o código responsável para a impressão das curvas na tela.

3.3.3. Curvas do fator de potência do motor

Da análise de circuitos de corrente alternada, sabe-se que a corrente do estator I_1 da equação (50) está desfasada em relação à tensão de entrada V por um ângulo φ . Fazendo o cosseno do ângulo φ , encontra-se o fator de potência conforme se mostra no Algoritmo D. 15 da página 112.

No Algoritmo D. 16 da página 112 encontra-se o código para a impressão das curvas do fator de potência na tela.

3.3.4. Cálculo do rendimento do motor

Para o cálculo do rendimento do motor, precisa-se conhecer a potência de entrada e de saída do motor.

Onde a potência de saída do motor é igual à potência de conversão do motor menos as perdas rotacionais, conforme ilustrado na equação (52) .

A potência de entrada do motor, por sua vez depende da corrente e tensão de entrada nas fases do motor, e do desfasamento entre a corrente e a tensão, conforme se pode ver na equação (55). A potência do entreferro necessária aos cálculos está representada na equação (44) da página 36.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (51)$$

$$P_{out} = P_{conv} - P_{rot} \quad (52)$$

$$P_{conv} = (1 - s)P_{EF} \quad (53)$$

$$P_{out} = (1 - s)P_{EF} - P_{rot} \quad (54)$$

$$P_{in} = 3V I_1 \cos \varphi \quad (55)$$

No Algoritmo D. 17 da página 112 apresenta-se o *laço for* criado no algoritmo da metodologia de projeto para o cálculo do rendimento do motor. O código mostra a aplicação do método de *Thévenin* já mencionado anteriormente, e a aplicação das equações (44), (51), (52), (53), (54) e (55).

As equações e o código usado para o cálculo do rendimento, podem ser usadas para o cálculo da potência de entrada do motor, para o cálculo da potência do entreferro e para o cálculo da potência de saída (potência mecânica), alterando apenas o código de impressão das curvas na tela.

3.4. Conclusão

Nesta secção, foi feita a implementação do algoritmo da metodologia de projeto recorrendo ao uso de fluxogramas e linhas de código. Com o algoritmo desenvolvido, conseguiu-se fazer o estudo do motor, onde dados de projeto são recolhidos, permitindo assim a criação de um modelo de elementos finitos.

Com a criação do modelo de elementos finitos do motor anelar, conseguiu-se obter os parâmetros do esquema equivalente do motor, permitindo assim, traçar um conjunto de curvas de funcionamento do motor, entre as quais, a curva do binário, corrente do estator, fator de potência, rendimento, etc.

4. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Partindo do pressuposto que o objetivo deste estudo é desenvolver uma metodologia de projeto de motores de indução anelares e que a metodologia em estudo precisa ser aplicada a um projeto prático, apresenta-se de seguida a simulação para o projeto de um motor de indução anelar aplicado á propulsão elétrica naval.

A simulação tem como base a análise do funcionamento do motor de indução anelar a partir do seu esquema equivalente, obtido a partir dos parâmetros de um modelo de análise por elementos finitos.

4.1. Exemplo de aplicação:

Para o efeito de teste da metodologia de projeto de motores de indução anelares desenvolvida no presente trabalho, apresenta-se na Tabela 4.I os dados de entrada de projeto, destinados ao projeto e simulação de um motor de indução anelar (motor-hélice) aplicado à propulsão elétrica naval.

Tabela 4.I. Dados de entrada de projeto para o motor-hélice.			
Símbolo	Designação	Unidade	Valor
f	Frequência elétrica do motor,	Hz	50
L_{axial}	Comprimento axial do motor,	mm	200
D_{int}	Diâmetro interno do hélice,	mm	431.8
V_p	Tensão de pico da fase,	V	38
I_n	Corrente nominal da fase,	A	180
n_{syn}	Velocidade síncrono do motor,	rpm	1500
$K_{D/C}$	Relação dente-cava do estator do motor,	un	1
$K_{LD/HD}$	Relação largura do dente/altura do dente,	un	1
$N_{C/P}$	Número de cavas por polo,	un	4
l_g	Espessura do entreferro,	mm	0.5
δ	Densidade de corrente elétrica no motor,	A/mm ²	20
K_e	Coefficiente de enchimento das cavas do estator,	un	0.65
h_{R1}	Espessura do anel interno do rotor,	mm	4
h_{R2}	Espessura do anel externo do rotor,	mm	1

A metodologia de projeto de motores de indução anelares desenvolvida neste trabalho, permite o dimensionamento de um motor de indução anelar mediante a solicitação de dados de entrada conforme os indicados na Tabela 4.I.

Para a simulação do motor-hélice, é aplicada a metodologia desenvolvida nesta dissertação. O algoritmo desenvolvido, solicita os dados de entrada de projeto e desenha o motor-hélice de forma automática, apresentando como saída de projeto, o desenho do motor e as respectivas dimensões em milímetros. Após isso, o número de espira e a secção dos condutores das bobinas do estator são calculadas e o motor analisado.

Feito o estudo do motor-hélice do exemplo prático apresentado acima, apresenta-se na Tabela 4.II os parâmetros do circuito equivalente obtidos da simulação do modelo de elementos finitos.

O motor-hélice em estudo apresenta a estrutura indicada na Figura 3.3, constituída por um rotor de dois anéis de materiais diferentes. O primeiro anel h_{R1} é de ferro e o segundo anel h_{R2} é de alumínio.

A simulação foi feita considerando as espessuras dos anéis h_{R1} e h_{R2} indicadas na Tabela 4.II, onde a espessura total do rotor é igual a **5 mm**.

Tabela 4.II. Dados de saída de projeto.					
Parâmetros do circuito equivalente do modelo FEM					
Resistência R1 (Ω)	Indutância L1 (H)	Reactância Lm (H)	Resistência R2 (Ω)	Combinação dos anéis do rotor	
				h_{R1} (mm)	h_{R2} (mm)
0.0390	4.7248 e -04	0.0016	0.0131	1	4
0.0413	6.1816 e -04	0.0020	0.0167	2	3
0.0455	8.5622 e -04	0.0025	0.0244	3	2
0.0560	0.0014	0.0036	0.0506	4	1

Na Tabela 4.III estão indicadas as dimensões do motor-hélice geradas automaticamente pela metodologia de projeto em estudo.

Tabela 4.III.Dados de saída de projeto (dimensões do motor).			
Símbolo	Designação	Unidade	Valor
D_{int}	Diâmetro do hélice	mm	431.8
h_R	Espessura total do rotor	mm	5
	Diâmetro externo do rotor	mm	433.8
D_S	Diâmetro interno do estator	mm	442.8
D_{ST}	Diâmetro externo do estator	mm	529.7
L_C	Largura da cava	mm	14.49
L_D	Largura do dente	mm	14.49
h_D	Altura do dente (equiv. altura da cava)	mm	14.49
L_{C-D}	Comprimento cava-dente	mm	28.98
h_{coroa}	Altura da coroa do estator	mm	28.98
d_c	Diâmetro do condutor da bobina	mm	3
N	Número de espiras por cava	Un	4

Após a criação do modelo de elementos finitos e da obtenção dos parâmetros do esquema equivalente do modelo de elementos finitos, o motor é analisado pelo esquema equivalente.

Recorrendo ao método de *Thévenin* para a análise de circuitos elétricos, constrói-se o esquema equivalente de *Thévenin* a partir do esquema equivalente do motor de indução, permitindo assim a criação de meios para a análise da dinâmica do motor de indução, conforme indicado no capítulo de implementação do algoritmo.

4.1.1. Análise do motor pelo esquema equivalente

Para a análise da dinâmica do motor de indução anelar, a metodologia desenvolvida nesta dissertação permite analisar o motor através do esquema equivalente, retornando as seguintes saídas:

- Curvas do binário do motor em função da velocidade do motor;
- Curvas da corrente do estator em função da velocidade;
- Curvas do fator de potência do motor em função da velocidade;
- Curvas do rendimento do motor em função da velocidade;

- Curvas da potência de entrada do motor (potência elétrica) em função da velocidade;
- Curvas da potência do entreferro do motor também em função da velocidade;
- E por fim, curvas da potência de saída do motor (potência mecânica) em função da velocidade.

No gráfico da Figura 4.1 ilustra-se a curva do binário do motor-hélice do exemplo de aplicação em estudo.

Da análise das curvas do binário do motor-hélice, consta-se que o motor-hélice que apresenta o rotor com o anel externo h_{R2} de **4 mm** em alumínio e o anel interno h_{R1} em **1 mm** de ferro, tem o maior binário de arranque e de plena carga. Tal ocorrência já era esperada, e é explicada pelo estudo do comportamento dos rotores anelares no motor de indução apresentado no Apêndice C. Neste estudo, constata-se que tanto o rotor de alumínio com **4 mm** de espessura, como o rotor de ferro de **1 mm** de espessura, apresentam melhores resultados em relação aos demais rotores de espessuras diferentes.

O binário de arranque depende da resistência do rotor. Quanto maior for este, maior é o binário de arranque. Mas, no todo, constata-se do gráfico da Figura 4.1 que o binário de arranque do motor anelar em estudo é baixo. Isto deve-se à baixa resistência do rotor, visto que este se encontra em curto-circuito. Visto isto de outra forma, António Vasco Martinha [14] diz que, o decréscimo do binário com o aumento do escorregamento, é devido essencialmente, ao aumento de frequência das correntes induzidas no rotor com o escorregamento, o que provoca o atraso das correntes induzidas em relação às f.e.m.s induzidas. Ou seja, quando a corrente do rotor atingir o seu máximo, já o fluxo indutor não é máximo, reagindo o rotor com um fluxo mais baixo.

Também, outro fator que leva ao baixo binário, é a elevada reactância de dispersão do motor. Contribuindo para isso, o elevado entreferro.

No entanto, neste tipo de projeto, o que interessa é a região de operação normal do motor, onde o binário tem melhores resultados.

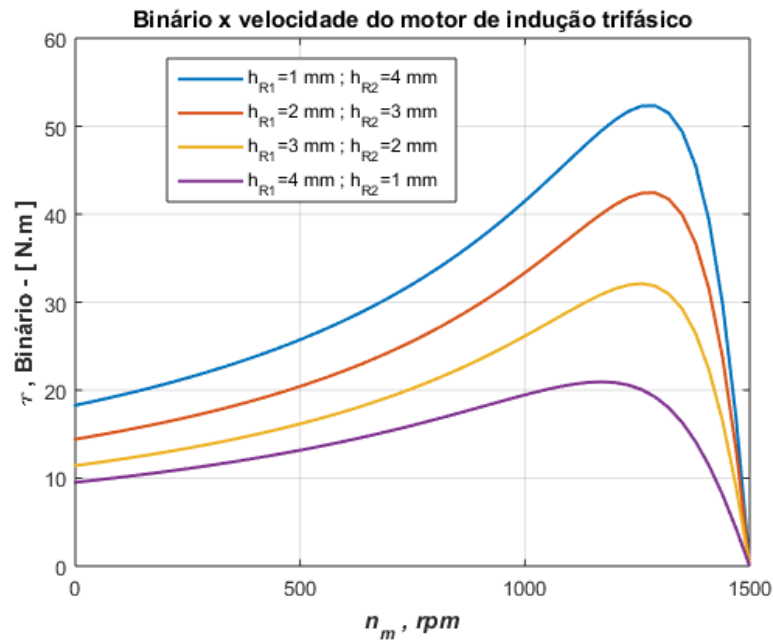


Figura 4.1. Binário do motor-hélice em função da velocidade.

Da análise das correntes do estator, consta-se do gráfico da Figura 4.2 que o rotor com o anel externo em alumínio de **4 mm** apresenta uma corrente de arranque de **1.5 vezes** a corrente nominal, e que o motor-hélice que apresenta o rotor com **1 mm** de alumínio dificilmente entrará em funcionamento por este ter uma corrente de arranque inferior à corrente nominal.

Segundo [14], quando o motor está parado, o rotor do motor anelar comporta como um secundário de um transformador em curto-circuito e, se a voltagem de funcionamento for aplicada, o motor toma uma corrente excessiva no arranque.

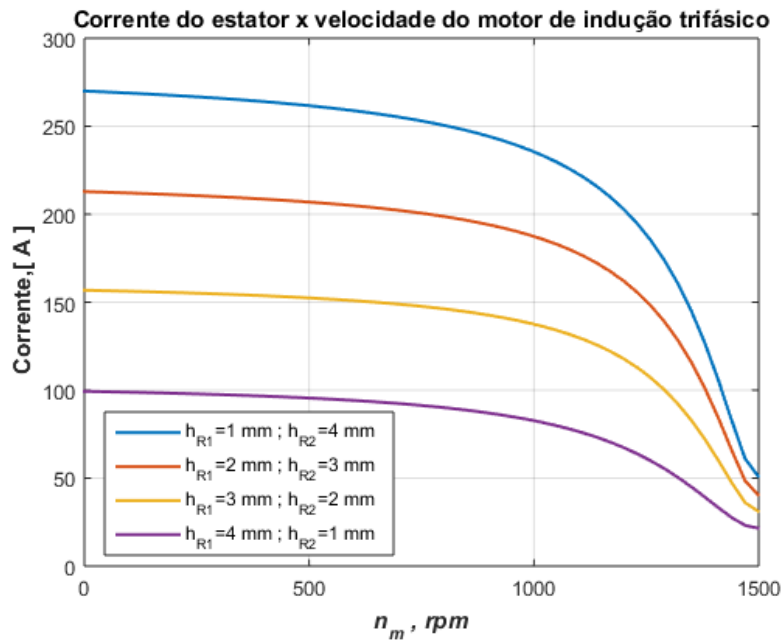


Figura 4.2. Corrente do estator do motor-hélice em função da velocidade do motor.

