

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**



**Cunhas Magnéticas num Motor de Indução e  
Influência de Excentricidade nas  
Forças Eletromotrizes Induzidas no Veio**

Marcelo Francisco Soares Morgado

VERSÃO FINAL

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
Major Energia

Orientador: Prof. Carlos Araújo Sá

Outubro de 2018

© Marcelo Morgado, 2018

# Resumo

O motor elétrico de indução está presente em diversos setores industriais, comerciais, residenciais e de transporte, devido ao seu *design* simples, robusto e de fácil manutenção. Além disso, são motores que atingem elevados níveis de eficiência energética na transformação de energia elétrica em energia mecânica útil. O presente trabalho tem como foco o motor elétrico trifásico de corrente alternada de indução com rotor em gaiola de esquilo, de alta tensão. Sendo assim, o objetivo será aprofundar o conhecimento relativo ao funcionamento destes motores e através disso proceder a melhorias e/ou resolução de problemas na prática de produtos da empresa WEG S.A..

Os dois principais temas abordados são: influência de cunhas magnéticas inseridas nas ranhuras do estator e influência da excentricidade nas forças eletromotrizes induzidas no veio. Todo o estudo dos motores será efetuado com base numa ferramenta de simulação poderosa de máquinas elétricas, o *ANSYS Maxwell*. Este suporta-se no Método dos Elementos Finitos (MEF) e permite uma simulação com uma grande precisão relativamente ao funcionamento na prática de um motor de indução. A interface do software é simples, interativa e possui inúmeros recursos que facilitam a construção dos modelos e obtenção de resultados.

De um modo geral, serão estabelecidas metodologias de análise consoante os objetivos definidos, seguida de uma recolha e tratamento de resultados. Após uma validação dos modelos dos motores e dos métodos desenvolvidos, os mesmos serão aplicados a exemplos práticos com medidas efetivas em motores elétricos da WEG S.A..

**Palavras-chave:** Motor de Indução Trifásico, Cunhas Magnéticas, Excentricidade, Forças Eletromotrizes Induzidas no Veio, Método de Elementos Finitos, *ANSYS Maxwell*.



# Abstract

The electric induction motor has been widely used in several industrial, commercial, residential and transport sectors due to its simple, robust design and easy maintenance. In addition, they're motors that achieve high levels of efficiency in the transformation of electrical energy into mechanical energy. The current paper presents a study on high power three phase induction motor with squirrel cage rotor. The study carried out in this thesis has the purpose of deepening the knowledge regarding the operation of these motors and through this make improvements and solve problems in real WEG S.A. products.

The two main topics covered are: influence of magnetic wedges on the motor performance and shaft induced voltages due to eccentricities. The entire study of the engines will be carried out based on a powerful simulation tool of electric machines, the *ANSYS Maxwell*. Which uses Finite Element Method (FEA) that allows a simulation with a great precision regarding the operation of an induction motor. The software interface is simple, interactive and has numerous features that facilitate the development of the models and results visualization.

In general, analysis methodologies will be established according to the defined objectives, followed by a treatment of results. After the engines models validations and used methods, they will be applied to practical examples with effective actions in WEG S.A. electric motors.

**Keywords:** Three-Phase Induction Motor, Magnetic Wedges, Eccentricity, Shaft Induced Voltages, Finite Element Method, *ANSYS Maxwell*.



# Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, Prof. Carlos Araújo Sá, por todo o apoio durante a realização do trabalho, com toda a sua exigência, perfeccionismo e um feedback constante.

Uma palavra fica também para a empresa WEG S.A.. No Brasil, um agradecimento ao meu supervisor, Eng. Emerson Hammerschmitt, à responsável pelo meu programa Silvana Tecila e a todos os colegas de trabalho que fizeram parte do meu percurso, pelo espírito de entajuda e pela amizade. Quanto à WEG S.A. em Portugal, um grande agradecimento ao Dr. Eng. Bruno Baptista, pelos desafios, ideias propostas e pela contribuição crucial no desenvolvimento do trabalho. Além disso, um obrigado à FURB por ter facilitado o processo relativo ao programa de intercâmbio e pela participação dos professores Sérgio Cabral e Luís Meyer no decorrer do trabalho.

Uma palavra especial vai para a minha nova família Franke. Por me ter acolhido no Brasil e recebido em sua casa. Estiveram sempre do meu lado e foram um grande apoio durante toda esta viagem. No que depender deles, sei que no Brasil sentir-me-ei sempre em casa.

Aos meus amigos, obrigado pelos melhores conselhos nas fases mais complicadas desta jornada e por ajudarem-me a suprimir as saudades de casa.

Por fim, não existem palavras que possam exprimir o sentimento de gratidão para com os meus pais e irmãs. Simplesmente, esta experiência no Brasil e a realização desta dissertação não se teriam concretizado sem eles. Obrigado por todo o amor e apoio incondicional.





*“Success is my only option, failure’s not”*

Marshall Mathers



# Índice

<b>Capítulo 1</b> .....	<b>1</b>
Introdução .....	1
1.1. Programa Mobile - WEG S.A.....	1
1.2. Contexto .....	1
1.2.1. Mercado global de motores elétricos.....	3
1.2.2. Eficiência de motores elétricos .....	3
1.3. Objetivos.....	3
1.4. Estrutura .....	4
<b>Capítulo 2</b> .....	<b>5</b>
Fundamentos teóricos e motores avaliados .....	5
2.1. Motor de indução .....	5
2.1.1. História .....	5
2.1.2. Constituição geral .....	6
2.1.3. Princípio de funcionamento.....	8
2.2. Cunhas magnéticas nas ranhuras do estator .....	10
2.2.1. Coeficiente de Carter .....	10
2.2.2. Reatância de fugas e impedância total no arranque .....	11
2.2.3. Influência nas características do motor.....	11
2.2.4. Tipologias convencionas .....	12
2.3. Software ANSYS Maxwell e método elementos finitos .....	13
2.3.1. Análise transitória magnética não linear ( <i>Transient</i> ) .....	14
2.4. Excentricidade .....	14
2.4.1. Tipos de excentricidade .....	15
2.5. Ruído magnético .....	16
2.5.1. Força de atração magnética desequilibrada .....	16
2.5.2. Modos de vibração .....	16
2.6. Forças eletromotrizes induzidas no veio .....	17

2.7.	Circulação de corrente no veio .....	18
2.7.1.	<i>Ring flux linking shaft</i> .....	18
2.7.2.	Fluxo homopolar .....	20
2.7.3.	Soluções de controlo ou eliminação .....	20
2.8.	Combinação de ranhuras do estator e rotor .....	21
2.9.	Motores avaliados .....	21
2.10.	Características elétricas .....	22
2.11.	Materiais e características construtivas .....	22
2.11.1.	Estator, rotor e entreferro .....	22
2.11.2.	Bobinagem .....	23
2.11.3.	Condutores rotóricos.....	23
2.11.4.	Anéis de curto-circuito .....	24
2.11.5.	Veio .....	24
2.11.6.	Cunhas magnéticas.....	24
<b>Capítulo 3</b>	.....	<b>25</b>
Modelização no ANSYS Maxwell.....		25
3.1.	Modelo do motor.....	25
3.1.1.	Construção .....	25
3.1.2.	Condições de fronteira ( <i>Boundaries</i> ).....	26
3.1.3.	Malhas de cálculo ( <i>Mesh Operations</i> ) .....	27
3.1.4.	Resistências e indutâncias .....	28
3.1.5.	Resistência e temperatura .....	30
<b>Capítulo 4</b>	.....	<b>31</b>
Simulação e metodologia .....		31
4.1.	Condições da simulação .....	31
4.1.1.	Regime permanente .....	31
4.1.2.	Transitório de arranque (Direto).....	32
4.2.	Densidade de fluxo magnético no entreferro .....	33
4.2.1.	Distorção harmónica do fluxo no entreferro .....	33
4.3.	Perdas e rendimento.....	34
4.3.1.	Trânsito de potência ativa .....	34
4.3.2.	Perdas mecânicas.....	35
4.3.3.	Perdas por efeito joule nos anéis .....	35
4.3.4.	Rendimento .....	36
4.4.	Fator de potência .....	36
4.5.	Força eletromotriz induzida no veio .....	37

<b>Capítulo 5 .....</b>	<b>39</b>
Resultados da simulação .....	39
5.1. Validação do modelo .....	39
5.1.1. Precisão dos modelos desenvolvidos .....	40
5.2. Formas de onda do regime permanente .....	41
5.2.1. Tensões de fase ( <i>InputVoltage(Phase)</i> ) .....	41
5.2.2. Correntes de fase ( <i>Current(Phase)</i> ) .....	41
5.2.3. Velocidade de rotação ( <i>Moving1.Speed</i> ).....	42
5.2.4. Binário ( <i>Moving1.Torque</i> ) .....	42
5.2.5. Potência absorvida ( <i>ElecPower</i> ) e potência útil ( <i>MechPower</i> ).....	42
5.3. Formas de onda do transitório de arranque .....	43
5.3.1. Corrente de arranque .....	43
5.4. Resultados para o fluxo magnético no entreferro .....	44
5.4.1. Influência das cunhas magnéticas .....	44
5.4.2. Forma de onda do fluxo magnético no entreferro .....	46
5.4.3. Transformada de Fourier (Análise FFT) .....	48
5.5. Binário eletromagnético.....	50
5.5.1. Cunhas magnéticas e binários pulsatórios .....	50
5.6. Resultados para perdas e rendimento .....	53
5.7. Corrente estatórica e fator de potência.....	54
5.8. Formas de onda da f.e.m. induzida no veio .....	54
5.8.1. F.e.m. induzida no veio e excentricidade no motor W22X 500 2np .....	55
5.8.2. F.e.m. induzida no veio e excentricidade no motor W22X 355 4np .....	56
5.8.3. Síntese de resultados da f.e.m. induzida no veio .....	57
5.8.4. Ensaio experimental da f.e.m. induzida no veio .....	57
5.8.5. F.e.m. induzida no veio e cunhas magnéticas .....	58
<b>Capítulo 6 .....</b>	<b>59</b>
Tratamento de resultados .....	59
6.1. Distorção do fluxo magnético no entreferro .....	59
6.2. Magnitude binários pulsatórios.....	60
6.3. Perdas .....	61
6.4. Rendimento.....	63
6.5. Corrente de arranque .....	64
6.6. Fator de potência.....	64
6.6. Excentricidade e f.e.m. induzida no veio .....	65
6.7. F.e.m. induzida no veio e cunhas magnéticas.....	65
<b>Capítulo 7 .....</b>	<b>67</b>

Aplicação prática .....	67
7.1. Motor W22X 500 2np e cunhas magnéticas.....	67
7.1.1. Desempenho do motor com cunhas não magnéticas .....	67
7.1.2. Avaliação económica .....	68
7.2. Motor W22X 355 4np e f.e.m. induzida no veio .....	69
7.2.1. Combinação de ranhuras e resultados para f.e.m. induzida no Veio .....	69
7.2.2. Restrições relativas aos modos de vibração.....	71
7.2.3. Análise do ruído magnético combinação E48/R40 .....	71
7.2.4. Validação do modelo com combinação E48/R40 .....	72
7.2.5. Avaliação económica .....	73
<b>Capítulo 8 .....</b>	<b>75</b>
Conclusões e trabalho futuro .....	75
8.1. Conclusões .....	75
8.2. Desenvolvimentos e trabalhos futuros.....	76
8.2.1. Cunhas magnéticas .....	76
8.2.2. F.e.m. induzida no veio .....	77
8.2.3. Perdas por efeito joule nos anéis de curto-circuito .....	77
<b>Referências .....</b>	<b>79</b>
<b>Anexo A.....</b>	<b>83</b>
Características dos motores.....	83
A.1. Estator, rotor e entreferro .....	83
A.2. Bobinagem .....	84
A.3. Barras do rotor e anéis de curto-circuito .....	84
<b>Anexo B.....</b>	<b>85</b>
Modelização dos motores .....	85
B.1. Modelos.....	85
B.2. Resistência, indutância e temperatura.....	88
<b>Anexo C.....</b>	<b>89</b>
Simulação.....	89
C.1. Condições de simulação .....	89
C.2. Perdas mecânicas.....	90
C.3. Perdas no ferro .....	90
<b>Anexo D.....</b>	<b>91</b>
Validação dos modelos .....	91
D.1. Validação do modelo do motor W22X 500 2np .....	91
D.2. Validação do modelo do motor W22X 355 4np .....	92
D.3. Validação do modelo do motor W22X 355 6np .....	93

D.4. Validação do modelo do motor W22X 450 8np .....	94
<b>Anexo E .....</b>	<b>95</b>
Formas de onda do regime permanente .....	95
E.1. Formas de onda do motor W22X 500 2np.....	95
E.2. Formas de onda do motor W22X 355 4np.....	97
E.3. Formas de onda do motor W22X 450 8np.....	98
<b>Anexo F .....</b>	<b>101</b>
Indução magnética nas cunhas .....	101
F.1. Condições de obtenção das ilustrações.....	101
F.2. Ilustrações da indução magnética no entreferro.....	102
<b>Anexo G .....</b>	<b>105</b>
Cálculo perdas anéis curto-circuito.....	105
G.1. Avaliação do método de cálculo de perdas nos anéis .....	106





# Lista de figuras

Figura 1.1 - Principais áreas de atuação para o aumento da eficiência de um motor de indução.	2
Figura 2.1 - Motor de indução de Galileo Ferrari.	6
Figura 2.2 - Motor de indução de Nikola Tesla.	6
Figura 2.3 - Exemplo esquemático do estator de um motor de indução.	6
Figura 2.4 - Exemplo esquemático de um rotor bobinado.	7
Figura 2.5 - Exemplo esquemático de um rotor em gaiola de esquilo.	8
Figura 2.6 - Motor da linha W22 WEG.	8
Figura 2.7 - Representação do campo magnético girante resultante.	10
Figura 2.8 - Cunha com geometria trapezoidal.	12
Figura 2.9 - Cunha de dupla aresta.	12
Figura 2.10 - Cunha trapezoidal com aresta arredondada.	13
Figura 2.11 - Cunha de dupla aresta com arestas planas.	13
Figura 2.12 - Elemento básico da malha de cálculo em 2D.	13
Figura 2.13 - a) Excentricidade estática b) Excentricidade dinâmica.	16
Figura 2.14 - Ilustração dos modos de vibração de baixa ordem.	17
Figura 2.15 - Vista transversal de um motor de indução e representação da distribuição assimétrica do fluxo útil em torno do veio.	18
Figura 2.16 - Efeito capacitivo entre estator, enrolamentos e rotor (através do entreferro).	19
Figura 2.17 - Vista longitudinal de um motor de indução com representação da tensão induzida e circulação de corrente.	19
Figura 2.18 - Ilustração da corrente no veio como consequência do fluxo homopolar.	20
Figura 2.19 - Curva B-H do material da chapa magnética do estator e do rotor.	23
Figura 2.20 - Esquema de um anel generalizado.	24
Figura 2.21 - Curva B-H do material que constitui a cunha magnética.	24
Figura 3.1 - Exemplo das simplificações adotadas na construção do modelo (motor <i>W22X 500 2np</i> ).	25
Figura 3.2 - Modelo completo do motor <i>W22X 500 2np</i> no <i>ANSYS Maxwell</i> .	26
Figura 3.3 - Zoom ao modelo do motor <i>W22X 500 2np</i> .	26
Figura 3.4 - Condição de fronteira, vetor potencial magnético nulo.	26
Figura 3.5 - Modelo motor <i>W22X 355 6np</i> e fronteiras.	27
Figura 3.6 - Representação da malha de cálculo total (motor <i>W22X 500 2np</i> ).	28

Figura 4.1 - Diagrama simplificado do trânsito de potência ativa de um motor de indução.	35
Figura 4.2 - Circuito externo de medição da f.e.m. induzida aos terminais do veio.	37
Figura 4.3 - Caracterização das excentricidades no modelo em 2D (centro geométrico a “preto” e centro rotórico a “laranja”).	38
Figura 5.1 - Tensões de fase motor W22X 355 6np.	41
Figura 5.2 - Correntes de fase motor W22X 355 6np.	41
Figura 5.3 - Velocidade de rotação motor W22X 355 6np.	42
Figura 5.4 - Binário motor W22X 355 6np.	42
Figura 5.5 - Potência absorvida e potência útil motor W22X 355 6np.	42
Figura 5.6 - Corrente de arranque numa fase motor W22X 500 2np.	43
Figura 5.7 - Corrente de arranque numa fase motor W22X 355 4np.	43
Figura 5.8 - Corrente de arranque numa fase motor W22X 355 6np.	44
Figura 5.9 - Corrente de arranque numa fase motor W22X 450 8np.	44
Figura 5.10 - Densidade de fluxo magnético no entreferro cunhas não magnéticas (W22X 500 2np).	45
Figura 5.11 - Densidade de fluxo magnético no entreferro com cunhas magnéticas (W22X 500 2np).	46
Figura 5.12 - Indução magnética no entreferro (motor W22X 500 2np).	47
Figura 5.13 - Indução magnética no entreferro (motor W22X 355 4np).	47
Figura 5.14 - Indução magnética no entreferro (motor W22X 355 6np).	47
Figura 5.15 - Indução magnética no entreferro (motor W22X 450 8np).	48
Figura 5.16 - Indução magnética no entreferro em função do tempo (motor W22X 500 2np).	49
Figura 5.17 - FFT aplicada à densidade de fluxo magnético no entreferro (W22X 500 2np).	49
Figura 5.18 - FFT aplicada à densidade de fluxo magnético no entreferro (W22X 355 4np).	49
Figura 5.19 - FFT aplicada à densidade de fluxo magnético no entreferro (W22X 355 6np).	50
Figura 5.20 - FFT aplicada à densidade de fluxo magnético no entreferro (W22X 450 8np).	50
Figura 5.21 - Binários pulsatórios motor W22X 500 2np.	51
Figura 5.22 - Binários pulsatórios motor W22X 355 4np.	51
Figura 5.23 - Binários pulsatórios motor W22X 355 6np.	52
Figura 5.24 - Binários pulsatórios motor W22X 450 8np.	52
Figura 5.25 - F.e.m. induzida no veio para excentricidade nula (motor W22X 500 2np).	55
Figura 5.26 - F.e.m. induzida no veio para excentricidade estática (motor W22X 355 2np).	55
Figura 5.27 - F.e.m. induzida no veio para excentricidade dinâmica (motor W22X 355 2np).	55
Figura 5.28 - F.e.m. induzida no veio para excentricidade nula (motor W22X 355 4np).	56
Figura 5.29 - F.e.m. induzida no veio para excentricidade estática (motor W22X 355 4np).	56
Figura 5.30 - F.e.m. induzida no veio para excentricidade dinâmica (motor W22X 355 4np).	56

Figura 5.31 - Forma de onda f.e.m. induzida no veio obtida em ensaio (W22X 355 4np)	57
Figura 6.1 - Comparação da THD da densidade de fluxo magnético para cada motor com cunhas magnéticas e não magnéticas.	60
Figura 6.2 - Comparação da magnitude dos binários pulsatórios para cada motor com cunhas magnéticas e não magnéticas.	60
Figura 6.3 - Diminuição da magnitude dos binários oscilatórios utilizando cunhas magnéticas.	61
Figura 6.4 - Aumento das perdas no ferro com cunhas não magnéticas.	62
Figura 6.5 - Aumento das perdas por efeito Joule com cunhas não magnéticas.	62
Figura 6.6 - Aumento do valor de perdas total com cunhas não magnéticas.	62
Figura 6.7 - Aumento do rendimento com cunhas magnéticas.	63
Figura 6.8 - Aumento da corrente de arranque de cada motor com cunhas não magnéticas.	64
Figura 6.9 - Aumento do fator do potência de cada motor com cunhas magnéticas.	64
Figura 6.10 - F.e.m. induzida no veio para excentricidades estática e dinâmica ( W22X 500 2np).	65
Figura 6.11 - F.e.m. induzida no veio para excentricidades estática e dinâmica (W22X 355 4np).	65
Figura 6.12 - Aumento da f.e.m. induzida no veio com cunhas não magnéticas para excentricidade estática (W22X 355 4np).	66
Figura 6.13 - Aumento da f.e.m. induzida no veio com cunhas não magnéticas para excentricidade dinâmica (W22X 355 4np).	66
Figura 7.1 - F.e.m. induzida no veio em função da combinação do número de ranhuras, com excentricidade nula.	69
Figura 7.2 - F.e.m. induzida no veio em função da combinação do número de ranhuras, com excentricidade estática (50%).	70
Figura 7.3 - F.e.m. induzida no veio em função da combinação do número de ranhuras, com excentricidade dinâmica (50%).	70
Figura 7.4 - Cálculo ruído magnético do motor W22X 355 4np com E48/R38.	71
Figura 7.5 - Cálculo ruído magnético do motor W22X 355 4np com E48/R40.	72
Figura A.1 - Esquema de um anel generalizado.	84
Figura B.1 - Modelo motor W22X 500 2np no ANSYS Maxwell.	85
Figura B.2 - Modelo motor W22X 355 4np no ANSYS Maxwell.	86
Figura B.3 - Modelo motor W22X 355 6np no ANSYS Maxwell (1/6 geometria).	86
Figura B.4 - Modelo motor W22X 450 8np no ANSYS Maxwell (1/4 geometria).	87
Figura E.1 - Tensões de fase ( <i>InputVoltage(Phase)</i> ) motor W22X 500 2np.	95
Figura E.2 - Correntes de fase ( <i>Current(Phase)</i> ) motor W22X 500 2np.	95
Figura E.3 - Velocidade de rotação ( <i>Moving1.Speed</i> ) motor W22X 500 2np.	96
Figura E.4 - Binário ( <i>Moving1.Torque</i> ) motor W22X 500 2np.	96
Figura E.5 - Potência absorvida ( <i>ElecPower</i> ) e potência útil ( <i>MechPower</i> ) motor W22X 500 2np.	96
Figura E.6 - Tensões de fase ( <i>InputVoltage(Phase)</i> ) motor W22X 355 4np.	97
Figura E.7 - Correntes de fase ( <i>Current(Phase)</i> ) motor W22X 355 4np.	97
Figura E.8 - Velocidade de rotação ( <i>Moving1.Speed</i> ) motor W22X 355 4np.	97
Figura E.9 - Binário ( <i>Moving1.Torque</i> ) motor W22X 355 4np.	98

Figura E.10 - Potência absorvida ( <i>ElecPower</i> ) e potência útil ( <i>MechPower</i> ) motor W22X 355 4np.	98
Figura E.11 - Tensões de fase ( <i>InputVoltage(Phase)</i> ) motor W22X 355 8np.	98
Figura E.12 - Correntes de fase ( <i>Current(Phase)</i> ) motor W22X 355 8np.	99
Figura E.13 - Velocidade de rotação ( <i>Moving1.Speed</i> ) motor W22X 355 8np.	99
Figura E.14 - Binário ( <i>Moving1.Torque</i> ) motor W22X 355 8np.	99
Figura E.15 - Potência absorvida ( <i>ElecPower</i> ) e potência útil ( <i>MechPower</i> ) motor W22X 355 8np.	100
Figura F.1 - Densidade de fluxo magnético com cunhas não magnéticas (W22X 355 4np).	102
Figura F.2 - Densidade de fluxo magnético com cunhas magnéticas (W22X 355 4np).	102
Figura F.3 - Densidade de fluxo magnético com cunhas não magnéticas (W22X 355 6np).	103
Figura F.4 - Densidade de fluxo magnético com cunhas magnéticas (W22X 355 6np).	103
Figura F.5 - Densidade de fluxo magnético com cunhas não magnéticas (W22X 450 8np).	104
Figura F.6 - Densidade de fluxo magnético com cunhas magnéticas (W22X 450 8np).	104

## Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Valores para principais grandezas obtidas em regime estipulado a 100% de carga. ....	22
Tabela 2.2 - Número de ranhuras do estator e rotor e comprimento do entreferro. ....	23
Tabela 3.1 - Resistência e indutância dos condutores do estator do motor <i>W22X 500 2np</i> . ....	29
Tabela 3.2 - Resistência e indutância barras do rotor e anéis de curto-circuito do <i>W22X 500 2np</i> . ....	29
Tabela 3.3 - Resistência por fase corrigida de acordo com temperatura operação ( <i>W22X 500 2np</i> ). ....	30
Tabela 3.4 - Resistividade das barras rotor corrigida de acordo com temperatura ( <i>W22X 500 2np</i> ). ....	30
Tabela 4.1 - Excentricidades simuladas no motor <i>W22X 500 2np</i> com entreferro igual a 4,25m. ....	38
Tabela 5.1 - Valores das tensões e correntes obtidos na simulação para o motor <i>W22X 355 6np</i> . ....	39
Tabela 5.2 - Valores de binário e velocidade obtidos na simulação do motor <i>W22X 355 6np</i> . ....	40
Tabela 5.3 - Valores de potências obtidos na simulação do motor <i>W22X 355 6np</i> . ....	40
Tabela 5.4 - Valor do fator de potência obtido na simulação do motor <i>W22X 355 6np</i> . ...	40
Tabela 5.5 - Fatores importantes na análise da indução magnética (motor <i>W22X 500 2np</i> ) . ....	45
Tabela 5.6 - Binário eletromagnético médio com cunhas magnéticas e não magnéticas. .	51
Tabela 5.7 - Cálculo das perdas e do rendimento para os quatro motores ( <i>UN – fN – IN</i> ) . ....	53
Tabela 5.8 - Cálculo do fator de potência para os quatro motores ( <i>UN – fN – IN</i> ). ....	54
Tabela 5.9 - Valores obtidos para f.e.m. induzida no veio. ....	57
Tabela 5.10 - F.e.m induzida no veio e influência das cunhas magnéticas (motor <i>W22 355 4np</i> ). ....	58
Tabela 7.1 - Fatores para decisão de utilização de cunhas não magnéticas. ....	68
Tabela 7.2 - Resultados f.e.m. induzida no veio e combinação de ranhuras. ....	70
Tabela 7.3 - Restrições para combinação de ranhuras relativas aos modos de vibração. ...	71
Tabela 7.4 - Tensões e correntes obtidos na simulação para o motor <i>W22X 355 4np</i> com E48/R40. ....	73

Tabela 7.5 - Binário e velocidade obtidos na simulação do motor W22X 355 4np com E48/R40. ....	73
Tabela 7.6 - Valores de potências obtidos na simulação do motor W22X 355 4np com E48/R40. ....	73
Tabela 7.7 - Valor do fator de potência obtido na simulação do motor W22X 355 4np com E48/R40. ....	73
Tabela A.1 - Caracterização construtiva do estator, rotor e entreferro. ....	83
Tabela A.2 - Caracterização da bobinagem dos quatro motores. ....	84
Tabela A.3 - Caracterização das barras do rotor e anéis de curto-circuito dos quatro motores. ....	84
Tabela B.1 - Caracterização da indutância e resistência em função da temperatura. ....	88
Tabela C.1 - Condições de simulação em regime permanente. ....	89
Tabela C.2 - Condições de simulação do transitório de arranque (direto). ....	90
Tabela C.3 - Perdas mecânicas obtidas em ensaio, no regime estipulado, a 100% de carga. ....	90
Tabela C.4 - Perdas no ferro obtidas em ensaio, no regime estipulado, a 100% de carga. ....	90
Tabela D.1 - Valores das tensões e correntes obtidos na simulação para o motor W22X 500 2np. ....	91
Tabela D.2 - Valores de binário e velocidade obtidos na simulação do motor W22X 500 2np. ....	91
Tabela D.3 - Valores de potências obtidos na simulação do motor W22X 500 2np. ....	91
Tabela D.4 - Valor do fator de potência obtido na simulação do motor W22X 500 2np. ...	92
Tabela D.5 - Valores das tensões e correntes obtidos na simulação para o motor W22X 355 4np. ....	92
Tabela D.6 - Valores de binário e velocidade obtidos na simulação do motor W22X 355 4np. ....	92
Tabela D.7 - Valores de potências obtidos na simulação do motor W22X 355 4np. ....	92
Tabela D.8 - Valor do fator de potência obtido na simulação do motor W22X 355 4np. ...	92
Tabela D.9 - Valores das tensões e correntes obtidos na simulação para o motor W22X 355 6np. ....	93
Tabela D.10 - Valores de binário e velocidade obtidos na simulação do motor W22X 355 6np. ....	93
Tabela D.11 - Valores de potências obtidos na simulação do motor W22X 355 6np. ....	93
Tabela D.12 - Valor do fator de potência obtido na simulação do motor W22X 355 6np. .	93
Tabela D.13 - Valores das tensões e correntes obtidos na simulação para o motor W22X 450 8np. ....	94
Tabela D.14 - Valores de binário e velocidade obtidos na simulação do motor W22X 450 8np. ....	94
Tabela D.15 - Valores de potências obtidos na simulação do motor W22X 450 8np. ....	94
Tabela D.16 - Valor do fator de potência obtido na simulação do motor W22X 450 8np. .	94
Tabela F.1 - Fatores importantes na análise da indução magnética (valores instantâneos). ....	101
Tabela G.1 - Cálculo perdas por efeito Joule nos anéis de curto-circuito. ....	105

## Abreviaturas

2D	Duas Dimensões
AC	Alternating Current
AS/NZS	Australia and New Zealand Standards
DC	Direct Current
FEM	Finite Element Method
FFT	Fast Fourier Transformation
IEA	International Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Comission
NEMA	National Eletrical Manufacturers Association
pk2pk	Peak to Peak Average
RAM	Random Access Memory
UMP	Unbalanced Magnetic Pull
VFD	Variable Frequency Drive

## Símbolos

$f$	Frequência
$p$	Número de pares de polos
$n$	Velocidade
$n_s$	Velocidade de sincronismo
$s$	Deslizamento
$f_r$	Frequência campo magnético girante rotórico
$F_s$	Força magnetomotriz estatórica
$F_r$	Força magnetomotriz rotórica
$\lambda$	Ângulo de binário
$B_s$	Campo magnético girante estatórico
$B_r$	Campo magnético girante rotórico
$B_R$	Campo magnético resultante
$B_m$	Densidade de fluxo magnético máxima no entreferro
$B_\delta$	Densidade de fluxo magnético média no entreferro
$t$	Passo da bobinagem
$b_m$	Comprimento de uma cunha

$h$	Espessura de uma cunha
$\delta$	Espessura do entreferro
$\mu_r$	Permeabilidade magnética relativa no topo das ranhuras
$\mu_o$	Permeabilidade magnética do vazio
$k_\delta$	Coefficiente de Carter
$R_{st}$	Resistência total no arranque
$X_{st}$	Reatância total de fugas no arranque
$R_1$	Resistência estática total referida ao estator
$R_2$	Resistência rotóricas total referida ao rotor
$T_M$	Binário máximo
$T_{st}$	Binário de arranque
$U_{1s}$	Tensão de fase
$I_{st}$	Corrente de arranque
$I_0$	Corrente em vazio
$\nu$	Relutividade magnética
$A$	Vetor potencial magnético
$J_s$	Densidade de corrente elétrica
$t$	Tempo
$\sigma$	Condutividade elétrica
$V$	Potencial elétrico
$H_C$	Coercividade magnética
$v$	Velocidade
$\varepsilon$	Força eletromotriz induzida
$\Delta\Phi$	Varição do fluxo magnético
$\Delta t$	Intervalo de tempo
$N_1$	Número de ranhuras do estator
$N_2$	Número de ranhuras do rotor
$p$	Número de pares de polos
$r$	Modo de vibração
$L_s$	Indutância total
$L_m$	Soma da indutância própria e indutância mútua das outras fases
$L_{sf}$	Indutância de fugas
$T$	Temperatura de operação do motor
$T_0$	Temperatura de referência
$R_{(T)}$	Resistência à temperatura de operação do motor
$R_{(T_0)}$	Resistência à temperatura de referência
$\alpha$	Coefficiente de temperatura
$B_k$	Valor eficaz das componentes harmônicas do fluxo magnético
$B_{1(fund)}$	Valor eficaz da componente fundamental do fluxo magnético
$p_{Js}$	Perdas por efeito Joule no estator
$p_{Jr}$	Perdas por efeito Joule no rotor
$p_{Fe}$	Perdas no ferro
$p_H$	Peras por histerese
$p_F$	Perdas por correntes de Foucault
$p_{LL}$	Perdas adicionais
$P_{abs}$	Potência elétrica ativa absorvida de entrada



$P_{tr}$	Potência ativa transferida para o rotor ou potência do entreferro
$P_2$	Potência mecânica total desenvolvida e inclui valor de perdas mecânicas
$P_u$	Potência útil mecânica
$p_{mec}$	Perdas mecânicas
$\eta$	Rendimento
$S$	Potência aparente
$\cos \varphi$	Fator de potência



# Capítulo 1

## Introdução

Este capítulo apresenta uma contextualização do trabalho desenvolvido, bem como os objetivos e a sua estrutura. Além disso, é feita uma referência ao programa de intercâmbio Mobile que está na base da realização desta dissertação em ambiente industrial.

### 1.1. Programa Mobile - WEG S.A.

O presente trabalho foi realizado na empresa WEG Equipamentos Elétricos S.A. - Motores, localizada na cidade de Jaraguá do Sul do estado de Santa Catarina, Brasil. Além disso, o trabalho decorreu na secção de Desenvolvimento e Aplicação de Motores Industriais, do Parque Fabril II. A duração do período de estudos foi de seis meses (fevereiro a julho de 2018), ao abrigo do programa de intercâmbio MOBILE envolvendo a FEUP (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto), a FURB (Universidade Regional de Blumenau) e a WEG S.A.. Pela FEUP, os trabalhos de dissertação tiveram a orientação do Prof. Carlos Sá. Localmente, os trabalhos tiveram a supervisão do Eng. Emerson Hammerschmitt (WEG Motores) e dos professores Sérgio Cabral e Luís Meyer (FURB). O desenvolvimento do trabalho contou também com a supervisão do Doutor Eng. Bruno Baptista da WEG S.A. em Portugal.

### 1.2. Contexto

Os motores elétricos estão presentes nos mais diversos setores industriais, comerciais e residenciais, tendo como principal função transformar energia elétrica em energia mecânica. A crescente procura de motores elétricos em áreas de aplicação como refinarias de petróleo, combustível, geração de energia, mineração, transporte e tração elétrica, indústrias de papel, celulose, naval e açúcar levam ao crescimento global do mercado dos motores elétricos. Estas indústrias têm uma elevada dependência destas máquinas e do seu funcionamento ininterrupto, que requer um elevado consumo de energia. Desse modo, o desenvolvimento dos motores elétricos na direção do maior nível de eficiência é imprescindível para uma exploração viável a um nível económico e ambiental [1].

Estes motores atingem um elevado grau de eficiência na transformação de energia, além disso, a sua exploração apresenta altos níveis de segurança e são capazes de operar em ambientes com condições extremamente adversas, como atmosferas corrosivas ou explosivas [2], valências que aumentam a sua procura.

O presente trabalho tem como foco o motor elétrico trifásico de corrente alternada de indução com rotor em gaiola de esquilo, de alta tensão. De um modo geral, os motores de indução apresentam um baixo custo de exploração, de manutenção e elevados níveis de eficiência. São produzidos em massa por vários fabricantes segundo normas e standards internacionais para todos os seus componentes e características de funcionamento (tamanho de carcaça, rendimento, potência útil mecânica, binário, velocidade de rotação, isolamento, entre outros).

O profundo conhecimento de todos os fenómenos envolvidos no funcionamento de um motor de indução é essencial para o entendimento das suas condições de operação e a influência destas no seu desempenho. Nesta temática a simulação computacional tem um papel determinante [3]. Atualmente, a variedade de *software* e ferramentas existentes permitem efetuar simulações com um elevado nível de precisão. Neste trabalho, o *software ANSYS Maxwell* será a ferramenta principal no estudo desenvolvido e na simulação de motores de indução.

De acordo com um estudo efetuado pela *International Energy Agency (IEA)* referido em [4], existem algumas áreas de intervenção relativas ao fabrico e materiais do motor de indução que terão um maior impacto no seu rendimento. Estas áreas de melhoramento estão resumidas no gráfico da figura 1.1, adaptada de [4].