No gráfico da Figura 4.3 constata-se o baixo fator de potência do motor-hélice, situação que está associada ao elevado entreferro do motor [17]. Pois, segundo [14] o fator de potência do motor depende em grande parte do intervalo de ar entre o rotor e o estator, havendo conveniência em mantê-lo o menor possível para que se trabalhe com um fator de potência alto.

Também, se deve realçar que além do entreferro elevado neste motor, a alta reactância indutiva do motor no arranque é outro fator para o abaixamento do fator de potência no arranque. Pois, no arranque o rotor é varrido pela frequência nominal do motor, aumentando assim a reactância indutiva do rotor e conseqüentemente do motor.

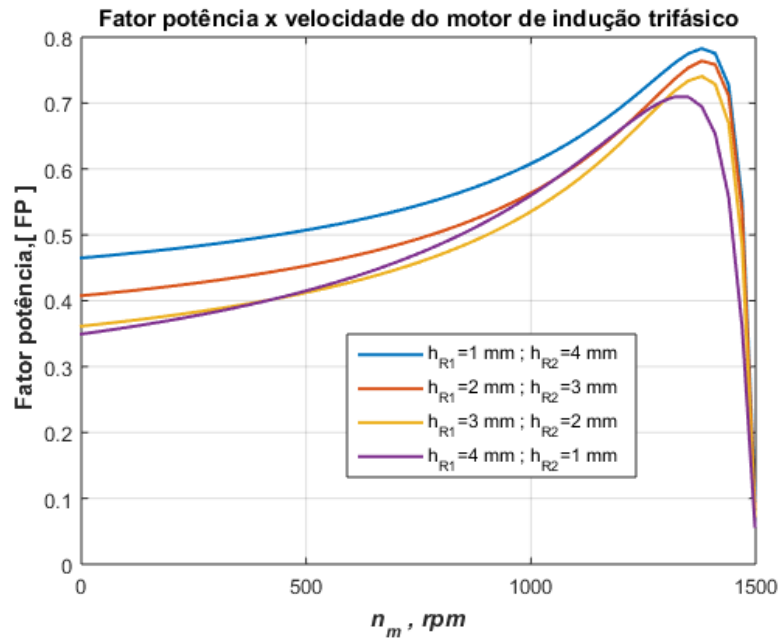


Figura 4.3. Fator de potência do motor-hélice.

No gráfico da Figura 4.4 está ilustrada a curva do rendimento do motor-hélice para as diversas espessuras dos anéis do rotor. Verificando melhores resultados, os rotores de **4 mm** e **3 mm** de alumínio no anel externo.

O rendimento de um motor de indução a plena carga é alto, variando, entre **85%**, para motores pequenos, e **92%**, para unidades maiores [14].

O motor anelar em estudo (motor-hélice), apresenta rendimento baixo a plena carga (**45-50%**). Acredita-se que a elevada potência do entreferro seja um fator determinante.

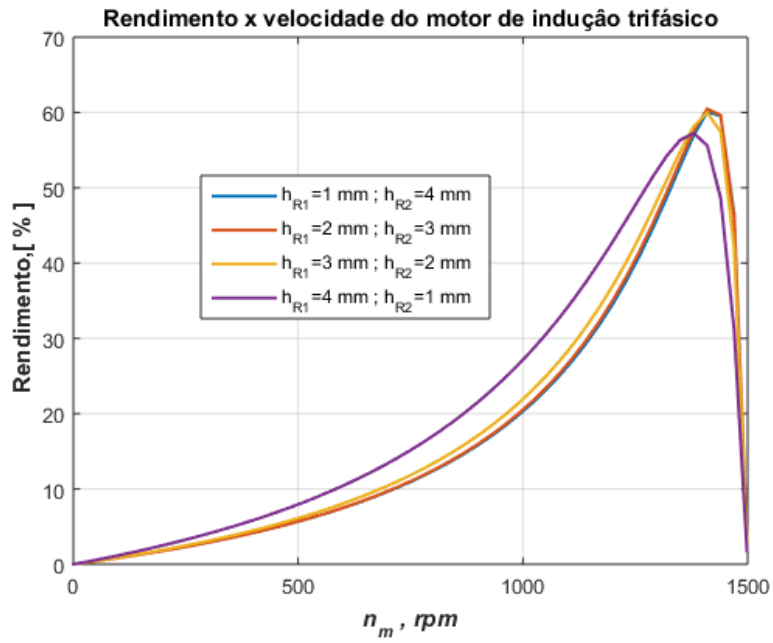


Figura 4.4. Rendimento do motor-hélice.

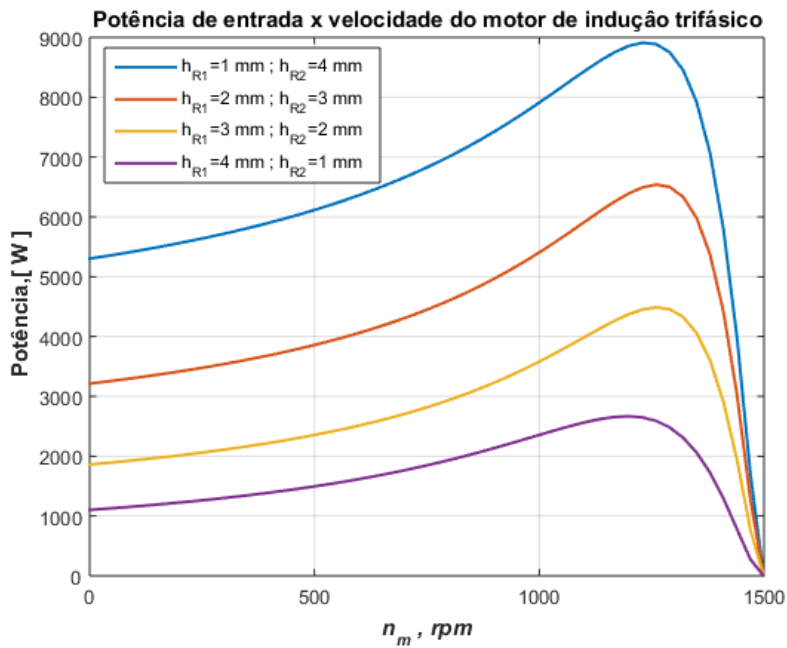


Figura 4.5. Potência de entrada do motor-hélice.

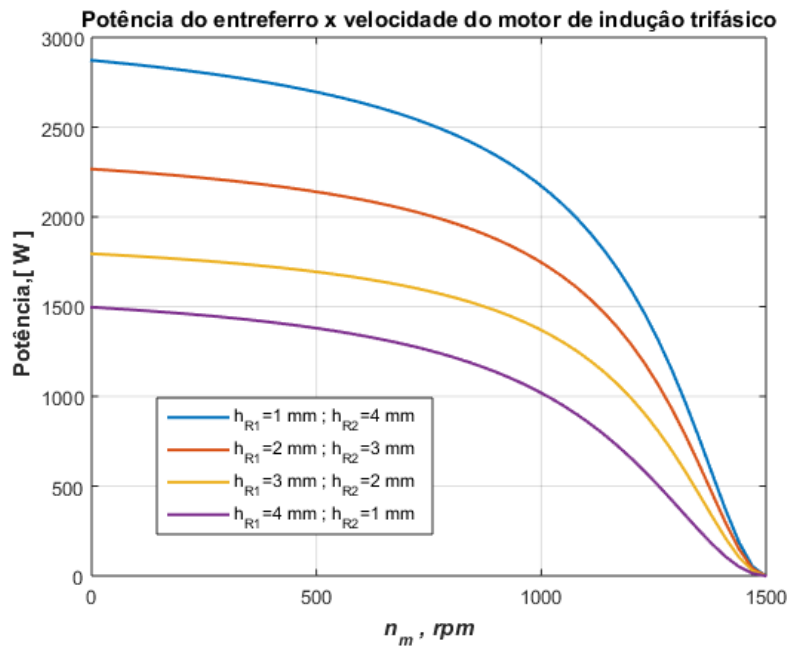


Figura 4.6. Potência do entreferro do motor-hélice.

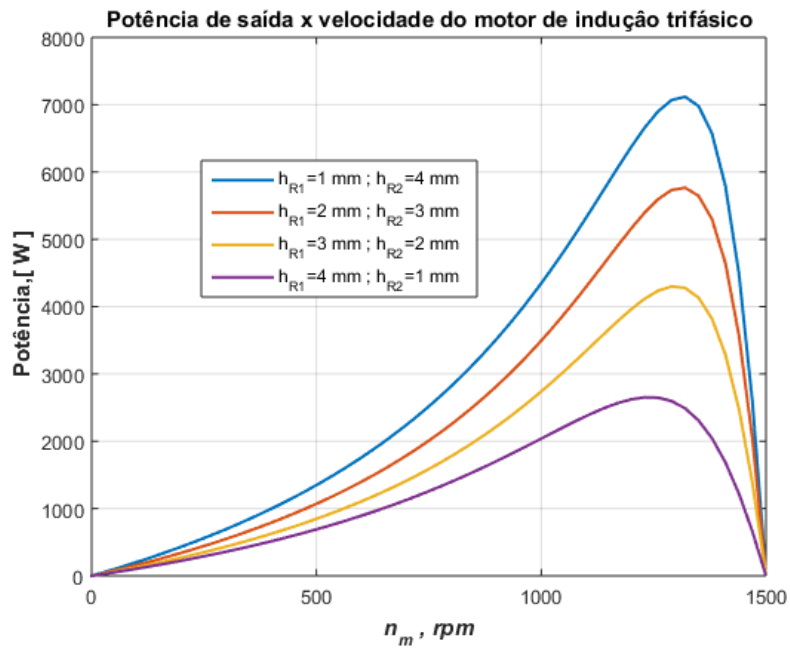


Figura 4.7. Potência de saída do motor-hélice.

Da análise do gráfico da Figura 4.5, do gráfico da Figura 4.6 e do gráfico da Figura 4.7 pode-se constatar que a potência consumida no entreferro é elevada, isto deve-se ao elevado entreferro comparado com motores de indução convencionais. Com isso, a potência de saída é diminuída consideravelmente.

No entanto, de toda a análise feita neste estudo de caso, consta-se que o motor-hélice que apresenta o rotor com o anel externo em alumínio de **4 mm** apresenta os melhores resultados.

5. CONCLUSÃO E TRABALHO FUTURO

Neste capítulo será apresentado a conclusão geral da metodologia desenvolvida durante esta dissertação e também serão apresentadas as propostas de melhoramento para um trabalho futuro.

5.1. Conclusão

Nesta dissertação, foi desenvolvida a metodologia de projeto de motores de indução anelares. Para o desenvolvimento da metodologia de projeto, foi criada uma série de algoritmos no Matlab de modo a obter o desenho automático do modelo de elementos finitos no FEMM mediante dados de entrada.

Após a construção automática do modelo de elementos finitos, foi criado um algoritmo de dimensionamento do motor, onde o número de espiras e a secção dos condutores das bobinas do estator são calculados de forma iterativa.

Decorrida a etapa de construção automática e dimensionamento do motor, este foi analisado, tendo-se obtido os parâmetros do circuito equivalente do modelo do motor. O funcionamento do motor foi então analisado a partir do esquema equivalente.

Da análise de funcionamento pelo esquema equivalente, conseguiu-se obter um conjunto de gráficos do funcionamento do motor, entre os quais, os gráficos do binário do motor, da corrente do estator, do rendimento, do fator de potência, da potência de entrada, da potência de saída e da potência no entreferro, todos em função da velocidade do motor.

Ainda da metodologia desenvolvida nesta dissertação, conseguiu-se obter as dimensões físicas de saída do modelo. Assim, conclui-se que todos os objetivos traçados no plano da dissertação foram cumpridos.

Com o dimensionamento do motor-hélice aplicando a metodologia desenvolvida nesta dissertação, chegou-se à conclusão de que o motor projetado, mediante os dados de entrada fornecidos pelo utilizador, apresenta baixo rendimento e baixo fator de potência.

Isto, deve-se em parte à tecnologia de construção aplicada no projeto do motor.

Pois, o alumínio que é utilizado na camada exterior do rotor, acaba por aumentar o entreferro do motor e por conseguinte aumentar a potência dissipada no entreferro.

Chegou-se à conclusão de que a abertura total das cavas, não é a melhor aposta [14], visto que isso aumenta a relutância do circuito magnético do entreferro de ar, provocando a diminuição do fator de potência e aumento das perdas.

Atendendo a esses fatores, conclui-se que o desenho das cavas e o tamanho do entreferro é, em linhas gerais, um compromisso entre um melhor rendimento e um maior aumento do binário [14].

Também durante este trabalho de investigação, foi feito um estudo laboratorial tendo como objetivo comprovar o método de análise por elementos finitos. De acordo com o estudo feito no Apêndice B, concluiu-se que o método é válido.

5.2. Trabalho futuro

Da metodologia desenvolvida neste trabalho, sentiu-se a necessidade do uso de um algoritmo inteligente para a tomada de decisão.

Além do algoritmo inteligente para a tomada de decisão, propõe-se que no futuro, seja desenvolvido um protótipo do modelo de elementos finitos criado neste trabalho, com o intuito de melhorar do dimensionamento do motor, usando dados reais.

REFERÊNCIAS

- [1] B. Wang, “China all electric rim-driven shaftless ultraquiet submarine propulsion,” *July 7, 2017*. [Online]. Available: <https://www.nextbigfuture.com/2017/07/china-all-electric-rim-driven-shaftless-ultraquiet-submarine-propulsion.html>. [Accessed: 06-Dec-2017].
- [2] R. Alves, “Propulsão Elétrica de Navios,” Universidade Federal do Rio, 2007.
- [3] M. A. S. Neves and P. C. Ufrj, “20 ° Congresso Nacional De Transportes Marítimos , Construção Naval E Offshore,” pp. 1–8, 1999.
- [4] “O primeiro barco foi inventado pelos egípcios,” *Lista de Curiosidades*, 2017. [Online]. Available: <http://www.listadecuriosidades.com.br/diversos/historia/o-primeiro-barco-foi-inventado-pelos-egipcios/>.
- [5] V. Penta, “Propellers Inboard propellers and speed calculation,” *Engines, Mar.*, 1998.
- [6] R. Oliveira, “Hélices,” *Revista Náutica*, 2014. [Online]. Available: http://www.nautica.com.br/helices/?doing_wp_cron=1520262082.2034270763397216796875. [Accessed: 09-Jan-2018].
- [7] “Kort Nozzle.” [Online]. Available: http://www.splashmaritime.com.au/Marops/data/less/Mano/Kort_nozzels.htm. [Accessed: 21-Aug-2018].
- [8] Strauhs, “Equipamentos Navais / Offshore - Sistemas Propulsores.” [Online]. Available: http://www.strauhs.com.br/server.php/br/prod_det/equipamentos_navais_-_offshore/sistemas_propulsores/tubos_kort68. [Accessed: 21-Aug-2018].
- [9] R. Cintra, “Conheça a propulsão híbrida da Caterpillar para rebocadores portuários,” *Grupo Portal Marítimo*, 2018. [Online]. Available: <https://www.portalmaritimo.com/2018/04/13/conheca-a-propulsao-hibrida-da-caterpillar-para-rebocadores-portuarios/>.
- [10] Ifremer, “Unité Systèmes sous-Marins,” 2018. [Online]. Available: <https://wwz.ifremer.fr/cmsm/Les-Systemes/Nautile>. [Accessed: 22-Aug-2018].
- [11] R. S. Lotti, A. W. Machado, Ê. T. Mazzeiro, and J. L. Júnior, “Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos,” *R Dent. Press Ortodon Ortop Facial*, vol. 11, no. 2, pp. 35–43, 2006.
- [12] D. Meeker, “Finite Element Method Magnetics: Induction Motor Example,” *Induction Motor Example*, 2004. [Online]. Available: <http://www.femm.info/wiki/InductionMotorExample>. [Accessed: 13-Dec-2017].
- [13] D. C. Meeker, “Finite Element Method Magnetics,” 2012.
- [14] A. V. Martinha, *Manual de Electrotecnia*. Lisboa, 1982.
- [15] M. Bose, A. Bhattacharjee, and R. Sudha, “Calculation of Induction Motor Model Parameters Using Finite Element Method,” no. 3, pp. 41–43, 2012.
- [16] S. Chapman, *Fundamentos de Máquinas Elétricas*, 5ª EDIÇÃO. São Paulo, 2013.
- [17] F. SINGER, *TRATADO DE BOBINADOS*. Buenos Aires, 1958.

[18] A. Ferreira, “Ensaio de motores de Indução,” Mindelo.

APÊNDICE A – Construção automática do motor anelar

Neste capítulo ilustra-se as fases de construção automática do modelo FEM do motor anelar em estudo, servindo assim como elemento de reforço no entendimento do processo de construção automática do motor anelar.

Usando as técnicas de formulação matemática e geométrica apresentadas no capítulo dedicado à metodologia de projeto, recorre-se a técnicas de programação para o desenho do modelo de elementos finitos pretendido.

Na Figura A. 1, representa-se a primeira fase de construção do modelo FEM do motor anelar pretendido. Nesta figura, está representado o desenho do rotor do motor anelar, e é constituído por dois anéis de material diferente conforme explicação anterior.

Dadas as entradas de projeto (tais como as dimensões físicas de projeto, entre outros), o algoritmo de construção automática do modelo FEM do motor anelar procede ao desenho do rotor conforme explicação dada no capítulo de construção automática do modelo FEM.

A construção do rotor começa com a inserção de pontos e arcos no espaço geométrico do software FEM, formando assim o primeiro anel interno h_{R1} . O rotor é desenhado por completo, com a construção do segundo anel h_{R2} , formando assim um rotor com duplo anel conforme ilustrado na Figura A. 1.

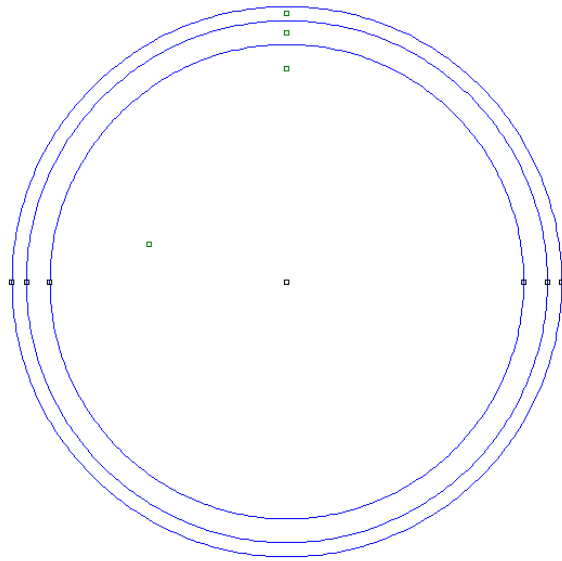


Figura A. 1. Construção do rotor em anel.

Estando o rotor completo e com as dimensões físicas dadas, o algoritmo de construção automática do estator começa com o cálculo do diâmetro interno do estator D_S e com a determinação do número de cavas N_C e dentes N_D necessárias ao desenho do estator.

Feito isso, o algoritmo dedicado à construção do estator procede com o desenho dos dentes e cavas do estator de acordo com a relação dente cava estabelecida para o projeto.

Na Figura A. 2 ilustra-se a fase de construção do estator, sendo nesta fase desenhada apenas os dentes e cavas do estator (o desenho do rotor é mantida na figura, por ser o primeiro elemento a ser desenhado).

Para a finalização do desenho do estator do motor anelar, o diâmetro externo do estator é desenhado de acordo com a formulação matemática já elaborada. Recorrendo a técnicas de programação, conforme pode-se ver dos códigos elaborados no presente trabalho, desenha-se a coroa do estator, finalizando assim a carcaça do motor anelar conforme pode-se ver da Figura A. 3.

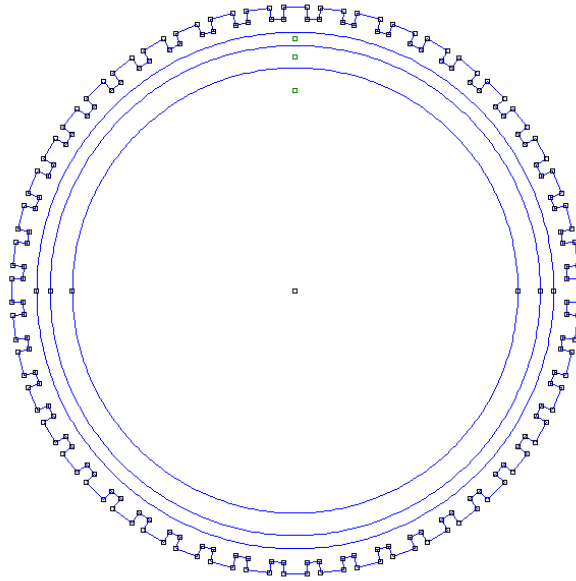


Figura A. 2. Começo da construção do estator, estando o rotor presente.

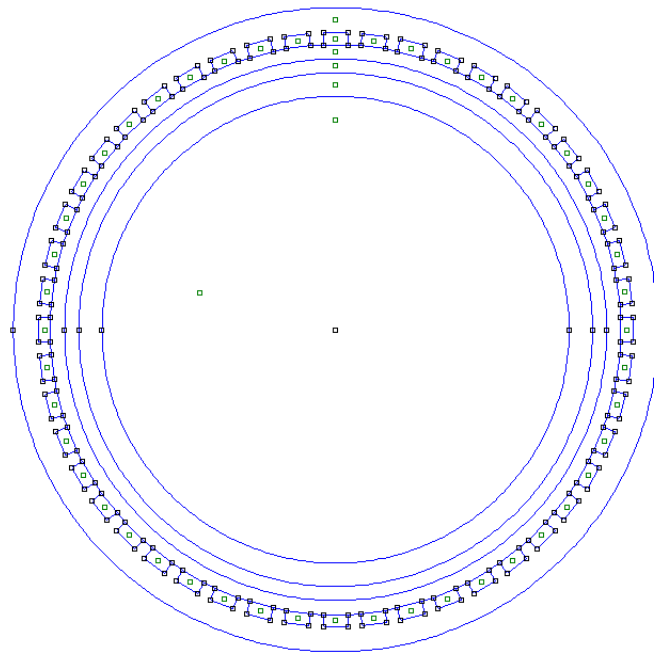


Figura A. 3. Estator completo, estando o rotor presente.

APÊNDICE B – Ensaios do M.I.T e a validação do modelo de elementos finitos

O presente estudo, tem como base, a validação da técnica de análise pelo método de elementos finitos.

A metodologia para o projeto de um motor de indução anelar desenvolvida no presente estudo (dissertação), teve como base o uso do software de elementos finitos FEMM. Trata-se de um software de acesso livre e muito usado em projetos acadêmicos de máquinas elétricas.

Com o intuito de validar os modelos criados com este software, utilizou-se neste estudo, um motor de indução trifásico, onde fez-se o levantamento dos parâmetros do motor usando ensaios laboratoriais.

O motor de indução utilizado no estudo faz parte de um atuador de movimento helicoidal, e apresenta semelhas ao motor projetado neste estudo.

Na Figura B. 1, ilustra-se o motor de indução usado para a validação do método de elementos finitos. Para a construção do modelo de elementos finitos do motor de indução, foi feito o levantamento dos dados construtivos do motor conforme se pode ver na Tabela B. I.

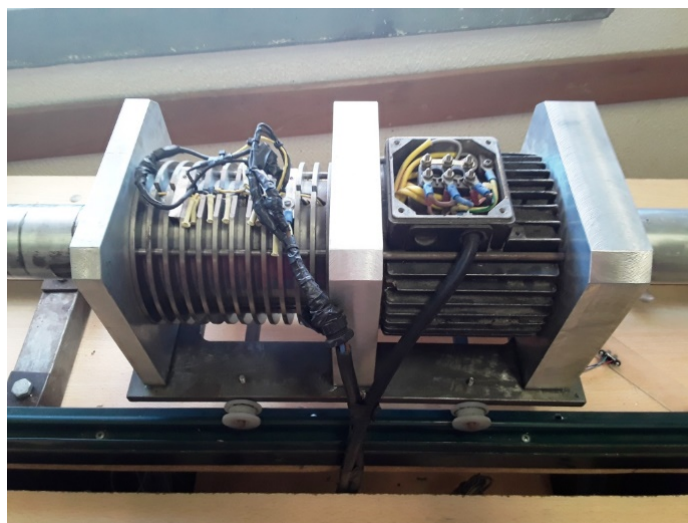


Figura B. 1 Motor de indução usado para validar o FEMM.

Tabela B. I Características do motor de indução trifásico em estudo.		
Designação	Unidades	Valor
Diâmetro externo do estator	mm	123
Diâmetro interno do estator	mm	65
Espessura do rotor	mm	64
Espessura do alumínio do rotor	mm	1.5
Espessura do ferro do rotor	mm	5
Largura da coroa do estator	mm	16.5
Altura das cavas	mm	12
Largura das cavas	mm	5.85
Passo de cavas	mm	8.51
Abertura das cavas	mm	2.3
Passo polar	mm	51
Passo da bobina	mm	51
Comprimento axial do primário	mm	110
Diâmetro do fio de bobinagem	mm	0.63
Número total de cavas	Un	24
Número de pares de polos	Un	2
Número de espiras por fase	Un	376
Tipo de enrolamento (ligação em estrela)	-	Série
Corrente nominal	A	1.77
Frequência da rede elétrica	Hz	50

Após o levantamento dos dados construtivos do motor de indução da Figura B. 1, procede-se à construção de um modelo de elementos finitos do motor. Tal procedimento, tem como objetivo comparar os parâmetros obtido pelo método de elementos finitos com os de ensaios laboratoriais.

B.1. Metodologia utilizada para a validação

Para a validação do método de elementos finitos, usando o software FEMM;

- 1° - Faz-se o levantamento dos parâmetros do esquema equivalente do motor de indução com ensaios laboratoriais e cálculos analíticos;
- 2° - Cria-se o modelo de elementos finitos do motor de indução;
- 3° - Obtém-se os parâmetros do esquema equivalente do modelo de elementos finitos de acordo com a metodologia desenvolvida no presente trabalho;
- 4° - Compara-se os valores dos parâmetros do esquema equivalente do motor real com o do motor de elementos finitos;

5º - E por último, conclusão dos resultados obtidos.