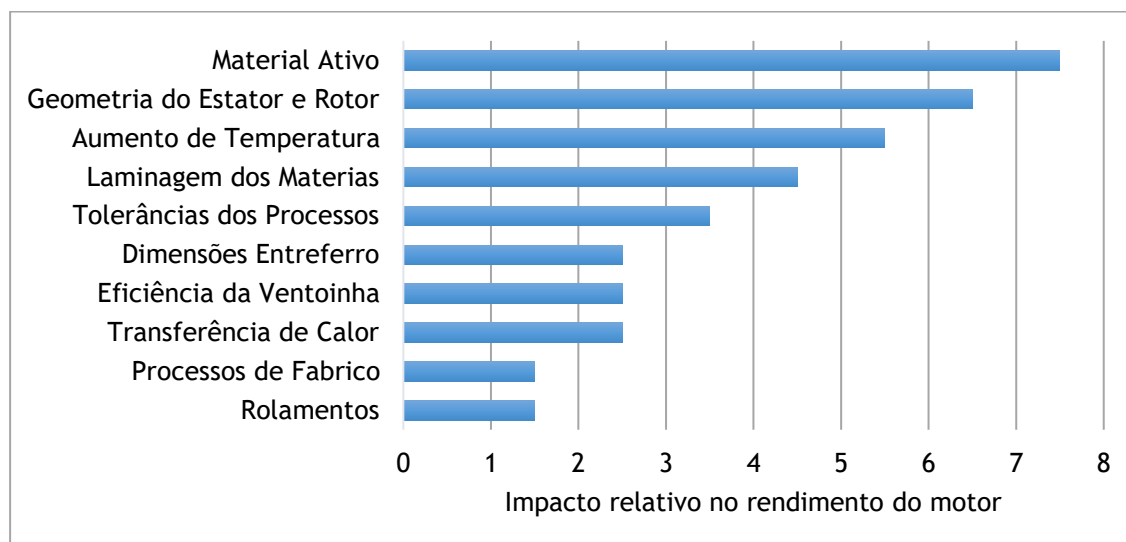


Figura 1.1 - Principais áreas de atuação para o aumento da eficiência de um motor de indução.

Pode-se afirmar que praticamente todos os fatores mencionados na figura 1.1 estão relacionados com os temas abordados neste trabalho: influência de cunhas magnéticas no desempenho de um motor de indução e forças eletromotrizes induzidas no veio como função de excentricidade. Dessa forma, considera-se que o aprofundamento do estudo destas duas temáticas é muito importante na melhoria contínua do motor de indução e compreensão do seu funcionamento.

### 1.2.1. Mercado global de motores elétricos

A *International Energy Agency* estimou que sistemas acionados por motores elétricos foram responsáveis por 46 % do consumo global de energia elétrica em 2011 [4], atingindo uma avaliação de mercado com um valor de 85,7 bilhões (10<sup>9</sup>) de dólares em 2015 [1]. A *IEA* mantém uma forte base de dados relativa ao consumo de energia por parte dos principais setores: industrial, comercial, agricultura, residencial e transportes. De todos eles, o setor industrial destacou-se em 2011 com cerca de 64 % do consumo de eletricidade por parte de motores elétricos [4].

Em termos de motores em funcionamento ou em *stock*, os motores pequenos são os mais comuns (potência menor que 0,75 kW): 2 bilhões de um total estimado de 2,23 bilhões de motores elétricos (valores de 2011 [4]). No entanto, os médios (potência entre 0,75 kW e 375 kW) e grandes motores (potência entre 375 kW e 100 MW) são responsáveis por mais de metade do consumo global de energia elétrica por parte de motores elétricos [4].

### 1.2.2. Eficiência de motores elétricos

Nos dias de hoje, a eficiência de um motor elétrico não se prende apenas ao balanço entre potência desenvolvida e potência consumida, muito pelo contrário. Estima-se que o consumo elétrico por parte destes motores foi responsável pela emissão de 6,040 Mt CO<sub>2</sub> em 2011 e a organização *IEA* reporta também que, sem medidas efetivas de eficiência energética, pelo ano de 2030 o consumo por parte dos motores elétricos atingirá os 13,360 TWh resultando num total de 8,750 Mt de emissão de CO<sub>2</sub> [4]. Dito isto, as medidas de eficiência energética em motores elétricos são um forte aliado para a diminuição da pegada humana ambiental.

Atualmente existem normas internacionais que incluem a eficiência de motores elétricos, onde se destacam as seguintes: *IEC (International Electrotechnical Commission)*, *NEMA (National Electrical Manufacturers Association, América do Norte)*, *ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas)* e *AS/NZS (Australia and New Zealand Standards)* [5]. A *IEC* definiu classes de rendimento para motores elétricos através do código *IE* que estão caracterizadas a partir da norma *IEC 60034-30-1:2014* [6] e podem ser resumidas pela seguinte forma: *IE1 Standard Efficiency*, *IE2 High Efficiency*, *IE3 Premium Efficiency* e *IE4 Super Premium Efficiency* [7].

## 1.3. Objetivos

A partir da contextualização realizada foram definidos os principais objetivos deste trabalho que passam a ser descritos:

- Estudo da influência de cunhas magnéticas no funcionamento e desempenho de um motor de indução;
- Estabelecimento de um método de análise sistemático para motores de indução, com recurso ao *ANSYS Maxwell*, tendo em conta a influência de cunhas magnéticas ou não magnéticas no seu funcionamento e desempenho;
- Aplicação do método de análise a exemplos práticos de motores WEG com diferentes características mecânicas e elétricas. Análise essa que poderá levar à alteração do tipo

de cunhas de um motor (para cunhas não magnéticas) que se irá traduzir numa diminuição do custo de fabrico deste;

- Estudo da relação da excentricidade de um motor de indução com a força eletromotriz (f.e.m.) induzida no veio e utilização de cunhas magnéticas ou não magnéticas nas ranhuras do estator;
- Construção de um método de análise de f.e.m. induzida no veio em função da excentricidade e aplicação de cunhas magnéticas ou não magnéticas;
- Desenvolvimento de uma possível solução para um motor WEG por forma a diminuir o valor da f.e.m. induzida no veio.

## 1.4. Estrutura

No presente capítulo, **Capítulo 1**, é feita uma introdução dos temas que se irão desenvolver ao longo da dissertação, começando por uma contextualização do ambiente industrial onde a dissertação foi desenvolvida (programa de intercâmbio MOBILE) e de motores elétricos no geral. Além disso, definem-se todos os objetivos e estrutura do trabalho.

No **Capítulo 2** descrevem-se alguns pontos importantes para compreensão do trabalho (motor de indução, cunhas magnéticas, excentricidade, f.e.m. induzida no veio e software ANSYS Maxwell). Seguido de uma caracterização de todos os motores, objetos de estudo neste trabalho quanto ao tipo, características elétricas, dimensões e materiais

O **Capítulo 3** contém o detalhamento da modelização dos motores no software *ANSYS Maxwell*. Todas as limitações do software e considerações que foram feitas na construção dos motores são referidas, bem como todos os parâmetros importantes para um modelo fiável em relação ao desempenho real de cada motor.

O **Capítulo 4** contém a descrição da metodologia adotada no desenvolvimento dos métodos de análise relativos às cunhas magnéticas e f.e.m induzida no veio. Além disso, também se aprofundam alguns conceitos importantes como perdas, rendimento e fator de potência.

Relativamente ao **Capítulo 5**, este contém a validação dos modelos dos motores e todos os resultados obtidos nas simulações por meio de tabelas, ilustrações e formas de onda.

Considera-se que o **Capítulo 6** é muito importante na medida em que organiza todos os resultados obtidos no capítulo anterior por meio de gráficos de simples leitura e compreensão.

No **Capítulo 7** são analisados os dois exemplos práticos da atividade experimental. O primeiro, relativo ao motor W22X 500 2np e utilização de cunhas magnéticas e o segundo, sobre o motor W22X 355 4np e a f.e.m. induzida no veio.

Por fim, no **Capítulo 8** são apresentadas as principais conclusões, discutindo também que desenvolvimentos se poderão fazer no futuro, relativos a este tema.

# Capítulo 2

## Fundamentos teóricos e motores avaliados

Neste capítulo são descritos alguns dos tópicos principais que servem de base deste estudo, com todos os fundamentos teóricos. Além disso, serão caracterizados os motores que foram avaliados por simulação computacional e aplicação prática. Esta será uma caracterização sucinta sendo que o **Anexo A** contém um maior detalhamento em termos elétricos e mecânicos. No total simularam-se 4 motores da WEG S.A. a partir do *software* de elementos finitos *ANSYS Maxwell*.

### 2.1. Motor de indução

#### 2.1.1. História

Os anos de 1831 e de 1860 são um marco no estudo da eletricidade, anos em que Faraday descobriu a lei da indução eletromagnética e Maxwell formulou as leis do eletromagnetismo (Equações de Maxwell) [8]. Cerca de duas décadas depois, em 1882, Nikola Tesla descobriu um princípio fundamental da física, o campo magnético rotativo [9]. A partir desse princípio e das leis referidas anteriormente, as condições estariam criadas para a invenção da máquina elétrica, mais propriamente, na criação dos primeiros motores de indução.

Sendo assim, no ano de 1883, Nikola Tesla construiu o primeiro motor de indução, ensaiando o seu funcionamento com sucesso. O motor de corrente alternada baseia-se no princípio de campo magnético rotativo. Por volta da mesma altura, 1885, surgiu também o motor de Galileo Ferrari, em muito semelhante com o de Nikola Tesla [8].

A principal diferença entre os motores seria na constituição do rotor em que, no caso de Nikola Tesla, o rotor era um cilindro de material ferromagnético com enrolamento curto-circuitado enquanto que o de Galileo Ferrari era composto por um rotor cilíndrico de cobre. No

entanto, ambos eram alimentados a partir de uma fonte AC bifásica, ou seja, com dois enrolamentos concentrados sobre o núcleo ferromagnético do estator [8]. Os dois motores estão representados nas figuras 2.1 e 2.2 [8].

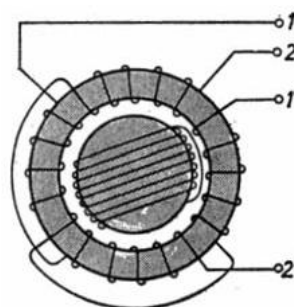
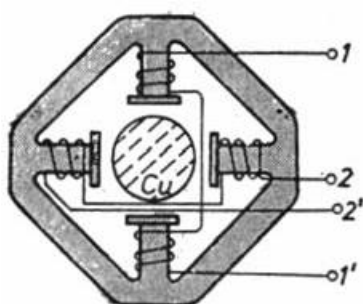


Figura 2.1 - Motor de indução de Galileo Ferrari.      Figura 2.2 - Motor de indução de Nikola Tesla.

Neste trabalho serão estudados motores de indução com rotor em gaiola de esquilo. Este tipo de motor apareceu em 1889 por parte de Dolivo-Dobrovolsky [8].

### 2.1.2. Constituição geral

Um motor de indução é constituído por um estator e um rotor, referentes à parte estática e parte móvel do motor, respetivamente.

O estator é composto por chapas finas de aço magnético (circuito magnético laminado) e possui ranhuras alinhadas axialmente e igualmente espaçadas, na face interna. As chapas magnéticas são obtidas por laminação a quente e recebem um tratamento de superfície para isolamento inter-chapas [10]. Ainda no estator temos o seu enrolamento que é constituído por três circuitos elétricos distintos (um por fase), onde cada circuito elétrico (enrolamento) é composto por bobinas. O estator de um motor de indução pode ser ilustrado pela figura 2.3, adaptada de [11], onde se observam apenas duas bobinas (efeitos de visualização) num par de ranhuras, formando um enrolamento imbricado.

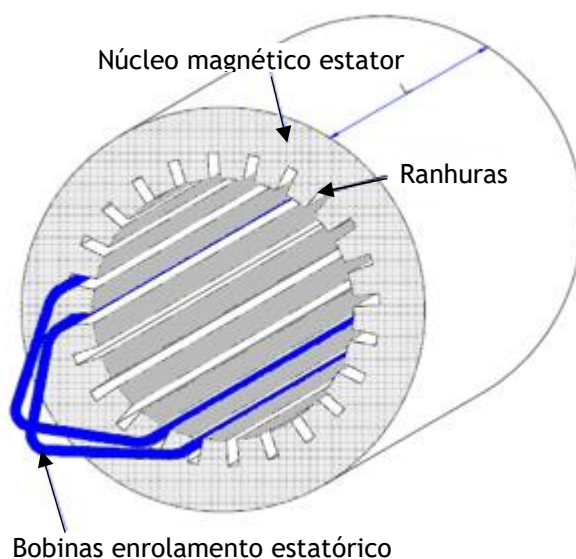


Figura 2.3 - Exemplo esquemático do estator de um motor de indução.



Quanto ao rotor, este também é obtido por empilhamento de chapa magnética e ranhurado axialmente (núcleo ferromagnético). O seu circuito elétrico pode ter origem em diferentes soluções construtivas: rotor bobinado ou rotor em gaiola de esquilo.

O primeiro, rotor bobinado, o enrolamento trifásico tem uma técnica de fabrico semelhante à do estator (bobinagem com o mesmo número de polos). Os terminais das bobinas que formam o enrolamento são ligados a três anéis isolados entre si e independentes do veio [11]. Estes anéis permitem a ligação do enrolamento ao exterior através de três escovas fixas que deslizam sobre eles [10]. de rotor tem o seu esquema exemplificado pela figura 2.4, adaptada de [11].

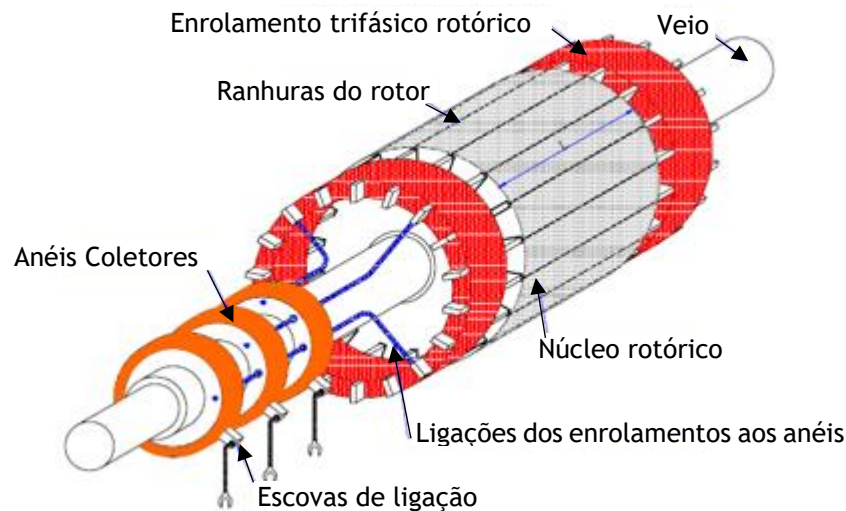


Figura 2.4 - Exemplo esquemático de um rotor bobinado.

No rotor em gaiola de esquilo (em curto-circuito), tem-se também um núcleo ferromagnético com ranhuras à superfície. No entanto, os enrolamentos são em barras condutoras que podem ser em cobre ou alumínio (injetado). Estas barras estão ligadas eletricamente por anéis de curto-circuito, do mesmo material das barras, em cada extremidade do rotor [10].

Contrariamente ao rotor bobinado, o rotor em gaiola não permite o acesso ao enrolamento rotórico. Melhor dizendo, os parâmetros elétricos do motor serão definidos pela própria execução e fabrico [11]. No caso do rotor bobinado este permite a posterior alteração dos parâmetros por inserção de elementos externos (resistências).

O rotor em gaiola tem um possível esquema ilustrado na figura 2.5, adaptada de [11].

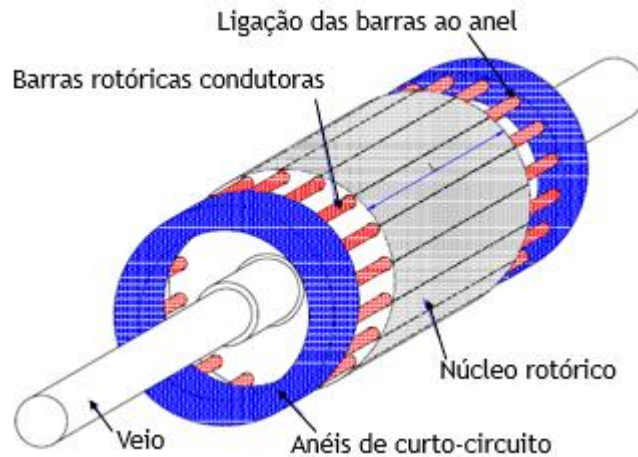


Figura 2.5 - Exemplo esquemático de um rotor em gaiola de esquilo.

Além do estator e do rotor tem-se ainda uma série de elementos importantes na constituição de um motor de indução: a carcaça (envolve o estator e serve de proteção), o veio (elemento transmissor de energia mecânica), sistema de ventilação (promove a libertação de calor para o exterior) e ainda caixa de terminais, chapa de características, patas/flange (fixação do motor), entre outros.

Em forma de exemplo, segue o modelo da figura 2.6 com o corte de um motor da linha W22, WEG (Fonte: WEG).

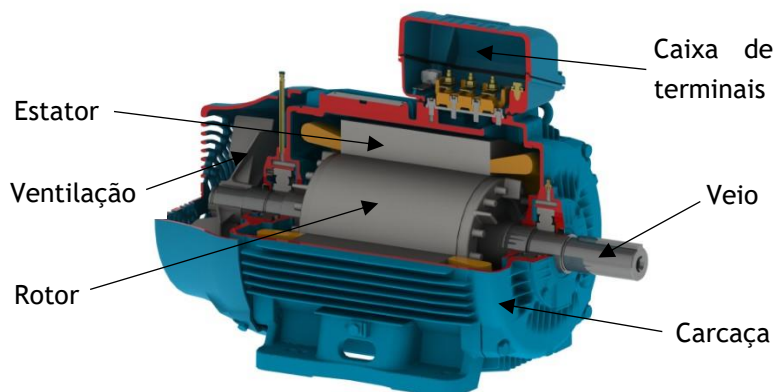


Figura 2.6 - Motor da linha W22 WEG.

### 2.1.3. Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento de uma máquina elétrica como motor de indução trifásico pode ser descrito através dos seguintes passos [10]:

1. O enrolamento do estator é alimentado por um sistema trifásico simétrico de tensões que fará com que circule nos três conjuntos de enrolamentos um sistema, igualmente, trifásico e simétrico de correntes. A circulação de correntes cria um campo magnético girante que roda a uma velocidade, denominada de velocidade de sincronismo ( $n_s$ ), dada pela expressão (2.1).

$$n_s = \frac{f}{p} 60 \quad (2.1)$$

Em que:

$f$  - Frequência da fonte de alimentação (Hz);

$p$  - Número de pares de polos.

2. O campo mencionado atua sobre o enrolamento do rotor induzindo nele uma força eletromotriz (f.e.m.) por barra condutora, originando a circulação de uma corrente.
3. Pela lei de Lenz, o rotor tenderá a rodar, em torno do veio (eixo de rotação), à mesma velocidade do campo girante estatórico.
4. No entanto, a velocidade de rotação do rotor ( $n$ , em rpm) estará sempre abaixo da velocidade de sincronismo. Isto acontece pelo facto de existirem perdas no rotor e um binário resistente relativo à carga mecânica na ponta do veio. Esta diferença de velocidade traduz-se num termo denominado de deslizamento ( $s$ ), ou seja, o rotor desloca-se com um certo deslizamento em relação ao campo girante estatórico [10]. Esta grandeza pode ser calculada pela expressão (2.2).

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2.2)$$

5. Para  $n = n_s$ , os condutores do rotor rodam à mesma velocidade que o campo magnético estatórico e não existirá indução de f.e.m., ou seja, nestas condições o binário produzido pelo motor é nulo.
6. Para  $n \neq n_s$ , as correntes rotóricas irão criar também um campo magnético girante rotórico. Essas correntes têm uma frequência ( $f_r$ ) que depende do deslizamento e pode ser dada pela expressão (2.3).

$$f_r = sf \quad (2.3)$$

7. O binário produzido depende das forças magnetomotrizes (f.m.m.) do estator ( $F_s$ ) e do rotor ( $F_r$ ) e do ângulo que formam entre si, denominado de ângulo binário ( $\lambda$ ), e pode ser descrito pela seguinte expressão (2.4).

$$T = kF_s F_r \sin \lambda \quad (2.4)$$

8. A composição dos campos girantes estatórico ( $B_s$ ) e rotórico ( $B_r$ ) originam um campo magnético resultante girante ( $B_R$ ) que roda à velocidade de sincronismo. É este o campo que persiste e é responsável pela indução da f.e.m. estatórica e rotórica. O campo resultante está representado pela figura 2.7 [10].

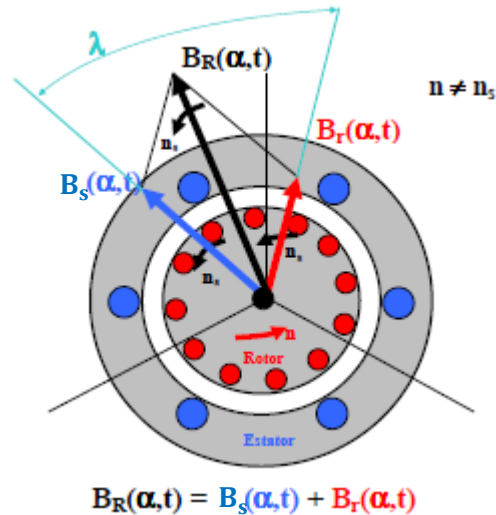


Figura 2.7 - Representação do campo magnético girante resultante.

## 2.2. Cunhas magnéticas nas ranhuras do estator

Normalmente, em motores de indução de média e alta tensão, as bobinas utilizadas nas ranhuras do estator são pré-fabricadas (condutores e isolamento). Nestes casos, por razões tecnológicas e facilitação do processo de inserção de bobinas, as ranhuras são dimensionadas com forma retangular. No entanto, devido à grande abertura das ranhuras, irá ocorrer um fenómeno indesejável conhecido como **efeito de ranhura**. O efeito de ranhura pode descrever-se como oscilação do valor da permeabilidade magnética na zona do entreferro, consequência da sucessão de dentes e ranhuras estatóricas e rotóricas [12].

A oscilação da permeabilidade magnética na zona do entreferro traduz-se na distorção do fluxo magnético no entreferro, contendo harmónicos de alta frequência. O binário produzido será sujeito a esses harmónicos, apresentando oscilações também de alta frequência. De um modo geral, as principais consequências da falta de uniformidade do fluxo magnético no entreferro serão: binários pulsatórios, diminuição do fator de potência, diminuição do rendimento do motor associado ao aumento das perdas (perdas adicionais principalmente) e aumento das vibrações e ruído [12] [15].

Para evitar tais efeitos negativos no desempenho do motor de indução, procede-se ao fechamento das ranhuras através de cunhas de material magnético. Além disso, em termos mecânicos, a cunha tem o objetivo de suportar o enrolamento estatórico contra forças eletrodinâmicas, principalmente durante o arranque [14]. Por essa razão, além das propriedades eletromagnéticas, estas devem ser mecanicamente robustas. A diferença entre a utilização de cunhas magnéticas ou não magnéticas pode provar-se bastante notória como será analisado numa fase posterior do trabalho.

### 2.2.1. Coeficiente de Carter

O coeficiente de Carter estabelece uma relação entre a abertura da ranhura e a espessura do entreferro. De acordo com expressões matemáticas referenciadas em [13], o coeficiente de Carter ( $k_\delta$ ) pode ser calculado pela seguinte expressão (2.5):

$$k_{\delta} = \frac{B_m}{B_{\delta}} = \frac{t}{\left[ t - b_m + \sqrt{h\delta\mu_r th \left( \frac{b_m}{2h\delta\mu_r} \right)} \right]} \quad (2.5)$$

Em que:

$B_m$  e  $B_{\delta}$  - Densidade de fluxo magnético máxima e média no entreferro (T), respetivamente;

$t$  - Passo da bobinagem (*Coil pitch*);

$b_m$  e  $h$  - comprimento e largura de uma cunha (m);

$\delta$  - espessura do entreferro (m);

$\mu_r$  - permeabilidade magnética relativa no topo das ranhuras.

Apenas pela análise da expressão (1.5) pode-se constatar que o coeficiente de Carter é tanto menor quanto maior a  $\mu_r$ , ou seja, o  $k_{\delta}$  do motor com cunhas magnéticas ( $\mu_r > 1$ ) é menor relativamente ao  $k_{\delta}$  com cunhas não magnéticas ( $\mu_r = \mu_o = 1$ , permeabilidade magnética do vácuo).

A principal ilação que se pode retirar é que com a utilização de cunhas magnéticas o motor pode ser dimensionado com uma espessura de entreferro menor [13].

### 2.2.2. Reatância de fugas e impedância total no arranque

Através do referenciado em [13] e [16], pode-se obter uma expressão (2.6) que expressa a impedância total de arranque do motor ( $Z_{st}$ ):

$$Z_{st} = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + X_{st}^2} = \sqrt{R_{st}^2 + X_{st}^2} \quad (2.6)$$

Em que:

$R_{st}$  e  $X_{st}$  - Resistência e reatância total de fugas no arranque ( $\Omega$ ).

$R_1$  e  $R_2$  - Resistências estáticas e rotóricas totais ( $\Omega$ ), ambas referidas ao estator.

### 2.2.3. Influência nas características do motor

Em primeiro lugar, de acordo com [13] e [16], sabemos que o binário máximo ( $T_M$ ) e o binário de arranque ( $T_{st}$ ) de um motor de indução podem ser calculados, de uma forma aproximada, pelas expressões (2.7) e (2.8):

$$T_M = 3 \frac{p}{2\pi f} \frac{U_{1s}^2}{2 \left( R_1 + \sqrt{R_1^2 + X^2} \right)} \quad (2.7)$$

$$T_{st} = 3 \frac{p}{2\pi f} R_2 \frac{U_{1s}^2}{Z_{st}^2} \quad (2.8)$$

Em que:

$U_{1s}$  - Tensão de fase (V).

$p$  - Número de pares de polos.

$f$  - Frequência da alimentação (Hz).

A partir das expressões (2.7) e (2.8) pode-se constatar uma relação inversamente proporcional entre  $T_M$  e  $T_{st}$  com o valor de  $Z_{st}$ . Melhor dizendo, a utilização de cunhas magnéticas nas ranhuras do estator provocará o aumento da reatância de fugas  $X_{st}$  e a conseqüente diminuição do binário máximo e binário de arranque.

Por outro lado, a corrente em vazio ( $I_0$ ) e a corrente de arranque ( $I_{st}$ ) do motor serão menores quando utilizadas cunhas magnéticas. Esta afirmação é sustentada pelas expressões (2.9) e (2.10). A diminuição destas correntes será vantajosa em termos de elevação de temperatura do motor [13].

$$I_{st} \propto \frac{1}{Z_{st}} \quad (2.9)$$

$$I_0 \propto k_\delta \quad (2.10)$$

#### 2.2.4. Tipologias convencionas

As cunhas magnéticas inseridas nas ranhuras do estator podem ter diversas geometrias, no entanto, existem dois tipos convencionais: cunha trapezoidal e cunha de dupla aresta, representadas nas figuras 2.8 e 2.9, respectivamente [17].



Figura 2.8 - Cunha com geometria trapezoidal.



Figura 2.9 - Cunha de dupla aresta.

As duas tipologias mencionadas possuem vantagens e desvantagens que passam a ser descritas [17]:

- **Cunha trapezoidal** - Tipo de cunha mais comum em motores elétricos devido à sua simples maquinagem, tempo de fabrico e rápida inserção da cunha na ranhura do estator.
- **Cunha de dupla aresta** - Maquinagem mais complexa em comparação com a cunha trapezoidal, no entanto, mais vantajosa em termos mecânicos e de robustez. Por vezes a cunha trapezoidal pode enfraquecer os dentes do estator, dependendo da estrutura dos mesmos.

Com o avanço tecnológico dos processos de fabrico, as cunhas magnéticas começaram a surgir com novas geometrias e/ou melhorias sobre as tipologias convencionais. Uma dessas melhorias foi a eliminação de arestas afiadas, tornando-as arredondadas ou planas. Ao fazê-lo as cunhas magnéticas terão melhores propriedades eletromagnéticas. Sendo assim, a eliminação dessas arestas é ilustrada pelas figuras 2.10 e 2.11 [17].



Figura 2.10 - Cunha trapezoidal com aresta arredondada.

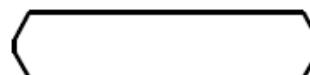


Figura 2.11 - Cunha de dupla aresta com arestas planas.

## 2.3. Software ANSYS Maxwell e método elementos finitos

O *ANSYS Maxwell* é líder na indústria de projeto e análise de motores elétricos, transformadores, sensores e outros dispositivos eletromagnéticos e eletromecânicos. É um software que possibilita a simulação de campos eletromagnéticos com alta precisão. Além disso, permite caracterizar o movimento não linear e transitório de componentes eletromecânicos e os seus efeitos nos circuito de acionamento e sistema de controle [18].

Para isso, o software faz uso do Método de Elementos Finitos (*Finite Element Method - FEM*) para resolução de problemas e determinação da distribuição de campos eletromagnéticos. O *FEM* tem uma sólida fundamentação teórica, tendo como base teoremas matemáticos que garantem a precisão do cálculo dos campos em direção à solução exata [19].

Através deste método é possível resolver equações diferenciais parciais que poderão ter diferentes graus de precisão. A precisão do resultado depende maioritariamente da definição das propriedades dos materiais, do passo de iteração e das malhas de cálculo. O tempo de simulação irá ser função dos recursos computacionais disponíveis (limitações de memória *RAM* e tempo de execução da simulação impostas pelo *hardware* utilizado) [20].

Por predefinição, o software analisa todos os objetos e divide-os em elementos menores de geometria simplificada que, no caso da simulação 2D, são triângulos. A figura 2.12 mostra os elementos triangulares que são compostos por seis nós. Esses nós são pontos localizados nas arestas e vértices dos elementos nos quais os cálculos serão executados pelo software [20].



Figura 2.12 - Elemento básico da malha de cálculo em 2D.

Embora o *software* de simulação realize um ajuste automático dos elementos da malha é necessário introduzir manualmente alguns parâmetros relativos à densidade da malha nos pontos de maior interesse. Essas considerações estão na secção 3.1.3, das malhas de cálculo.

O *ANSYS Maxwell* possui uma interface para construção de objetos a duas dimensões (2D) ou a três dimensões (3D). Neste caso, os modelos dos motores serão em 2D devido à sua simplicidade (construção modelo, tempo de simulação, etc.) em relação à simulação 3D e pelo facto de apresentarem resultados com elevado nível de confiança.

Existem seis modos de análise possíveis em 2D (*solver type*): Eletrostática (*Electrostatic*), Magnetostática (*Magnetostatic*), Corrente de Foucault (*Eddy Current*), Condução DC (*DC Conduction*), Condução AC (*AC Conduction*) e Transitória (*Transient*).

Neste caso, procede-se a uma Análise Transitória Magnética Não Linear (*Transient*), permitindo observar o comportamento do motor desde o seu transitório de arranque até ao regime permanente, tendo em conta o seu movimento de rotação, cilíndrico ou não.

### 2.3.1. Análise transitória magnética não linear (*Transient*)

Este tipo de simulação baseia-se numa análise magnética com variação no tempo em que os vetores na análise a 2D apenas têm uma componente na direção Z. A equação magnética dependente do tempo pode descrita pela expressão (2.11) [19].

$$\nabla v \nabla A = J_s - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla V + \nabla H_c + \sigma v \nabla A \quad (2.11)$$

Em que:

$v$  - Relutividade magnética (m/H).

$A$  - Vetor potencial magnético (Wb/m).

$J_s$  - Densidade de corrente elétrica (A/m<sup>2</sup>).

$t$  - Tempo (s).

$\sigma$  - Condutividade elétrica (S/m).

$V$  - Potencial elétrico (V).

$H_c$  - Coercividade magnética (Oe).

$v$  - Velocidade das partes em movimento (m/s).

O *solver* transitório do software considera que na equação do vetor potencial magnético a velocidade é zero, das partes estacionárias e das partes em movimento, relativamente a cada um dos seus referenciais. Como se considera cada componente em relação ao seu próprio sistema de coordenadas, a derivada parcial do tempo do vetor potencial transforma-se numa derivada total. Por essa razão, a expressão (2.11) passa a escrever-se da forma (2.12), onde o movimento está implícito da derivada total do vetor potencial magnético [19].

$$\nabla v \nabla A = J_s - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla V + \nabla H_c \quad (2.12)$$

## 2.4. Excentricidade

Nos processos de fabricação e de montagem de motores elétricos podem existir variações que originam excentricidades. Esta é uma temática crucial no contexto do trabalho na medida em que permite realizar uma simulação em software mais aproximada da prática. Além disso, excentricidades num motor de indução provocarão assimetrias magnéticas com a consequência de aparecimento de forças eletromotrizes induzidas no veio do motor.



Como referido anteriormente, variações intrínsecas a processos de fabrico de motores de indução podem levar ao aparecimento de assimetrias elétricas ou mecânicas. Estas podem ser de vários tipos/origens, que são descritos seguidamente de uma forma sucinta [22]:

- **Alimentação** - Harmónicos presentes na rede de alimentação;
- **Estator** - Desequilíbrios na posição das bobinas nas ranhuras do estator (assimetrias do enrolamento em relação ao centro geométrico). Combinação entre ranhuras do estator e rotor [21].
- **Excentricidade do Rotor** - Excentricidade estática, dinâmica ou mista em relação ao centro geométrico (rotor desequilibrado). No rotor podem existir ainda problemas na injeção da gaiola e nas próprias barras do rotor [23].
- **Veio** - Deflexão axial do veio (flecha) que pode ser entendida como um tipo de excentricidade.
- **Maquinagem** - Procedimento que tem o objetivo de dar forma a uma matéria prima através de ferramentas ou máquinas. Poderão existir irregularidades nestes processos que criarão deformações ao longo do entreferro (entreferro não uniforme), nas chapas do estator, do rotor, nas tampas e carcaças.

É importante salientar que as irregularidades de fabrico referidas existem independentemente da precisão ferramental ou do processo, no entanto, são mantidas sob controlo por forma a que as especificações sejam cumpridas, não deixando de ter uma influência preponderante no funcionamento do motor.

#### 2.4.1. Tipos de excentricidade

No trabalho desenvolvido optou-se por representar apenas a **excentricidade do rotor** a partir do software de elementos finitos. Isso justifica-se pelo facto de ser o método mais simples e direto em termos de simulação.

De um modo geral, deve distinguir-se a excentricidade do rotor em dois tipos principais: estática e dinâmica, que estão representadas na figura 2.13 [22]. Na prática, o mais comum é existir uma combinação dos dois tipos, denominada de excentricidade mista.

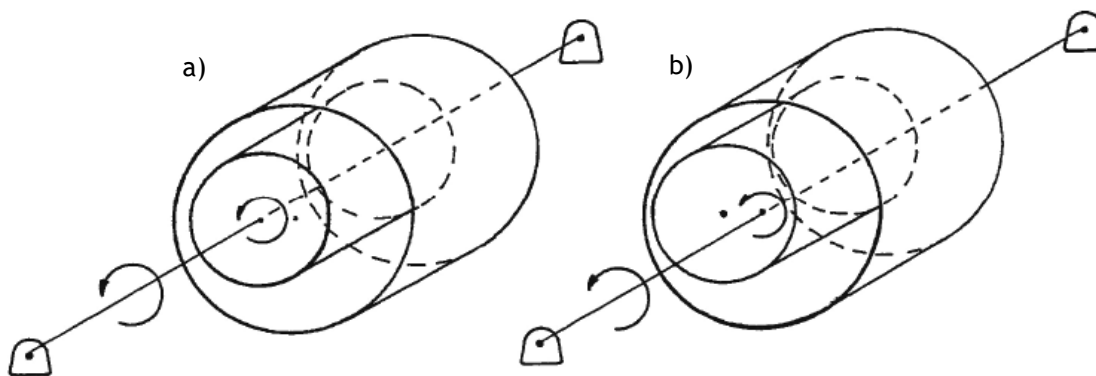


Figura 2.13 - a) Excentricidade estática b) Excentricidade dinâmica.