Para a obtenção dos parâmetros do esquema equivalente do motor de indução real, recorre-se a ensaios laboratoriais, os quais passamos a descrever.

B.1.1. O ensaio em vazio

É um ensaio onde nenhuma carga mecânica é associada ao veio do motor. Com este ensaio, mede-se a reactância de magnetização do motor, bem como as perdas rotacionais. O procedimento para a realização do ensaio é ilustrado na Figura B. 2, onde wattímetros, voltímetros e amperímetros são conectados a um motor de indução trifásico onde o veio do motor é deixado livre para girar [16]. O ensaio começa com a entrada em funcionamento do motor, onde os valores da corrente, tensão e potência ativa são registados.

Resumidamente, com este ensaio procura-se informações sobre o ramo de magnetização.

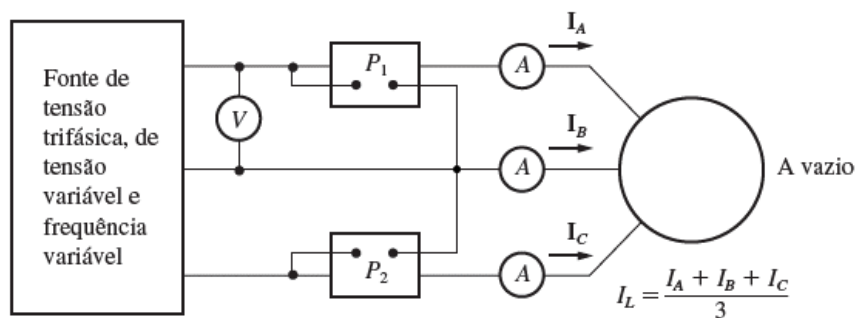


Figura B. 2. Características do motor indução trifásico em estudo [16].

B.1.2. Ensaio de corrente continua

Com este simples ensaio, procura-se informação sobre a resistência do enrolamento de fase, R_1 .

O teste ocorre com a aplicação de uma corrente continua nos enrolamentos do estator (ver Figura B. 3). Devido ao facto de a corrente de teste ser continua, não há tensão induzida no rotor nem fluxo resultante de corrente no rotor [16]. Nessas condições a reactância do motor é nula.

É de realçar que este teste pode ser substituído pela medição da resistência direta dos enrolamentos com o ohmímetro, desde que o teste seja realizado a quente (após o funcionamento do motor).

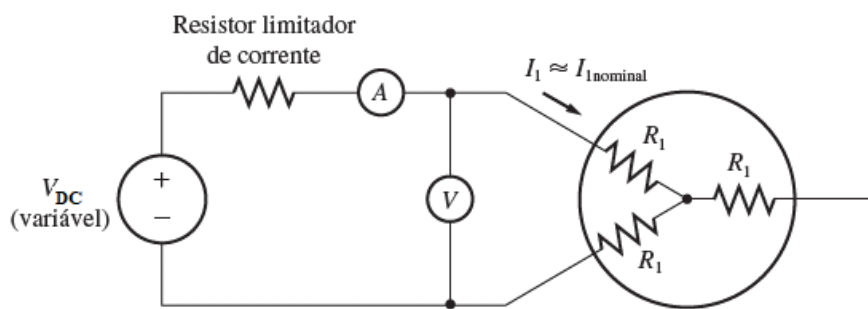


Figura B. 3. Teste corrente continua para a medição da resistência R_1 (adaptado de [16]).

Da figura acima, pode-se calcular a resistência R_1 , onde:

$$2 R_1 = \frac{V_{DC}}{I_1} \quad (56)$$

$$R_1 = \frac{V_{DC}}{2 I_1} \quad (57)$$

B.1.3. Ensaio de rotor bloqueado

Como o nome indica, neste ensaio o rotor do motor de indução é travado por um dispositivo mecânico e só depois é aplicada uma tensão de corrente alternada variável ao estator e o fluxo de corrente é ajustado até atingir a corrente nominal do motor a plena carga [16]. Uma vez atingida a corrente nominal do motor, deve-se registrar o valor das medições de tensão e potência ativa (ver Figura B. 4).

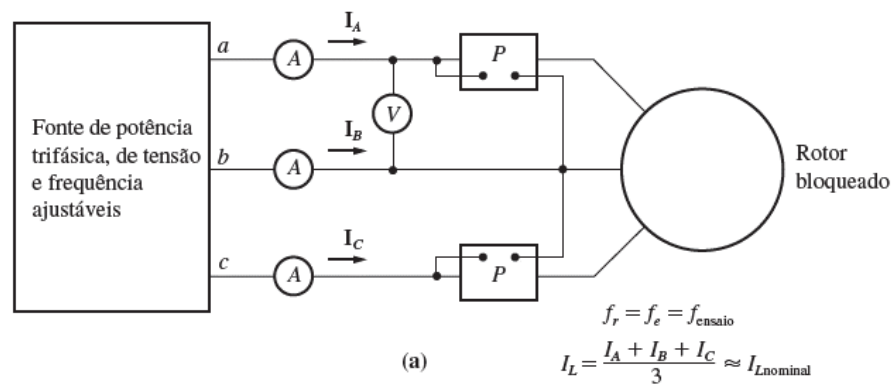


Figura B. 4. Teste de rotor bloqueado do motor de indução trifásico [16].

Dos ensaios laboratoriais feitos com o motor de indução real em estudo, obteve-se os seguintes resultados (Ver Tabela B. II, Figura B. 5 e Figura B. 6):

Tabela B. II. Dados experimentais obtidos dos ensaios laboratoriais.		
Designação	Unidades	Valor
Teste a vazio	-	-
Tensão da linha (simples)	V	63.4
Corrente da linha (simples)	A	1.667
Potência ativa entrada	W	83.3
Teste corrente continua		-
Resistência média por fase (RI) (a quente)	Ω	13
Teste rotor bloqueado	-	-
Tensão da linha (simples)	V	62.3
Corrente da linha (simples)	A	1.775
Potência ativa entrada	W	90.8
Outros	-	-
Rotação do motor	rpm	1370
Temperatura ambiente	$^{\circ}\text{c}$	21.2



Figura B. 5. Ensaio laboratorial - teste do motor em vazio.



Figura B. 6. Ensaio laboratorial - teste do motor com rotor bloqueado.

Após a obtenção dos dados dos ensaios laboratoriais, estes são utilizados para o cálculo analítico dos parâmetros do esquema equivalente do motor.

B.1.4. Cálculos analíticos para obtenção dos parâmetros do esquema equivalente

Na Figura B. 7, apresenta-se o esquema equivalente do motor de indução utilizado para a obtenção dos parâmetros do motor real.

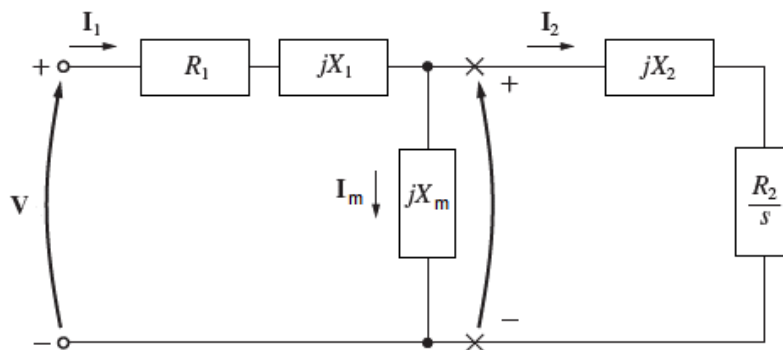


Figura B. 7. Esquema equivalente do motor de indução recomendado pelo IEEE.

No ensaio a vazio, o escorregamento do motor é muito pequeno (próximo de zero), situação que leva a um aumento da resistência do rotor e conseqüentemente uma diminuição da corrente I_2 do rotor. O ramo de magnetização (reactância magnetização X_m) está em paralelo com o circuito do rotor e tem uma impedância muito menor do que este. Tal fato indica que a impedância do paralelo seja praticamente o valor de X_m . Ficando o circuito equivalente reduzido ao circuito da Figura B. 8 [16].

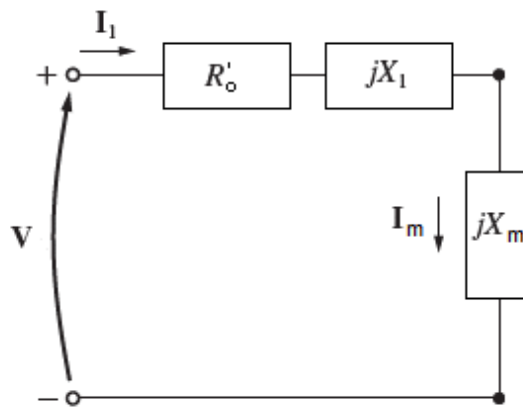


Figura B. 8. Circuito equivalente do motor em vazio.

Da análise da Figura B. 8 obtém-se a impedância equivalente para o motor a funcionar em vazio.

$$Z'_0 = \frac{V}{I_1} \quad (58)$$

$$Z'_0 = \frac{63.4 \text{ V}}{1.667 \text{ A}} = 38.03 \ \Omega \quad (59)$$

$$R'_0 = \frac{P_0}{3 \times I_1^2} \quad (60)$$

R'_0 , representa a resistência equivalente medida no teste em vazio.

$$R'_0 = \frac{83.3 \text{ W}}{3 \times 1.667^2 \text{ A}} = 9.99 \ \Omega \quad (61)$$

Para o cálculo da reactância equivalente em vazio, obtém-se:

$$X'_0 = X_1 + X_m \quad (62)$$

$$X'_0 = \sqrt{(Z'_0)^2 - R'_0{}^2} \quad (63)$$

$$X'_0 = \sqrt{(38.03^2 - 9.99^2)} = 36.69 \, \Omega \quad (64)$$

$$36.69 \, \Omega = X_1 + X_m \quad (65)$$

Conhecendo as perdas de dispersão do estator, consegue-se chegar a um valor da reactância de magnetização, conforme pode-se ver da equação (65).

Logo, para o cálculo das reactâncias de dispersão do estator e do rotor, é necessário submeter o motor de indução ao ensaio de rotor bloqueado. Neste ensaio, devido ao bloqueio do rotor o escorregamento é máximo ($s=1$), implicando numa resistência do rotor muito menor do que a reactância de magnetização. Nestas condições, o resultado do paralelo de X_m com R_2 toma o valor de R_2 por este ser de menor valor. Na Figura B. 9 representa-se o esquema equivalente do motor com rotor bloqueado.

O IEEE recomenda uma frequência de ensaio para rotor bloqueado de **25%** da frequência nominal [16], [18]. Também adverte que para motores com potência inferiores a **20 HP**, os efeitos da frequência são negligenciáveis e o teste de rotor bloqueado pode ser feito com a frequência nominal do motor [18].

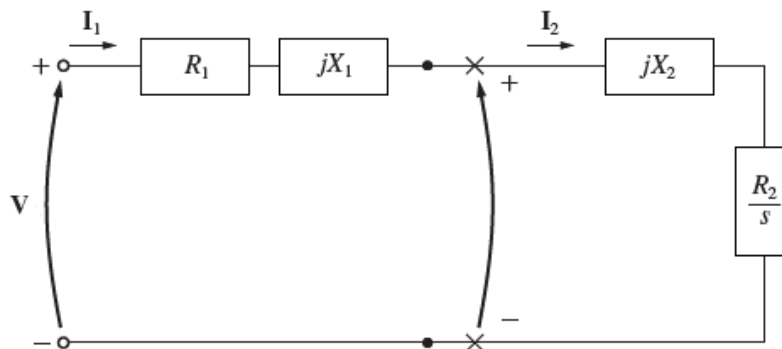


Figura B. 9. Esquema equivalente do motor com rotor bloqueado.

Para o cálculo da resistência equivalente com rotor bloqueado, tem-se:

$$R_{bloq} = \frac{P_{bloq}}{3 \times I_{bloq}^2} \quad (66)$$

$$R_{bloq} = \frac{90.8 \text{ W}}{3 \times 1.775^2} = 9.61 \Omega \quad (67)$$

Logo, para o cálculo da resistência do rotor R_2 , tem-se:

$$R_2 = R_1 - R_{bloq} \quad (68)$$

$$R_2 = 13 \Omega - 9.61 \Omega = 3.39 \Omega \quad (69)$$

A impedância com o rotor bloqueado, é calculado da seguinte forma:

$$Z_{bloq} = \frac{V_{bloq}}{I_{bloq}} \quad (70)$$

$$Z_{bloq} = \frac{62.3 \text{ V}}{1.775 \text{ A}} = 35.10 \Omega \quad (71)$$

A reactância do motor com o rotor bloqueado é calculada de acordo com a equação (72):

$$X_{bloq} = \sqrt{(Z_{bloq}^2 - R_{bloq}^2)} \quad (72)$$

$$X_{bloq} = \sqrt{(35.10^2 - 9.61^2)} = 33.76 \Omega \quad (73)$$

$$X_{bloq} = X_1 + X_2 \quad (74)$$

Conhecida a reactância do motor com o rotor bloqueado, pode-se calcular as reactâncias de dispersão do estator e o rotor de acordo com a equação (75).

$$X_1 = X_2 = \frac{X_{bloq}}{2} \quad (75)$$

$$X_1 = X_2 = \frac{33.76 \Omega}{2} = 16.88 \Omega \quad (76)$$

$$X_1 = 2\pi f L_1 \quad (77)$$

$$L_1 = \frac{16.7 \Omega}{2\pi 50} = 0.053 \text{ H} \quad (78)$$

Da equação (65), obtém-se a reactância de magnetização do motor:

$$X_m = 36.69 \Omega - 16.88 \Omega = 19.81 \Omega \quad (79)$$

Sabendo que:

$$X_m = 2\pi f L_m \quad (80)$$

$$L_m = \frac{19.81 \Omega}{2\pi 50} = 0.063 H \quad (81)$$

B.2. Construção do modelo de elementos finitos do motor de indução trifásico

Com os dados da Tabela B. I, foi construído o modelo de elementos finitos do motor de indução utilizado em ensaios laboratoriais, conforme se pode ver na Figura B. 10.