No caso de excentricidade estática existe um deslocamento do rotor e do centro de rotação em simultâneo (eixo de rotação coincide com eixo do rotor). Por outro lado, na excentricidade dinâmica, existe um deslocamento do rotor mas o centro de rotação coincide com centro geométrico do estator.

## 2.5. Ruído magnético

O ruído sonoro de origem magnética em máquinas elétricas é gerado através da interação das ondas de indução (fundamental e harmónicas) presentes no entreferro [22]. A variação destas ondas no espaço e no tempo deve-se às diferenças da permeabilidade magnética no entreferro com origem na sucessão de dentes e ranhuras do estator (efeito de ranhura) e excentricidades.

### 2.5.1. Força de atração magnética desequilibrada

A excentricidade do rotor e a falta de uniformidade da indução magnética no entreferro originam o aparecimento de forças distribuídas ao longo do perímetro interno do estator cuja resultante é diferente de zero, chamada de força de atração magnética desequilibrada, termo conhecido do Inglês como *UMP (unbalanced magnetic pull)* [22]. Esta força resultante está direcionada para a posição de mínimo entreferro e está diretamente relacionada com o nível de excentricidade [22].

Este conceito considera-se importante no trabalho desenvolvido na medida em que se relaciona diretamente com os modos de vibração, seguidamente descritos, e com o ruído magnético.

### 2.5.2. Modos de vibração

A forças magnéticas referidas no ponto anterior podem ser descritas como ondas de forças radiais que irão provocar deformações no pacote de chapas do estator. Um forma de quantificar a amplitude das deformações seria através dos modos de vibração, representados pela letra  $r$ . A figura 2.14 mostra como podem ser ilustrados os modos de vibração, de baixa ordem [22].

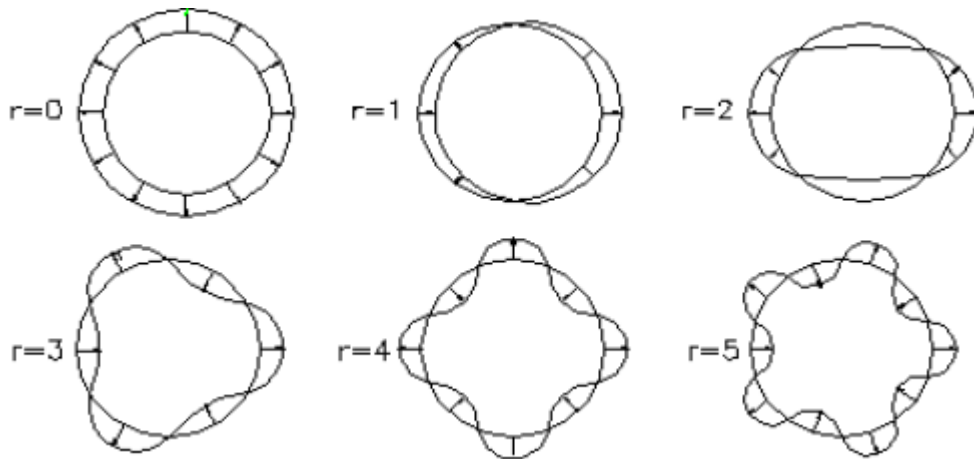


Figura 2.14 - Ilustração dos modos de vibração de baixa ordem.

## 2.6. Forças eletromotrizes induzidas no veio

Num motor de indução com rotor em gaiola de esquilo em que o material do veio é magnético e apresenta um certo valor de condutividade elétrica, fará com que o seu comportamento se assemelhe ao de um condutor sólido. Sendo assim, quando sujeito a assimetrias magnéticas, com origem em tolerâncias mecânicas de fabricação, poderá existir uma majoração das forças eletromotrizes (f.e.m.) induzidas no veio. Além disso, o aparecimento de uma f.e.m induzida no veio é comum à utilização de inversores de frequência, denominados de VFDs (Variable-frequency drive). Estes são destinados ao controlo e variação de velocidade de motores elétricos de indução trifásicos [24].

As referidas assimetrias magnéticas podem ser descritas como variações da densidade de fluxo magnético, que conjugadas com o movimento do rotor e as suas características mecânicas e elétricas, podem originar uma força eletromotriz induzida no veio.

Este fenómeno é descrito pela lei da indução eletromagnética (Lei de Faraday), que define o módulo da força eletromotriz induzida num circuito como sendo igual à razão entre a variação do fluxo magnético, pelo intervalo de tempo em que essa variação ocorre. Eventualmente, a Lei de Lenz afirma que esta força eletromotriz induzida se opõe à variação do fluxo, podendo ser representada pela seguinte expressão (2.13):

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2.13)$$

Em que:

$\varepsilon$  - Força eletromotriz induzida (V);  
 $\Delta\Phi$  - Variação do fluxo magnético;  
 $\Delta t$  - intervalo de tempo (s).

## 2.7. Circulação de corrente no veio

A circulação de corrente no veio, com origem em assimetrias magnéticas, pode surgir de dois fenómenos principais. Procede-se então à sua descrição com base no descrito no Guia Técnico referenciado em [21].

- **Ring Flux Linking Shaft** - Distribuição assimétrica do fluxo magnético à volta do veio, capaz de induzir nele correntes longitudinais que se fecham por um trajeto capacitivo;
- **Homopolar Fluxes Between Stator, Rotor and Shaft** - Componentes homopolares do fluxo referido anteriormente responsáveis por correntes que se sobrepõem às restantes.

### 2.7.1. Ring flux linking shaft

A variação de fluxo magnético no veio é uma das principais causas de correntes que circulam o veio e os rolamentos do motor. Este fluxo tem direção perpendicular à do eixo e ocorre no núcleo do estator e do rotor.

Normalmente, este fluxo divide-se simetricamente no sentido horário e anti-horário. No entanto, se a relutância não for uniforme em todas as direções, o fluxo será assimétrico, como ilustrado na figura 2.15 (adaptada de [21]).

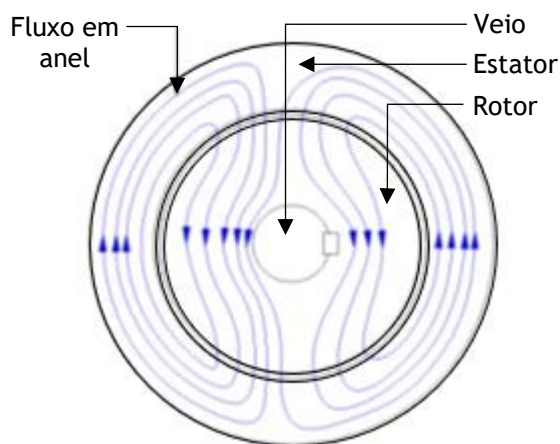


Figura 2.15 - Vista transversal de um motor de indução e representação da distribuição assimétrica do fluxo útil em torno do veio.

A variação do fluxo magnético representada na figura 2.15 estabelece uma f.e.m induzida entre das duas extremidades do veio, explicado pela expressão (3.1). Se a diferença de potencial for grande o suficiente para criar a rutura elétrica do lubrificante do rolamento (material dielétrico), ocorrerá um arco de tensão.

De um modo geral, a distribuição assimétrica do fluxo em torno do veio, na presença da rotação deste, induz f.e.m.s que fazem circular correntes no sentido longitudinal do mesmo. O trajeto de circulação de tais correntes é, por natureza, capacitivo e pode ser demonstrado através da figura 2.16 [21].

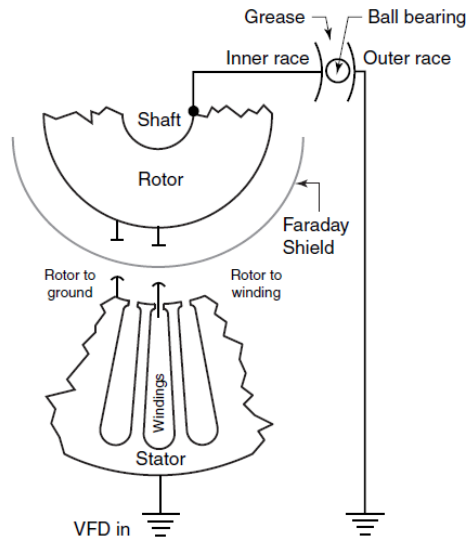


Figura 2.16 - Efeito capacitivo entre estator, enrolamentos e rotor (através do entreferro).

Este efeito capacitivo fará com que apareça circulação de corrente no veio, pelo rolamento, através da carcaça do motor, fechando o circuito novamente pelo veio. Este circuito onde haverá uma circulação de corrente está representado na figura 2.17 (adaptada de [21]).

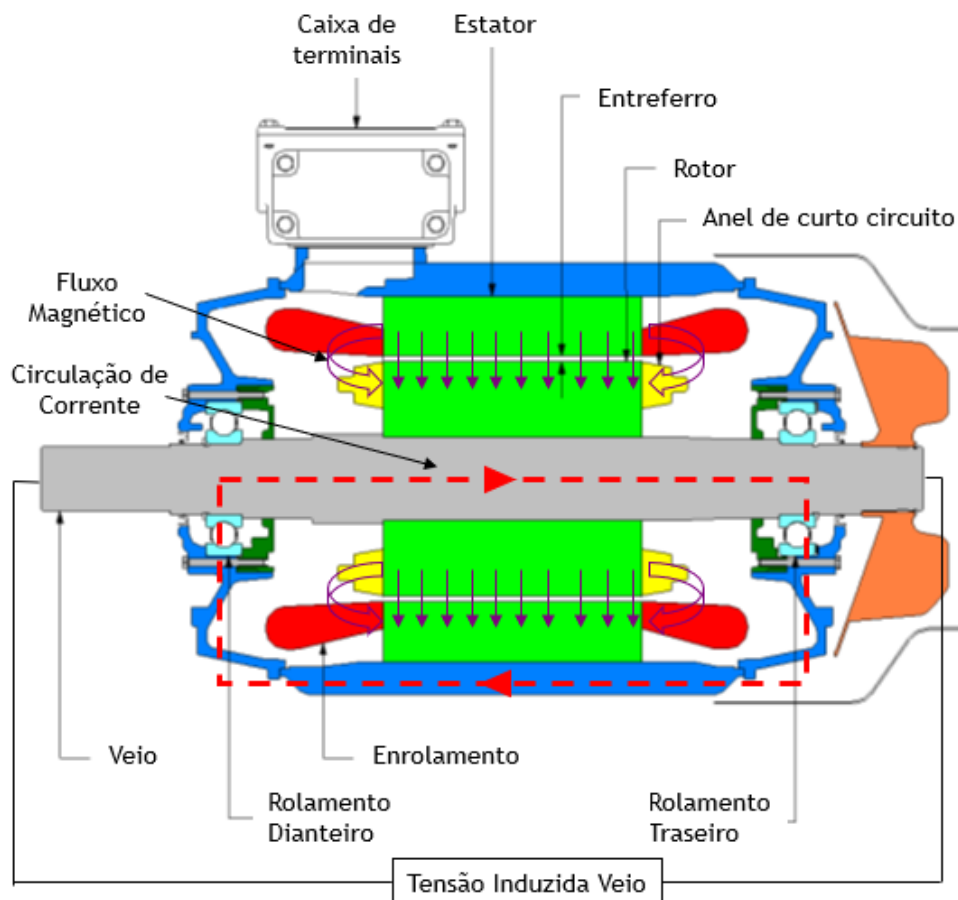


Figura 2.17 - Vista longitudinal de um motor de indução com representação da tensão induzida e circulação de corrente.

### 2.7.2. Fluxo homopolar

O fluxo homopolar é significativo para máquinas de maior porte, a partir de carcaça 400 (altura em mm do chão até meio do diâmetro do veio). Este tipo de fluxo resulta da excentricidade do rotor e consequente variação da relutância magnética. Como demonstrado na figura 2.18 (adaptada de [21]), as correntes que circulam localmente no rolamento combinam com a corrente no veio, provocando o seu aumento.

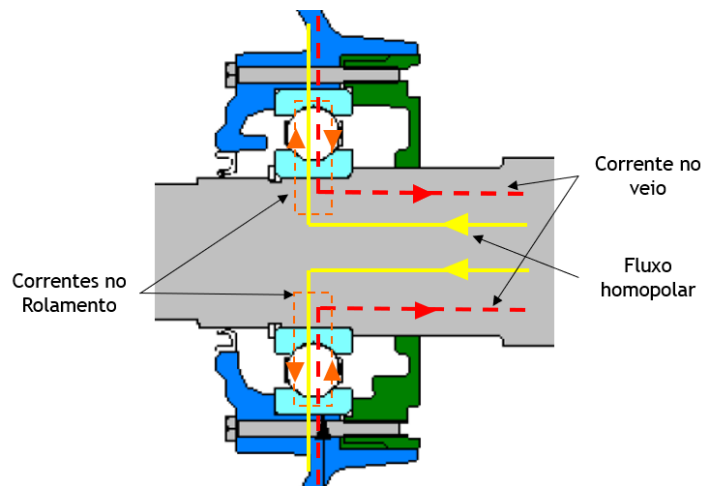


Figura 2.18 - Ilustração da corrente no veio como consequência do fluxo homopolar.

### 2.7.3. Soluções de controlo ou eliminação

A problemática das tensões induzidas no veio e consequente circulação de correntes num motor de indução, tem sido alvo de inúmeros estudos, remontando a 1992, como referido em [25]. Sendo assim, existem no presente várias soluções para este problema. Soluções essas que passam a ser caracterizadas sucintamente, com base no exposto em [21] e [23]:

- **Isolamento de Rolamentos** - Isolamento com o objetivo de interromper o caminho de circulação de corrente no veio. Realizado na parte interna do rolamento e pode ser em resina epoxi, cerâmica ou em óxido de alumínio.
- **Gaiola de Faraday** - Solução para eliminação do efeito capacitivo em que se instala uma gaiola de faraday no estator (figura 1.17). Ligação à terra do enrolamento do estator através de uma folha de cobre.
- **Escovas de ligação do veio à terra** - Escovas de baixa impedância (circuito em paralelo de ligação à terra) evitando que a corrente circule pelos rolamentos, carcaça e veio.
- **Aplicações com inversor de frequência (VFD)** - Utilização de um cabo que estabelece uma terra comum entre o motor e o drive, reduzindo assim efeitos de alta frequência.

Na prática, soluções para correntes indesejáveis no veio e consequente degradação dos rolamentos têm um custo extra associado. Dado que o cliente poderá recusar esse acréscimo, fica necessário encontrar alternativas, como por exemplo, atuar diretamente no processo construtivo do motor.

## 2.8. Combinação de ranhuras do estator e rotor

A alteração da combinação de ranhuras do estator e do rotor aparece no **Capítulo 7**, da aplicação prática, como uma alternativa construtiva do motor W22X 355 4np com o objetivo de anular ou reduzir a f.e.m. induzida no veio.

A combinação de ranhuras de estator e do rotor é o fator mais relevante na fase de projeto para que o motor tenha baixo ruído magnético.

Do exposto na secção 2.5, para obter um ruído acústico de origem magnética com a menor intensidade possível é necessário evitar os modos de vibração de baixa ordem (0, 2, 4, 5 e 6). De longe, o mais importante é o modo 2 seguido dos modos 3 e 4. Para isso, é fundamental que as seguintes regras sejam cumpridas [22] [26]:

$$|N1 - N2| \neq r \quad (2.14)$$

$$|N1 - N2| \neq (2p + r) \quad (2.15)$$

$$|N1 - N2| \neq (2p - r) \quad (2.16)$$

Em que:

$N1$  - Número de ranhuras do estator;

$N2$  - Número de ranhuras do rotor;

$p$  - Número de pares de polos;

$r$  - Modo de vibração.

## 2.9. Motores avaliados

Procurou-se estudar motores elétricos com diferentes características tendo alguns fatores em foco: carcaça, potência, tensão, número de polos e comprimento do entreferro (determinantes na relação com cunhas magnéticas e tensões induzidas no veio). De um modo geral, são quatro motores de indução trifásicos de alta tensão, todos eles com rotor em gaiola de esquilo. Além disso, todos pertencem à linha W22 e são especialmente fabricados para funcionamento em atmosferas explosivas (índice X na designação do motor). Exemplificando, atmosferas explosivas podem ser encontradas nos segmentos Petroquímico, Alimentar, Farmacêutico, Têxtil, Papel e Celulose, entre outros [2].

É importante referir que os quatro motores em estudo são de fabrico especial, ou seja, não pertencem a nenhuma linha *standard* da WEG e, em alguns casos, os valores das suas principais características de funcionamento e tipologias construtivas diferem do definido em catálogo para motores com características semelhantes. Especificamente, o motor W22X 500 2np será o foco do estudo relacionado com cunhas magnéticas e o W22X 355 4np o das f.e.m.s. induzidas, como se verá no **Capítulo 7**, da aplicação prática. Ainda assim, os outros motores servirão como termo de comparação e a metodologia de estudo será a mesma. No final será estabelecida uma relação entre todas as temáticas e relacionando todos os motores.

## 2.10. Características elétricas

Em primeiro lugar, caracterizam-se os motores em termos de características elétricas, mais propriamente, dos valores das principais grandezas em regime estipulado, obtidas em ensaio a 100% da carga, por meio da tabela 2.1.

Por forma a diferenciar os motores será utilizada a seguinte designação: *Linha Carcaça Polos*. Exemplificando, o motor W22X 500 2np será um motor da linha W22, para atmosferas explosivas, com uma carcaça 500 (500 é a altura do veio, medida do solo até metade da ponta do veio, em milímetros) e com dois polos.

Tabela 2.1 - Valores para principais grandezas obtidas em regime estipulado a 100% de carga.

Ensaio Regime Estipulado 100% Carga		<u>W22X 500</u> <u>2np</u>	<u>W22X 355</u> <u>4np</u>	<u>W22X 355</u> <u>6np</u>	<u>W22X 450</u> <u>8np</u>
Frequência	$f_N$ (Hz)	50	50	50	50
Tensão	$V_N Y$ (V)	6000	3300	3300	6000
Tensão de Fase	$V_N$ (V)	3464	1905	1905	3464
Velocidade de Rotação	$n_N$ (rpm)	2990	1491	992	746
Binário	$T_N$ (Nm)	3194	1921	3207	5123
Potência Útil	$P_N$ (kW)	1000	300	333	400
Corrente	$I_N$ (A)	110,0	64,9	74,7	49,9
Fator de Potência	$\cos \varphi_N$	0,90	0,84	0,74	0,80
Número de polos	$np$	2	4	6	8
Rendimento	$\eta_N$ (%)	97,8	96,3	96,0	96,4

## 2.11. Materiais e características construtivas

### 2.11.1. Estator, rotor e entreferro

A tabela 2.2 resume algumas características construtivas do estator, rotor e entreferro. Nomeadamente, combinação de ranhuras e comprimento do entreferro.

As restantes dimensões (diâmetros internos e externos, entre outros) encontram-se anexo A.1.



Tabela 2.2 - Número de ranhuras do estator e rotor e comprimento do entreferro.

Estator, Rotor e Entreferro	$\frac{W22X\ 500}{2np}$	$\frac{W22X\ 355}{4np}$	$\frac{W22X\ 355}{6np}$	$\frac{W22X\ 450}{8np}$
Nº de Ranhuras Estator $N1$	60	48	72	72
Nº de Ranhuras Rotor $N2$	48	38	60	88
Comprimento Entreferro (mm)	4,25	1,7	1,2	1,4

O estator e o rotor são em chapa magnética de grãos não orientados. Para uma melhor definição, segue-se a figura 2.19 que representa a curva B-H deste material (valores máximos da indução magnética  $B$  (Tesla), em função da intensidade do campo magnético  $H$  (A/m)).

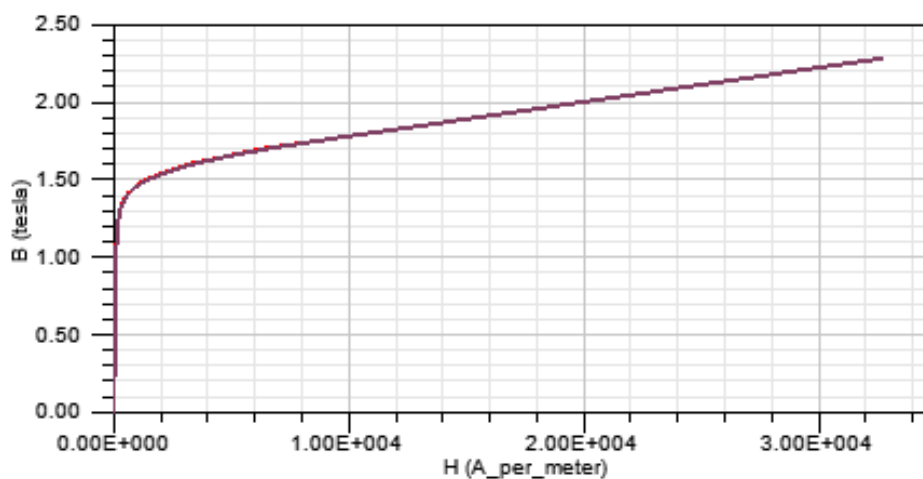


Figura 2.19 - Curva B-H do material da chapa magnética do estator e do rotor.

### 2.11.2. Bobinagem

Os condutores do estator são de cobre com um tipo de isolamento composto por polyester, papel e mica. Estes condutores formam bobinas retangulares pré-fabricadas.

Nos quatro motores temos bobinagem do tipo imbricado e com camada dupla. Quanto ao passo, a constituição e dimensões dos fios, estes estão organizados no anexo A.2.

### 2.11.3. Condutores rotóricos

Os condutores do rotor são barras que podem ser de cobre ou alumínio. No caso de serem de cobre, as ranhuras do rotor serão abertas por forma a facilitar a sua inserção. Por outro lado, se forem em alumínio, as ranhuras serão fechadas e as barras serão obtidas por injeção.

Quanto aos motores em análise, o anexo A.3 resume a composição dos condutores rotóricos.

#### 2.11.4. Anéis de curto-circuito

As barras dos rotor são curto-circuitadas por dois anéis do mesmo material (cobre ou alumínio), em cada extremidade. A figura 2.20 ilustra a geometria generalizada de um anel.

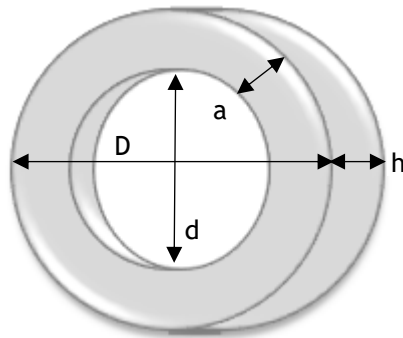


Figura 2.20 - Esquema de um anel generalizado.

As dimensões relativas dos anéis estão contidas no anexo A.3.

#### 2.11.5. Veio

O veio é composto por uma liga de aço magnético denominado de *AISI 4140*, material esse utilizado em todos os motores integrantes do trabalho.

#### 2.11.6. Cunhas magnéticas

As cunhas magnéticas utilizadas, em todos os motores em estudo, são compostas por fibra de vidro, limalha de ferro e resina epóxi modificada. A curva B-H do material utilizado nestas cunhas segue na figura 2.21. A permeabilidade magnética relativa das cunhas magnéticas utilizadas é de aproximadamente,  $\mu_r = 3$ .

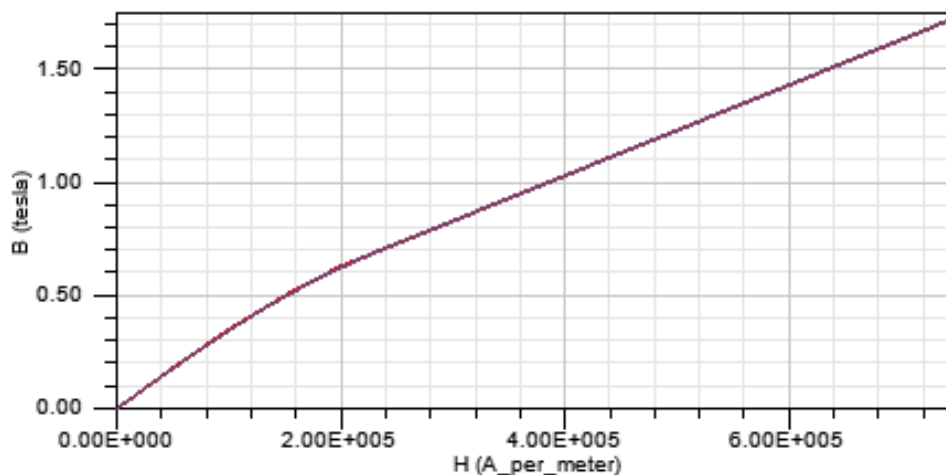


Figura 2.21 - Curva B-H do material que constitui a cunha magnética.

Para cunhas não magnéticas considerou-se que o seu material teria as mesmas propriedades eletromagnéticas do ar. É importante referir que os quatro motores em estudo possuem cunhas magnéticas na sua tipologia original, ou seja, a troca para cunhas não magnéticas surge para efeitos de comparação.

## Capítulo 3

# Modelização no ANSYS Maxwell

Neste capítulo procede-se a uma descrição da modelização dos motores a partir do software *ANSYS Maxwell* tendo em conta todas as simplificações realizadas impostas por este. Há que salientar que apenas se utilizaram alguns motores para auxiliar nesta descrição. Para os restantes motores em estudo, a modelização foi exatamente a mesma. Ainda assim, a informação omitida neste capítulo encontra-se organizada no **Anexo B**.

### 3.1. Modelo do motor

#### 3.1.1. Construção

O *ANSYS Maxwell* oferece muitas ferramentas que facilitam a construção de um motor de indução, no entanto, é necessário ter alguns cuidados na construção de um modelo. Um deles são geometrias demasiado pormenorizadas (ex. curvas de pequena dimensão) que poderão entrar em conflito com as malhas de cálculo definidas. Sendo assim, optou-se por um modelo com linhas simples. Um exemplo disso segue na figura 3.1, relativo ao motor W22X 500 2np.

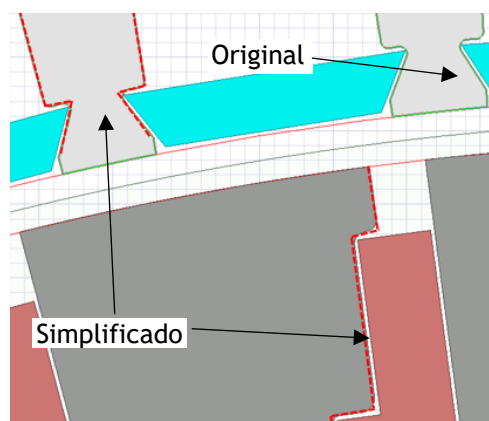


Figura 3.1 - Exemplo das simplificações adotadas na construção do modelo (motor W22X 500 2np).

Dito isto, utilizam-se duas ilustrações, a figura 3.2 e a figura 3.3, para demonstrar a construção de um modelo completo, a duas dimensões, no *ANSYS Maxwell*.

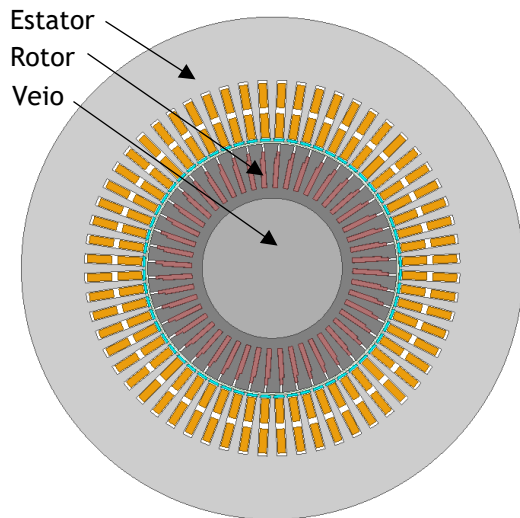


Figura 3.2 - Modelo completo do motor W22X 500 2np no *ANSYS Maxwell*.

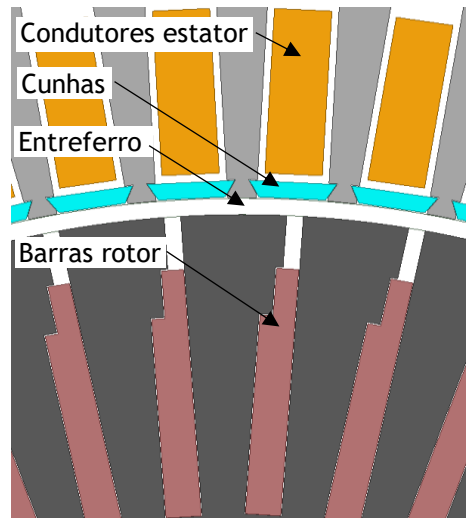


Figura 3.3 - Zoom ao modelo do motor W22X 500 2np.

### 3.1.2. Condições de fronteira (*Boundaries*)

No software é necessário definir condições de fronteira que caracterizam o comportamento dos campos elétricos ou magnéticos nas faces e arestas dos componentes que fazem parte da região do problema.

No caso do motor W22X 500 2np apenas se verificou necessário definir uma fronteira, do vetor potencial magnético, sobre a circunferência que delimita o estator do motor, indicada na figura 3.4, na qual será definido um valor constante e igual a zero para o seu parâmetro.

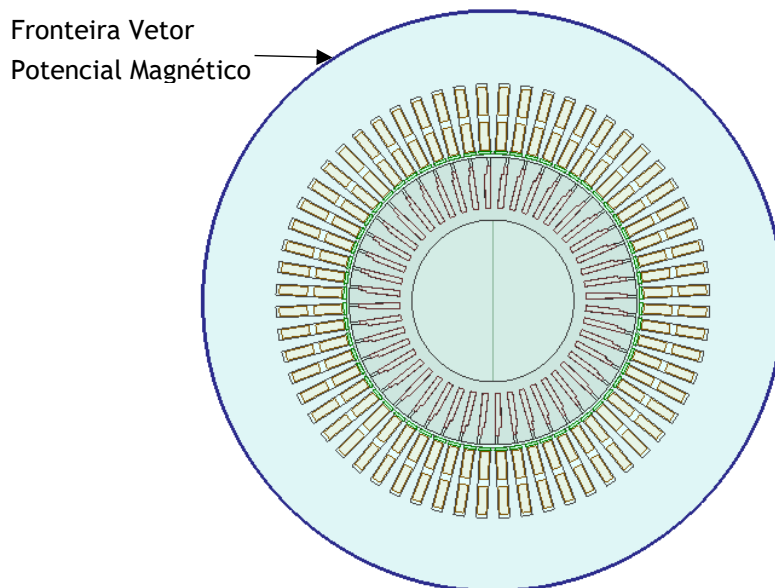


Figura 3.4 - Condição de fronteira, vetor potencial magnético nulo.

O software assume que o vetor potencial magnético  $A$ , dado pela expressão (5.1), apenas contem uma componente no plano Z ( $A_z$ ) e a densidade de fluxo  $B$  fica no plano XY, por essa razão a relação entre o campo magnético e o vetor potencial fica definida pela expressão (3.2). De um modo geral, o campo magnético será tangencial a qualquer fronteira com um valor de  $A_z$  constante.

$$\nabla A = B \quad (3.1)$$

$$B = \frac{\partial A_z}{\partial y} \hat{x} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \hat{y} \quad (3.2)$$

No entanto, o software permite simulações com simetrias, dependendo do número de polos e ranhuras. Por exemplo, o motor W22X 355 6np foi representado apenas com um sexto da sua geometria total. Isso é vantajoso na medida em que o tempo de simulação é reduzido na mesma proporção, ou seja, o tempo será um sexto do que se teria com a geometria total do motor.

Para isso, são necessárias definir mais duas condições de fronteira além da primeira referida: *Master* e *Slave*. Estas irão definir o comportamento do fluxo magnético nos limites da geometria simplificada do motor, melhor dizendo, o campo magnético  $H$  na fronteira tipo *Slave* é forçado a igualar a magnitude e direção do campo magnético da fronteira *Master*,  $H_s = H_m$ . O resultado destas considerações ilustra-se pela figura 3.5, representando um sexto da geometria do motor W22X 355 6np e as suas fronteiras.

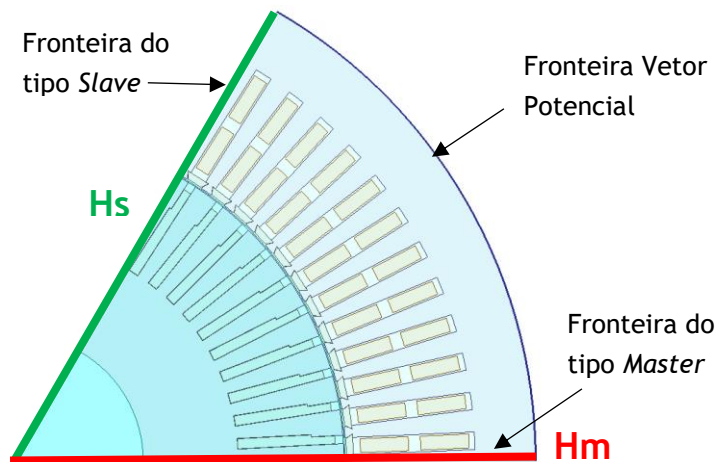


Figura 3.5 - Modelo motor W22X 355 6np e fronteiras.

### 3.1.3. Malhas de cálculo (*Mesh Operations*)

As malhas de cálculo foram refinadas em alguns pontos críticos. Mais propriamente, na zona das cunhas, no entreferro, nas barras do rotor e no veio. No entanto, o ajuste das malhas de cálculo tem de ter aliado uma eficiência quanto ao tempo de simulação. Sendo assim, foi necessário encontrar uma relação ótima entre o número de pontos de cálculo da malha e o seu peso computacional (nº de iterações a cada passo). O software permite calcular dois tipos de malhas, *Inside Selection* (Dentro da Seleção), *On Selection* (Na Seleção):

- **Inside Selection** - Define, numa geometria fechada, a forma como os pontos de cálculo da malha serão calculados;
- **On Selection** - Os pontos serão calculados sobre uma geometria calculada (linha, segmento de reta, arco, etc.). Este tipo foi utilizado para o entreferro, onde se definiu uma circunferência com um raio de comprimento do centro até metade do entreferro, atribuindo uma malha On Selection nessa geometria.

Para os dois tipos de malhas podem ser definidos os seguintes parâmetros:

- **Max Length** (Comprimento máximo) - Define o comprimento máximo do lado de um elemento triangular.
- **Max Elements** (Número máximo de elementos) - Define o número máximo de elementos no interior ou na geometria selecionada, dependendo do tipo.

A partir dos tipos de malha mencionados e dos parâmetros que as caracterizam, foi possível construir a malha de cálculo total do motor W22X 500 2np, representada pela figura 3.6. De um modo geral, utilizou-se *Inside Selection* no estator, rotor, veio, condutores estator, cunhas e veio. Quanto a *On Selection*, apenas foi aplicada no entreferro, como já referido.

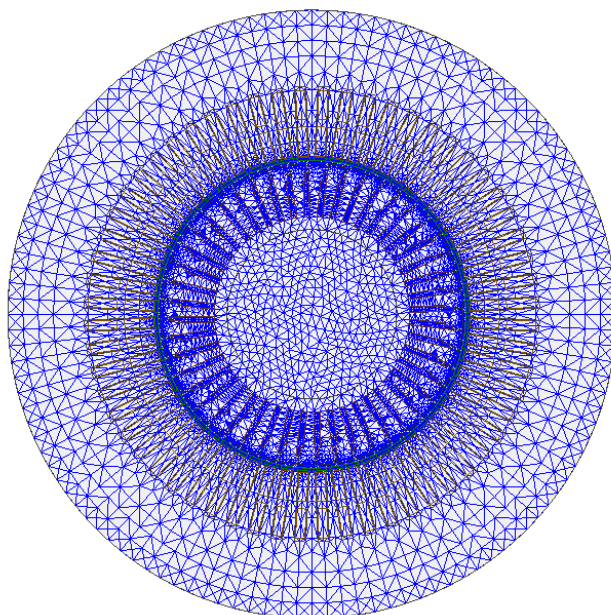


Figura 3.6 - Representação da malha de cálculo total (motor W22X 500 2np).

#### 3.1.4. Resistências e indutâncias

Neste ponto são caracterizados os valores de resistências e indutâncias consideradas no desenvolvimento do modelo do motor, relativamente ao estator e ao rotor. Nomeadamente, resistência e indutância dos condutores do estator e barras do rotor (inclusão dos anéis). Os valores dos parâmetros definidos no software, para o motor W22X 500 2np, estão organizados nas tabelas 3.1 e 3.2. Os dados relativos aos outros motores encontram-se no anexo B.2.

Tabela 3.1 - Resistência e indutância dos condutores do estator do motor W22X 500 2np.

Estator ( <i>Winding</i> ) - Total por fase	
Resistência Estatórica ( $\Omega$ ), $R_{20^{\circ}C}$	0,07720
Indutância Parcial de Fugas Estatórica (H), $L_{sf\ Estator}$	0,00169

Tabela 3.2 - Resistência e indutância barras do rotor e anéis de curto-circuito do W22X 500 2np.

Rotor ( <i>End Connection</i> ) - Entre duas barras adjacentes	
Resistência Rotórica ( $\Omega$ ), $R_{rotor}$	$1,1358 \times 10^{-7}$
Indutância Parcial de Fugas Rotórica (H), $L_{sf\ Rotor}$	$5,0753 \times 10^{-9}$

Relativamente aos parâmetros e valores referidos nas tabelas 3.1 e 3.2 , é necessário ter em conta alguns aspetos importantes:

- **Resistência do estator ( $R_{(T_0)}$ )** - Corresponde ao valor de resistência total por enrolamento de fase à temperatura de 20°C. Este valor inclui o valor de resistência relativo às testas das bobinas.
- **Indutância do estator ( $L_{sf\ Estator}$ )** - De um modo geral, o valor total de indutância é calculado pela seguinte expressão:

$$L_s = L_m + L_{sf} \quad (5.3)$$

Em que:

$L_s$  - Indutância total (H);

$L_m$  - Soma da indutância própria (autoindução) com a indutância referente à influência mútua das outras fases (H);

$L_{sf}$  - Indutância de fugas (H).

No caso do software utilizado, o valor 0,00169 H para indutância do estator apenas se refere ao valor de indutância de fugas  $L_{sf}$  por fase. Quanto ao valor de  $L_m$ , este é calculado automaticamente pelo software durante a simulação.

- **Resistência ( $R_{rotor}$ ) e Indutância do Rotor ( $L_{sf\ Rotor}$ )** - Tratando-se esta de uma simulação em 2D, é necessário definir previamente tudo aquilo que não pode ser representado a duas dimensões, nomeadamente, os anéis de curto-circuito e a porção das barras de cobre (ou alumínio) que ultrapassam o comprimento do núcleo. Sendo assim, estes valores, de resistência e indutância, dizem respeito apenas à porção de um anel de curto-circuito que fica entre duas barras condutoras de cobre (ou alumínio) adjacentes, incluindo a contribuição das próprias barras (valores calculados automaticamente pelo software após introdução dos dados dos anéis de curto-circuito e das barras rotóricas, com inclusão da influência da temperatura).

### 3.1.5. Resistência e temperatura

A temperatura é um fator determinante na exploração do motor de indução. Mais propriamente, esta terá uma influência notória no valor da resistência dos condutores do estator e na resistividade das barras de cobre ou alumínio do rotor.

Como referido anteriormente, utiliza-se neste capítulo o motor W22X 500 2np na forma de exemplo. Para os restantes motores em estudo, a correção da resistência e resistividade está contida no anexo **B.2**.

Sendo assim, quanto aos condutores estatóricos, submeteu-se o valor total por enrolamento de fase a uma correção tendo em conta a temperatura que a bobinagem atinge com o motor em operação ( $T_{estator}$ ). O novo valor de resistência é obtido através da expressão (3.4), referenciada em [27], e os resultados estão sintetizados na tabela **3.3**.

$$R_{(T_{estator})} = R_{(T_0)} * [1 + \alpha * (T_{estator} - T_0)] \quad (3.4)$$

Em que:

$T$  - Temperatura de operação do motor, obtida em ensaio (°C);

$T_0$  - Temperatura de referência, temperatura ambiente (°C);

$R_{(T)}$  - Resistência à temperatura de operação do motor ( $\Omega$ );

$R_{(T_0)}$  - Resistência à temperatura de referência ( $\Omega$ );

$\alpha$  - Coeficiente de temperatura ( $1/^\circ\text{C}$ ).

**Tabela 3.3 - Resistência por fase corrigida de acordo com temperatura operação (W22X 500 2np).**

$T_0$ (°C)	$T_{estator}$ (°C)	$\alpha_{Cobre}$ ( $1/^\circ\text{C}$ )	$R_{(T_0)}$ ( $\Omega$ )	$R_{(T_{estator})}$ ( $\Omega$ )
20	100	$3,862 \times 10^{-3}$	0,07720	0,10105

Quanto às barras do rotor, procedeu-se a uma correção do valor da própria resistividade ( $\rho$ ) do material (cobre). Criou-se um material com as mesmas propriedades do cobre com exceção ao valor da resistividade, que foi corrigido para uma temperatura de  $110^\circ\text{C}$ . Tipicamente na WEG considera-se que a temperatura do rotor neste tipo de motores é  $10^\circ\text{C}$  superior em relação à temperatura da bobinagem do estator. Sendo assim, a expressão utilizada é em muito semelhante com a expressão (3.4), sendo apenas necessário trocar os valores de resistência por valores de resistividade. Sendo assim, a tabela **3.4** apresenta os resultados obtidos.

**Tabela 3.4 - Resistividade das barras rotor corrigida de acordo com temperatura (W22X 500 2np).**

$T_0$ (°C)	$T_{rotor}$ (°C)	$\alpha_{Cobre}$ ( $1/^\circ\text{C}$ )	$\rho_{(T_0)}$ ( $\Omega.m$ )	$\rho_{(T_{rotor})}$ ( $\Omega.m$ )
20	110	$3,862 \times 10^{-3}$	$1,68 \times 10^{-8}$	$2,26 \times 10^{-8}$

Os valores do coeficiente de temperatura e resistividade dos materiais alumínio e cobre obtiveram-se a partir do referenciado em [28].



# Capítulo 4

## Simulação e metodologia

No presente capítulo, explica-se detalhadamente os métodos que foram utilizados para cumprir os objetivos definidos. Além disso, são enunciadas todas as condições das simulações a que motores foram sujeitos, bem como todas as considerações importantes para compreensão dos resultados obtidos.

### 4.1. Condições da simulação

Os motores que são objeto de estudo serão simulados em regime permanente e no seu transitório de arranque (direto). Sendo assim, neste capítulo serão apresentadas todas as condições aplicadas relativamente ao software, para um dos motores. Novamente utilizar-se-á como referência o motor W22X 500 2np.

Todas as condições de simulação mencionadas neste capítulo estão resumidas no anexo C.1, no que respeita aos outros motores em análise.

Além das condições relacionadas com o software, os motores serão simulados de acordo com as suas grandezas em regime estipulado, obtidas em ensaio. As informações do regime estipulado de cada motor estão organizadas na secção 2.10, referente as características elétricas.

#### 4.1.1. Regime permanente

A simulação que representará o funcionamento do motor W22X 500 2np será sujeita às seguintes condições:

- **Tipo** - *Maxwell 2D Transient*;

- **Motion Setup** (Movimento) - Velocidade de rotação inicial,  $n=2990$  rpm (velocidade em regime estipulado obtida em ensaio). Não se pretende representar nenhum modo de exploração do motor considerando um valor de velocidade inicial de 2990 rpm. De um modo simplificado, considerar 2990 rpm como velocidade inicial é o mesmo que aplicar uma “força exterior” inicialmente para que o motor atinja o regime permanente com um menor tempo de simulação.

A velocidade para a qual o modelo converge será a velocidade estipulada do motor com um erro relativo à velocidade indicada na folha de dados (2990 rpm);

- Simulação em carga com valor de binário estipulado. Este valor pode ser calculado pela expressão (4.1), indicada de seguida.

$$T_N = \frac{P_N}{\frac{2\pi}{60} * n_N} = \frac{1000e + 3}{\frac{2\pi}{60} \times 2990} = (-) 3193,74 Nm \quad (4.1)$$

Em que:

$T_N$  - Binário estipulado (Nm), o sinal negativo é uma imposição do software;

$P_N$  - Potência útil estipulada (W);

$n_N$  - Velocidade de rotação estipulada (rpm);

- Momento de inércia do rotor:  $I = 24,7 kg.m^2$ ;
- **Analysis Setup** (Menu de Análise) - Tempo total de simulação: 2000 ms e um *Step size* (Tamanho do passo): 0,3333 ms;
- Os resultados obtidos são calculados em regime permanente (*steady state*): o motor atinge este regime a partir, aproximadamente, dos 1800 ms.

#### 4.1.2. Transitório de arranque (Direto)

Comparativamente com o regime permanente os parâmetros que foram alterados estão indicados de seguida:

- Velocidade de rotação inicial:  $n = 0$  rpm;
- Simulação em carga com valor de binário estipulado (*Load Torque* - Considerando agora sinal positivo):  $T_N = (+) 3193,74 Nm$ . Isto traduz-se no arranque direto do motor sujeito a um binário resistente constante igual a  $T_N$  e com um momento de inércia:  $I = 24,7 kg.m^2$ .
- **Analysis Setup** - Tempo total de simulação: 3200 ms e um *Step size*: 0,3333 ms;
- Os resultados obtidos são calculados para o transitório de arranque, entre os 0 e 3000 ms (instante em que o motor atinge o regime permanente, aproximadamente).

## 4.2. Densidade de fluxo magnético no entreferro

Torna-se pertinente analisar se as cunhas magnéticas estão, efetivamente, a cumprir o seu objetivo. Melhor dizendo, é necessário perceber qual é a densidade do fluxo magnético  $B$  (indução magnética) que “atravessa” as cunhas magnéticas e dentes do estator, pelo entreferro, até ao rotor. Com esse objetivo, recorreu-se a uma ferramenta do *ANSYS Maxwell*, denominada de *Plot Fields*, onde é possível criar uma ilustração com a distribuição espacial da indução. Os resultados da indução magnética são valores instantâneos, pertencentes ao regime permanente.

Os dois casos em análise são o de utilização de cunhas magnéticas ou cunhas não magnéticas, que correspondem, efetivamente, a dois modelos diferentes. Devido a essa diferença, não será possível obter duas situações exatamente iguais em termos de alinhamento entre rotor e estator. Isso deve-se ao facto de a velocidade atingida em regime permanente ser também ligeiramente diferente nos dois casos.

Por forma a obter uma análise mais detalhada do comportamento da distribuição da densidade de fluxo magnético ao longo do entreferro traçou-se um gráfico de indução magnética em função da distância, correspondente ao perímetro da circunferência com raio igual à distância do centro até meio do entreferro. Este cálculo é efetuado através do *Fields Calculator* (Cálculo de Campos) do *ANSYS Maxwell*.

### 4.2.1. Distorção harmónica do fluxo no entreferro

Como vimos anteriormente na secção 2.2, a utilização de cunhas magnéticas estará fortemente relacionada com a distorção harmónica do fluxo magnético no entreferro. Para isso efetuou-se uma análise FFT (*Fast Fourier Transformation*) à forma de onda obtida para variação da densidade de fluxo magnético.

Este tipo de análise pode ser realizado na medida em que as componentes sinusoidais da variação de densidade de fluxo magnético repetem-se por unidade de distância, ou seja, é um fenómeno que corresponde à definição de *spatial frequency*, característica de qualquer estrutura que é periódica por toda a posição no espaço (unidade SI de *spatial frequency* é em ciclos por metro) [29]. Essas componentes sinusoidais periódicas são determinadas pela Transformada de Fourier. Sendo assim, a partir dessa análise, calculou-se a distorção harmónica total, THD (*Total Harmonic Distortion*), recorrendo à expressão (4.2).

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} B_k^2}}{B_{1(fundamental)}} \quad (4.2)$$

Em que:

$B_k$  - Valores eficazes das componentes harmónicas da variação da indução magnética ao longo do entreferro (T);

$B_{1(fundamental)}$  - Valor eficaz da componente fundamental da variação da indução magnética ao longo do entreferro (T).

### 4.3. Perdas e rendimento

A quantificação das perdas do motor é um fator determinante no contexto do trabalho desenvolvido. Sendo assim, segue uma caracterização de cada tipo de perdas num motor de indução trifásico:

- **Perdas por Efeito Joule no Estator ( $p_{Js}$ )** - Perdas nos condutores no estator relacionadas com a passagem de corrente elétrica num condutor que provoca um aumento de temperatura e conseqüente libertação de calor.
- **Perdas por Efeito Joule no Rotor ( $p_{Jr}$ )**- Semelhante às do estator, no entanto, calculadas nas barras condutoras do rotor e nos anéis de curto-circuito.
- **Perdas no Ferro ( $p_{Fe}$ )** - Estas podem ter duas origens: Perdas por Histerese ( $p_H$ ) e Perdas por Correntes de Foucault ( $p_F$ ).
  - **Perdas por Histerese ( $p_H$ )** - Têm como origem variações no tempo de fluxos magnéticos que percorrem o interior de núcleos ferromagnéticos (histerese magnética).
  - **Perdas por Correntes de Foucault ( $p_F$ )** - A variação do fluxo magnético induz, no próprio material magnético, origina correntes elétricas normalmente denominadas de correntes de Foucault (*eddy currents*), cuja circulação origina perdas por efeito de calor. Além disso, o valor deste tipo de perdas depende da resistividade elétrica no próprio material magnético [30].

Adicionalmente, existe uma parcela das perdas importante que deve ser mencionada. As perdas adicionais (*stray load losses*) apresentam uma forte relação com a utilização de cunhas magnéticas:

- **Perdas adicionais, *Stray Load Losses* ( $p_{LL}$ )** - Este tipo de perdas pode ter diversas origens, no entanto, o foco estará sobre perdas adicionais relacionadas com o **efeito de ranhura**. Estas têm origem em pulsações de fluxo produzidas por variações da relutância magnética ao longo do entreferro. Esta variação de relutância deve-se à sucessão de dentes/ranhuras. É de salientar que este tipo de perdas é de difícil separação e quantificação, no entanto, existem alguns métodos que o tornam possível. Esta temática está aprofundada em [30].

#### 4.3.1. Trânsito de potência ativa

Por forma a resumir o mencionado no capítulo anterior segue um diagrama dado pela figura 4.1 [16] que representa o funcionamento de um motor de indução em termos de potências ativas e perdas. No diagrama considera-se que as perdas no ferro do rotor são muito pequenas em comparação com as perdas no ferro no estator, em regime permanente, devido à baixa frequência das correntes rotóricas.

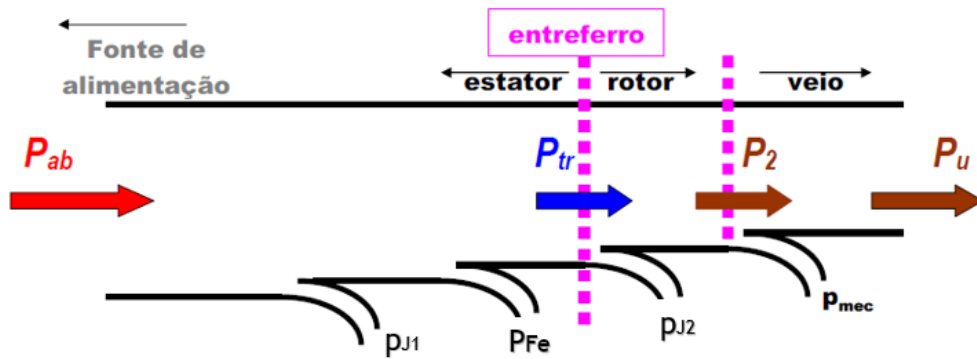


Figura 4.1 - Diagrama simplificado do trânsito de potência ativa de um motor de indução.

Em que:

$P_{abs}$  - Potência elétrica ativa absorvida de entrada (W);

$P_{tr}$  - Potência ativa transferida para o rotor ou potência do entreferro (W);

$P_2$  - Potência mecânica total desenvolvida e inclui valor de perdas mecânicas (W);

$P_u$  - Potência útil mecânica (W).

#### 4.3.2. Perdas mecânicas

As **perdas mecânicas** ( $p_{mec}$ ) do motor podem ser definidas como perdas por atrito e ventilação. Normalmente, são perdas provocadas pelo atrito das partes móveis que constituem um motor de indução e pela potência absorvida pelos ventiladores acoplados ao veio [30].

Em todos os motores estudados é conhecido o valor das perdas mecânicas, por ensaio experimental. Sendo assim, a sua inclusão na simulação realizou-se através de um parâmetro, pertencente ao *Motion Setup* do ANSYS Maxwell, denominado de *Damping*.

O *Damping* é um coeficiente de atrito dado pela divisão do valor de perdas mecânicas (obtido em ensaio) dividido pelo valor da velocidade síncrona ao quadrado, como se traduz na expressão (4.3). A unidade do coeficiente de atrito é em dada por Nm/(rad/s) [19].

$$Damping = \frac{p_{mec}}{n_s^2} \quad (4.3)$$

Os valores para perdas mecânicas obtidos em ensaio relativos a cada motor estão sintetizados no anexo C.2.

#### 4.3.3. Perdas por efeito joule nos anéis

Nas perdas por efeito Joule no rotor estão incluídas as perdas nos anéis de curto circuito, no entanto, o *software* de simulação usado não as calcula. Sendo assim, as perdas nos anéis serão obtidas por um método indireto que passa a ser explicado.

As perdas por efeito Joule no rotor totais serão definidas como  $p_{Jr\ Totais}$ .

Em primeiro lugar, calcula-se a potência transferida para o rotor através da subtração da potência absorvida pelas perdas por efeito Joule no estator e pelas perdas no ferro estáticas ( $p_{Js}$  e  $p_{Fes}$ , valores fornecidos pela simulação).

$$P_{tr} = P_{abs} - p_{Js} - p_{Fes} \quad (4.4)$$

Com esse cálculo realizado, as perdas por efeito Joule no rotor totais serão obtidas multiplicando a potência transferida para o rotor pelo deslizamento.

$$p_{Jr\ Totais} = P_{tr} \times s \quad (4.5)$$

As perdas por efeito Joule nos anéis de curto circuito ( $p_{Jr\ Anéis}$ ) serão assim calculadas indiretamente pela subtração de  $p_{Jr\ Totais}$  pelas perdas por efeito joule nos condutores rotóricos ( $p_{Jr}$ ), valor que é fornecido pela simulação no *ANSYS Maxwell*.

$$p_{Jr\ Anéis} = p_{Jr\ Totais} - p_{Jr} \quad (4.6)$$

#### 4.3.4. Rendimento

Para calcular o rendimento  $\eta$  (%) existem duas hipóteses possíveis que são dadas pelas expressões (4.7) e (4.8). Neste trabalho, as duas serão aplicadas por forma a comparar os resultados obtidos e também para validação dos mesmos.

$$\eta = \frac{P_u}{P_{abs}} \quad (4.7)$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + \text{perdas}} = \frac{P_u}{P_u + p_{Js} + p_{Jr} + p_{Fe}} \quad (4.8)$$

Na expressão (4.8), todas as componentes pertencentes à parcela das perdas obtêm-se diretamente a partir do software. Além disso, a inclusão das perdas mecânicas é feita a partir do referido na secção 4.3.2 deste capítulo, daí não estarem incluídas na expressão (4.8).

### 4.4. Fator de potência

O cálculo do fator de potência é realizado através de um método indireto, ou seja, através dos resultados das simulações calcula-se o fator de potência por um cálculo teórico. Mais propriamente através das expressões (4.9) e (4.10) que relacionam a potência absorvida e o valor de potência aparente  $S$  (VA).

$$S = 3 V_{1\ Fase} I_{1\ Fase} \quad (4.9)$$

$$\cos \varphi = \frac{P_{abs}}{S} \quad (4.10)$$

## 4.5. Força eletromotriz induzida no veio

Por existirem imposições de limite máximo destas forças eletromotrizes considera-se pertinente simular as mesmas e perceber como esta força eletromotriz induzida se relaciona com a aplicação de cunhas magnéticas nas ranhuras do estator e com o próprio nível de excentricidade. As imposições referidas podem vir por parte do fabricante, normas, segurança ou pelo cliente, no entanto, o fator preponderante é a aplicação específica do motor.

Com esse objetivo, recorreu-se a uma ferramenta do *software*, o *Maxwell Circuit Design*. Este possibilita a criação de um circuito externo em que se considera que o veio é um condutor sólido, sendo possível medir a f.e.m. induzida entre as suas extremidades.

A conexão entre o *Maxwell Circuit Design* e o modelo do motor de elementos finitos, é realizada através de um componente denominado de *Winding* (Veio Condutor) que pode ser definido como um condutor sólido. É de salientar que este componente é o que possibilita a interação do circuito de medição de tensão com a simulação de elementos finitos, considerando o movimento e todos os restantes fenómenos envolvidos.

O circuito desenvolvido está ilustrado na figura 4.2, onde se pode verificar uma resistência  $R$  ( $M\Omega$ ), de valor muito alto (equivalente à resistência do multímetro utilizado para medir a f.e.m. induzida nas extremidades do veio), ligada em paralelo com o veio e um voltímetro  $V_{veio}$  (mV) que quantificará o valor de tensão induzida. O circuito da figura 4.2 simula o trajeto percorrido pela corrente no veio, que se estima com uma resistência de valor muito elevado e, além disso, permite estimar o valor da f.e.m. induzida no veio.

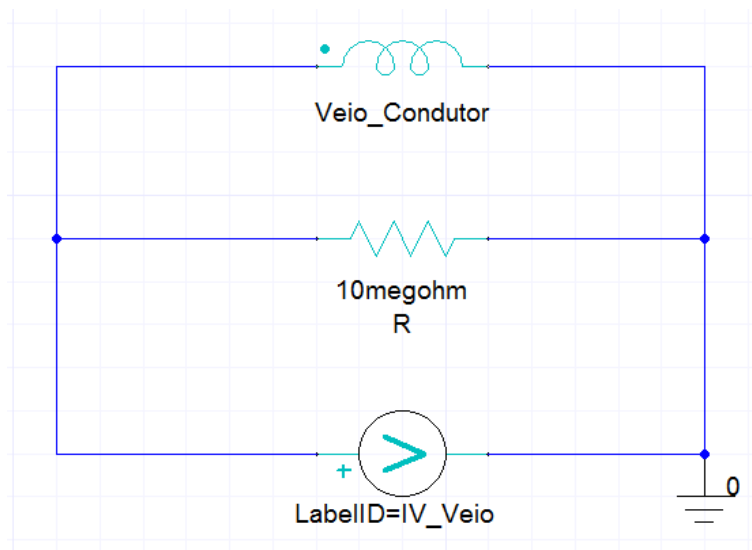


Figura 4.2 - Circuito externo de medição da f.e.m. induzida aos terminais do veio.

A excentricidade aplicada será definida como percentagem de deslocamento do centro de rotação ou deslocamento do rotor relativamente ao comprimento do entreferro. Sendo assim, realizaram-se simulações para as excentricidades presentes na tabela 4.1, em termos de valor e tipo (dinâmica ou estática). As modificações que foram feitas no modelo do motor *W22X 500 2np*, a duas dimensões, estão também ilustradas na figura 4.3.

Tabela 4.1 - Excentricidades simuladas no motor *W22X 500 2np* com entreferro igual a 4,25m.

Estática		Espessura mínima do entreferro (mm)	Dinâmica	
Excentricidade (%)	Deslocamento do rotor e do centro de rotação (mm)		Excentricidade (%)	Deslocamento rotor e centro de rotação igual (mm)
20	0,8500	3,4000	20	0,8500
50	2,1250	2,1250	50	2,1250
75	3,1875	1,0625	75	3,1875

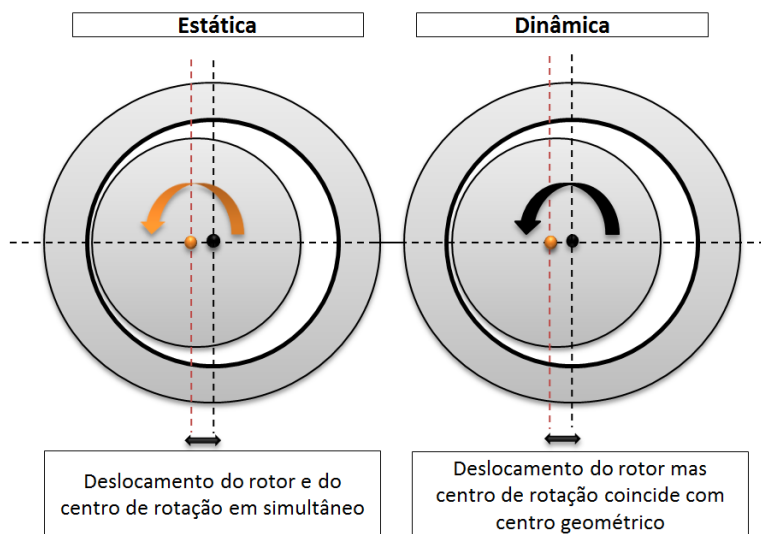


Figura 4.3 - Caracterização das excentricidades no modelo em 2D (centro geométrico a “preto” e centro rotórico a “laranja”).



# Capítulo 5

## Resultados da simulação

Neste capítulo apresentam-se os resultados provenientes das simulações efetuadas. Devido ao volume de informação relativa aos quatro motores, optou-se por utilizar um motor como exemplo em algumas das secções deste capítulo. Ainda assim, os resultados para todos os motores estão organizados nos anexos C, D, E, F e G.

### 5.1. Validação do modelo

Os modelos desenvolvidos no *ANSYS Maxwell* devem apresentar um funcionamento o mais próximo possível do seu comportamento real. Para isso, todas as considerações feitas na construção destes, são com o objetivo de obter características semelhantes às características de funcionamento em regime estipulado obtidas em ensaio, a 100% da carga.

Sendo assim, tendo em conta todos os fatores e condições mencionados nas secções 2.10 e 4.1.1 relativos à simulação em regime estipulado ( $U_N - f_N - I_N$ ), obtiveram-se os resultados das tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 para o motor *W22X 355 6np*. Para os restantes motores, valores das principais grandezas obtidos em simulação vêm nos anexos D.1, D.2, D.3 e D.4.

Tabela 5.1 - Valores das tensões e correntes obtidos na simulação para o motor *W22X 355 6np*.

Tensões e Correntes		Simulação Regime Permanente	Ensaio Regime Estipulado
Tensão de Fase	$V_1$ rms (V)	1905	1905
Corrente de Fase	$I_1$ rms (A)	Fase A	74,71
		Fase B	
		Fase C	

Tabela 5.2 - Valores de binário e velocidade obtidos na simulação do motor W22X 355 6np.

Binário e Velocidade		Simulação Regime Permanente	Ensaio Regime Estipulado
Binário	$T_{avg}$ (Nm)	3209,6	3207,0
Velocidade de Rotação	$n_{avg}$ (rpm)	992,84	992,00

Tabela 5.3 - Valores de potências obtidos na simulação do motor W22X 355 6np.

Potências		Simulação Regime Permanente	Ensaio Regime Estipulado
Potência Absorvida	$P_{abs}$ avg (kW)	343,908	346,000
Potência Útil	$P_u$ avg (kW)	333,780	333,000

Tabela 5.4 - Valor do fator de potência obtido na simulação do motor W22X 355 6np.

Fator de Potência		Simulação Regime Permanente	Ensaio Regime Estipulado
Potência Aparente	$S$ (VA) (4.9)	426,396	427,026
Fator de Potência	$\cos \varphi$ (4.10)	0,807	0,812

Nota: O binário referido na tabela 5.2 é definido pela soma do binário útil com o binário resistente relativo às perdas mecânicas.

### 5.1.1. Precisão dos modelos desenvolvidos

Os desvios obtidos entre valores de simulação em regime estipulado e o ensaio experimental devem-se a simplificações e aproximações intrínsecas ao *ANSYS Maxwell*, alguns desses fatores passam a ser descritos seguidamente.

O facto de realizar-se uma simulação a duas dimensões existem aproximações a um nível construtivo. Exemplificando, os anéis de curto-circuito são aproximados pelos parâmetros definidos nas secções 3.1.4 e 3.1.5. Além disso, não é considerado o sistema de ventilação, carcaça, bem como outros elementos importantes que constituem um motor de indução.

A alimentação é realizada por um sistema trifásico de tensões equilibrado, definido externamente pelo utilizador no *ANSYS Maxwell*, o que não acontece na prática dado que existem harmónicos e desequilíbrios presentes na rede de alimentação.

As malhas de cálculo apesar de apresentarem um elevado número de pontos de cálculos podem sempre ser refinadas, levando a uma melhor solução (maior tempo total de simulação).

O *step size* utilizado foi de 0,3333 ms que equivale a 60 pontos por cada ciclo elétrico. Por forma a aumentar a precisão dos resultados obtidos poderia optar-se por um *step size* menor

(0,1 ms, 200 pontos por ciclo elétrico). No entanto, o aumento do tempo de simulação total adjacente a esse *step size* não iria ser viável para o trabalho desenvolvido.

As curvas B-H dos materiais da chapa magnética do estator, do rotor e do material utilizado nas cunhas magnéticas (secção 2.11), foram traçadas através de valores discretos fornecidos pelo fabricante, representando aproximadamente o seu comportamento eletromagnético.

## 5.2. Formas de onda do regime permanente

Neste ponto seguem as formas de onda obtidas por meio das simulações em regime permanente (secções 2.10 e 4.1.1),  $U_N - f_N - I_N$  (figuras 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5). O motor utilizado para exemplo é o W22X 355 6np. As formas de onda resultantes do estudo de todos os motores podem ser visualizadas nos anexos E.1, E.2, e E.3.

### 5.2.1. Tensões de fase (*InputVoltage(Phase)*)

O sistema de tensões trifásico simétrico equilibrado é imposto pelo utilizador no *software* de elementos finitos, como um dado de entrada. Por essa razão o valor de tensão eficaz por fase é constante e igual a  $V_{Fase\ RMS} = 1905,26\ V$ , no caso do motor W22X 355 6np:

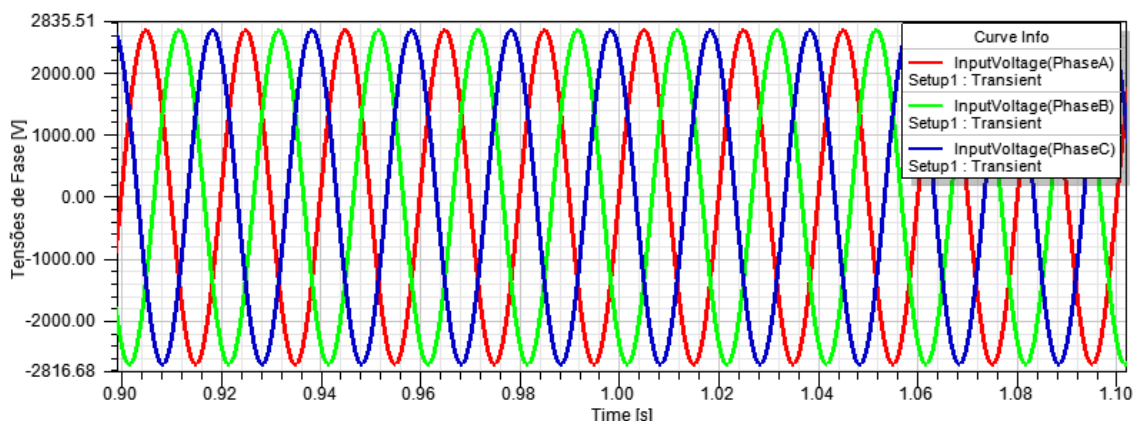


Figura 5.1 - Tensões de fase motor W22X 355 6np.

### 5.2.2. Correntes de fase (*Current(Phase)*)

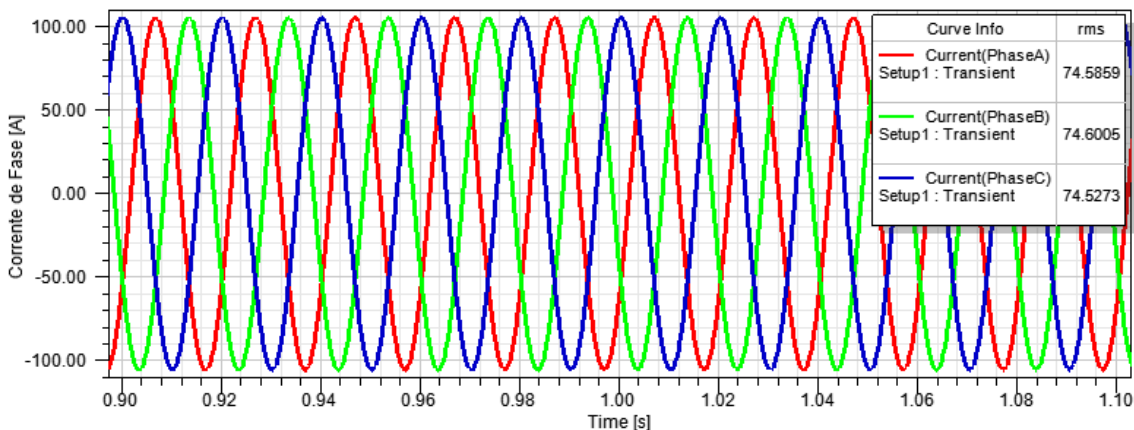


Figura 5.2 - Correntes de fase motor W22X 355 6np.

### 5.2.3. Velocidade de rotação (*Moving1.Speed*)

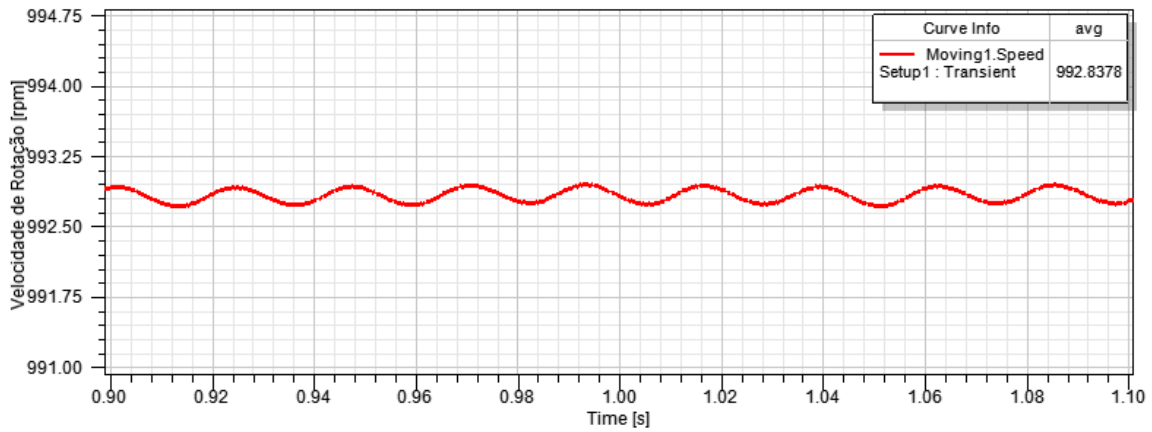


Figura 5.3 - Velocidade de rotação motor W22X 355 6np.