. Após a construção do modelo de elementos finitos do motor, os parâmetros do esquema equivalente são obtidos do modelo a fim de serem comparados com os resultados obtidos em ensaios laboratoriais.

Realça-se, que este estudo tem como objetivo a validação do método de elementos finitos desenvolvido neste trabalho.

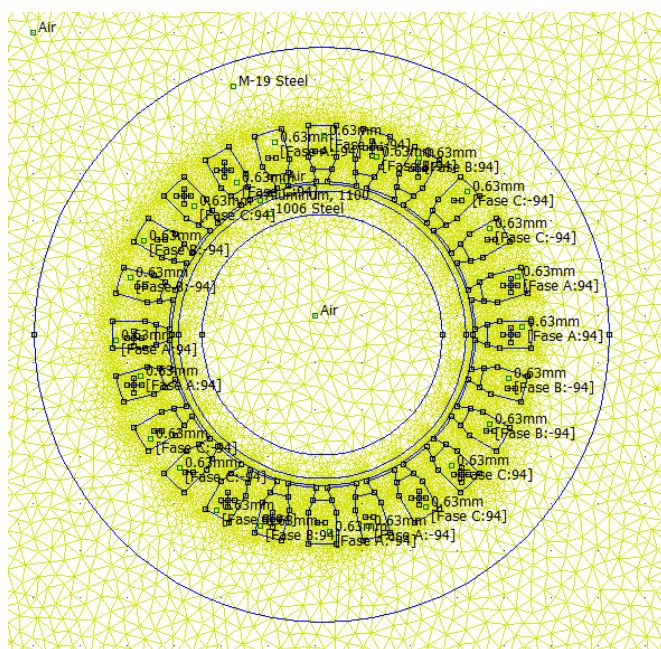


Figura B. 10. Modelo de elementos finitos do motor de indução trifásico usado em ensaios laboratoriais.

B.2.1. Obtenção dos parâmetros do modelo de elementos finitos

Da análise do modelo de elementos finitos do motor de indução apresentado na Figura B. 10, obteve-se os seguintes dados:

Na Tabela B. III, apresenta-se os parâmetros do motor de indução do modelo de elementos finitos, e na Tabela B. IV os parâmetros do motor de indução real.

Tabela B. III. Parâmetros do esquema equivalente do modelo FEM.		
Parâmetros do esquema equivalente do modelo FEM	Unidade	valor
Resistência do estator, R1	Ω	6.9909
Indutância de dispersão do estator L1	H	0.0700
Indutância de magnetização, Lm	H	0.0710
Resistência do rotor, R2	Ω	4.4736

Tabela B. IV. Parâmetros do esquema equivalente do motor real.		
Parâmetros do esquema equivalente do motor real	Unidade	valor
Resistência do estator, R1	Ω	13
Indutância de dispersão do estator L1	H	0.053
Indutância de magnetização, Lm	H	0.063
Resistência do rotor, R2	Ω	3.39

B.3. Conclusão dos resultados experimentais

Conclui-se, da análise dos dados obtidos no laboratório e dos dados obtidos do modelo de elementos finitos, que os resultados são satisfatórios conforme se pode ver das tabelas acima.

No entanto, deve-se ter em consideração que o software de elementos finitos analisa um modelo matemático e não um motor real. Isto, refletiu-se no cálculo de R_l pelo método de elementos finitos, onde a temperatura do enrolamento não foi levada em consideração, gerando alguma discrepância no valor calculado versus o valor medido.

APÊNDICE C – Análise do comportamento dos rotores anelares em motores de indução

Neste Apêndice apresentam-se os resultados de análises feitas durante a dissertação sobre o comportamento do motor anelar em função da variação da espessura do rotor anelar e do material utilizado.

C.1. Resultados obtidos da simulação para rotor de alumínio

Na Tabela C. I, mostra-se os resultados dos parâmetros do motor, obtidos utilizando diferentes espessuras do rotor anelar. Neste estudo utilizou-se o alumínio como material do rotor, e os cálculos basearam-se na técnica de elementos finitos, segundo o trabalho de Mayukh Bose [15].

Tabela C. I. Parâmetros do circuito equivalente do motor anelar para rotor em alumínio.				
Parâmetros do circuito equivalente do modelo FEMM				
Resistência R1 (Ω)	Indutância L1 (H)	Indutância M (H)	Resistência R2 (Ω)	Espessura rotor
0.0798	5.7120×10^{-4}	2.7193×10^{-4}	0.0034	1 mm
0.0799	5.3281×10^{-4}	3.0300×10^{-4}	0.0041	2 mm
0.0800	5.0074×10^{-4}	3.2910×10^{-4}	0.0046	3 mm
0.0801	4.7406×10^{-4}	3.4959×10^{-4}	0.0049	4 mm
0.0801	4.5412×10^{-4}	3.6483×10^{-4}	0.0051	5 mm

Para a obtenção dos parâmetros da Tabela C. I, utilizou-se um modelo de elementos finitos baseado nas características da Tabela C. II e Tabela C. III respectivamente.

Tabela C. II. Características elétricas do motor anelar com rotor em alumínio.

Características elétricas do motor-hélice (motor anelar)		
Designação	unidades	valor
Tensão de fase, Vf	V	27
Densidade de corrente	A/mm ²	20
Corrente de Fase	A	150
Frequência elétrica	Hz	50

Tabela C. III. Características mecânicas do motor anelar com rotor em alumínio.

Características mecânicas do motor-hélice (motor anelar)		
Designação	unidades	valor
Diâmetro interno do rotor	mm	431.8
Espessura do rotor	mm	1 - 5
Diâmetro interno do estator	mm	442.8
Altura da coroa do estator	mm	14
Entreferro (<i>airgap</i>)	mm	0.5
Largura do dente do estator	mm	14
Largura da cava	mm	14
Altura da cava	mm	14
Diâmetro do condutor da bobina	mm	3
Secção do condutor da bobina	mm ²	7.5
Comprimento axial do estator	mm	200
Número de bobinas por fase	Un	8
Número de bobinas por polo	Un	2
Número de espiras por cava	Un	10
Número de espiras por fase	Un	80
Número de dentes	Un	48
Número de cavas	Un	48
Número de polos	Un	4
Velocidade síncrona	rpm	1500
Velocidade síncrona	rad/s	157
Material do rotor - Alumínio	-	-
Material do estator – Aço magnético M-19	-	-

Da análise do comportamento do motor anelar com rotor em alumínio, constatou-se que o binário de arranque é muito baixo. Situação explicada pela baixa resistência do rotor e elevada dispersão magnética.

Na Figura C. 1, está representado o motor anelar com rotor de alumínio, onde se pode ver a alta dispersão magnética associada a este tipo de rotor, situação que contribui para a diminuição do binário de arranque (ver gráfico da Figura C. 2).

Devido ao facto de este tipo de motor (com rotor exclusivamente em alumínio) ser muito indutivo, o fator de potência é baixo como se pode ver no gráfico da Figura C. 4.

A corrente do estator no arranque é afetada (menor do esperado) devida a alta reactância do motor (ver gráfico da Figura C. 3).

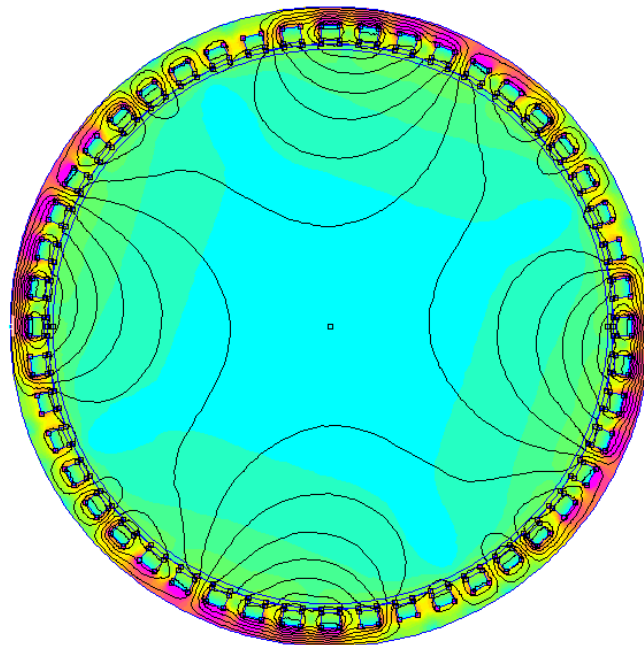


Figura C. 1. Linhas de fluxo magnético atravessando rotor de alumínio.

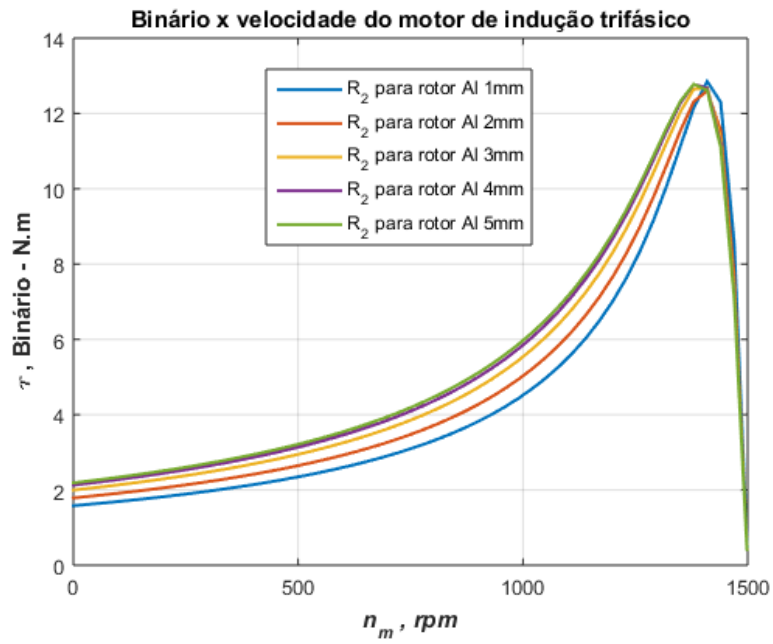


Figura C. 2. Binário do motor anelar a diferentes espessuras do rotor em alumínio.

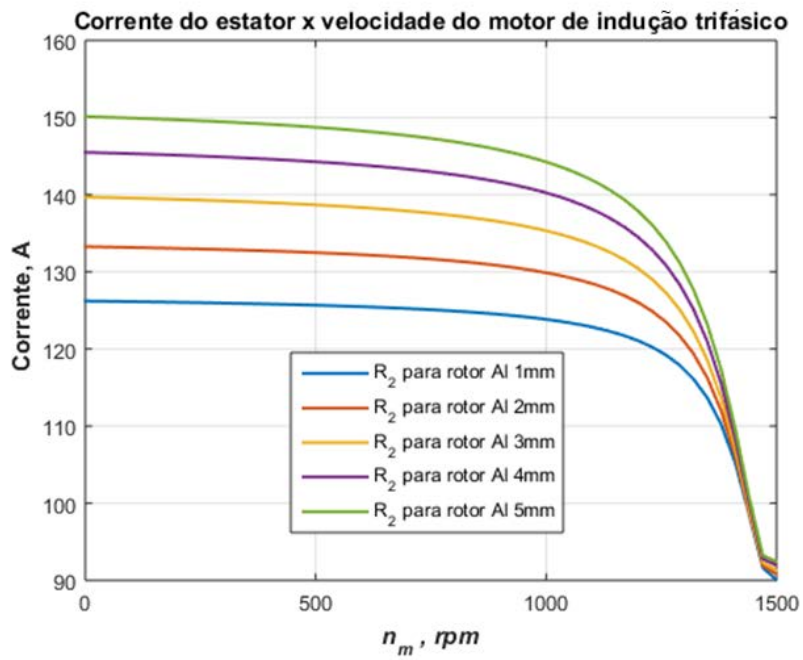


Figura C. 3. Corrente do estator do motor anelar a diferentes espessuras do rotor em alumínio.