### 5.2.4. Binário (*Moving1.Torque*)

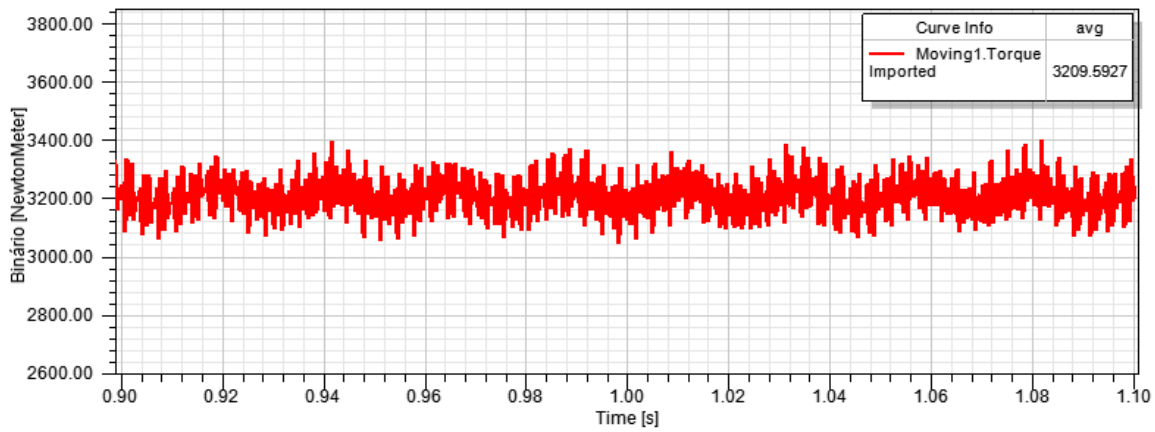


Figura 5.4 - Binário motor W22X 355 6np.

### 5.2.5. Potência absorvida (*ElecPower*) e potência útil (*MechPower*)

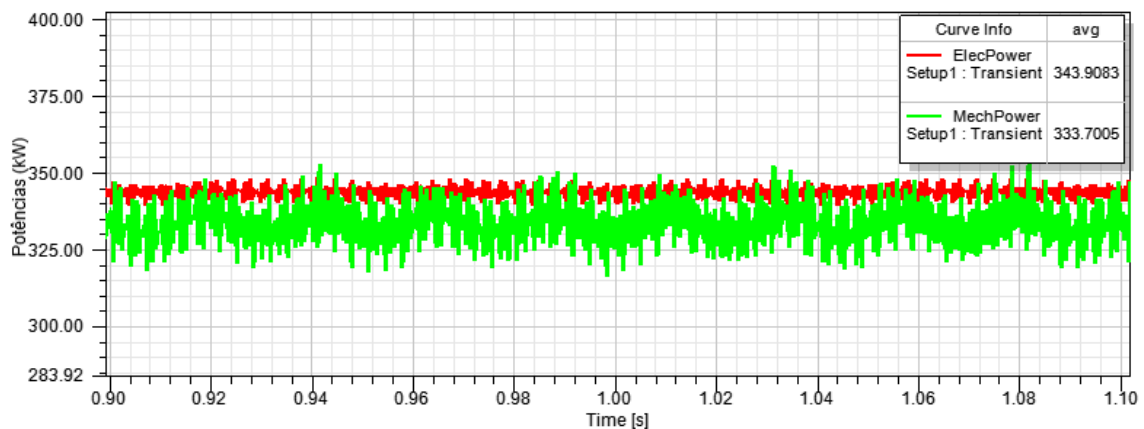


Figura 5.5 - Potência absorvida e potência útil motor W22X 355 6np.

### 5.3. Formas de onda do transitório de arranque

A partir das condições mencionadas na secção 4.1.2, traçaram-se os gráficos relativos à corrente de arranque numa fase (figuras 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9) para os quatro motores em análise. Além disso, procedeu-se à comparação dos resultados obtidos com e sem cunhas magnéticas.

#### 5.3.1. Corrente de arranque

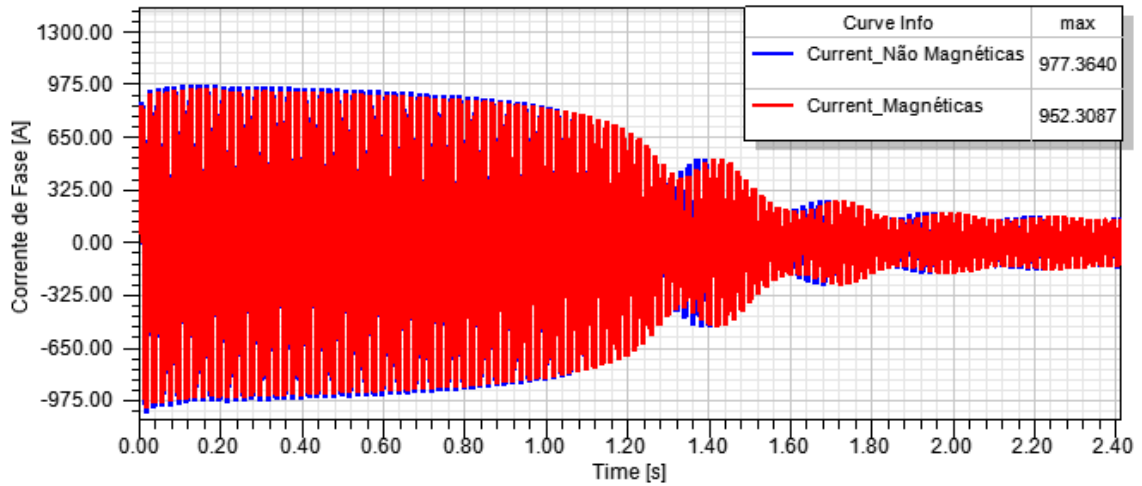


Figura 5.6 - Corrente de arranque numa fase motor W22X 500 2np.

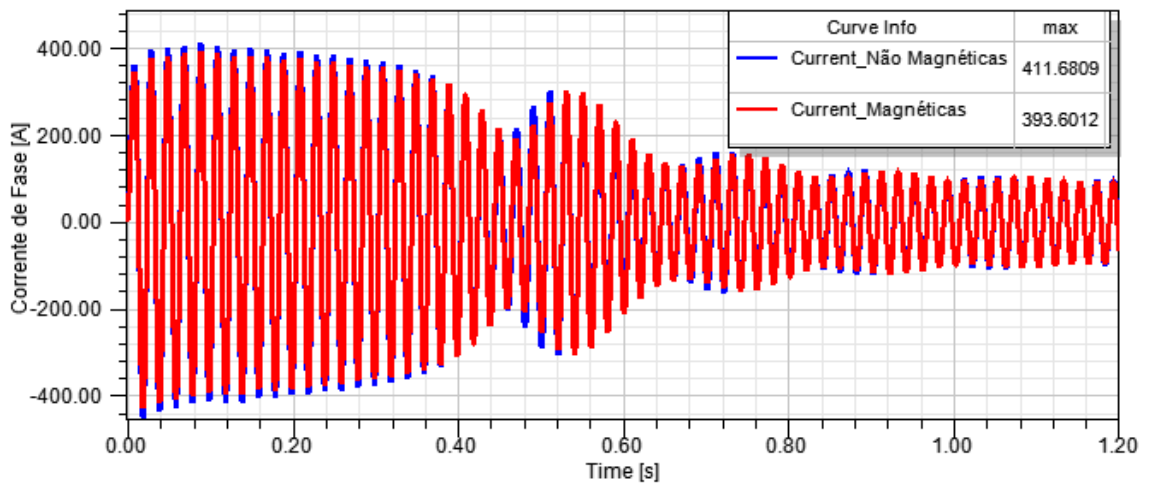


Figura 5.7 - Corrente de arranque numa fase motor W22X 355 4np.

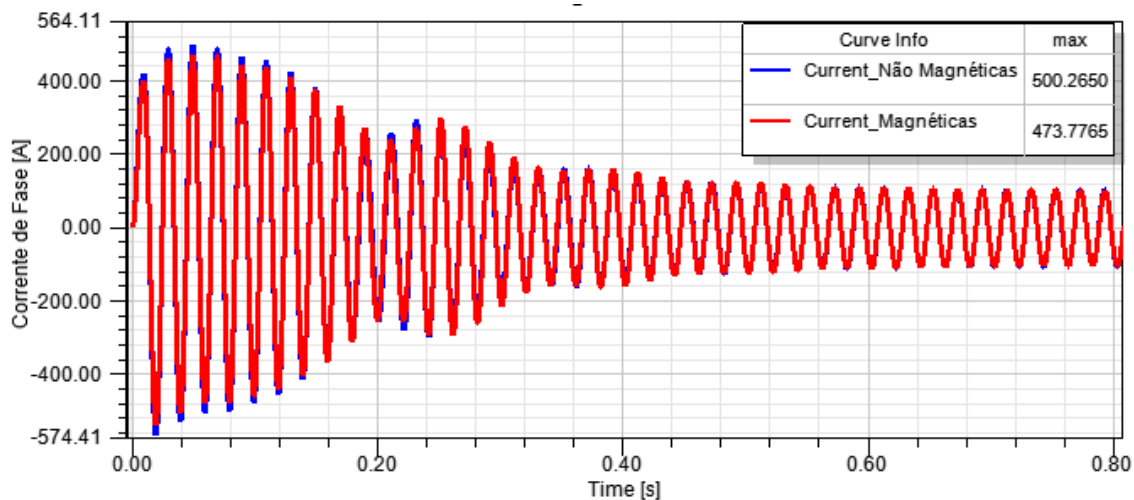


Figura 5.8 - Corrente de arranque numa fase motor W22X 355 6np.

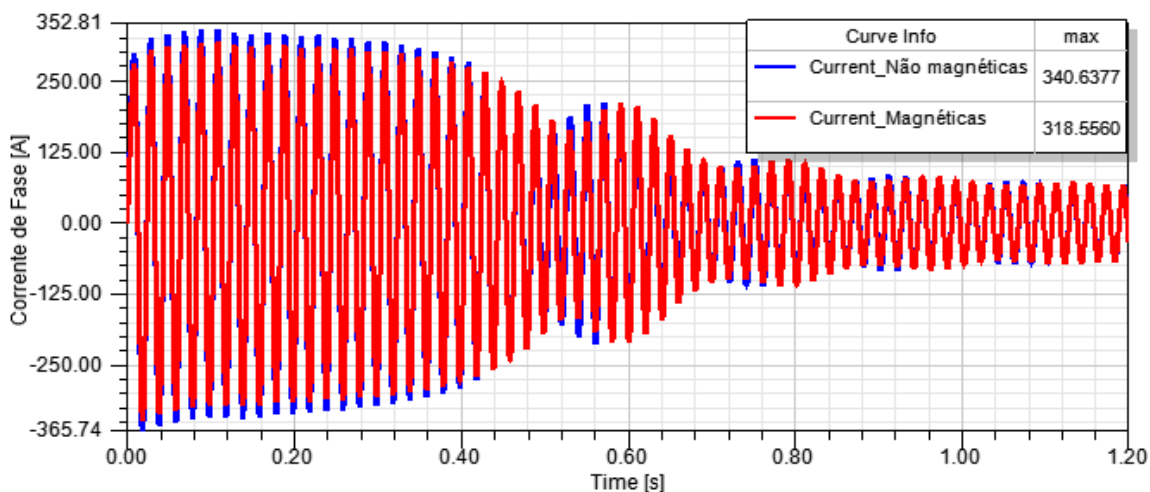


Figura 5.9 - Corrente de arranque numa fase motor W22X 450 8np.

## 5.4. Resultados para o fluxo magnético no entreferro

### 5.4.1. Influência das cunhas magnéticas

Na secção 4.2, da metodologia, explica-se que para esta análise as condições de determinação do fluxo magnético no entreferro não são exatamente as mesmas, isto porque se efetuaram duas simulações independentes, com dois modelos diferentes: cunhas magnéticas e cunhas não magnéticas.

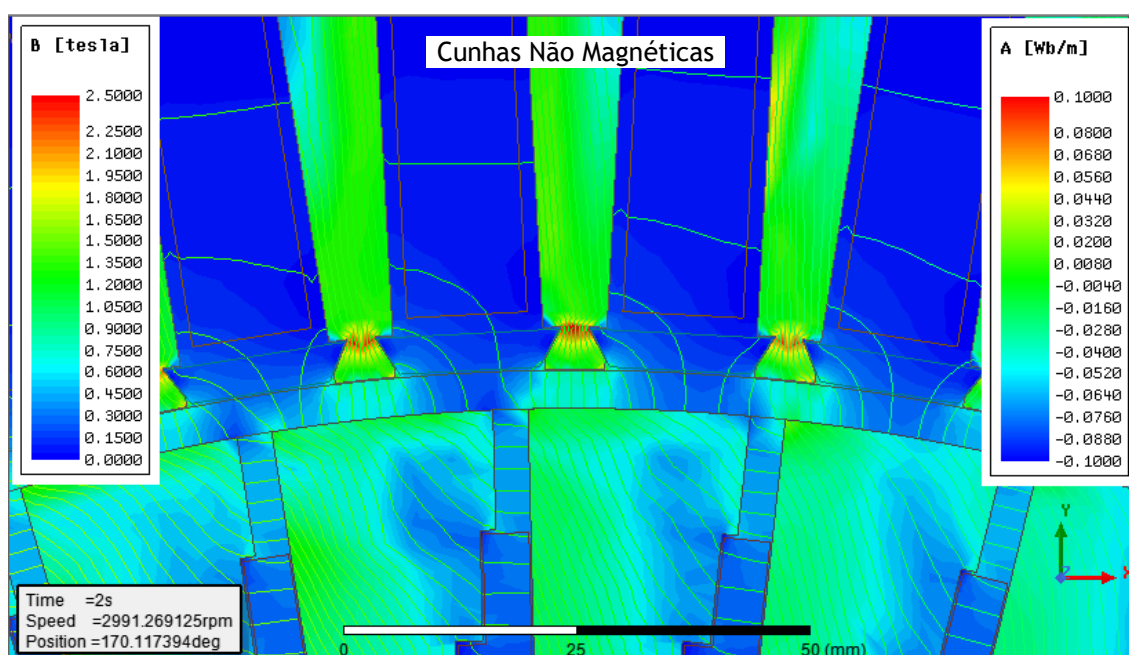
A comparação dos valores instantâneos das grandezas de maior relevância, para o motor W22X 500 2np estão resumidas na tabela 5.5 por forma a garantir duas situações idênticas de análise. No anexo F.1 encontram-se as condições relativas aos motores restantes.

Tabela 5.5 - Fatores importantes na análise da indução magnética (motor W22X 500 2np) .

Grandezas (valores instantâneos)	Cunhas Magnéticas	
	Sim	Não
Velocidade de rotação (rpm)	2991,19	2991,27
Corrente de Fase Estatórica (A)	108,6	109,1
Instante de tempo (s)	1,99	2,00
Posição do rotor (°)	161,89	170,12

A posição do rotor refere-se ao ângulo do arco entre a posição final e posição inicial de uma barra rotórica relativamente ao instante inicial e ao instante de tempo considerado na análise da indução magnética. O centro do arco coincide com o centro de rotação do rotor.

O motor utilizado como exemplo é o W22X 500 2np e a densidade de fluxo magnético está representada nas figuras 5.10 e 5.11. As ilustrações obtidas para os outros motores e as condições com que foram obtidas vêm no anexo F.2.



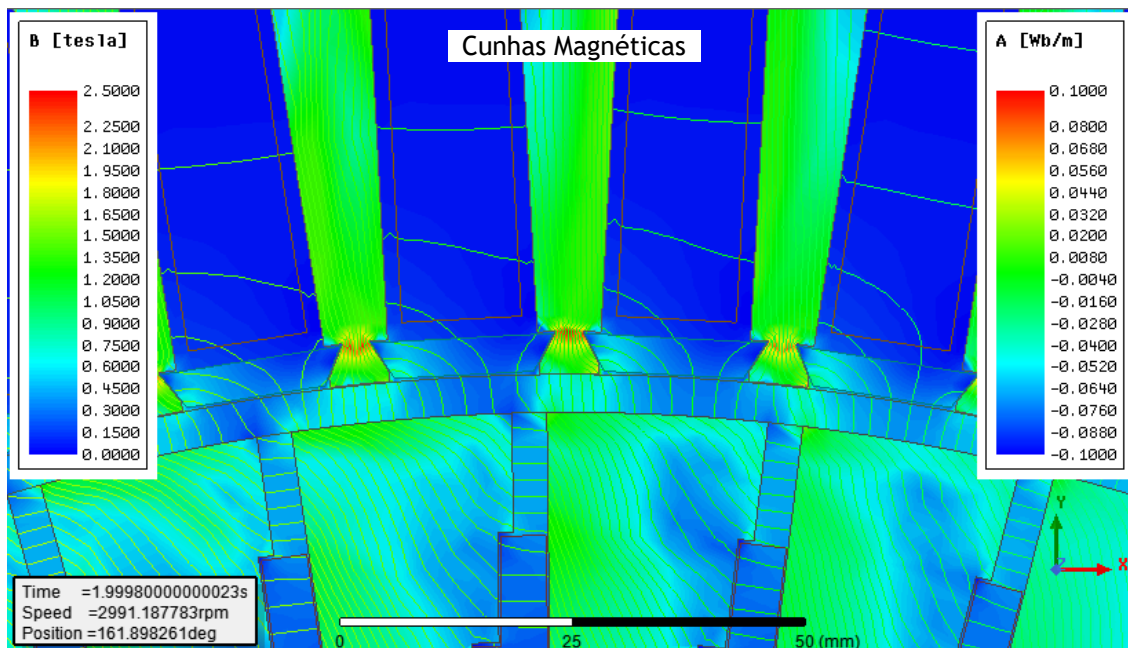


Figura 5.11 - Densidade de fluxo magnético no entreferro com cunhas magnéticas (*W22X 500 2np*).

#### 5.4.2. Forma de onda do fluxo magnético no entreferro

Observando as figuras 5.10 e 5.11 verifica-se que, no caso da utilização de cunhas magnéticas, tem-se uma maior uniformidade de indução magnética no entreferro. No caso de cunhas não magnéticas, a densidade do fluxo magnético é maior na zona dos dentes do estator.

Pelo método exposto na secção 4.2 foi possível traçar as formas de onda da densidade de fluxo magnético ao longo do entreferro (indução magnética em função da distância). Produziram-se quatro gráficos, um para cada motor, onde se compara a densidade de fluxo magnético no entreferro, utilizando cunhas magnéticas ou cunhas não magnéticas.

No caso dos motores simulados com geometria total é possível observar a forma de onda sinusoidal relativa ao perímetro total do entreferro, correspondente a 360° geométricos. Na verdade, existe uma relação direta entre o perímetro total do entreferro e o período das formas de onda, dependendo do número de polos. Essa conversão será fundamentada e aplicada na secção 5.4.3, por forma a obter uma análise das componentes harmónicas das formas de onda em função da frequência, considerando 50 Hz como frequência fundamental.

De modo a compreender a informação contida nos gráficos referidos é necessário ter em conta as simetrias utilizadas nos motores que passam a ser descritas (ver anexo ).

- *W22X 500 2np* - Geometria total e representação gráfica (figura 5.12) da indução magnética sobre o número total de polos, dois neste caso.



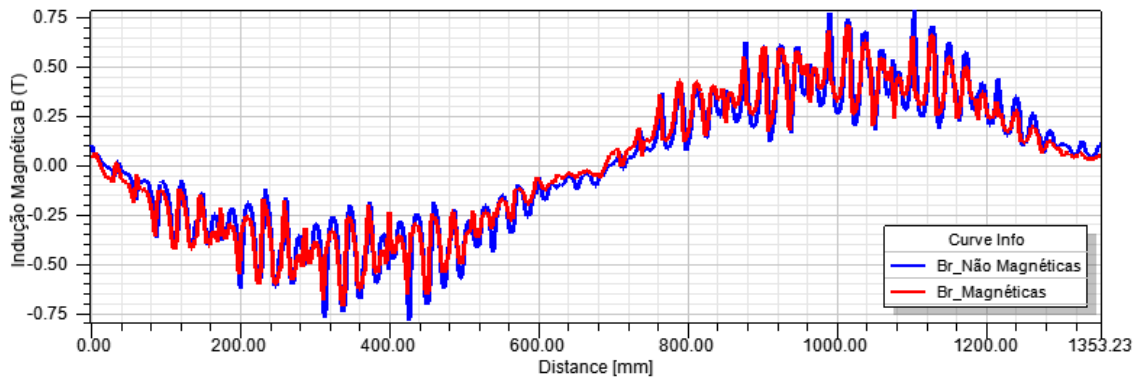


Figura 5.12 - Indução magnética no entreferro (motor W22X 500 2np).

- W22X 355 4np - Geometria total e representação gráfica (figura 5.13) da indução magnética sobre o número total de polos, quatro neste caso.

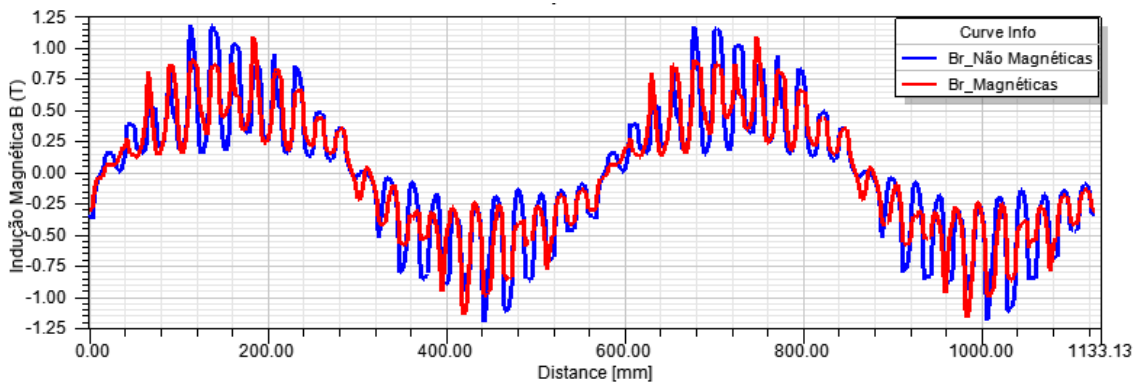


Figura 5.13 - Indução magnética no entreferro (motor W22X 355 4np).

- W22X 355 6np - Um sexto da geometria e representação gráfica da indução magnética sobre um polo, com um total de seis polos (figura 5.14).

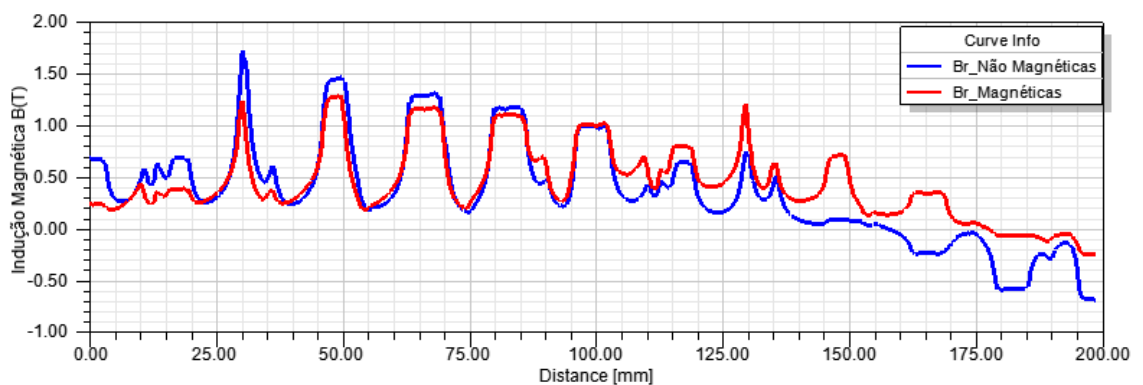


Figura 5.14 - Indução magnética no entreferro (motor W22X 355 6np).

- W22X 450 8np - Um quarto da geometria e representação gráfica da indução magnética sobre dois polos, com um total de oito polos (figura 5.15).

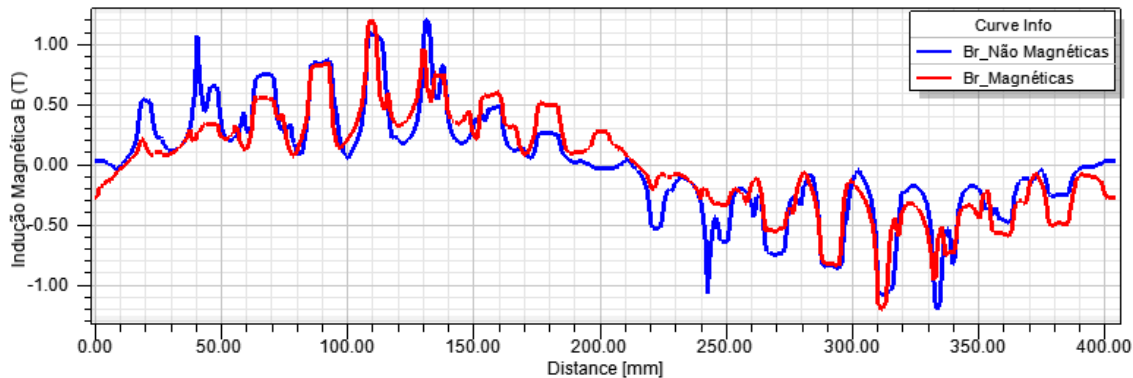


Figura 5.15 - Indução magnética no entreferro (motor W22X 450 8np).

### 5.4.3. Transformada de Fourier (Análise FFT)

A partir do referido no capítulo 4.2.1 podemos realizar uma análise FFT às formas de onda obtidas no ponto anterior. O objetivo desse cálculo é entender qual a distorção harmônica adjacente a cada uma delas e a influência do tipo de cunhas nesse valor.

Nas figuras 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15 pode-se observar uma relação de indução magnética em função da distância. A distância no eixo das abcissas representa o perímetro da circunferência com distância do centro do rotor até metade da espessura do entreferro.

Como indicado no ponto anterior, o eixo das abcissas será convertido de distância em milímetros para tempo em segundos. Isso implica que a Transformada de Fourier aplicada nessa forma de onda resultará nas componentes harmônicas relativos a cada frequência.

A conversão é realizada através da expressão (5.1), onde  $T$  é o período em segundos,  $d_{antigo}$  é referente aos valores de distância da abcissa e  $t_{novo}$  corresponderá aos novos valores das abcissas em segundos. A variável  $d_{total T}$  tem o valor do perímetro da circunferência (raio igual do centro até ao entreferro), em metros, que corresponde a um período das formas de onda sinusoidais visualizadas nas figuras 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15.

$$t_{novo} = \frac{d_{antigo} \times T}{d_{total T}} \quad (5.1)$$

Exemplificando, para o motor W22X 500 2np, a expressão (5.1) fica com os seguintes valores.

$$T = \frac{1}{f_N} = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ s} \quad (5.2)$$

$$t_{novo} = \frac{d_{antigo} \times 0,02}{1,353} \quad (5.3)$$

A forma de onda da figura 5.12, referente ao motor W22X 500 2np, terá então o seu novo eixo das abcissas como representado na figura 5.16.

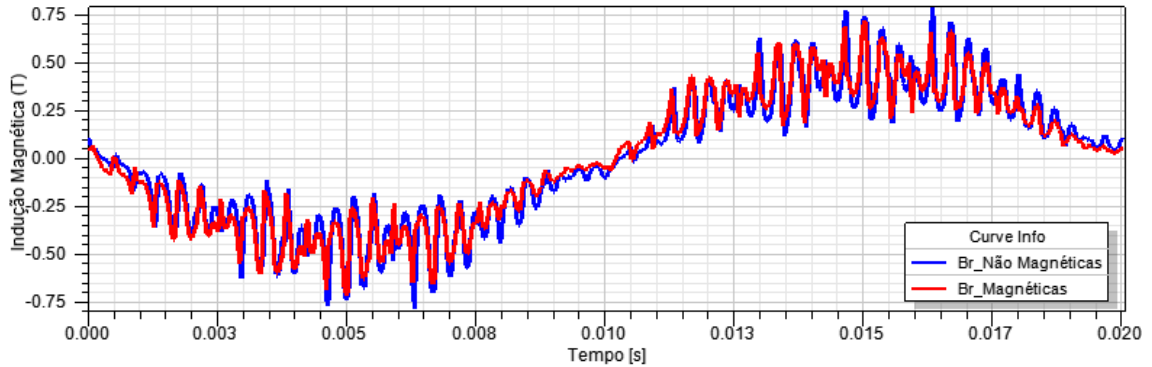


Figura 5.16 - Indução magnética no entreferro em função do tempo (motor W22X 500 2np).

Dito isto, estão criadas as condições para aplicar a Transformada de Fourier nas formas de onda obtidas. Sendo assim, seguem as formas de onda das figuras 5.17, 5.18, 5.19 e 5.20, onde se comparam as simulações com cunhas magnéticas e não magnéticas ( $B_r$  - Indução Magnética no Entreferro). É de salientar que o eixo das ordenadas está normalizado pela componente fundamental (50 Hz) e em escala logarítmica.

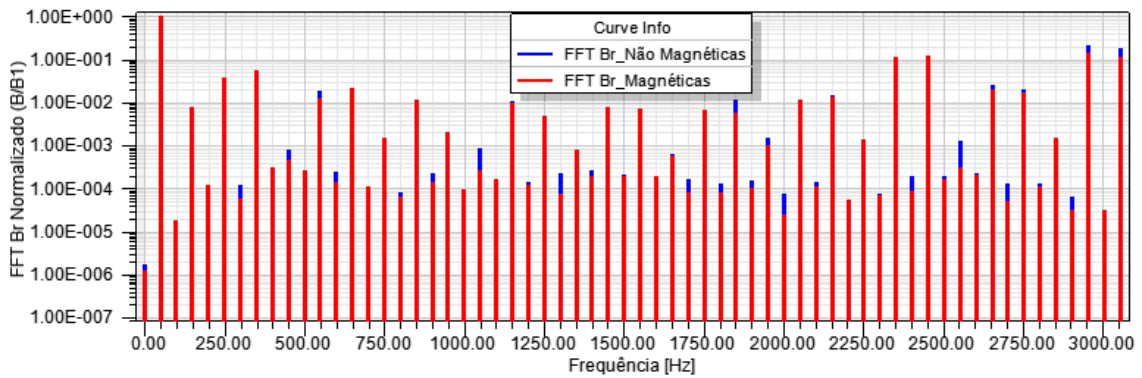


Figura 5.17 - FFT aplicada à densidade de fluxo magnético no entreferro (W22X 500 2np).

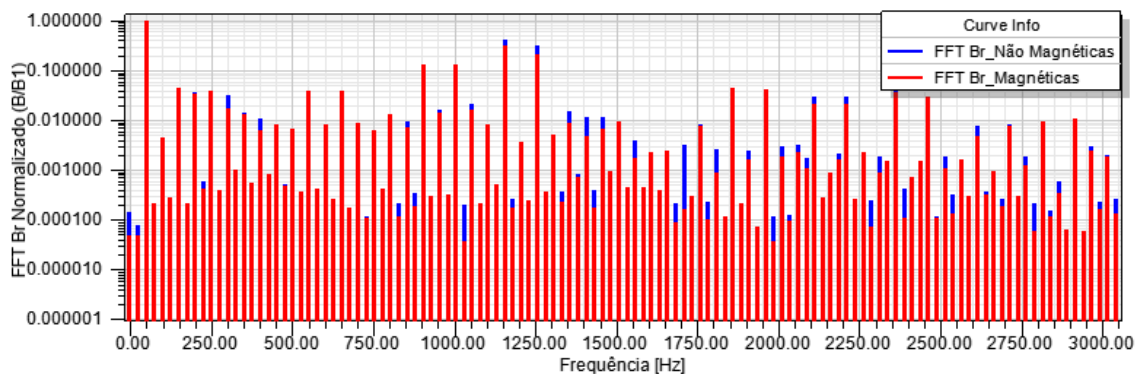


Figura 5.18 - FFT aplicada à densidade de fluxo magnético no entreferro (W22X 355 4np).

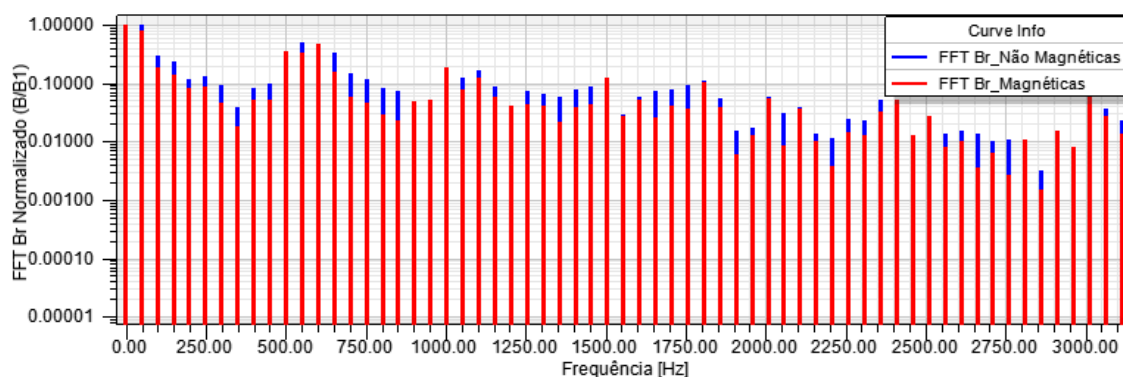


Figura 5.19 - FFT aplicada à densidade de fluxo magnético no entreferro (W22X 355 6np).

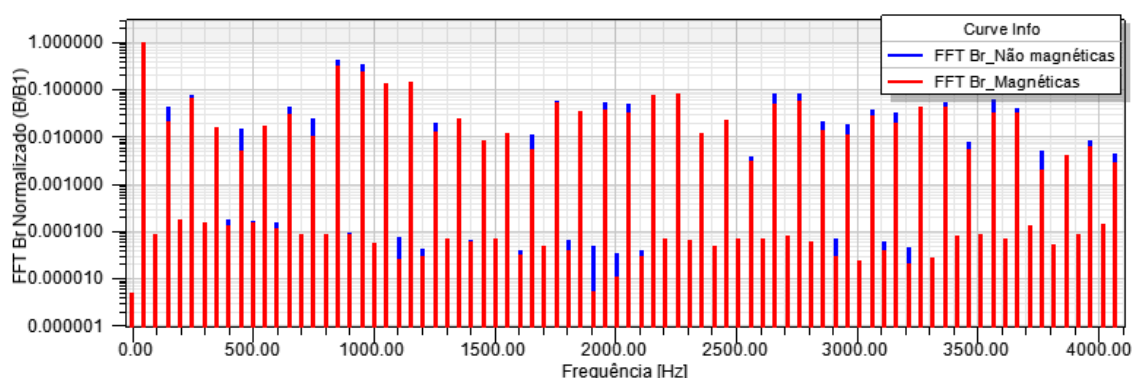


Figura 5.20 - FFT aplicada à densidade de fluxo magnético no entreferro (W22X 450 8np).

## 5.5. Binário eletromagnético

Após uma análise da forma de onda do binário produzido (binário útil) pelo motor, observaram-se pequenas variações no seu valor, que podem ser denominadas de binários pulsatórios, oscilatórios ou ripple do binário. Especificamente, estas são oscilações de alta frequência com origem no efeito de ranhura. Como referido na secção 2.2, o efeito de ranhura pode descrever-se como oscilação do valor da permeabilidade magnética na zona do entreferro, oscilação essa relacionada com a falta de uniformidade da densidade de fluxo magnético, relacionada com a sucessão de dentes e ranhuras do estator e do rotor.

### 5.5.1. Cunhas magnéticas e binários pulsatórios

A escolha do intervalo de tempo para esta análise foi feita tendo em conta o binário útil desenvolvido médio nesse intervalo com cunhas magnéticas e cunhas não magnéticas por forma a garantir situações idênticas de exploração do motor. Esse intervalo é o mesmo considerado para a simulação dos motores em regime estipulado ( $U_N - f_N - I_N$ ), a 100% da carga (secções 2.10 e 4.1.1).

Os valores do binário produzido e comparação com cunhas não magnéticas, para todos os motores, estão contidos na tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Binário eletromagnético médio com cunhas magnéticas e não magnéticas.

W22X 500 2np			W22X 355 4np		
Binário	Cunhas Magnéticas		Binário	Cunhas Magnéticas	
	Sim	Não		Sim	Não
<i>T</i> avg (Nm)	3207	3209	<i>T</i> avg (Nm)	1930	1930
W22X 355 6np			W22X 450 8np		
Binário	Cunhas Magnéticas		Binário	Cunhas Magnéticas	
	Sim	Não		Sim	Não
<i>T</i> avg (Nm)	3210	3210	<i>T</i> avg (Nm)	5134	5135

Garantindo que o binário eletromagnético é semelhante pode-se avaliar as oscilações de alta frequência presentes na sua forma de onda. Para isso, recorreu-se a um indicador do ANSYS Maxwell denominado de *pk2pk*. Este parâmetro retorna o valor médio pico-a-pico da forma de onda de binário produzido, sendo assim, serve de quantificador da magnitude das oscilações verificadas nas figuras 5.21, 5.22, 5.23 e 5.24.

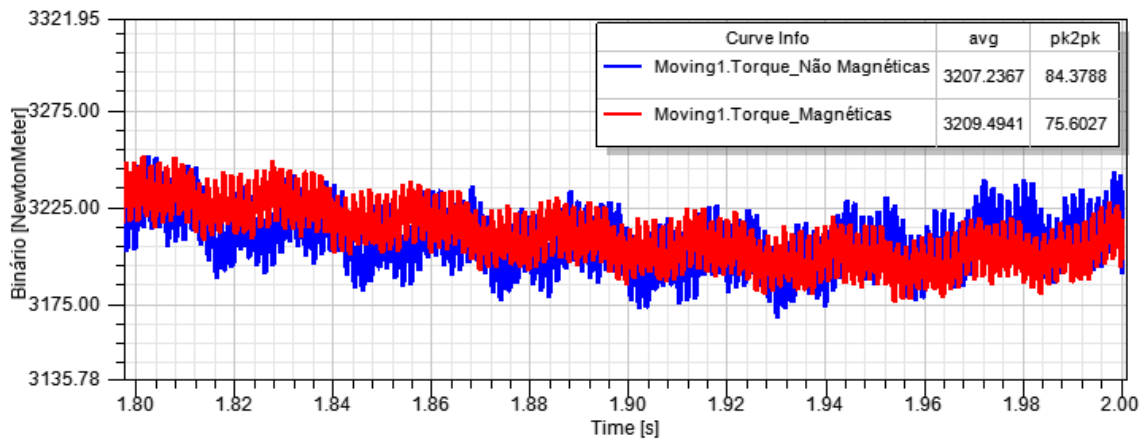


Figura 5.21 - Binários pulsatórios motor W22X 500 2np.

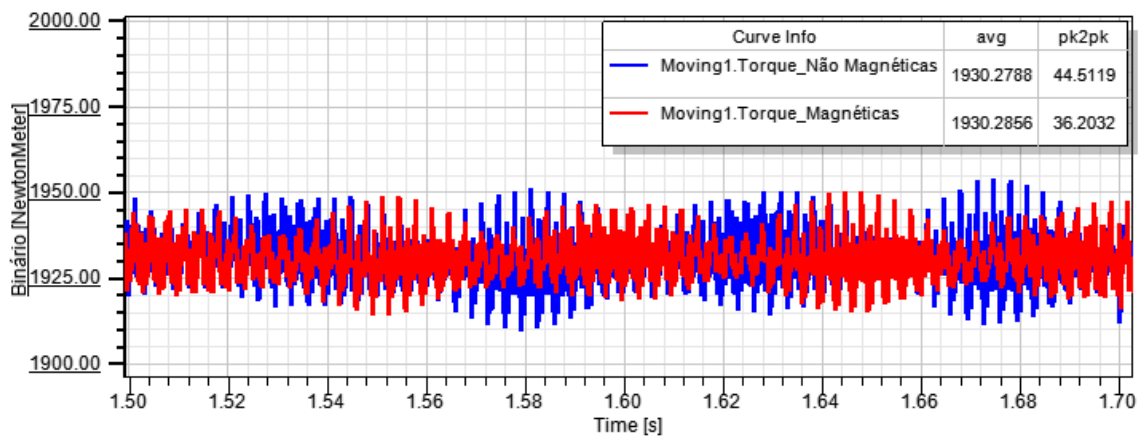


Figura 5.22 - Binários pulsatórios motor W22X 355 4np.

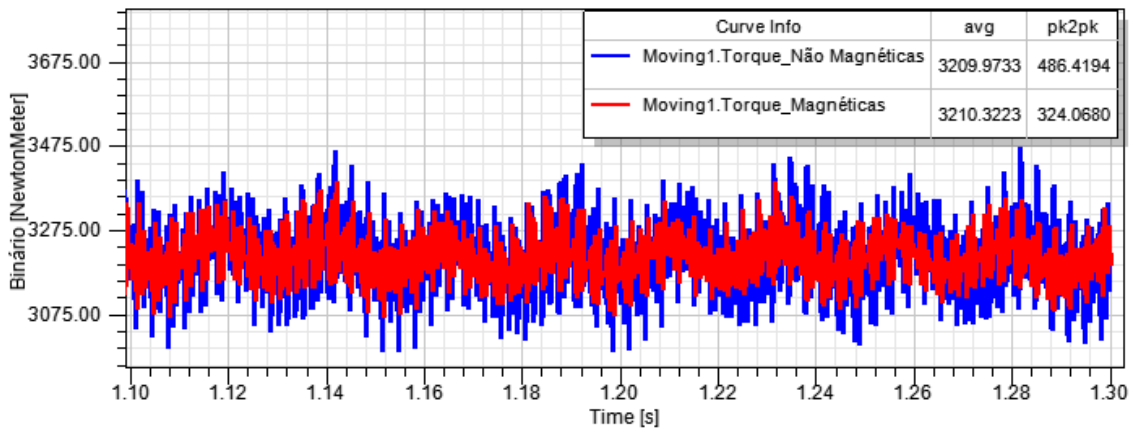


Figura 5.23 - Binários pulsatórios motor W22X 355 6np.

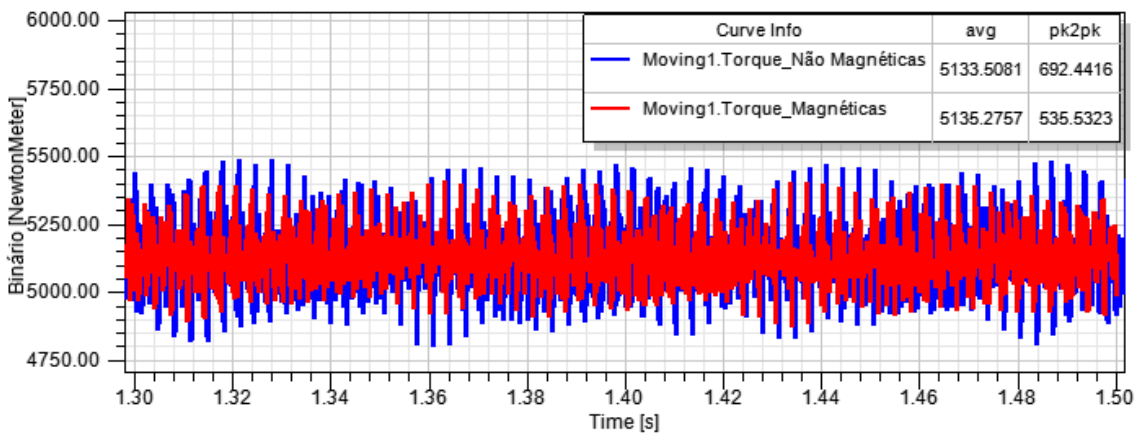


Figura 5.24 - Binários pulsatórios motor W22X 450 8np.

## 5.6. Resultados para perdas e rendimento

Como referido na secção 4.3.4, o rendimento obteve-se a partir de dois métodos distintos dados pelas expressões (4.7) e (4.8). Sendo assim, o valor das perdas e o cálculo do rendimento para cada motor estão organizados neste capítulo por intermédio da tabela 5.7, respeitante a cada motor estudado. Além disso, são confrontados os valores das simulações dos motores, com cunhas magnéticas e com cunhas não magnéticas.

Tabela 5.7 - Cálculo das perdas e do rendimento para os quatro motores ( $U_N - f_N - I_N$ ).

W22X 500 2np			W22X 355 4np		
Perdas e Rendimento	Cunhas Magnéticas		Perdas e Rendimento	Cunhas Magnéticas	
	Sim	Não		Sim	Não
$p_{Js}$ (W)	3584	3620	$p_{Js}$ (W)	2372	2436
$p_{Jr}$ (W)	2977	2918	$p_{Jr}$ (W)	1550	1640
$p_{Fe}$ (W)	4629	4665	$p_{Fe}$ (W)	4353	4495
$P_u$ (W)	1005399	1004697	$P_u$ (W)	301500	301520
$P_{abs}$ (W)	1021848	1019858	$P_{abs}$ (W)	307117	307270
$\eta$ (%) (4.7)	98,4	98,5	$\eta$ (%) (4.7)	98,2	98,1
$\eta$ (%) (4.8)	98,9	98,9	$\eta$ (%) (4.8)	97,3	97,2
$\eta_{N\ ENSAIO}$ (%)	97,8	-	$\eta_{N\ ENSAIO}$ (%)	96,3	-
W22X 355 6np			W22X 450 8np		
Perdas e Rendimento	Cunhas Magnéticas		Perdas e Rendimento	Cunhas Magnéticas	
	Sim	Não		Sim	Não
$p_{Js}$ (W)	4815	4969	$p_{Js}$ (W)	3475	3621
$p_{Jr}$ (W)	2191	2259	$p_{Jr}$ (W)	2892	3865
$p_{Fe}$ (W)	3215	3810	$p_{Fe}$ (W)	3222	3692
$P_u$ (W)	333700	333629	$P_u$ (W)	401448	401320
$P_{abs}$ (W)	343908	344908	$P_{abs}$ (W)	410391	413110
$\eta$ (%) (4.7)	97,0	96,9	$\eta$ (%) (4.7)	97,8	97,2
$\eta$ (%) (4.8)	97,0	96,8	$\eta$ (%) (4.8)	97,7	97,2
$\eta_{N\ ENSAIO}$ (%)	96,0	-	$\eta_{N\ ENSAIO}$ (%)	96,4	-

No anexo C.3 contém os valores das perdas no ferro obtidos em ensaio experimental e um confronto com os valores obtidos em simulação. Mais uma vez, é importante salientar que as perdas mecânicas são incluídas na simulação pelo parâmetro *Damping*, daí não entrarem no cálculo do rendimento (secção 4.3.2). A partir desse parâmetro as perdas mecânicas têm uma influência direta no motor durante a simulação, não entrando num cálculo de rendimento pós-simulação (*post-processing*). As perdas for efeito Joule nos anéis de curto-circuito não foram incluídas na parcela das perdas totais pelas razões mencionadas no anexo G.1.

## 5.7. Corrente estatórica e fator de potência

Novamente, procede-se a uma comparação dos resultados com cunhas magnéticas e cunhas não magnéticas, mas neste caso do fator de potência, por meio da tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Cálculo do fator de potência para os quatro motores ( $U_N - f_N - I_N$ ).

W22X 500 2np				W22X 355 4np			
Fator de Potência		Cunhas Magnéticas		Fator de Potência		Cunhas Magnéticas	
		Sim	Não			Sim	Não
$I_1$ rms (A)	Fase A	108,63	109,17	$I_1$ rms (A)	Fase A	68,04	68,96
	Fase B	108,61	109,16		Fase B	68,06	68,98
	Fase C	108,58	109,10		Fase C	68,01	68,92
$S$ (kVA) (4.9)		1128,641	1134,216	$S$ (kVA) (4.9)		353,519	358,282
$\cos \varphi$ (4.10)		0,905	0,899	$\cos \varphi$ (4.10)		0,869	0,858
W22X 355 6np				W22X 450 8np			
Fator de Potência		Cunhas Magnéticas		Fator de Potência		Cunhas Magnéticas	
		Sim	Não			Sim	Não
$I_1$ rms (A)	Fase A	74,59	75,77	$I_1$ rms (A)	Fase A	47,39	48,38
	Fase B	74,60	75,77		Fase B	47,40	48,39
	Fase C	74,53	75,70		Fase C	47,36	48,34
$S$ (kVA) (4.9)		426,243	432,950	$S$ (kVA) (4.9)		492,422	502,678
$\cos \varphi$ (4.10)		0,807	0,795	$\cos \varphi$ (4.10)		0,833	0,820

## 5.8. Formas de onda da f.e.m. induzida no veio

Como mencionado na secção 2.9, o motor W22X 355 4np será o foco da análise relativa às f.e.m. induzidas no veio. No entanto, o motor W22X 500 2np será utilizado como termo de comparação, dado que também foi ensaiado na prática em termos da f.e.m. induzida.

Sendo assim, neste capítulo demonstram-se os resultados obtidos para a f.e.m induzida (*InducedVoltage(Veio\_Condutor)*) e as formas de onda dos dois motores, tendo em conta os conceitos mencionados na secção 2.6 e seguindo a metodologia explanada na secção 4.5.

De salientar que esta análise é realizada em regime permanente com valores obtidos em simulação para o regime estipulado ( $U_N - f_N - I_N$ ), a 100% da carga (secções 2.10 e 4.1.1). Os intervalos de tempo escolhidos para visualização de cada gráfico foram feitos de forma a melhorar a percepção do formato de cada onda.



### 5.8.1. F.e.m. induzida no veio e excentricidade no motor W22X 500 2np

Considerando os três tipos de excentricidades nula (0%), estática e dinâmica (20%, 50% e 75%), obtiveram-se as formas de onda ilustradas pelas figuras 5.25, 5.26 e 5.27 para a força eletromotriz induzida no veio.

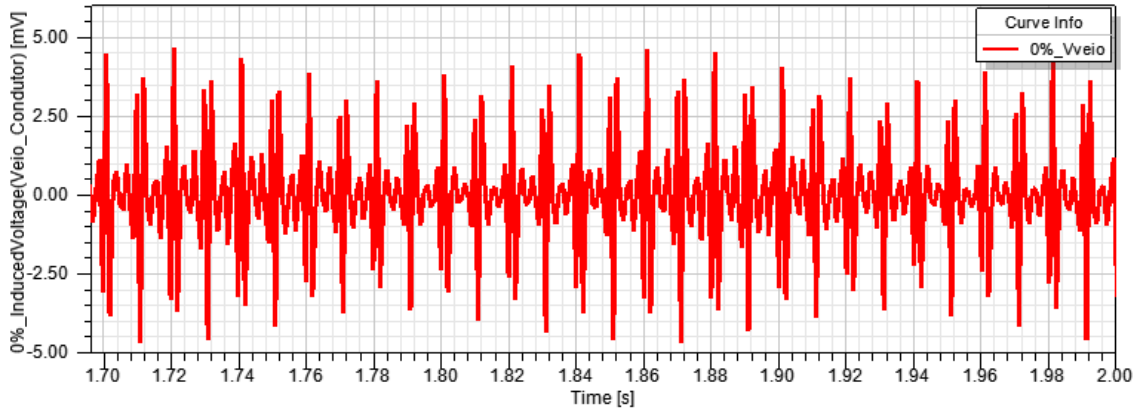


Figura 5.25 - F.e.m. induzida no veio para excentricidade nula (motor W22X 500 2np).

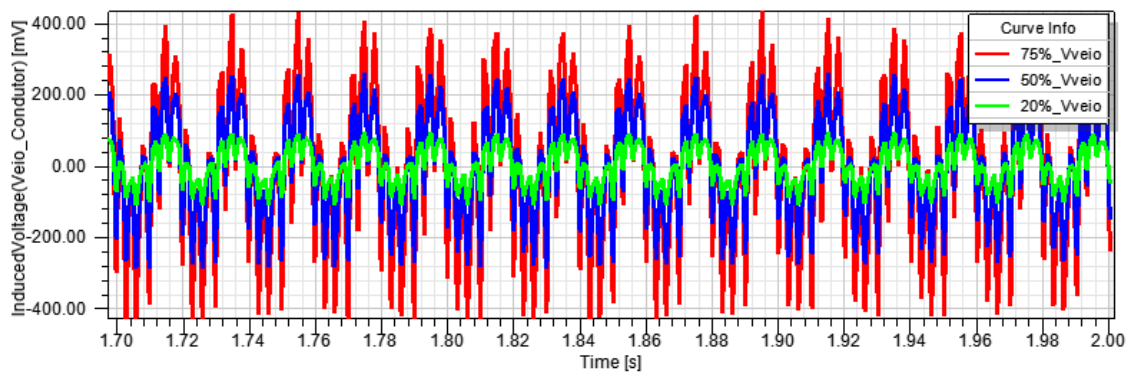


Figura 5.26 - F.e.m. induzida no veio para excentricidade estática (motor W22X 355 2np).

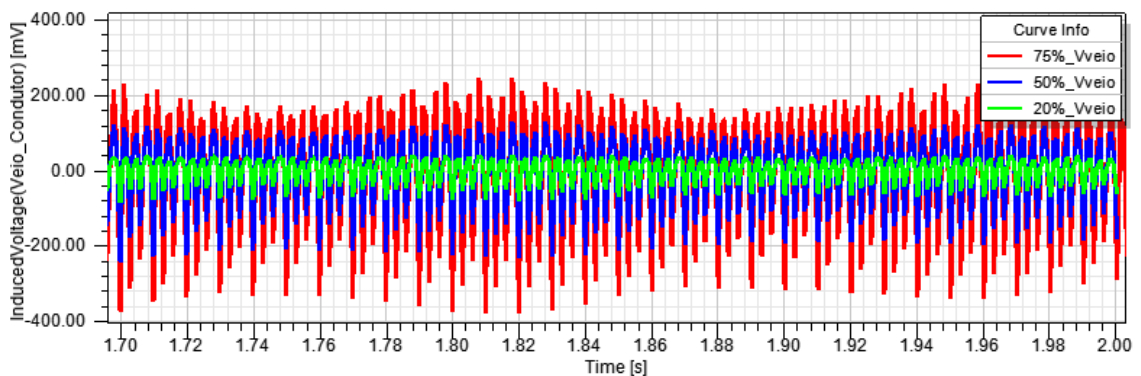


Figura 5.27 - F.e.m. induzida no veio para excentricidade dinâmica (motor W22X 355 2np).

### 5.8.2. F.e.m. induzida no veio e excentricidade no motor W22X 355 4np

Para os mesmos tipos e níveis de excentricidade obtiveram-se as formas de onda para a f.e.m. induzida no veio para o motor W22X 355 4np representadas nas figuras 5.28, 5.29 e 5.30.

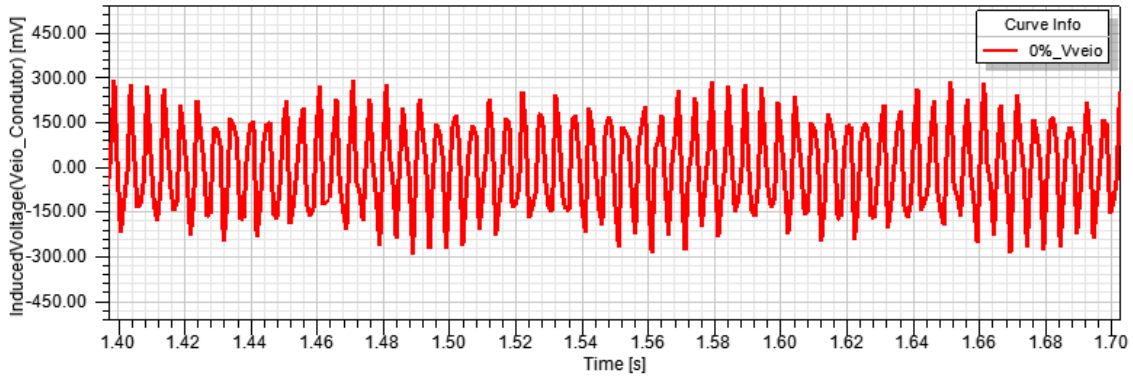


Figura 5.28 - F.e.m. induzida no veio para excentricidade nula (motor W22X 355 4np).

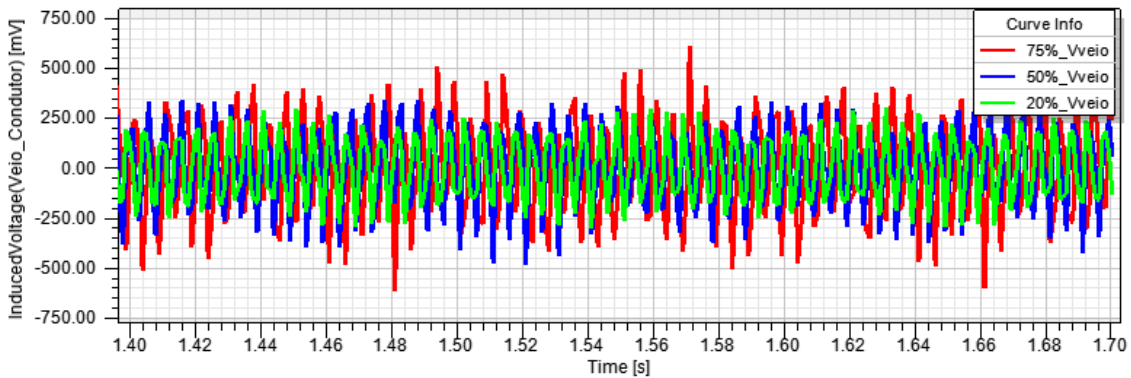


Figura 5.29 - F.e.m. induzida no veio para excentricidade estática (motor W22X 355 4np).

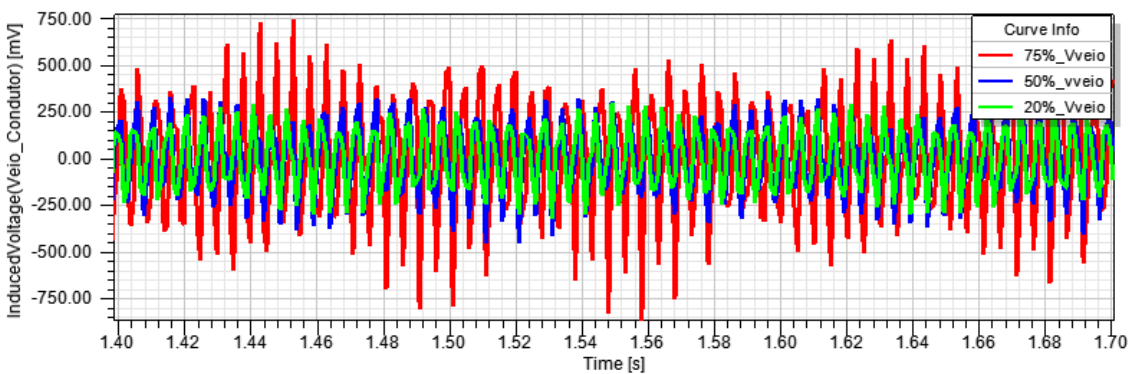


Figura 5.30 - F.e.m. induzida no veio para excentricidade dinâmica (motor W22X 355 4np).

### 5.8.3. Síntese de resultados da f.e.m. induzida no veio

A partir das formas de onda calculou-se o valor eficaz da f.e.m. induzida no veio ( $V_{veio\ rms}$ ) chegando aos resultados da tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Valores obtidos para f.e.m. induzida no veio.

Excentricidade (%)		$V_{veio\ rms}$ (mV)	
		W22X 500 2np	W22X 355 4np
Nula	0	2,0	154,5
	20	58,9	161,1
Estática	50	157,7	204,3
	75	245,8	255,4
Dinâmica	20	38,1	162,8
	50	112,4	199,9
	75	190,6	338,2

Pela observação e análise dos resultados obtidos na tabela 5.9 verifica-se que o motor W22X 355 4np apresenta valores elevados de f.e.m. induzida no seu veio, mesmo para um valor nulo de excentricidade. Por essa razão, na secção 7.2 da aplicação prática será apresentada uma possível solução construtiva para o motor W22X 355 4np com o objetivo de eliminar a f.e.m. induzida no veio ou reduzir para um valor que cumpra a especificação da aplicação.

### 5.8.4. Ensaio experimental da f.e.m. induzida no veio

Como mencionado no início deste capítulo, os motores W22X 500 2np e W22X 355 4np foram ensaiados em termos de f.e.m. induzida no veio. Como complemento à análise efetuada, a figura 5.31 é a forma de onda, do motor W22X 355 4np, proveniente do ensaio ( $U_N - f_N - I_N$ ). Quanto ao motor W22X 500 2np, apenas se sabe que  $V_{veio\ RMS} = 234\ mV$  (valor eficaz diretamente medido nas extremidades do veio do motor).



Figura 5.31 - Forma de onda f.e.m. induzida no veio obtida em ensaio (W22X 355 4np)

### 5.8.5. F.e.m. induzida no veio e cunhas magnéticas

Neste trabalho são abordadas duas temáticas principais: Influência das cunhas magnéticas no funcionamento de um motor e as forças eletromotrizes induzidas no seu veio. Sendo assim, considerou-se pertinente comparar os valores de f.e.m. induzida no veio do motor W22X 355 4np, mas com cunhas não magnéticas, e entender se poderá existir uma relação direta entre os dois conceitos. Disso resultaram os valores da tabela 5.10.

Tabela 5.10 - F.e.m induzida no veio e influência das cunhas magnéticas (motor W22 355 4np).

Excentricidade (%)		$V_{veio} \text{ rms (mV)}$	
		Cunhas Magnéticas	
		Sim	Não
Nula	0	154,5	155,2
Estática	20	161,1	177,2
	50	204,3	230,4
	75	255,4	295,3
Dinâmica	20	162,8	178,5
	50	199,9	221,3
	75	338,2	382,2

Pelos valores da tabela 5.10 vemos que, em todos os casos, a tensão induzida no veio aumenta para o motor com cunhas não magnéticas (com exceção à excentricidade nula). Como o valor da tensão induzida está diretamente relacionado com a variação do fluxo magnético, este aumento da f.e.m. pode ser explicado pela maior variação do fluxo magnético presente no entreferro.

Das ilações retiradas ao longo deste capítulo podemos afirmar que um motor com cunhas não magnéticas terá uma maior distorção na forma de onda que representa o fluxo magnetico no entreferro. Uma onda com maior distorção é sinónimo de um fluxo com maior variação, que terá como consequência direta uma força eletromotriz de maior magnitude induzida ao longo do veio.

# Capítulo 6

## Tratamento de resultados

Neste capítulo procura-se sintetizar e organizar os resultados obtidos no **Capítulo 5** por meio de ilustrações e gráficos simples e intuitivos. A importância deste capítulo deve-se ao elevado volume de informação proveniente das simulações e ao facto da sua organização permitir conclusões mais claras.

Novamente salienta-se o facto dos quatro motores em análise serem especiais, ou seja, são fabricados para aplicações específicas e não fazem parte de linhas *standard* da WEG S.A.. Isto implica que a análise dos resultados obtidos tem de ter em conta todas as características eléctricas e construtivas dos motores, bem como a relação entre todas elas (espessura do entreferro, número de polos, tamanho da carcaça, entre outros).

### 6.1. Distorção do fluxo magnético no entreferro

A taxa de distorção harmónica da forma de onda correspondente à densidade do fluxo magnética está directamente relacionada com a variação da permeabilidade magnética no entreferro. Mais propriamente, à variação entre o seu máximo (entre dois dentes do estator e do rotor) e o seu mínimo (entre duas ranhuras do estator e do rotor) [31]. Além disso, a *THD* depende da frequência dessa variação, que é função do número de ranhuras do estator, ranhuras do rotor e da velocidade de rotação.

Sendo assim, traçou-se o gráfico da figura 6.1, onde se compara a taxa de distorção harmónica total da densidade de fluxo magnético no entreferro, com cunhas magnéticas e não magnéticas, para cada motor.

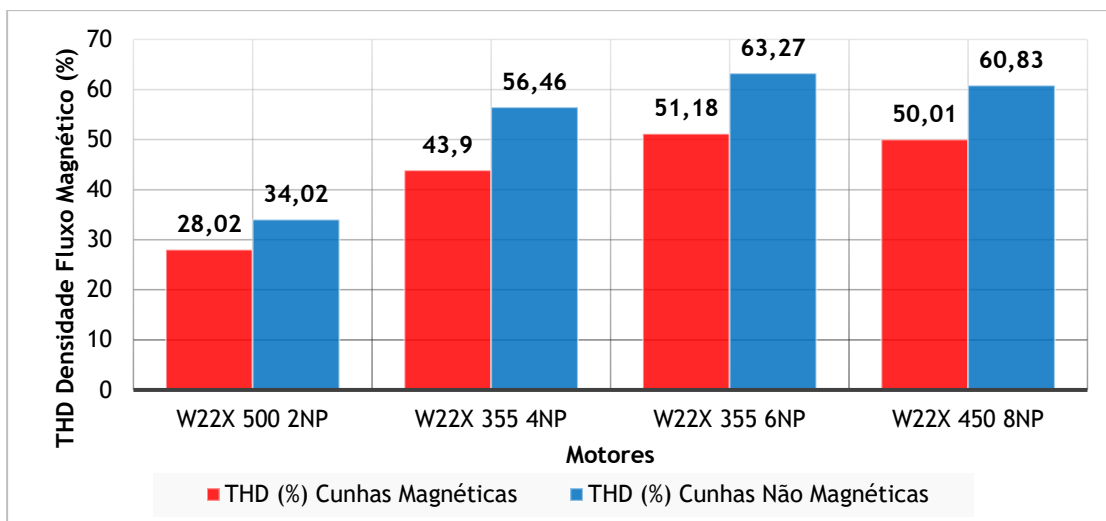


Figura 6.1 - Comparação da THD da densidade de fluxo magnético para cada motor com cunhas magnéticas e não magnéticas.

Por observação da figura 6.1, pode-se afirmar que a taxa de distorção harmónica total é menor quando se utilizam cunhas magnéticas, ou seja, a variação da permeabilidade magnética é menor, ao longo do entreferro. A diminuição dessa variação pode ser definida também como um aumento da uniformidade das linhas de fluxo que atravessam o entreferro, algo que foi constatado nas figuras 5.10 e 5.11 da secção 5.4.1.

## 6.2. Magnitude binários pulsatórios

Como demonstrado na secção 5.5.1, a oscilação do binário foi quantificada através do parâmetro  $pk2pk$ . Por forma a comparar as simulações motores com cunhas magnéticas e não magnéticas, criou-se o gráfico da figura 6.2.

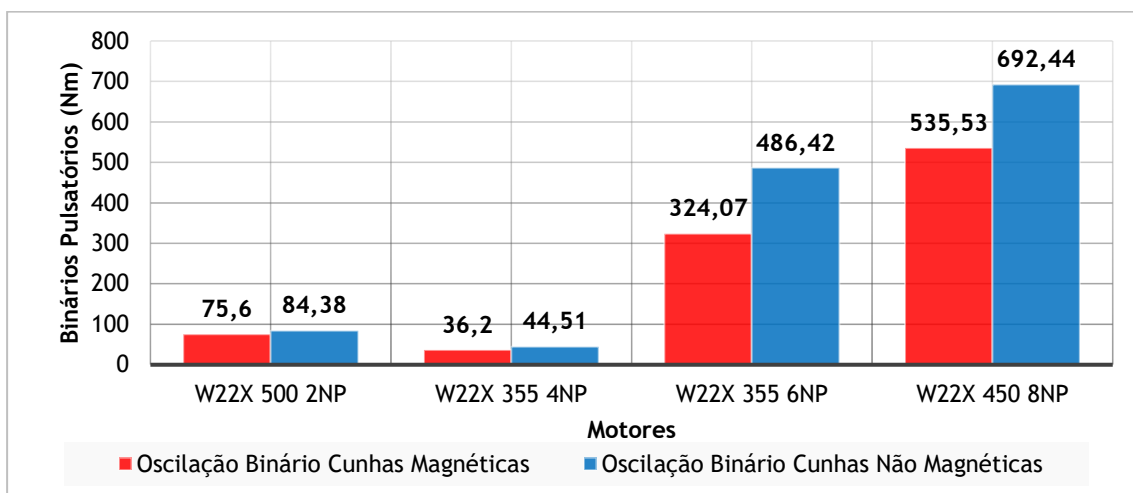


Figura 6.2 - Comparação da magnitude dos binários pulsatórios para cada motor com cunhas magnéticas e não magnéticas.

Nesta análise afirma-se que, para todos os motores, a magnitude das oscilações de alta frequência é menor quando se utilizam cunhas magnéticas. De um modo geral, a utilização de cunhas magnéticas diminui o efeito de ranhura (secção 1.5) e como consequência, diminui o valor das oscilações presentes no binário útil produzido pelo motor.

No trabalho desenvolvido em [32], procede-se à mesma afirmação do parágrafo anterior. No entanto, é dito que o aumento da permeabilidade magnética das cunhas leva a uma diminuição do valor do binário útil que o motor é capaz de produzir (expressões (1.6) e (1.7)). Essa será a maior desvantagem da utilização de cunhas magnéticas e exige um correto dimensionamento das cunhas a inserir nas ranhuras do estator.

Por forma a complementar a análise realizada, quantificou-se a influência das cunhas magnéticas em termos percentuais (figura 6.3), ou seja, qual a diminuição da magnitude das oscilações em comparação com a utilização de cunhas não magnéticas. Dessa forma, pode-se constatar quais os motores que apresentam uma melhor resposta à utilização de cunhas magnéticas em termos destas oscilações de alta frequência.

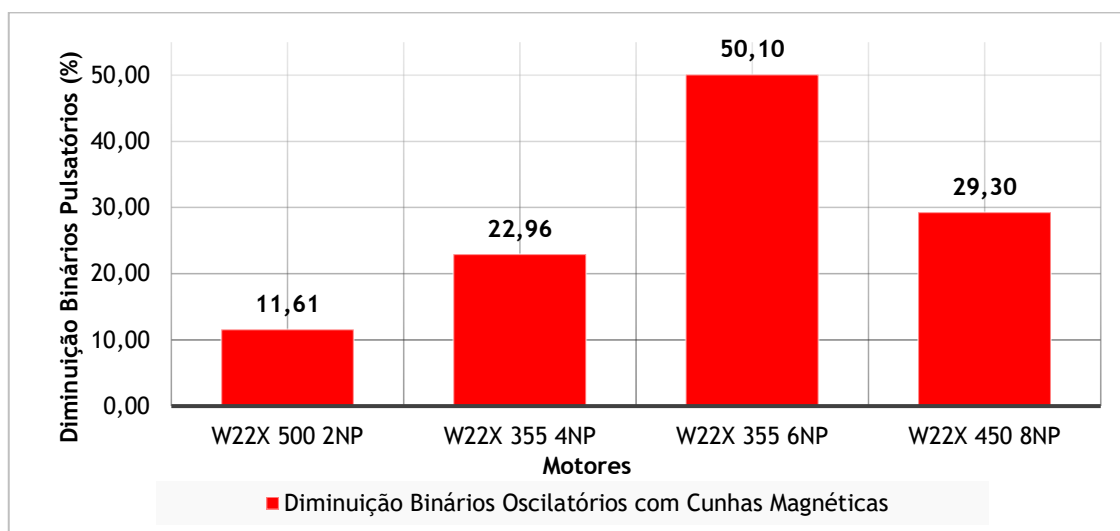


Figura 6.3 - Diminuição da magnitude dos binários oscilatórios utilizando cunhas magnéticas.

### 6.3. Perdas

Organizando os resultados da tabela 5.7, traçaram-se três gráficos onde se comparam perdas no ferro, perdas por efeito joule e perdas totais com cunhas magnéticas e não magnéticas para cada um dos motores. Todos tipos de perdas analisados apresentam um acréscimo quando se simulam os motores com cunhas não magnéticas nas ranhuras estatóricas, por essa razão, os gráficos (figuras 6.4, 6.5 e 6.7) representarão esse facto como uma variação percentual de aumento. Essa representação permite também quantificar a influências das cunhas magnéticas em cada motor tendo em conta cada tipo de perda considerado.