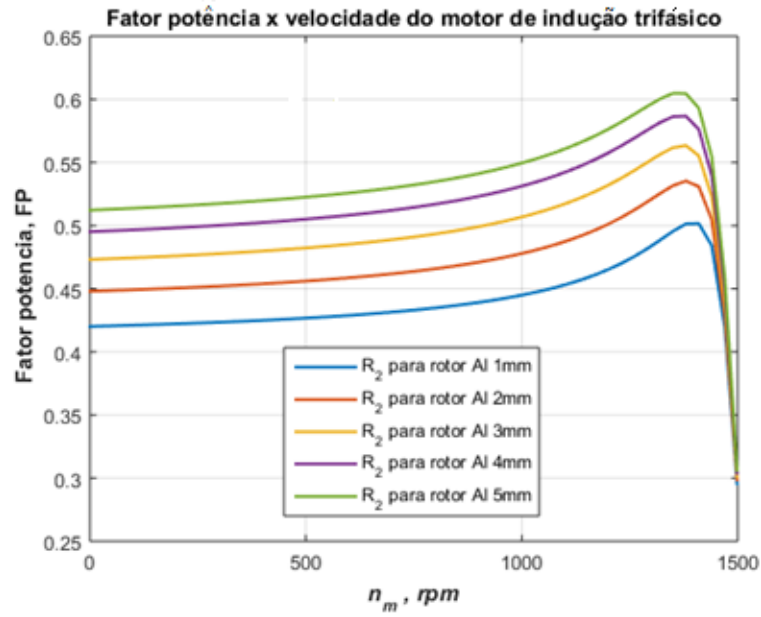


Figura C. 4. Fator de potência para o motor anelar a diferentes espessuras do rotor de alumínio.

No gráfico da Figura C. 5, constata-se um baixo rendimento do motor anelar com o rotor em alumínio, resultado da grande dispersão magnética.

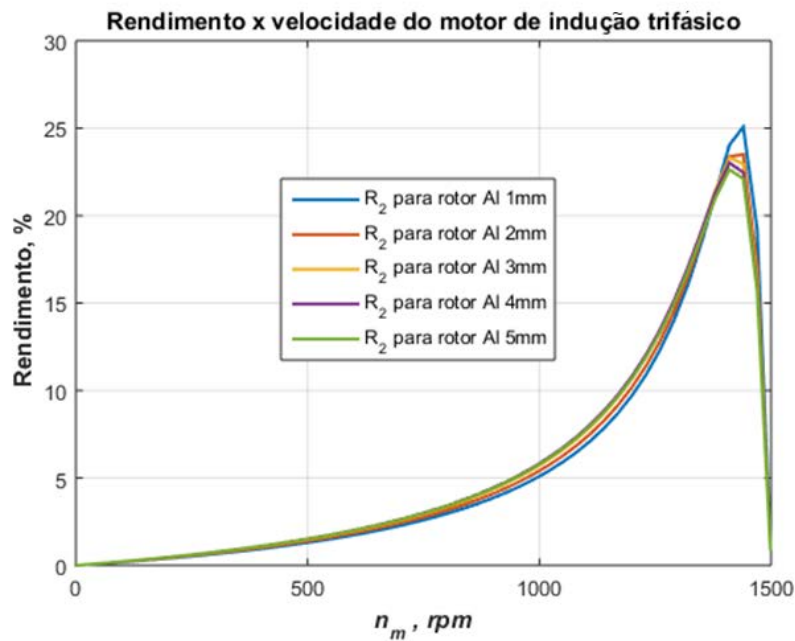


Figura C. 5. Rendimento do motor anelar a diferentes espessuras do rotor em alumínio.

C.2. Resultados obtidos da simulação para rotor de ferro macio

Os testes realizados anteriormente com rotor de alumínio para o modelo FEM do motor anelar de 25V são realizados neste subcapítulo, utilizando o ferro macio como material do rotor. As características mecânicas do motor anelar são as mesmas que as indicadas na Tabela C. III, exceto o material do rotor e número de espiras por cava e fase.

Na Tabela C. IV, temos as características elétricas do modelo FEM usado para a obtenção dos parâmetros do motor com rotor de ferro. O modelo de elementos finitos do motor anelar com rotor de ferro macio, tem uma corrente de fase de 150 A, sendo o valor da tensão da fase de 32V. Deve-se realçar que o valor da tensão da fase e o número de espiras por cava foram calculados com base no algoritmo iterativo.

Tabela C. IV. Características elétricas do motor anelar para rotor de ferro macio.		
Características elétricas do motor-hélice (motor anelar)		
Designação	unidades	valor
Tensão de fase, Vf	V	32
Densidade de corrente	A/mm ²	20
Corrente de Fase	A	150
Frequência elétrica	Hz	50
Nº espiras por cava	Un	3
Nº espiras por fase	Un	24

Na Tabela C. V, mostra-se os parâmetros do circuito equivalente do motor anelar em estudo, para rotor de ferro macio.

Tabela C. V. Parâmetros do circuito equivalente do motor anelar para rotor de ferro macio.				
Parâmetros do circuito equivalente do modelo FEMM				
Resistência R1(Ω)	Indutância L1(H)	Indutância M(H)	Resistência R2(Ω)	Espessura rotor
0.0373	3.6982 e ⁻⁴	0.0021	0.0251	1 mm
0.0372	3.4966 e ⁻⁴	0.0025	0.0202	2 mm
0.0370	3.6467 e ⁻⁴	0.0024	0.0199	3 mm
0.0371	3.4633 e ⁻⁴	0.0024	0.0202	4 mm
0.0370	3.4390 e ⁻⁴	0.0024	0.0200	5 mm

Na Figura C. 6, encontra-se ilustrado a densidade de fluxo magnético para o motor anelar com rotor de ferro macio. Pode-se ver que quando o rotor é de ferro macio, as linhas de fluxo magnético não atravessam o rotor. Estas linhas de fluxo derivadas do estator fecham um circuito magnético através do rotor, por este ser de material ferromagnético.

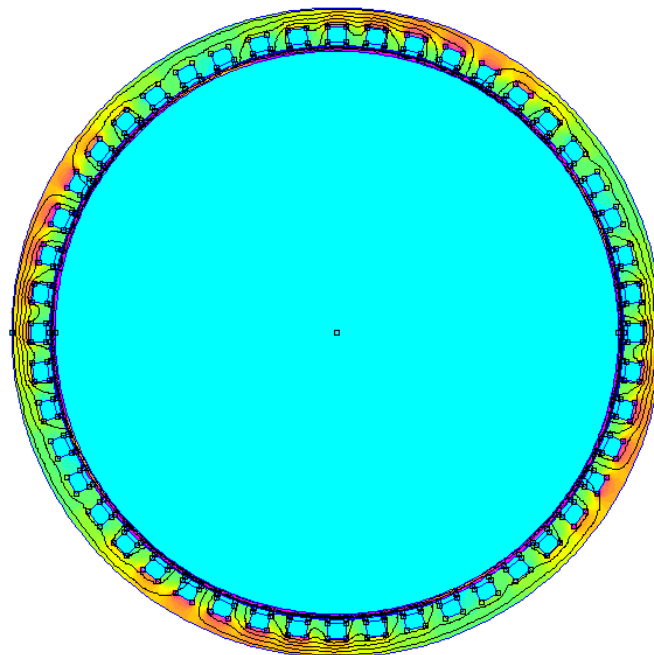


Figura C. 6. Modelo elementos finitos com rotor de ferro macio.

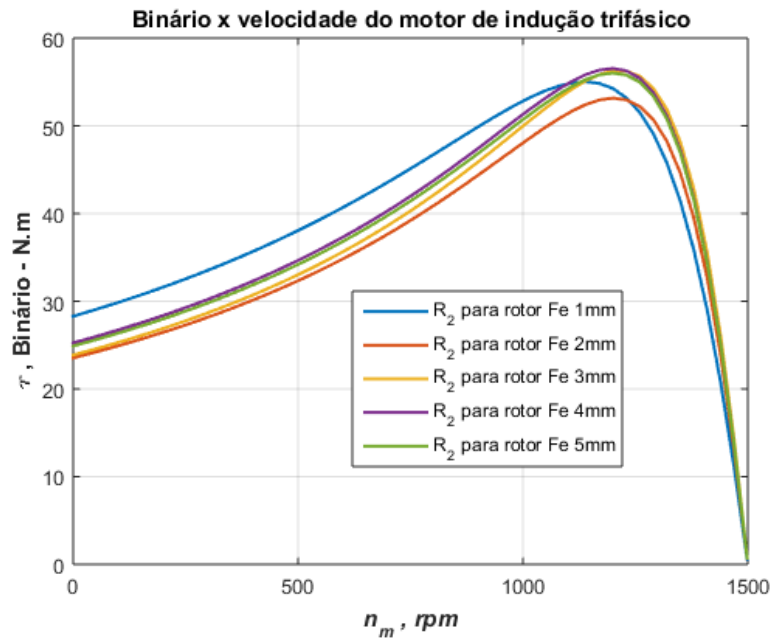


Figura C. 7. Binário do motor anelar para diferentes espessuras do rotor de ferro macio.

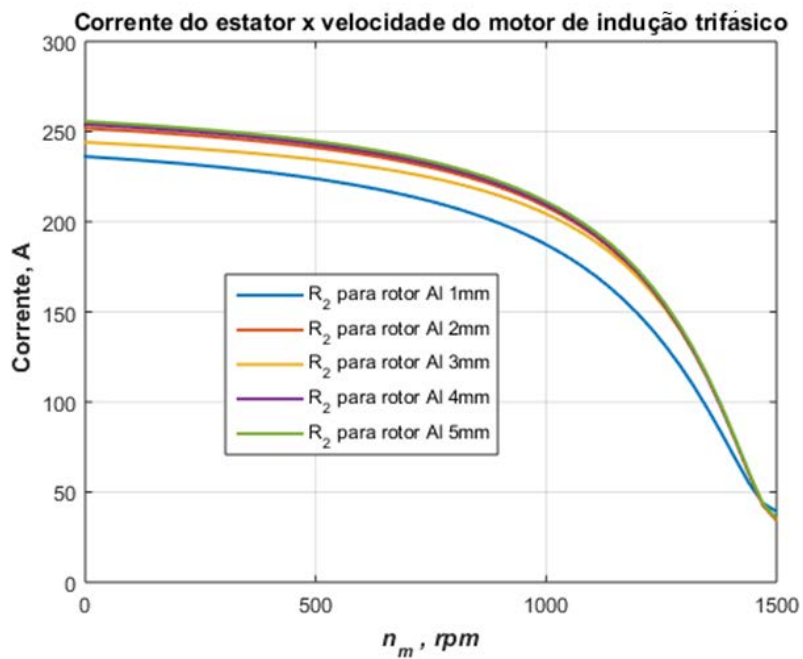


Figura C. 8. Corrente do estator do motor anelar, para rotor de ferro macio.

No gráfico da Figura C. 7, pode-se ver que para o rotor de ferro macio, o binário do motor anelar aumenta. Neste caso, as perdas por dispersão magnéticas são menores e ocorrem em maior quantidade no entreferro de ar. Também neste caso, a resistência do rotor é maior devido ao material utilizado.

Devido ao facto de este motor ser menos indutivo do que o motor com rotor em alumínio, este apresenta um aumento da corrente do arranque, conforme pode-se ver do gráfico da Figura C. 8.

Do gráfico da Figura C. 9, pode-se ver que no arranque o fator de potência é baixo. Isto, devido ao facto de a resistência do rotor ser baixa, ficando o motor muito indutivo no arranque. No entanto, apresenta melhores resultados do que o motor com rotor em alumínio.

No gráfico da Figura C. 10, constata-se que o rendimento é melhor do que o rendimento do motor com rotor em alumínio. Pois, neste tipo de motor as perdas por dispersão são menores do que no motor com rotor em alumínio.

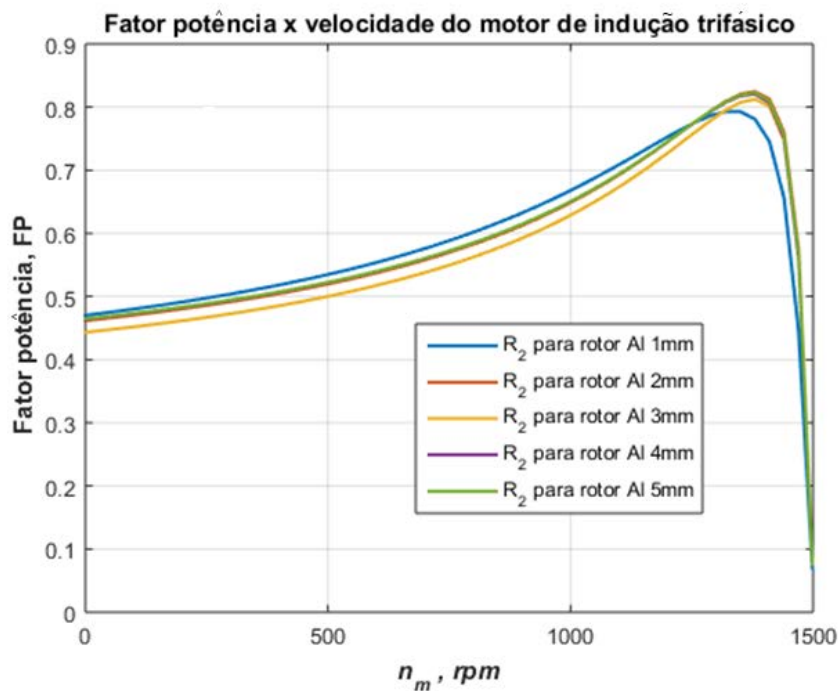


Figura C. 9. Curva do Fator de Potência do motor anelar com rotor de ferro.

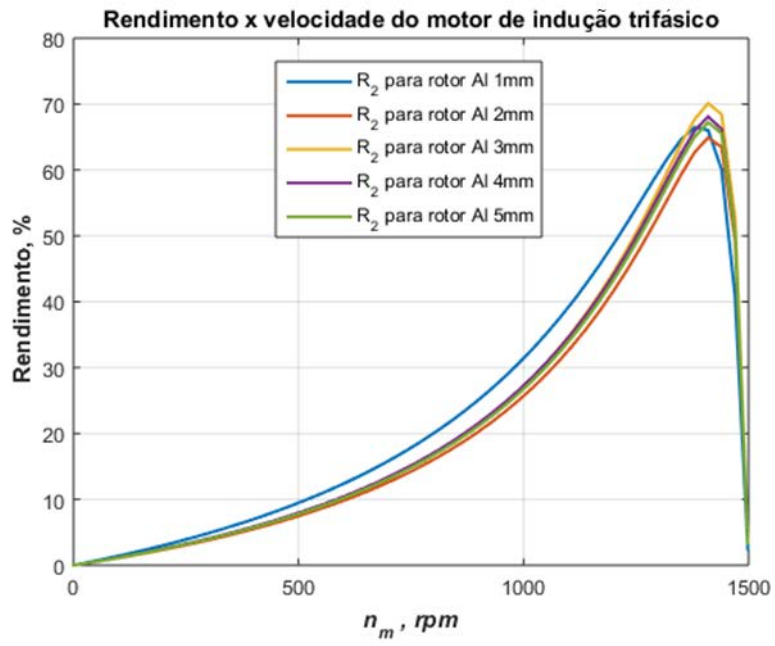


Figura C. 10. Rendimento do motor anelar a diferentes espessuras do rotor de ferro macio.

APÊNDICE D – Algoritmos

```
% Algoritmo principal da metodologia de projeto de motores de indução
anelares
%-----

clc;
clear all;
calculo_espira2; % m-file para o cálculo do número de espiras do motor
h_start=1;
h_step=1;
h_end=4;
vector_index=0;
for esp=h_start:h_step:h_end % Ciclo para a variação da espessura do
rotor
    h=esp;
    if h==1; % h- representa o anel interno do rotor
        h2=4; % h2- representa a anel externo do rotor
    end
    if h==2;
        h2=3;
    end
    if h==3;
        h2=2;
    end
    if h==4;
        h2=1;
    end
end

cd('C:\Users\Escola\Desktop\algoritmo dissertação');
openfemm; % Código LUA para abrir o FEMM
newdocument(0); % Código Lua para a criação de um novo documento FEMM
mi_saveas('teste.FEM'); % Código Lua para a gravação do projeto

disp(sprintf('-----'));
disp(sprintf('Desenho automático do motor anelar '));
disp(sprintf('-----//-----'));
disp(sprintf('Introduza os dados de entrada: '));
disp(sprintf('*****'));

mi_probdef(f,'millimeters','planar',1e-8,Laxial,-30) % definição ...
... das variáveis globais do projeto

%-----
formulas; % m-file com as formulas do projeto
desenho_rotor; % m-file com códigos de desenho do rotor
desenho_estator; % m-file com códigos de desenho do estator
propriedade_materiais; % m-file com as propriedades do projeto
fronteira; % m-file com códigos de criação da fronteira de
teste
label; % m-file com etiquetas do projeto
bobinas; % m-file de criação das bobinas
dados_saida; % m-file com código de 'plotagem' das dimensões de
...
...saída do projeto
```

```

%-----
-
for k = 1:12      % ciclo para a variação da frequência de
escorregamento
    syms ws wss

    freq = k/4;
    ws=[freq*2*pi]; % Frequência de escorregamento, w(s).
%-----
    if k==1;
    ws1=freq*2*pi;
    end
    if k==2;
    ws2=freq*2*pi;
    end
    if k==3;
    ws3=freq*2*pi;
    end
    if k==4;
    ws4=freq*2*pi;
    end
    if k==5;
    ws5=freq*2*pi;
    end
    if k==6;
    ws6=freq*2*pi;
    end
    if k==7;
    ws7=freq*2*pi;
    end
    if k==8;
    ws8=freq*2*pi;
    end
    if k==9;
    ws9=freq*2*pi;
    end
    if k==10;
    ws10=freq*2*pi;
    end
    if k==11;
    ws11=freq*2*pi;
    end
    if k==12;
    ws12=freq*2*pi;
    end
%-----

mi_probdef(freq, 'millimeters', 'planar', 1e-8, Laxial, -30)

mi_analyze(0);
mi_loadsolution;

CP = mo_getcircuitproperties('Fase A');

Ic(k)=CP(1); % Obtenção da corrente da fase na respetiva
frequência...
...escorregamento;

```

```

V(k)=CP(2);      % Obtenção da queda de tensão da fase na
respetiva...
...frequência escorregamento;

flux(k)=CP(3);      % Obtenção do fluxo concatenado na
respetiva...
...frequência de escorregamento;

ind(k)=flux(k)/Ic(k); % Obtenção da indutância L(Ws) nas...
...respetivas frequências de escorregamento (Ws).

Rs(k)=V(k)/Ic(k);      % Obtenção da resistência do estator ...
...nas respetivas frequencias de escorregamento (Ws).
end
%-----
-
Li1=-(imag(ind(1)));
Li2=-(imag(ind(2)));
Li3=-(imag(ind(3)));
Li4=-(imag(ind(4)));
Li5=-(imag(ind(5)));
Li6=-(imag(ind(6)));
Li7=-(imag(ind(7)));
Li8=-(imag(ind(8)));
Li9=-(imag(ind(9)));
Li10=-(imag(ind(10)));
Li11=-(imag(ind(11)));
Li12=-(imag(ind(12))); % Indutância imaginária na respetiva
frequência...
... de escorregamento w(s).

%-----
Lre1=real(ind(1));
Lre2=real(ind(2));
Lre3=real(ind(3));
Lre4=real(ind(4));
Lre5=real(ind(5));
Lre6=real(ind(6));
Lre7=real(ind(7));
Lre8=real(ind(8));
Lre9=real(ind(9));
Lre10=real(ind(10));
Lre11=real(ind(11));
Lre12=real(ind(12)); % Indutância real na respetiva frequência ...
... de escorregamento w(s).
%-----

syms tau M Rr Rest Rst R

m=[ws1 -Li1*ws1^2;ws2 -Li2*ws2^2;ws3 -Li3*ws3^2;ws4 -Li4*ws4^2;...
ws5 -Li5*ws5^2;ws6 -Li6*ws6^2;ws7 -Li7*ws7^2;ws8 -Li8*ws8^2;...
ws9 -Li9*ws9^2;ws10 -Li10*ws10^2;ws11 -Li11*ws11^2;ws12 -
Li12*ws12^2];

b=[Li1;Li2;Li3;Li4;Li5;Li6;Li7;Li8;Li9;Li10;Li11;Li12];

C=inv((m.')*m)*(m.')*b; % Obtenção dos parâmetros C1 e C2 para...
... o cálculo de Lm

tau=sqrt(C(2));

```

```

M=abs(C(1)/tau)      % Indutância de magnetização Lm
R2=abs(M/tau)        % Resistência do rotor R2

Lls1=Lre1-(M/(1+(tau*ws1)^2));
Lls2=Lre2-(M/(1+(tau*ws2)^2));
Lls3=Lre3-(M/(1+(tau*ws3)^2));
Lls4=Lre4-(M/(1+(tau*ws4)^2));
Lls5=Lre5-(M/(1+(tau*ws5)^2));
Lls6=Lre6-(M/(1+(tau*ws6)^2));
Lls7=Lre7-(M/(1+(tau*ws7)^2));
Lls8=Lre8-(M/(1+(tau*ws8)^2));
Lls9=Lre9-(M/(1+(tau*ws9)^2));
Lls10=Lre10-(M/(1+(tau*ws10)^2));
Lls11=Lre11-(M/(1+(tau*ws11)^2));
Lls12=Lre12-(M/(1+(tau*ws12)^2)); % Indutância de dispersão na ...
...respetiva frequência de escorregamento (Ws).

% Indutância de dispersão do estator, L1
l1=abs((Lls1+Lls2+Lls3+Lls4+Lls5+Lls6+Lls7+Lls8+Lls9+Lls10+Lls11+Lls12
)/12)

% Resistência do estator, R1.
R1=(abs(Rs(1))+abs(Rs(2))+abs(Rs(3))+abs(Rs(4))+abs(Rs(5))+abs(Rs(6))
...
+abs(Rs(7))+abs(Rs(8))+abs(Rs(9))+abs(Rs(10))+abs(Rs(11))+abs(Rs(12)))
/12

%.....
....

sub_algoritmo_metodo_thevenin; % sub-algoritmo de formulação Thévenin

end
calculo_binario; % Ficheiro-m com formulação de cálculo do binário
plot_binario;   % Ficheiro-m com instruções de impressão das curvas
binário
pause
calculo_corrente_estator; % Ficheiro-m com formulação de cálculo da
corrente
plot_current; % Ficheiro-m com instruções de impressão das curvas
corrente
pause
calculo_FP; % Ficheiro-m com formulação de cálculo do fator de
potência
plot_FP; % Ficheiro-m com instruções de impressão das curvas FP
pause
calculo_rendimento;% Ficheiro-m com formulação de cálculo do
rendimento
plot_rendimento;% Ficheiro-m com instruções de impressão das curvas do
rendimento
pause
calculo_Pin; % Ficheiro-m com formulação de cálculo da potência
entrada
plot_Pin; % Ficheiro-m com instruções de impressão das curvas da
potência entrada
pause
calculo_Pag; % Ficheiro-m com formulação de cálculo da potência no
entreferro

```

```

plot_Pag; % Ficheiro-m com instruções de impressão das curvas da
potência no entreferro
pause
calculo_Pout; % Ficheiro-m com formulação de cálculo da potência de
saída
plot_Pout; % Ficheiro-m com instruções de impressão das curvas da
potência de saída

```

Algoritmo D. 1. Declaração e inicialização das variáveis locais e globais.
--

<pre> f=input('Introduza a frequência elétrica do motor:'); % frequência... ...elétrica da rede de alimentação do motor Laxial=input('Introduza o comprimento axial do motor:'); % comprimentoaxial do motor anelar Dint=input('Introduza o diâmetro interno do hélice:'); % diâmetrointerior do rotor Vp=input('Introduza a tensão de pico da fase:'); % tensão depico para a alimentação do motor If=input('Introduza a corrente nominal das fases:'); % O código completo encontra-se em apêndice em formato digital </pre>

Algoritmo D. 2. Código do sub-algoritmo de desenho automática do modelo FEM.

```

cd('C:\Users\Escola\Desktop\algoritmo dissertacao');
openfemm;           % Comando para abrir o FEMM
newdocument(0); % Comando para a criação de um novo documento FEMM
mi_saveas('teste.FEM'); % Comando para a gravação do projeto

disp(sprintf('-----
'));
disp(sprintf('Desenho automático do motor anelar '));
disp(sprintf('-----//-----
'));
disp(sprintf('Introduza os dados de entrada: '));
disp(sprintf('*****
'));
;
mi_probdef(f,'millimeters','planar',1e-8,Laxial,-30) % definição
...
... das variáveis globais do projeto

%-----
formulas3;           % m-file com as formulas do projeto
desenho_rotor;      % m-file com códigos de desenho do rotor
desenho_estator;    % m-file com códigos de desenho do estator
propriedade_materiais; % m-file com as propriedades do projeto
fronteira;          % m-file com códigos de criação da fronteira
de teste
label;              % m-file com etiquetas do projeto
bobinas;            % m-file de criação das bobinas
dados_saida;        % m-file com código de ''plotagem'' das
dimensões de .....saída do projeto
%-----

```

Algoritmo D. 3. Código para o cálculo da secção e número de espira.

```

clc;
clear all;
N_start=1;
N_step=1;
N_end=25;
vector_index=0;
variaveis_e_dados_entrada2;    % m-file com as variáveis locais ....
... e dados de entrada
sc=If/ds_c;                    % Cálculo da secção do condutor da bobina
d=sqrt(4*sc/pi);              % Cálculo do diâmetro do condutor da bobina
for esp=N_start:N_step:N_end % Ciclo de variação do número de
espiras
subalgoritmo_desenho_automatgico; % m-file com o algoritmo de
construção automática do modelo FEM
mi_analyze(0);                % Análise do modelo FEM
mi_loadsolution;              % visualização dos dados de análise
mo_hidepoints;
CP = mo_getcircuitproperties('Fase A');
Ic(esp)=CP(1);                % Corrente da fase na respectiva frequência...
...                            de escorregamento;
V(esp)=CP(2);                 % Queda tensão da fase na respectiva
frequência de escorregamento;
flux(esp)=CP(3);              % Fluxo concatenado na respectiva frequência
...                            escorregamento;
vector_index=vector_index+1;
Is=abs(Ic(vector_index))
disp(sprintf('Número de espiras = %d,para corrente de fase
=%dA',Nesp,Is));
v=abs(V(vector_index))
if v >=25;
    disp(sprintf('Valor aceitável = %dV,para corrente de fase
=%dA',v,Is));
    break
end
end
end

```

Algoritmo D. 4. Geração de frequências de escorregamento do motor.

```
for k = 1:12      % ciclo para a variação da frequência de
escorregamento
    syms WS WSS

        freq = k/4;
ws=[freq*2*pi]; % Frequência de escorregamento, w(s).
%-----
if k==1;
ws1=freq*2*pi;
end
if k==2;
ws2=freq*2*pi;
end

...

ws8=freq*2*pi;
if k==9;
ws9=freq*2*pi;
end
if k==10;
    ws10=freq*2*pi;
end
if k==11;
ws11=freq*2*pi;
end
if k==12;
ws12=freq*2*pi;
end
```

Algoritmo D. 5. código de obtenção da indutância $L(\omega_s)$.

```

mi_analyze(0);
mi_loadsolution;

CP = mo_getcircuitproperties('Fase A');

Ic(k)=CP(1); % Obtenção da corrente da fase

V(k)=CP(2); % Obtenção da queda de tensão da fase

flux(k)=CP(3); % Obtenção do fluxo concatenado

ind(k)=flux(k)/Ic(k); % Obtenção da indutância L( $\omega_s$ )

Rs(k)=V(k)/Ic(k); % Obtenção da resistência do estator
End

Li1=-(imag(ind(1)));
Li2=-(imag(ind(2)));
...
Li10=-(imag(ind(10)));
Li11=-(imag(ind(11)));
Li12=-(imag(ind(12))); % Indutância imaginária na respectiva
frequência...
... de escorregamento w(s).

%-----
Lre1=real(ind(1));
Lre2=real(ind(2));
Lre3=real(ind(3));
...
Lre10=real(ind(10));
Lre11=real(ind(11));
Lre12=real(ind(12)); % Indutância real na respectiva frequência ...
... de escorregamento w(s).