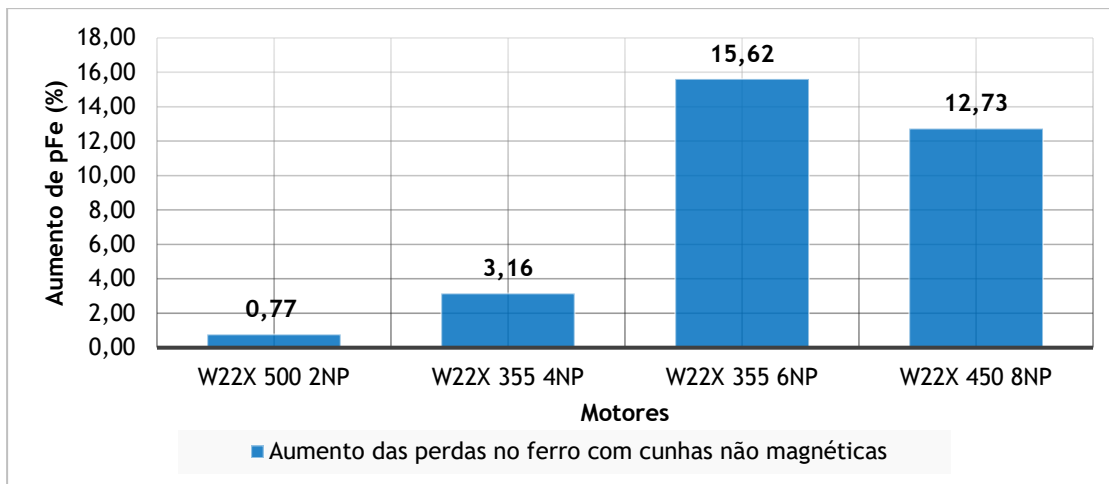


Figura 6.4 - Aumento das perdas no ferro com cunhas não magnéticas.

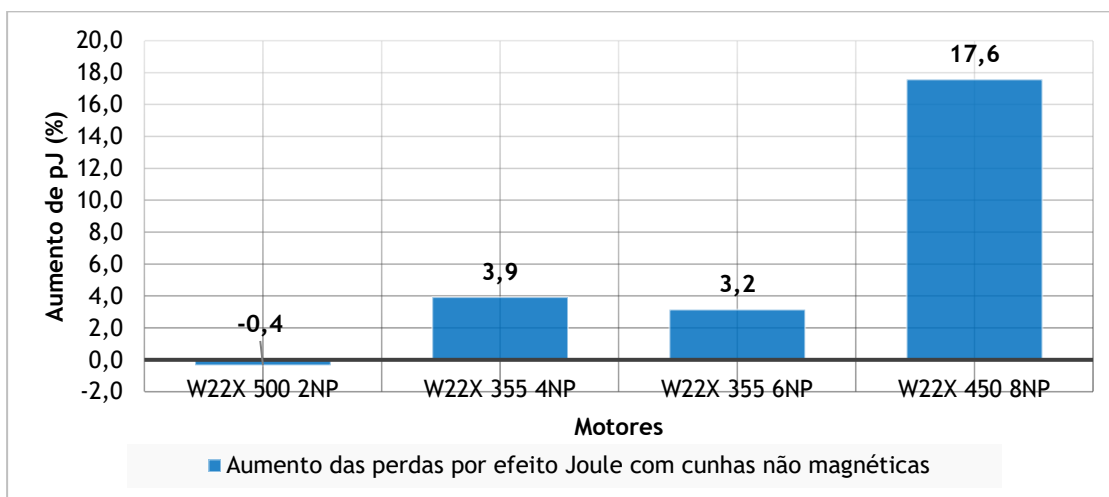


Figura 6.5 - Aumento das perdas por efeito Joule com cunhas não magnéticas.

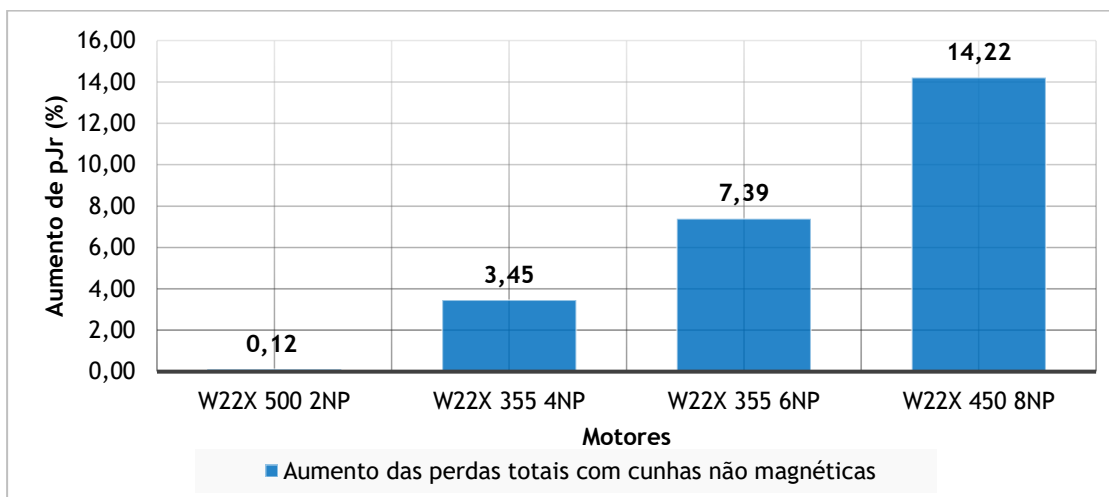


Figura 6.6 - Aumento do valor de perdas total com cunhas não magnéticas.



A utilização de cunhas não magnéticas provoca um aumento da corrente que percorre os enrolamentos do estator. Sendo que as perdas por efeito Joule são função da corrente isso implica um consequente aumento das perdas por efeito Joule estatóricas. Quanto às perdas por efeito Joule no rotor também irão aumentar. Neste caso, do verificado na secção 6.1 deste capítulo, o valor de indução magnética no entreferro é maior para cunhas não magnéticas. Isso provocará um aumento da corrente induzida nas barras do rotor. Da mesma forma, o aumento da corrente que percorre as barras rotóricas e anéis de curto-circuito levará a um acréscimo do valor das perdas por efeito Joule no rotor.

Uma das explicações para o aumento das perdas totais, além do aumento das perdas por efeito Joule e de perdas no ferro, é o facto da utilização de cunhas magnéticas estar fortemente relacionado com as perdas adicionais (stray load losses) referidas na secção 4.3 e fundamentadas em [30]. Estas têm origem em pulsações de fluxo produzidas por variações de relutância magnética ao longo do entreferro, por isso, relacionam-se com a utilização de cunhas magnéticas (e o seu valor de permeabilidade magnética) a partir do exposto nas secções 6.1 e 6.2.

## 6.4. Rendimento

A partir dos resultados da secção anterior, espera-se que o rendimento apresente valores mais altos nas simulações dos motores com cunhas magnéticas. Sendo assim, a variação do rendimento está ilustrada na figura 6.7 como aumento do rendimento quando se utilizam cunhas magnéticas.

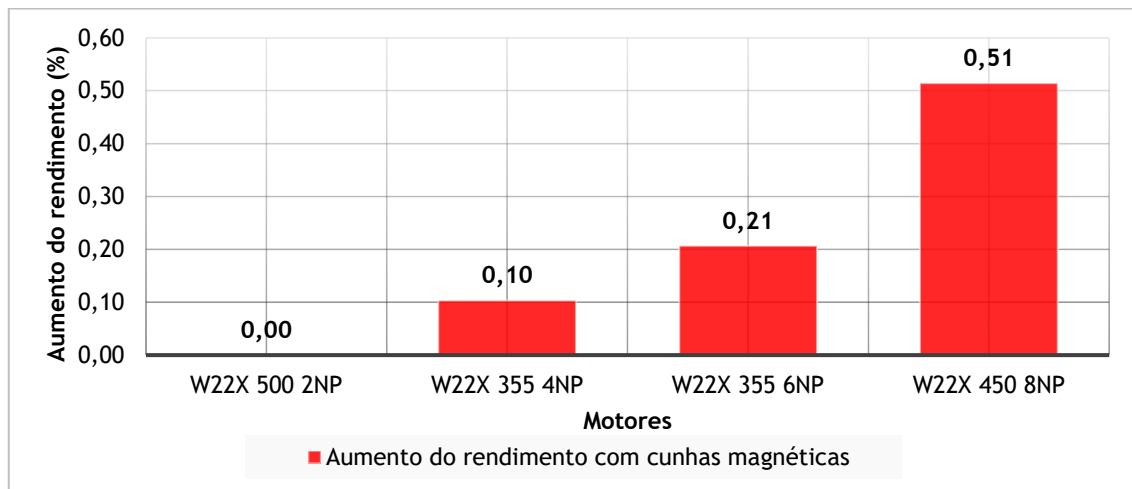


Figura 6.7 - Aumento do rendimento com cunhas magnéticas.

## 6.5. Corrente de arranque

Analisando as formas de onda e resultados da secção 5.3.1, verificou-se que a corrente durante o arranque do motor é maior quando se utilizam cunhas não magnéticas, como fundamentado teoricamente na secção 1.5.3, pela expressão (1.9).

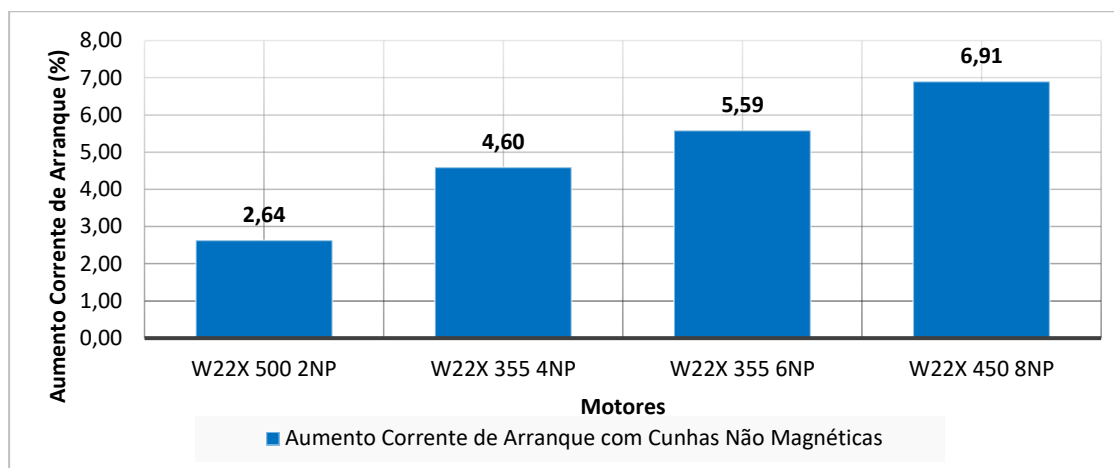


Figura 6.8 - Aumento da corrente de arranque de cada motor com cunhas não magnéticas.

## 6.6. Fator de potência

O tipo de cunha utilizado nas ranhuras do estator demonstra ter uma grande influência no fator de potência. Sendo assim, o valor do fator de potência para os quatro motores em estudo em termos de aumento quando se utilizam cunhas magnéticas através da figura 6.9.

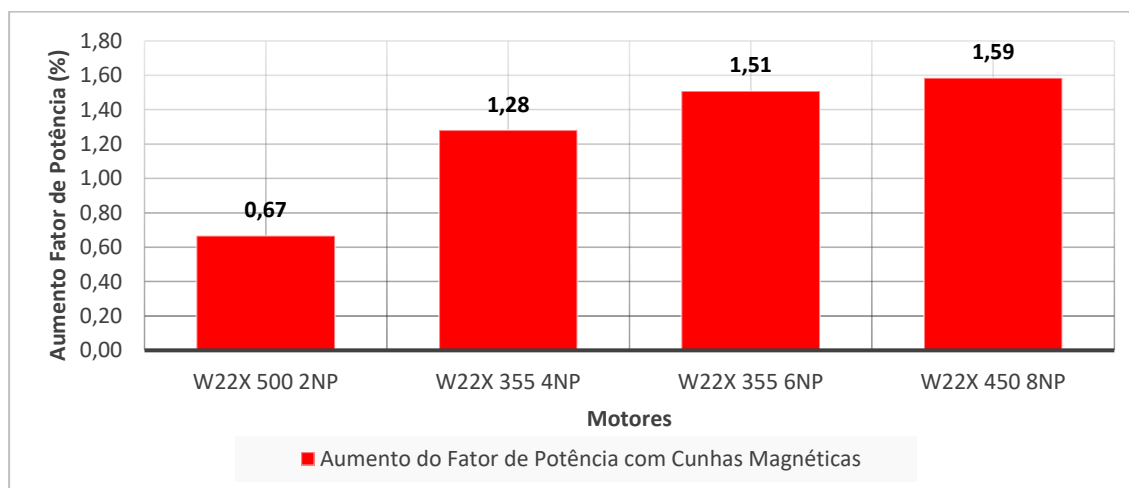


Figura 6.9 - Aumento do fator do potência de cada motor com cunhas magnéticas.

Do referido em [33] e pela análise realizada neste trabalho, pode afirmar-se que a utilização de cunhas magnéticas provoca uma diminuição da corrente de magnetização com um consequente melhoramento do fator de potência.

## 6.6. Excentricidade e f.e.m. induzida no veio

Os gráficos das figuras 6.10 e 6.11 simplificam a leitura da tabela 5.9, onde se verifica que a f.e.m. induzida no veio é função do aumento de excentricidade.

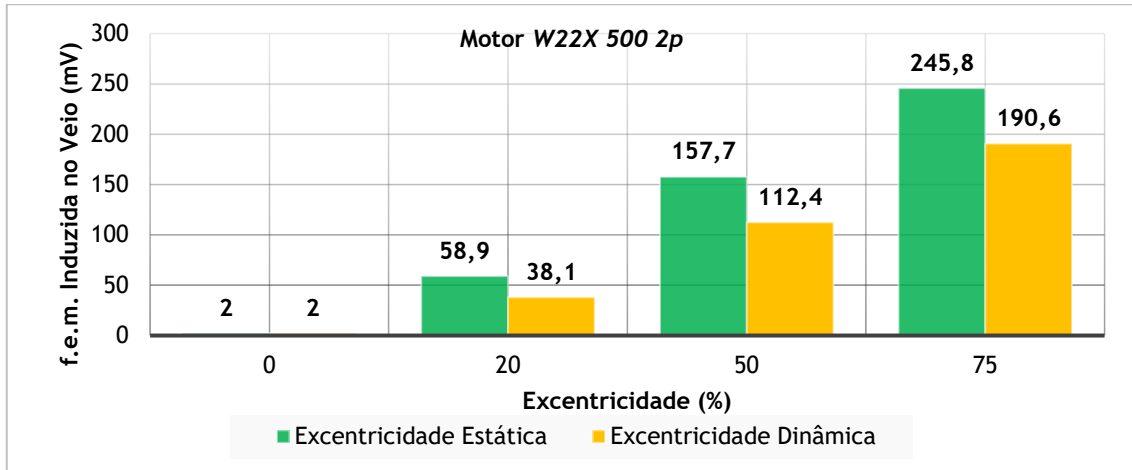


Figura 6.10 - F.e.m. induzida no veio para excentricidades estática e dinâmica (W22X 500 2np).

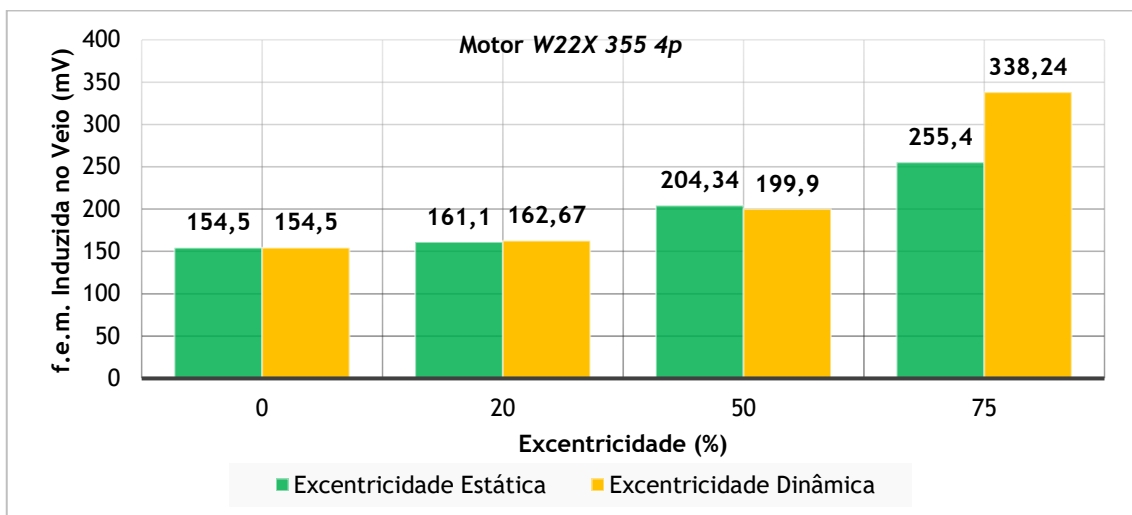


Figura 6.11 - F.e.m. induzida no veio para excentricidades estática e dinâmica (W22X 355 4np).

## 6.7. F.e.m. induzida no veio e cunhas magnéticas

Dos resultados da tabela 7.10 relativos ao motor W22X 355 4np, afirma-se que a f.e.m. induzida no veio apresenta valores mais altos quando se procede a uma simulação com cunhas não magnéticas.

Acrescentando a isso uma análise dos gráficos das figuras 6.12 e 6.13, pode-se constatar que quanto maior é a excentricidade, maior é a variação do valor da f.e.m. induzida no veio, ou seja, esse aumento não linear com o aumento da excentricidade. Como exemplo, a f.e.m. induzida no veio para uma excentricidade estática de 75%, é 15% maior quando se utilizam cunhas não magnéticas, em comparação com a tipologia original com cunhas magnéticas.

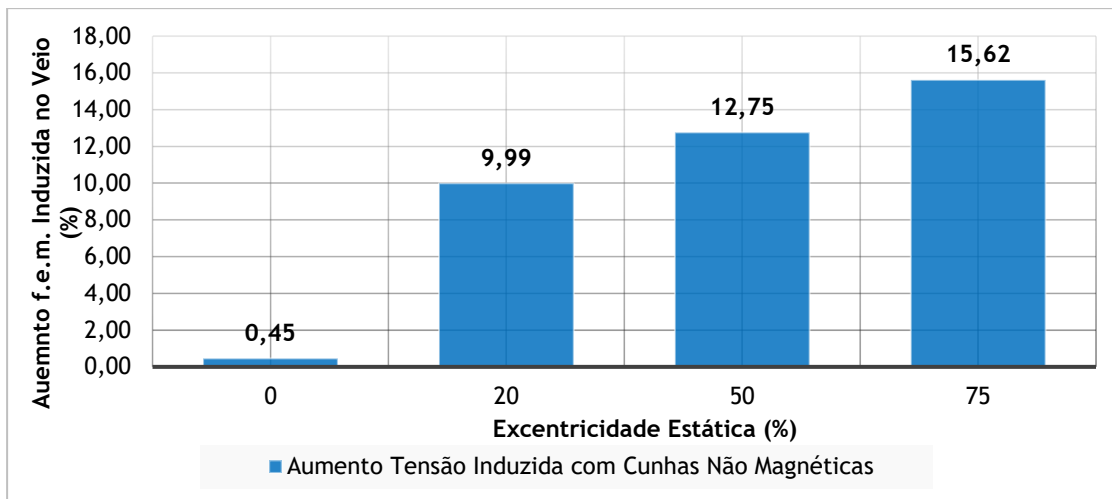


Figura 6.12 - Aumento da f.e.m. induzida no veio com cunhas não magnéticas para excentricidade estática (*W22X 355 4np*).

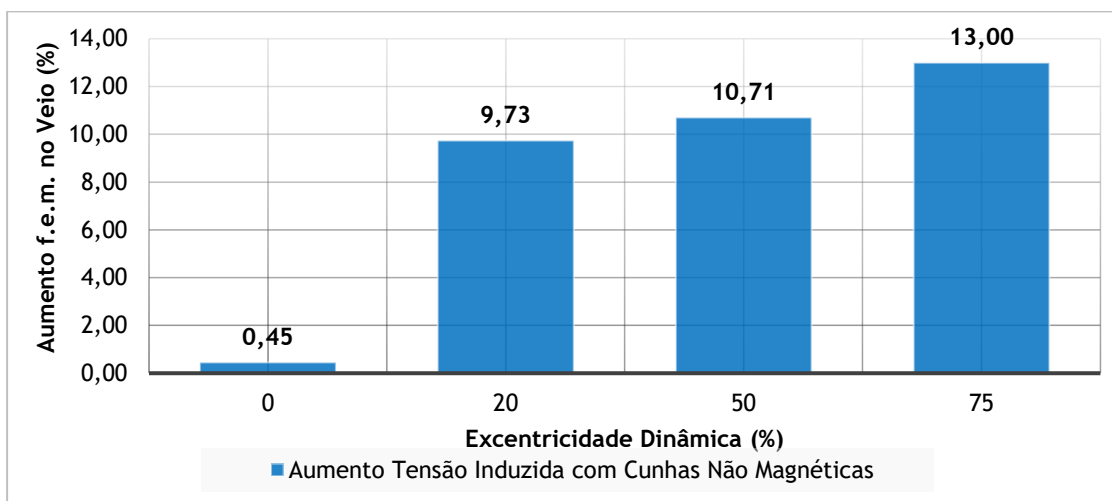


Figura 6.13 - Aumento da f.e.m. induzida no veio com cunhas não magnéticas para excentricidade dinâmica (*W22X 355 4np*).

# Capítulo 7

## Aplicação prática

Este capítulo contém a aplicação prática, em dois motores WEG, das duas temáticas principais desenvolvidas ao longo deste trabalho: influência de cunhas magnéticas no desempenho de um motor de indução e f.e.m. induzida no veio com origem em excentricidade.

Relativamente à influência das cunhas magnéticas, o motor em foco é o *W22X 500 2np*, e o objetivo proposto inicialmente seria tomar uma decisão em relação à possibilidade de trocar o tipo de cunhas deste motor de magnéticas para não magnéticas e, se possível, avaliar economicamente essa alternativa.

Quanto às f.e.m.s. induzidas no veio, para o *W22X 355 4np* decidir se é viável a construção de um novo rotor com um número de ranhuras diferentes com o objetivo de eliminar ou reduzir o valor destas tensões por forma a cumprirem as especificações da sua aplicação. Do mesmo modo, se essa solução construtiva for aceitável, proceder-se a uma avaliação económica.

### 7.1. Motor W22X 500 2np e cunhas magnéticas

#### 7.1.1. Desempenho do motor com cunhas não magnéticas

O motor em questão, *W22X 500 2np*, foi utilizado como exemplo nos diferentes capítulos ao longo do trabalho. Sendo assim, todos os fenómenos importantes já foram analisados bem como obtidos todos os resultados.

O que se fará neste ponto através da tabela 7.1 é sintetizar todos os resultados e proceder assim à tomada de decisão mencionada em relação ao tipo de cunhas, ou seja, qual será o desempenho do motor com cunhas não magnéticas. O termo “variação” na tabela 7.1 representa qual será o aumento ou diminuição de cada fator, em percentagem.

Tabela 7.1 - Fatores para decisão de utilização de cunhas não magnéticas.

Fatores de Decisão	Cunhas Magnéticas		Variação (%)
	Sim	Não	
THD Densidade Fluxo Entreferro (%)	28,02	34,02	+ 21,41
Magnitude Binários Pulsatórios (Nm)	75,6	84,38	+ 11,61
Fator de Potência	0,905	0,899	- 0,01
Corrente de Arranque (A)	952,3	977,4	+ 2,64
Perdas Totais (kW)	11,47	11,54	+ 0,58
Rendimento (%)	98,9	98,9	0

Após esta síntese afirma-se que a utilização de cunhas não magnéticas neste motor é viável. Apesar de todos os parâmetros piorarem, com exceção do binário máximo, considera-se que as alterações não irão afetar negativamente o desempenho e eficiência do motor. Como se pode constatar pela tabela 7.1, o valor do rendimento é o mesmo nas duas situações.

De facto, esta análise vai de encontro ao estudo efetuado ao longo do trabalho. Para motores de indução com um baixo número de polos (dois) e grande comprimento do entreferro (4,25 mm), a influência das cunhas magnéticas é praticamente nula nas características terminais do motor e no seu rendimento.

### 7.1.2. Avaliação económica

Depois de concluir que neste motor poderá optar-se por fabricar o seu estator com cunhas não magnéticas nas ranhura foi possível proceder a uma avaliação económico relativa à possível poupança do custo de fabrico do motor.

Como mencionado na secção 2.11.6, as cunhas magnéticas utilizadas são compostas por fibra de vidro, limalha de ferro e resina epóxi modificada. Para cunhas não magnéticas o material será apenas fibra de vidro que se traduzirá numa redução de 70% do custo das cunhas aplicadas nas ranhuras estatóricas neste motor.

## 7.2. Motor W22X 355 4np e f.e.m. induzida no veio

Tal como já referido no presente trabalho, neste capítulo procede-se à descrição de uma proposta de solução construtiva para um dos motores WEG.

O motor W22X 355 4np após ter sido fabricado e ensaiado apresentou um alto valor de f.e.m. induzida. Na verdade, existem motores com forças eletromotrizes induzidas no veio com valores bem mais elevados, no entanto, é necessário ter em conta a aplicação específica para o qual foi projetado, ou seja, o motor apresenta um bom funcionamento, mas exige-se um menor valor de f.e.m. induzida no seu veio, tendo em conta a sua aplicação.

Uma das soluções possíveis, indicada na secção 2.7.3, para este problema, sem alterar o estado atual do motor, seria optar por rolamentos isolados. No entanto, neste trabalho estudou-se a possibilidade de construir um novo rotor, com um número de ranhuras diferentes. Esta opção poderá tornar-se viável na medida em que poderá evitar que o mesmo problema ocorra em projetos futuros. Melhor dizendo, estará a atuar-se diretamente no processo e não implementar apenas uma solução pós-fabrico com um custo acrescido.

A combinação de ranhuras do estator e do rotor será representada por  $EN1/RN2$  em que  $N1$  refere-se ao número de ranhuras estatóricas e  $N2$  ao número de ranhuras rotóricas.

### 7.2.1. Combinação de ranhuras e resultados para f.e.m. induzida no Veio

O motor W22X 355 4np tem E48/R38 como tipologia original. Sendo assim, estudaram-se duas alternativas: E48/R40 e E48/34, que foram combinações propostas pela WEG S.A.

A metodologia adotada é igual à explicada na secção 4.5, ficando possível traçar três gráficos (figuras 7.1, 7.2 e 7.3) que contêm uma comparação da tensão induzida no veio para as três combinações consideradas em função dos seguintes tipos de excentricidade: nula (0%), estática (50%) e dinâmica (50%). Neste ponto apenas se considerou 50% para nível de excentricidade na medida em que se considera ser um valor intermédio que permite uma análise qualitativa do comportamento do motor consoante cada combinação (com  $U_N - f_N - I_N$ ).

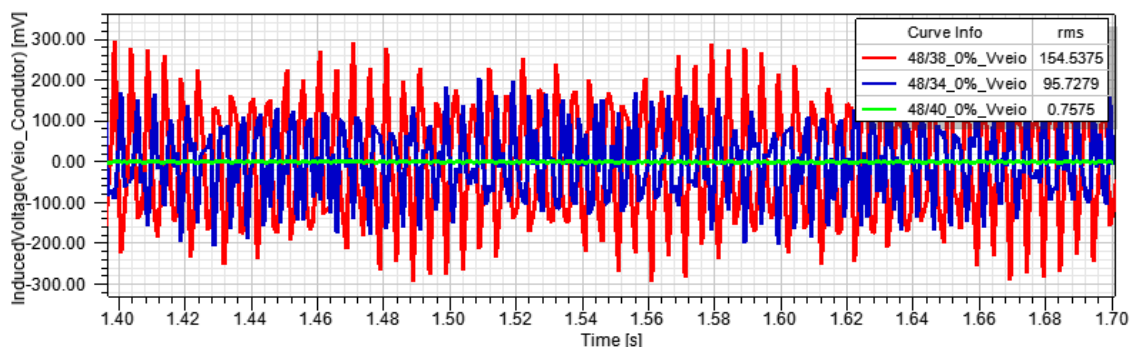


Figura 7.1 - F.e.m. induzida no veio em função da combinação do número de ranhuras, com excentricidade nula.

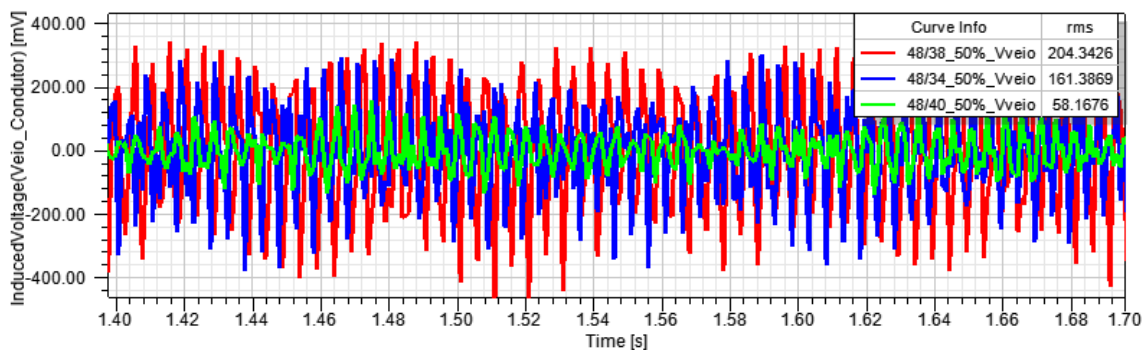


Figura 7.2 - F.e.m. induzida no veio em função da combinação do número de ranhuras, com excentricidade estática (50%).

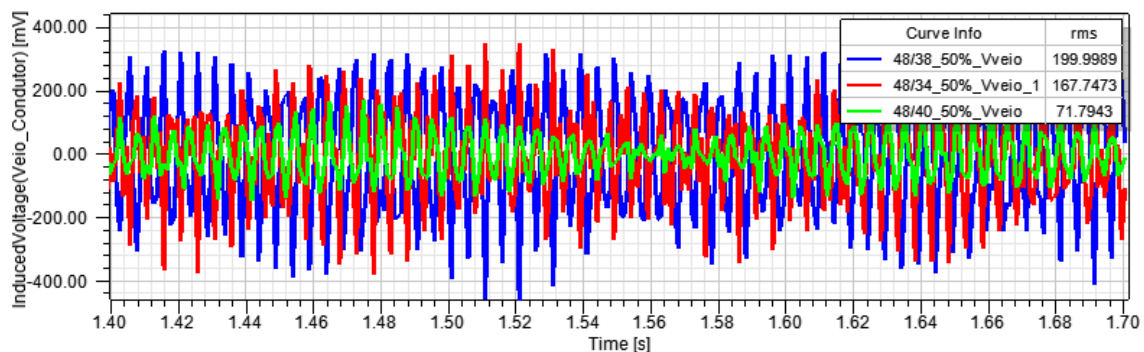


Figura 7.3 - F.e.m. induzida no veio em função da combinação do número de ranhuras, com excentricidade dinâmica (50%).

A tabela 7.2 resume os valores obtidos nas simulações e a compara as três combinações.

Tabela 7.2 - Resultados f.e.m. induzida no veio e combinação de ranhuras.

Excentricidade (%)		$V_{veio}$ rms (mV)		
		E48/R38	E48/R34	E48/R40
Nula	0	154,5	95,7	0,8
Estática	50	204,3	161,4	58,2
Dinâmica	50	199,9	167,8	71,8

Apenas pela análise das f.e.m.s. induzidas em função da excentricidade, a combinação E48/R40 é a que apresenta os melhores resultados. Mesmo com um nível de excentricidade de 50%, a combinação E48/R40 apresenta um valor eficaz de f.e.m. induzida menor comparativamente com a da combinação original E48/R38 com excentricidade nula.



## 7.2.2. Restrições relativas aos modos de vibração

Alterar a combinação de ranhuras do estator e do rotor poderá ser viável em termos de forças eletromotrizes induzidas no veio. No entanto, é necessário ter em conta a influência dessa mudança na intensidade do ruído magnético gerado pelo motor [22] [26].

Então, se queremos evitar os modos de vibração 2, 3 e 4 (secção 1.8.2) para o motor de 4 polos ( $p = 2$ ) em questão, temos que garantir as restrições (3.2), (3.3) e (3.4), resumidas na tabela 7.3.

Tabela 7.3 - Restrições para combinação de ranhuras relativas aos modos de vibração.

Combinação Ranhuras	$r$	$ N_1 - N_2 $ C	$2p + r$ A	$2p - r$ B	$C \neq r$	$C \neq A$	$C \neq B$
E48/R38	2, 3 e 4	10	6, 7, 8	2, 1, 0	✓	✓	✓
E48/R40		8			✓	x	✓
E48/R34		14			✓	✓	✓

## 7.2.3. Análise do ruído magnético combinação E48/R40

Constatou-se que a combinação E48/E40 é a mais vantajosa em termos de f.e.m. induzida. No entanto, no capítulo anterior foi possível concluir que esta não cumpre uma das três restrições dos modos de vibração ( $C \neq A$ ), isso poderá traduzir se num ruído magnético com uma magnitude que impossibilitará a construção do novo rotor.

Por essa razão, procedeu-se à análise do ruído magnético, confrontando os resultados da combinação original E48/R38 com a E48/R40. Na figura 7.4 pode observar-se o valor do ruído global em dB(A), nível de pressão sonora, e um espectro com os níveis de ruído e as frequências às quais os mesmos são gerados. O ruído global lê-se no termo *Ruído Global (1m)* e é medido a um metro de distância com uma tolerância de +3dB(A).

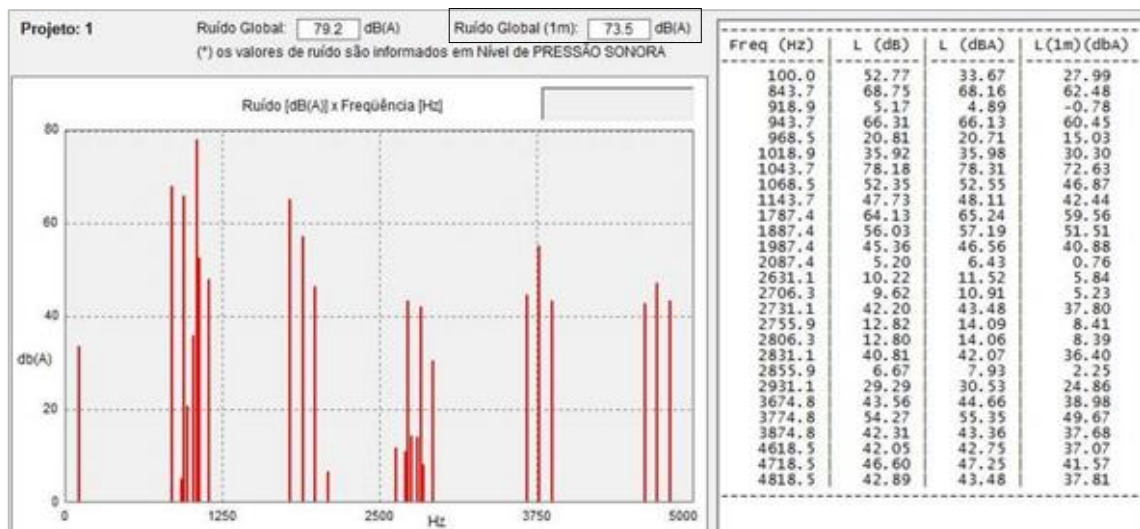


Figura 7.4 - Cálculo ruído magnético do motor W22X 355 4np com E48/R38.