```

Algoritmo D. 6. Cálculo dos parâmetros C1 e C2 usando a técnica mínimos quadrados.

```

m=[ws1 -Li1*ws1^2;ws2 -Li2*ws2^2;ws3 -Li3*ws3^2;ws4 -Li4*ws4^2;...
ws5 -Li5*ws5^2;ws6 -Li6*ws6^2;ws7 -Li7*ws7^2;ws8 -Li8*ws8^2;...
ws9 -Li9*ws9^2;ws10 -Li10*ws10^2;ws11 -Li11*ws11^2;ws12 -
Li12*ws12^2];

b=[Li1;Li2;Li3;Li4;Li5;Li6;Li7;Li8;Li9;Li10;Li11;Li12];

C=inv((m.')*m)*(m.')*b; % Obtenção dos parâmetros C1 e C2 para...
... o cálculo de Lm

tau=sqrt(C(2));

```

Algoritmo D. 7. Obtenção dos parâmetros do circuito equivalente do modelo FEM.

```

M=abs(C(1)/tau)      % Indutância de magnetização Lm
R2=abs(M/tau)        % Resistência do rotor R2

L1s1=Lre1-(M/(1+(tau*ws1)^2));
L1s2=Lre2-(M/(1+(tau*ws2)^2));
L1s3=Lre3-(M/(1+(tau*ws3)^2));
L1s4=Lre4-(M/(1+(tau*ws4)^2));
L1s5=Lre5-(M/(1+(tau*ws5)^2));
L1s6=Lre6-(M/(1+(tau*ws6)^2));
L1s7=Lre7-(M/(1+(tau*ws7)^2));
L1s8=Lre8-(M/(1+(tau*ws8)^2));
L1s9=Lre9-(M/(1+(tau*ws9)^2));
L1s10=Lre10-(M/(1+(tau*ws10)^2));
L1s11=Lre11-(M/(1+(tau*ws11)^2));
L1s12=Lre12-(M/(1+(tau*ws12)^2));    % Indutância de dispersão na
...
...respetiva frequência de escorregamento (Ws).

% Indutância de dispersão do estator, L1
l1=abs((L1s1+L1s2+L1s3+L1s4+L1s5+L1s6+L1s7+L1s8+L1s9+L1s10+L1s11+L1s
12)/12)

% Resistência do estator, R1.
R1=(abs(Rs(1))+abs(Rs(2))+abs(Rs(3))+abs(Rs(4))+abs(Rs(5))+abs(Rs(6)
) ...
+abs(Rs(7))+abs(Rs(8))+abs(Rs(9))+abs(Rs(10))+abs(Rs(11))+abs(Rs(12)
))/12

```

Algoritmo D. 8. Inicialização dos parâmetros do esquema equivalente.

```

% traçado da curva do binário em função da velocidade do motor.
% Inicialização dos parâmetros do esquema equivalente do modelo FEM
vector_index=vector_index+1;

L1(vector_index)=l1;
r1(vector_index)=R1;
r2(vector_index)=R2;
Xbl=(2*pi*f*L1(vector_index));
x1(vector_index)=Xbl/2.5;
Lm(vector_index)=M;
x2=0;
X2=x2;
xm(vector_index)=(2*pi*f*Lm(vector_index));

```

Algoritmo D. 9. Aplicação do método de *Thévenin*.

```

%-----
% traçado da curva de binário em função da velocidade do motor.
% Aplicação das formulas já desenvolvidas durante a dissertação
%-----
-----
v_phase=v;          % Inicialização da variável que contem a Tensão de
fase
n_sync=nsyn;        % Inicialização da variável da velocidade
síncrona(rpm)
w_sync=n_sync*2*pi/60; % Idem para a velocidade síncrona (rad/s)

%Cálculo da tensão e impedância de Thévenin
v_th(vector_index)=v_phase*( xm(vector_index))/...
sqrt(
((r1(vector_index))^2)+(x1(vector_index)+xm(vector_index))^2)); %...
...Cálculo da tensão de Thévenin
z_th(vector_index)=((j*xm(vector_index))*(r1(vector_index)+...
j*x1(vector_index)))/(r1(vector_index)+j*(x1(vector_index)+...
xm(vector_index))); % Cálculo da impedância de Thévenin

r_th(vector_index)=real(z_th(vector_index)); % Cálculo da
resistência Thévenin

x_th(vector_index)=imag(z_th(vector_index)); % Cálculo da reactância
de Thévenin

```

Algoritmo D. 10. Geração dos valores de escorregamento do motor.

```

% Criação dos valores de escorregamento do motor (entre 0 e 1)
%-----
s=(0:1:50)/50; % Criação de 51 valores (entre 0 e 1) para o
escorregamento
s(1)=0.001; % forçando o 1º valor a ser 0.001
nm=(1-s)*n_sync; % velocidade mecânica versus velocidade síncrona

```

Algoritmo D. 11. Código para o traçado de quatro curvas do binário.

```

for ii=1:51
    T1(ii)=(3*((v_th(1))^2)*((r2(1))/s(ii)))/...
            (w_sync*((r_th(1)+((r2(1))/s(ii)))^2)+(x_th(1)+x2(1))^2));
end
for ii=1:51
    T2(ii)=(3*((v_th(2))^2)*((r2(2))/s(ii)))/...
            (w_sync*((r_th(2)+((r2(2))/s(ii)))^2)+(x_th(2)+X2(1))^2));
end
for ii=1:51
    T3(ii)=(3*((v_th(3))^2)*((r2(3))/s(ii)))/...
            (w_sync*((r_th(3)+((r2(3))/s(ii)))^2)+(x_th(3)+X2(1))^2));
end
for ii=1:51
    T4(ii)=(3*((v_th(4))^2)*((r2(4))/s(ii)))/...
            (w_sync*((r_th(4)+((r2(4))/s(ii)))^2)+(x_th(4)+X2(1))^2));
end

```

Algoritmo D. 12. Código para a impressão das curvas na tela do computador.

```

% traçado da curva do Binário x velocidade mecânica

plot(nm,T1, 'LineWidth',1.5)
hold on;
plot(nm,T2, 'LineWidth',1.5)
hold on;
plot(nm,T3, 'LineWidth',1.5)
hold on;
plot(nm,T4, 'LineWidth',1.5)
hold on;
title('Binário x velocidade do motor de indução trifásico');
xlabel('\bf\itn_{m} , rpm');
ylabel('\bf\tau_{ } , Binário - [ N.m ]');
legend('h_{R1}=1 mm ; h_{R2}=4 mm )',...
'h_{R1}=2 mm ; h_{R2}=3 mm )',...
'h_{R1}=3 mm ; h_{R2}=2 mm )',...
'h_{R1}=4 mm ; h_{R2}=1 mm');
grid on;
hold off;

```

Algoritmo D. 13. Código para o cálculo das correntes do estator.

```

for ii=1:51
    Zf(ii) =
    ((r2(1)/s(ii)+j*X2(1))*j*xm(1))/((r2(1)/s(ii)+j*X2(1))+j*xm(1));
    Zentrada(ii) = r1(1)+j*x1(1)+Zf(ii);
    I1(ii) = v_phase/Zentrada(ii);
    modI1(ii) = abs(I1(ii));

end
for ii=1:51
    Zf(ii) =
    ((r2(2)/s(ii)+j*X2(1))*j*xm(2))/((r2(2)/s(ii)+j*X2(1))+j*xm(2));
    Zentrada(ii) = r1(2)+j*x1(2)+Zf(ii);
    I1(ii) = v_phase/Zentrada(ii);
    modI1_2(ii) = abs(I1(ii));

end
for ii=1:51
    Zf(ii) =
    ((r2(3)/s(ii)+j*X2(1))*j*xm(3))/((r2(3)/s(ii)+j*X2(1))+j*xm(3));
    Zentrada(ii) = r1(3)+j*x1(3)+Zf(ii);
    I1(ii) = v_phase/Zentrada(ii);
    modI1_3(ii) = abs(I1(ii));

end
for ii=1:51
    Zf(ii) =
    ((r2(4)/s(ii)+j*X2(1))*j*xm(4))/((r2(4)/s(ii)+j*X2(1))+j*xm(4));
    Zentrada(ii) = r1(4)+j*x1(4)+Zf(ii);
    I1(ii) = v_phase/Zentrada(ii);
    modI1_4(ii) = abs(I1(ii));

end

```

Algoritmo D. 14. Código de impressão das curvas de corrente do estator na tela.

```

plot(nm,modI1,'LineWidth',1.5)
hold on;
plot(nm,modI1_2,'LineWidth',1.5)
hold on;
plot(nm,modI1_3,'LineWidth',1.5)
hold on;
plot(nm,modI1_4,'LineWidth',1.5)
title('Corrente do estator x velocidade do motor de indução
trifásico');
xlabel('\bf\itn_{m} , rpm');
ylabel('\bf Corrente,[ A ]');
legend('h_{R1}=1 mm ; h_{R2}=4 mm )',...
'h_{R1}=2 mm ; h_{R2}=3 mm )',...
'h_{R1}=3 mm ; h_{R2}=2 mm )',...
'h_{R1}=4 mm ; h_{R2}=1 mm ');

```

Algoritmo D. 15. Código para o cálculo do fator de potência.

```

for ii=1:51
    Zf(ii) =
    ((r2(1)/s(ii)+j*X2(1))*j*xm(1))/((r2(1)/s(ii)+j*X2(1))+j*xm(1));
    Zentrada(ii) = r1(1)+j*x1(1)+Zf(ii);
    I1(ii) = v_phase/Zentrada(ii);
    modI1(ii) = abs(I1(ii));
    FP(ii) = cos(angle(I1(ii))); %Fator de potência
end

```

Algoritmo D. 16. Código para a impressão das curvas de fator de potência na tela.

```

plot(nm,FP, 'LineWidth',1.5)
hold on;
plot(nm,FP_2, 'LineWidth',1.5)
hold on;
plot(nm,FP_3, 'LineWidth',1.5)
hold on;
plot(nm,FP_4, 'LineWidth',1.5)
title('Fator potência x velocidade do motor de indução trifásico');
xlabel('\bf\itn_{m} , rpm');
ylabel('\bf Fator potência,[ FP ]');
legend('h_{R1}=1 mm ; h_{R2}=4 mm )',...
'h_{R1}=2 mm ; h_{R2}=3 mm )',...
'h_{R1}=3 mm ; h_{R2}=2 mm )',...
'h_{R1}=4 mm ; h_{R2}=1 mm');
grid on;
hold off;

```

Algoritmo D. 17. Código para o cálculo do rendimento.

```

Prot=0;
for ii=1:51
    Zf(ii) =
    ((r2(1)/s(ii)+j*X2(1))*j*xm(1))/((r2(1)/s(ii)+j*X2(1))+j*xm(1));
    Zentrada(ii) = r1(1)+j*x1(1)+Zf(ii);
    I1(ii) = v_phase/Zentrada(ii);
    modI1(ii) = abs(I1(ii));
    FP(ii) = cos(angle(I1(ii))); % Fator de potência
    I2 = abs(v_th(1)/(z_th(1)+j*x2(1)+r2(1)/s(ii))); %I2 para
diversos s
    Pentrada(ii) = 3*v_phase*I1(ii)*FP(ii); % Potência na entrada
    Pg = 3*I2^2*(r2(1)/s(ii));
    Peixo(ii) = ((1-s(ii))*Pg)-Prot; % potência no eixo(= potência
conv.)
    Pmec(ii)=Peixo(ii)+Prot;
    rend(ii) = (Peixo(ii)/Pentrada(ii))*100; % rendimento
end

```