De ensaio, o motor W22X 355 4np apresenta um valor de 76 db(A) e pela análise efetuada obteve-se um valor de 73.5 db(A). Este resultado serve de validação e permite agora aplicar o mesmo método, mas agora alterando a combinação das ranhuras para E48/R40. Dito isto, a figura 7.5 contém a análise do ruído magnético nas novas condições.

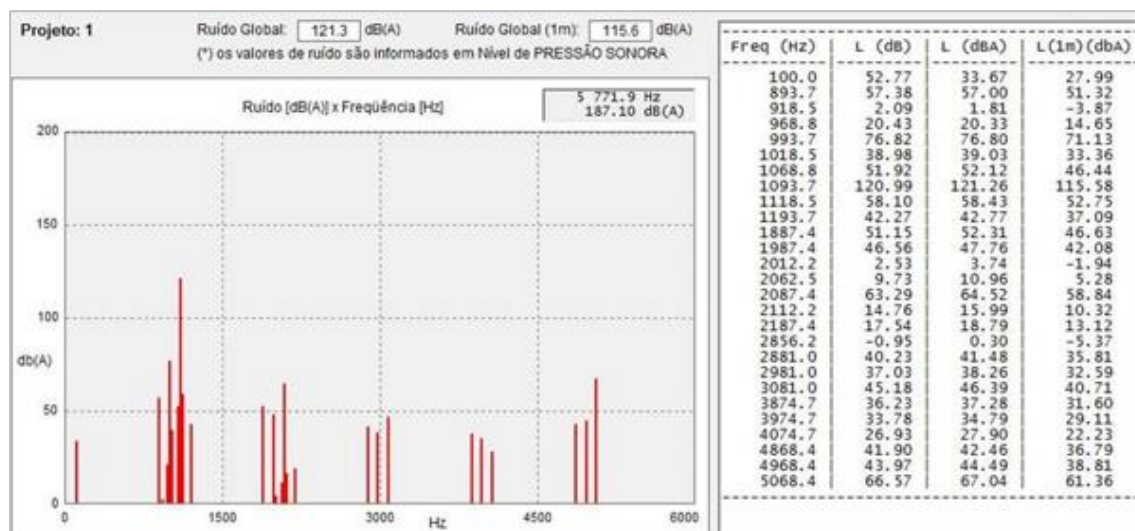


Figura 7.5 - Cálculo ruído magnético do motor W22X 355 4np com E48/R40.

O software utilizado apenas procede a uma análise qualitativa do ruído magnético. Melhor dizendo, observa-se que a alteração da combinação de ranhuras estator/rotor para 48/40 é prejudicial em termos de ruído magnético, com um aumento de 42 dB (A), aproximadamente.

No entanto, a experiência prática diz que ruído poderá não piorar com esta magnitude, dado que depende de inúmeros fatores. Um deles é o comportamento/reposta da carcaça em relação ao ruído magnético.

Um procedimento possível para entender esse comportamento seria realizar uma medição do espectro na prática e determinar qual a frequência que está a originar maiores problemas em termos de ruído, mais propriamente, se está próxima dos 1000 Hz (valor crítico em termos de ruído magnético determinado pelo software).

#### 7.2.4. Validação do modelo com combinação E48/R40

Além da análise ao ruído magnético efetuada no ponto anterior é necessário garantir que as características principais do motor permanecem muito próximas das obtidas em ensaio para o regime estipulado para o motor com rotor E48/R38.

Sendo assim, procede-se a uma comparação semelhante à efetuada na secção 5.1, a partir das tabelas 7.4, 7.5, 7.6 e 7.7 (simulação em regime permanente com  $U_N - f_N - I_N$ ). Os valores de ensaio em regime estipulado das tabelas são referentes ao motor com combinação E48/R38.

Tabela 7.4 - Tensões e correntes obtidos na simulação para o motor W22X 355 4np com E48/R40.

Tensões e Correntes		Simulação Regime Permanente	Ensaio Regime Estipulado
Tensão de Fase	$V_1$ rms (V)	1905	1905
Corrente de Fase	$I_1$ rms (A)	Fase A	69,47
		Fase B	69,46
		Fase C	69,02
			64,90

Tabela 7.5 - Binário e velocidade obtidos na simulação do motor W22X 355 4np com E48/R40.

Binário e Velocidade		Simulação Regime Permanente	Ensaio Regime Estipulado
Binário	$T$ avg (Nm)	1929	1921
Velocidade de Rotação	$n$ avg (rpm)	1491,49	1491,00

Tabela 7.6 - Valores de potências obtidos na simulação do motor W22X 355 4np com E48/R40.

Potências		Simulação Regime Permanente	Ensaio Regime Estipulado
Potência Absorvida	$P_{abs}$ avg (kW)	305,679	309,400
Potência Útil	$P_u$ avg (kW)	301,242	300,000

Tabela 7.7 - Valor do fator de potência obtido na simulação do motor W22X 355 4np com E48/R40.

Fator de Potência		Simulação Regime Permanente	Ensaio Regime Estipulado
Potência Aparente	$S$ (kVA) (4.9)	360,169	337,220
Fator de Potência	$\cos \varphi$ (4.10)	0,849	0,840

### 7.2.5. Avaliação económica

Através da análise efetuada neste capítulo considera-se viável a construção de um novo rotor protótipo com 40 ranhuras, alternativa essa que não necessita de rolamentos isolados. Tendo isso em conta, um rolamento não isolado apresenta um custo 85% menor relativamente ao isolado.

É de referir que a construção do novo protótipo foi aprovada pela WEG S.A., sendo que análise efetuada neste trabalho foi um dos elementos que sustentou essa proposta.



# Capítulo 8

## Conclusões e trabalho futuro

Este capítulo apresenta as principais conclusões resultantes do trabalho realizado e possíveis desenvolvimentos a serem efetuados no futuro. Além disso, será feita uma crítica às metodologias e resultados obtidos.

### 8.1. Conclusões

Inicialmente propôs-se aprofundar o conhecimento relativo à influência de cunhas magnéticas no desempenho de um motor de indução e o aparecimento de f.e.m. induzida no veio com origem em excentricidade. Para isso, definiram-se métodos de análise utilizando o *ANSYS Maxwell*, que foram aplicados a quatro modelos de motores da WEG S.A..

Em primeiro lugar, da análise efetuada, a inserção de cunhas magnéticas nas ranhuras do estator demonstrou ser vantajosa em inúmeros aspetos relativos ao funcionamento de um motor de indução:

- Diminuição da taxa de distorção harmónica total do fluxo magnético no entreferro;
- Diminuição da magnitude de oscilações de alta frequência do binário útil. Isso terá uma influência direta nas vibrações e ruído magnético do motor;
- Diminuição do valor de perdas por efeito Joule, perdas no ferro e valor de perdas no total que se traduzirá num aumento do rendimento;
- Diminuição das correntes de arranque, em vazio e estatóricas do motor. A diminuição das correntes provocará uma diminuição da elevação da temperatura de operação.
- Aumento do fator de potência.

Quanto à f.e.m. induzida no veio, provou-se que esta é função do aumento do valor de excentricidade presente no motor. Além disso, para maiores níveis de excentricidade, a influência das cunhas magnéticas na diminuição da f.e.m. induzida entre as extremidades do veio, provou-se mais notória.

Dos resultados obtidos em simulação foi possível passar à aplicação prática dos conceitos consolidados ao longo do trabalho. O facto de aplicar os conhecimentos em situações práticas de resolução de problemas, com medidas concretas a seguir apresentadas, foi um ponto crucial no trabalho desenvolvido.

Assim, no respeitante à utilização de cunhas magnéticas no motor W22X 500 2np provou-se a possibilidade de redução do custo do tipo de cunha utilizada (de cunhas magnéticas para não magnéticas de fibra de vidro), que fará com que o custo total do fabrico do motor sofra também uma redução, com prática manutenção do nível desempenho do motor.

Para além disso, em termos de f.e.m. induzida no veio do motor W22X 355 4np, a WEG S.A. aprovou já a construção de um protótipo para rotor com uma nova combinação de ranhuras estatóricas e rotóricas. A análise efetuada neste trabalho foi um dos elementos base para essa aprovação. O novo rotor possibilitará a troca do tipo de rolamentos, para não isolados, significando uma redução do custo total do motor. De salientar que o desempenho o motor não será praticamente afetado com a nova alternativa.

## 8.2. Desenvolvimentos e trabalhos futuros

### 8.2.1. Cunhas magnéticas

Do exposto no **Capítulo 6**, constatou-se que a utilização de cunhas magnéticas nas ranhuras estatóricas, tem influência no desempenho de um motor de indução. No entanto, isso não aconteceu para todos os motores em análise. Como demonstrado no **Capítulo 7**, o motor W22X 500 2np apresentou praticamente os mesmos resultados com cunhas magnéticas e não magnéticas.

De facto, outras características dos motores são preponderantes no comportamento das cunhas, tal como o número de polos, a potência nominal, a espessura do entreferro, entre outros. No entanto, devido à característica “especial” dos quatro motores estudados, tornou-se complicado encontrar um padrão nos resultados obtidos.

Os fatores que se demonstraram com maior preponderância foram o número de polos e a espessura do entreferro, no entanto, para resultados fiáveis seria necessário proceder a muitas simulações em motores com o mesmo número de polos e com um entreferro progressivamente mais espesso ou o contrário, motores com a mesma espessura de entreferro e número de polos crescente.

É de salientar que durante todo o trabalho não se explorou a hipótese de modificar o tipo de cunhas magnéticas utilizadas. Atualmente, a WEG S.A. utiliza este tipo de cunhas, com a mesma tipologia e material. No entanto, considera-se pertinente explorar novos tipos de materiais que tenham aliadas outras propriedades eletromagnéticas e mecânicas.

### 8.2.2. F.e.m. induzida no veio

A temática da f.e.m. induzida no veio teve uma orientação mais prática no trabalho desenvolvido, levando a uma aprovação da construção de um protótipo. De facto, a curto prazo, a WEG S.A. pretende proceder à construção efetiva do novo rotor e proceder assim ao ensaio experimental do motor W22X 355 4np com a modificação sugerida neste trabalho.

Futuramente, espera-se poder estender esta análise noutras linhas/gamas de motores com o mesmo tipo de problemas e entender se é possível estabelecer uma relação direta entre combinação estator/rotor dos números de ranhuras e as forças eletromotrizes induzidas no veio de um motor de indução, confirmando ou não os resultados obtidos no caso do motor W22X 355 4np.

### 8.2.3. Perdas por efeito joule nos anéis de curto-circuito

O facto do *ANSYS Maxwell* não considerar as perdas por efeito Joule nos anéis de curto-circuito, torna pertinente calcular essas perdas por um método indireto. Neste trabalho foi possível desenvolvê-lo. No entanto, a falta de coerência nos resultados obtidos, relativamente a um dos motores, impossibilitou a sua inclusão na parcela das perdas totais e cálculo do rendimento.





# Referências

- [1] Prnewswire, “Global Electric Motor Market 2016-2022 - Research and Markets”. 2018. Available at: <https://www.prnewswire.com/news-releases/global-electric-motor-market-2016-2022---research-and-markets-300464686.html>.
- [2] Homepage WEG S.A., 2018, Available at: <https://www.weg.net/institutional/ES/pt/>.
- [3] M. Abboud, “Simulation of 3ph induction motor in MATLAB with VVVF starting method”. 2016, Halmstad University.
- [4] P. Waide, C. Brunner, “Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems”. 2011, International Energy Agency Working Paper.
- [5] WEG S.A, “Energy Efficiency Programs Worldwide”, 2018, Global directives presentation. Available at: <http://static.weg.net/medias/h5e/h61/Energy-Efficiency-Global-Directives - Presentation 2015.pdf>.
- [6] IEC Webstore, “IEC 60034-30-1:2014, Rotating Eletrical Machines”. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/136>.
- [7] T. Dang and N. Sainato, “NEMA and IEC standards: A practical approach” 2013 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Technical Conference, Orlando, FL, 2013, pp. 1-12. doi: 10.1109/CITCON.2013.6525285
- [8] Boldea, I., Nasar, S., Grigsby, L., Dorf, R., “The Induction Machine Handbook”. 2002, Boca Raton: CRC Press.
- [9] Tesla Society, “Tesla Constructs the First Induction Motor”. Available at: <http://www.teslasociety.com/strasbourg.htm>.
- [10] A. Costa, “Introdução às Máquinas Elétricas Rotativas”, 2018, Aulas Teóricas de Máquinas Elétricas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [11] Universidade de São Paulo, “Introdução à Eletromecânica e Automação, O Motor de Indução”, 2006. Available at: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/375427/mod\\_resource/content/1/MOTOR\\_DE\\_INDUCAO\\_PARTE\\_TEORICA.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/375427/mod_resource/content/1/MOTOR_DE_INDUCAO_PARTE_TEORICA.pdf).
- [12] G. Madescu, M. Moț, M. Greconici, M. Biriescu and D. Vesa, “Performances analysis of an induction motor with stator slot magnetic wedges,” 2016 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), Craiova, 2016, pp. 1-7. doi: 10.1109/ICATE.2016.7754641.

[13] Shuping Wang, Zhengming Zhao, Liqiang Yuan and Buyao Wang, "Investigation and analysis of the influence of magnetic wedges on high voltage motors performance," 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Harbin, 2008, pp. 1-6. doi: 10.1109/VPPC.2008.4677633.

[14] Dems, Maria & Komez, K & Sykulski, J.K. "Analysis of Effects of Magnetic Slot Wedges on Characteristics of Large Induction Motors", 2011.

[15] R. Curiac and H. Li, "Improvements in energy efficiency of induction motors by the use of magnetic wedges," 2011 Record of Conference Papers Industry Applications Society 58th Annual IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference (PCIC), Toronto, ON, 2011, pp. 1-6. doi: 10.1109/PCICon.2011.6085890.

[16] A. Costa, "Motores de Indução, Parte 1, Motores Trifásicos", 2018, Aulas Teóricas de Máquinas Elétricas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

[17] Dr. H. Simburger, SPIndustries, "Investigation of metal powder filled, glass fiber reinforced resin, used as slot wedges in electrical engineering industry", 2010, Institute of Materials Science and Technology, Wien.

[18] ANSYS Website, "ANSYS Maxwell: Low Frequency Electromagnetic Fields", 2018. Available at: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell>.

[19] ANSYS Inc., "Maxwell Online Help Electromagnetics Suite 19.0", 2017.

[20] H. Bertan, "Estudo e Modelamento Computacional de emissores de elétrons por efeito de campo de forma hemi-elipsoidal utilizando o MEF", 2016, Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas.

[21] GAMBICA/BEAMA Technical Guide, "Motor Shaft Voltages and Bearing Currents Under PWM Inverter Operation", 2016, Third Edition, The GAMBICA Association Ltd, BEAMA Ltd.

[22] S. L. Nau, "Análise da Influência da Excentricidade do Rotor sobre o Ruído Acústico de Origem Magnético gerado por Motores de Indução Trifásicos", 2007, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina.

[23] S. Stefanko, M. Bogut, I. Kurtovic, M. Kovacevic, M. Momic, "The Origins of Shaft Currents in Squirrel-Cage Low-Voltage Induction Machines", 2005.

[23] T. Bishop, "Dealing with Shaft and Bearing Currents", EASA, Electrical Apparatus Service Association, St. Louis, MO.

[24] WEG S.A., "Motores Elétricos, Guia de Especificação", Available at: [www.weg.net](http://www.weg.net).

[25] G. Sandwell, "Electrically Induced Bearing Damage (EIBD) aka Shaft Currents aka Electrical Discharge Machining (EDM)", 2018, VIBES Corp, Vancouver.

[26] S. L. Nau, "Combinação de ranhuras do estator e rotor", WEG S.A..

[27] CEPA, "Variação da Resistência com a Temperatura", 2018, Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada, Universidade de São Paulo. Available at: [http://efisica.if.usp.br/eletricidade/basico/corrente/var\\_resist\\_temperatura/](http://efisica.if.usp.br/eletricidade/basico/corrente/var_resist_temperatura/).

[28] Douglas Giancoli (2009) [1984]. "25. Electric Currents and Resistance". In Jocelyn Phillips. Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics (4th ed.). Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall. p. 658. ISBN 0-13-149508-9.4

[29] Wikipedia Definition, "Spatial Frequency", Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Spatial\\_frequency](https://en.wikipedia.org/wiki/Spatial_frequency).

[30] O. Cunha, "Determinação das perdas adicionais em carga de motores de indução trifásicos por recurso ao ensaio Eh-star", 2009, Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

[31] Li, Yingjie & Li, Silong & Sarlioglu, Bulent, "Analysis of pulsating torque in squirrel cage induction machines by investigating stator slot and rotor bar dimensions for traction applications", 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2013. 246-253. 10.1109/ECCE.2013.6646707.

[32] Wardach, Marcin. (2007). Minimization of torque pulsation in slotted PM machines with magnetic wedges. *Przeład Elektrotechniczny*. 83. 118-120.

[33] R. A. Hanna, W. Hiscock and P. Klinowski, "Failure Analysis of Three Slow-Speed Induction Motors for Reciprocating Load Application," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 43, no. 2, pp. 429-435, March-april 2007. doi: 10.1109/TIA.2006.889969



# Anexo A

## Características dos motores

Este capítulo contém uma caracterização detalhada em termos elétricos e construtivos dos quatro motores que foram a base do trabalho desenvolvido.

### A.1. Estator, rotor e entreferro

Tabela A.1 - Caracterização construtiva do estator, rotor e entreferro.

Estator e Rotor	<u>W22X 500</u> <u>2np</u>	<u>W22X 355</u> <u>4np</u>	<u>W22X 355</u> <u>6np</u>	<u>W22X 450</u> <u>8np</u>
Nº de Ranhuras Estator	60	48	72	72
Nº de Ranhuras Rotor	48	38	60	88
Diâmetro externo Estator (mm)	860	600	600	770
Diâmetro interno Estator (mm)	435	360	380	515
Diâmetro externo Rotor (mm)	426,5	356,6	377,6	512,2
Diâmetro interno Rotor (mm)	240	170	145	215
Espessura Entreferro (mm)	4,25	1,7	1,2	1,4
Comprimento Núcleo (mm)	980	700	730	1030

## A.2. Bobinagem

Tabela A.2 - Caracterização da bobinagem dos quatro motores.

Bobinagem	<u>W22X 500 2p</u>	<u>W22X 355 4p</u>	<u>W22X 355 6p</u>	<u>W22X 450 8p</u>
Passo	1-23	1-11	1-11	1-9
Ligação	2xParalelo Estrela (//Y)	Série Estrela (SY)	2xParalelo Estrela (//Y)	2xParalelo Estrela (//Y)

## A.3. Barras do rotor e anéis de curto-circuito

Tabela A.3 - Caracterização das barras do rotor e anéis de curto-circuito dos quatro motores.

Barras do Rotor e Anéis de Curto-Circuito	<u>W22X 500 2p</u>	<u>W22X 355 4p</u>	<u>W22X 355 6p</u>	<u>W22X 450 8p</u>
D (mm)	426	353	380	512
d (mm)	280	223	230	370
a (mm)	73	65	73,8	70,6
h (mm)	65	65	30	44,8
Comprimento barras (mm)	1070	830	820	1120
Material Barras e Anéis	Cobre	Alumínio	Cobre	Cobre

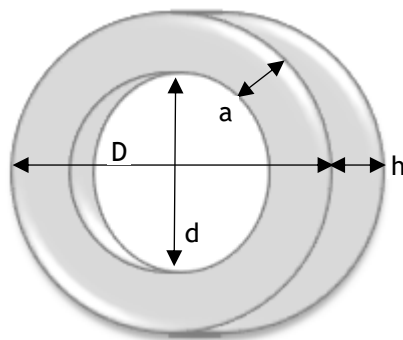


Figura A.1 - Esquema de um anel generalizado.

## Anexo B

### Modelização dos motores

Este capítulo contém os modelos desenvolvidos para os quatro motores em análise. Em todos eles pode-se visualizar um corte do motor a duas dimensões constituído pelo estator, condutores estatóricos, cunhas nas ranhuras do estator, barras rotóricas, rotor e veio (os modelos não estão à escala).

#### B.1. Modelos

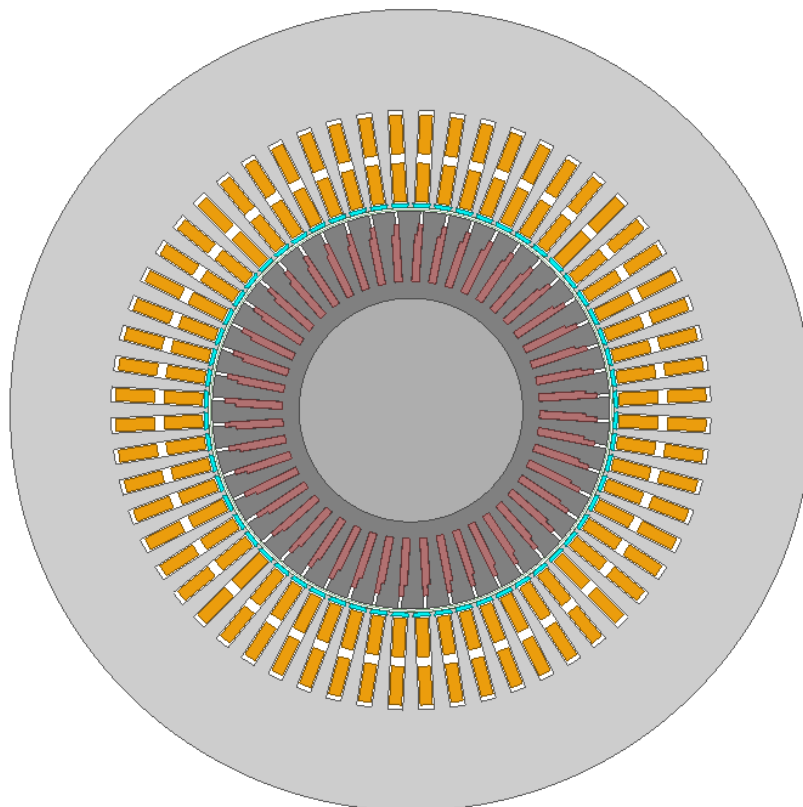


Figura B.1 - Modelo motor W22X 500 2np no ANSYS Maxwell.

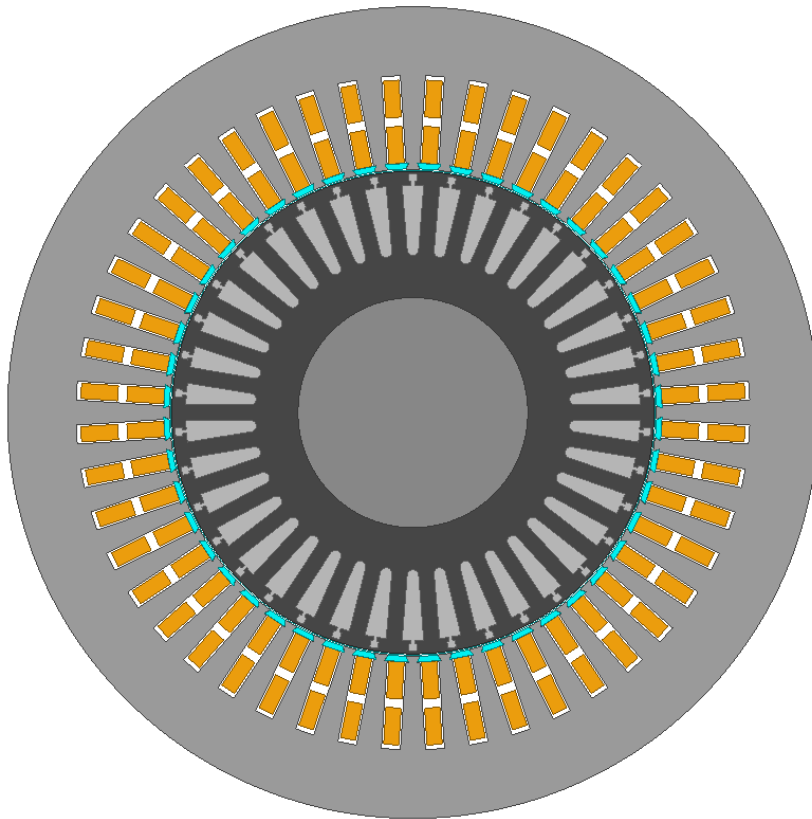


Figura B.2 - Modelo motor W22X 355 4np no ANSYS Maxwell.

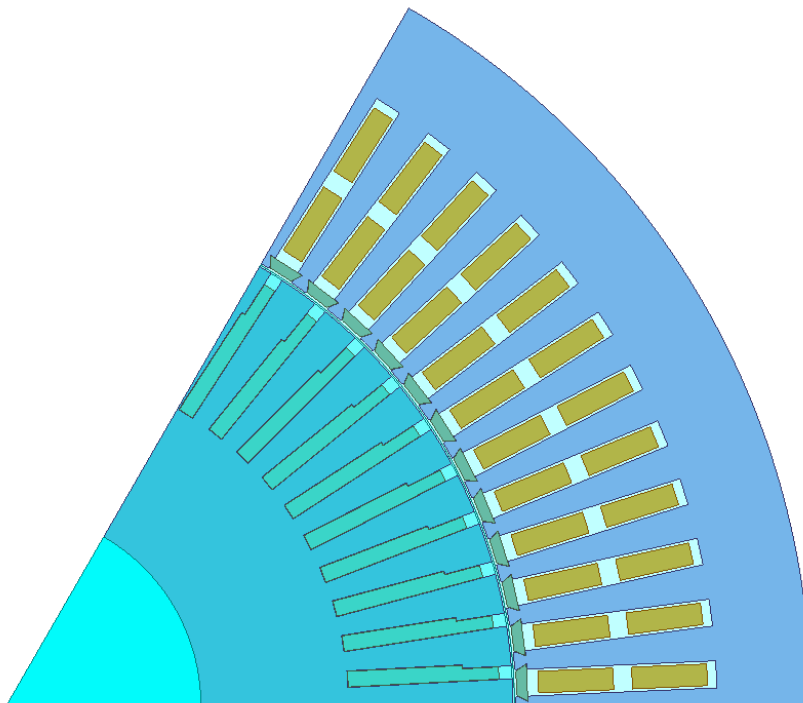


Figura B.3 - Modelo motor W22X 355 6np no ANSYS Maxwell (1/6 geometria).



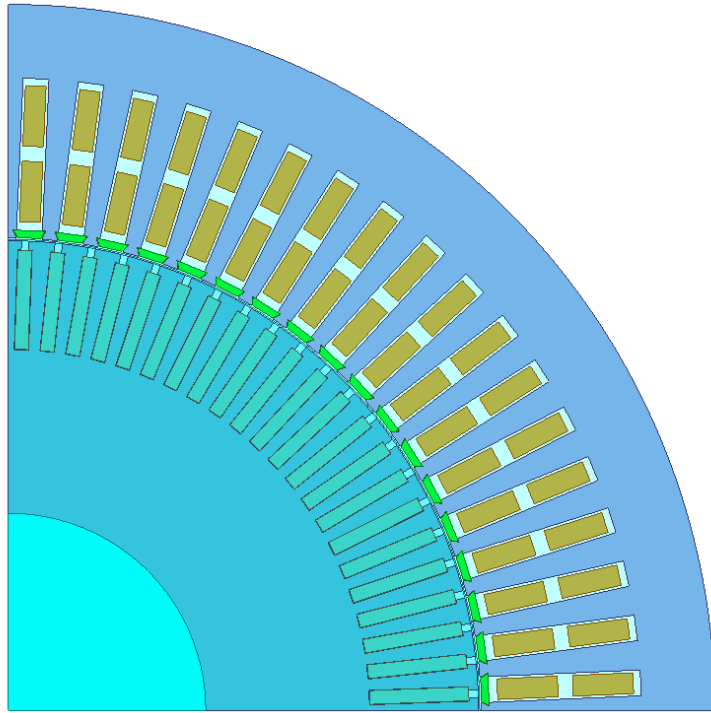


Figura B.4 - Modelo motor W22X 450 8np no ANSYS Maxwell (1/4 geometria).

## B.2. Resistência, indutância e temperatura

Tabela B.1 - Caracterização da indutância e resistência em função da temperatura.

Resistência, Indutância e Temperatura	<u>W22X 500</u> <u>2np</u>	<u>W22X 355</u> <u>4np</u>	<u>W22X 355</u> <u>6np</u>	<u>W22X 450</u> <u>8np</u>
Indutância de Fugas Estatórica $L_{sf\ Estator}$ (H)	0,00169	0,00099	0,00104	0,00234
Resistência Rotórica $R_{rotor}$ ( $\Omega$ )	$1,14 \times 10^{-7}$	$4,55 \times 10^{-7}$	$1,36 \times 10^{-8}$	$8,14 \times 10^{-9}$
Indutância de Fugas Rotórica $L_{sf\ Rotor}$ (H)	$5,07 \times 10^{-9}$	$1,25 \times 10^{-8}$	$2,41 \times 10^{-7}$	$4,63 \times 10^{-7}$
Temperatura de Referência $T_0$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	20	20	20	20
Temperatura de Operação Estator $T_{estator}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	100	90	115	90
Temperatura de Operação Rotor $T_{rotor}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	110	100	125	100
Coefficiente de Temperatura $\alpha$ ( $1/^{\circ}\text{C}$ )	$3,862 \times 10^{-3}$ (Cobre)	$3,9 \times 10^{-3}$ (Alumínio)	$3,862 \times 10^{-3}$ (Cobre)	$3,862 \times 10^{-3}$ (Cobre)
Resistência a $T_0$ do Estator $R_{(T_0)}$ ( $\Omega$ )	0,07720	0,13050	0,21060	0,39420
Resistência a $T_{estator}$ $R_{(T_{Estator})}$ ( $\Omega$ )	0,10105	0,16578	0,28786	0,50077
Resistividade Barras Rotóricas a $T_0$ $\rho_{(T_0)}$ ( $\Omega.m$ )	$1,68 \times 10^{-8}$ (Cobre)	$2,82 \times 10^{-8}$ (Alumínio)	$1,68 \times 10^{-8}$ (Cobre)	$1,68 \times 10^{-8}$ (Cobre)
Resistividade Barras Rotóricas a $T_{rotor}$ $\rho_{(T_{Rotor})}$ ( $\Omega.m$ )	$2,26 \times 10^{-8}$	$3,69 \times 10^{-8}$	$2,36 \times 10^{-8}$	$2,19 \times 10^{-8}$

# Anexo C

## Simulação

O presente capítulo apresenta as condições de simulação detalhadas utilizadas em cada um dos motores, bem como outras considerações importantes na metodologia de análise.

### C.1. Condições de simulação

Tabela C.1 - Condições de simulação em regime permanente.

Regime Permanente	<u>W22X 500</u> <u>2np</u>	<u>W22X 355</u> <u>4np</u>	<u>W22X 355</u> <u>6np</u>	<u>W22X 450</u> <u>8np</u>
Velocidade de Rotação Inicial (rpm)	2990	1491	992	746
Carga Nominal (Nm)	- 3194	- 1921	- 3207	- 5123
Momento de Inércia (kgm <sup>2</sup> )	24,7	8,66	11,3	53,8
Tempo Total de Simulação (ms)	2000	1900	1300	1700
Passo Temporal, <i>Step Size</i> (ms)	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333
Intervalo Resultados (ms-ms)	1800-2000	1700-1900	1100-1300	1500-1700

Tabela C.2 - Condições de simulação do transitório de arranque (direto).

Transitório de Arranque (Direto)	<u>W22X 500</u> <u>2np</u>	<u>W22X 355</u> <u>4np</u>	<u>W22X 355</u> <u>6np</u>	<u>W22X 450</u> <u>8np</u>
Velocidade de Rotação Inicial (rpm)	0	0	0	0
Carga Nominal (Nm)	+ 3194	+ 1921	+ 3207	+ 5123
Momento de Inércia (kgm <sup>2</sup> )	24,7	8,66	11,3	53,8
Tempo Total da Simulação (ms)	2500	2000	1000	1500

## C.2. Perdas mecânicas

Tabela C.3 - Perdas mecânicas obtidas em ensaio, no regime estipulado, a 100% de carga.

Motores	<u>W22X 500</u> <u>2p</u>	<u>W22X 355</u> <u>4p</u>	<u>W22X 355</u> <u>6p</u>	<u>W22X 450</u> <u>8p</u>
Perdas Mecânicas obtidas em Ensaio (W)	5255	1500	795	1335

## C.3. Perdas no ferro

Tabela C.4 - Perdas no ferro obtidas em ensaio, no regime estipulado, a 100% de carga.

Motores	<u>W22X 500</u> <u>2p</u>	<u>W22X 355</u> <u>4p</u>	<u>W22X 355</u> <u>6p</u>	<u>W22X 450</u> <u>8p</u>
Perdas no Ferro obtidas em Ensaio (W)	5128	4004	3163	5316
Perdas no Ferro obtidas em Simulação (W)	4629	4353	3215	3222

## Anexo D

### Validação dos modelos

O presente capítulo sustenta a validação dos modelos desenvolvidos no ANSYS Maxwell.

#### D.1. Validação do modelo do motor W22X 500 2np

Tabela D.1 - Valores das tensões e correntes obtidos na simulação para o motor W22X 500 2np.

Tensões e Correntes		Simulação Regime Permanente	Ensaio Regime Estipulado
Tensão de Fase	$V_1$ rms (kV)	3464	3464
Corrente de Fase	$I_1$ rms (A)	Fase A	110,00
		Fase B	
		Fase C	

Tabela D.2 - Valores de binário e velocidade obtidos na simulação do motor W22X 500 2np.

Binário e Velocidade		Simulação Regime Permanente	Ensaio Regime Estipulado
Binário	$T$ avg (Nm)	3209,49	3194,00
Velocidade de Rotação	$n$ avg (rpm)	2991,39	2990

Tabela D.3 - Valores de potências obtidos na simulação do motor W22X 500 2np.

Potências		Simulação Regime Permanente	Ensaio Regime Estipulado
Potência Absorvida	$P_{abs}$ avg (kW)	1021,848	1022,00
Potência Útil	$P_u$ avg (kW)	1005,399	1000,00

Tabela D.4 - Valor do fator de potência obtido na simulação do motor W22X 500 2np.

Fator de Potência		Simulação Regime Permanente	Ensaio Regime Estipulado
Potência Aparente	$S$ (kVA) (4.9)	1128,640	1143,120
Fator de Potência	$\cos \varphi$ (4.10)	0,905	0,900

## D.2. Validação do modelo do motor W22X 355 4np

Tabela D.5 - Valores das tensões e correntes obtidos na simulação para o motor W22X 355 4np.

Tensões e Correntes			Simulação Regime Permanente	Ensaio Regime Estipulado
Tensão de Fase	$V_1$ rms (V)		1905	1905
Corrente de Fase	$I_1$ rms (A)	Fase A	68,04	64,90
		Fase B	68,06	
		Fase C	68,01	

Tabela D.6 - Valores de binário e velocidade obtidos na simulação do motor W22X 355 4np.

Binário e Velocidade		Simulação Regime Permanente	Ensaio Regime Estipulado
Binário	$T$ avg (Nm)	1930	1921
Velocidade de Rotação	$n$ avg (rpm)	1491,55	1491,00

Tabela D.7 - Valores de potências obtidos na simulação do motor W22X 355 4np.

Potências		Simulação Regime Permanente	Ensaio Regime Estipulado
Potência Absorvida	$P_{abs}$ avg (kW)	307,117	309,400
Potência Útil	$P_u$ avg (kW)	301,500	300,000

Tabela D.8 - Valor do fator de potência obtido na simulação do motor W22X 355 4np.

Fator de Potência		Simulação Regime Permanente	Ensaio Regime Estipulado
Potência Aparente	$S$ (kVA) (4.9)	353,519	337,220
Fator de Potência	$\cos \varphi$ (4.10)	0,869	0,840

### D.3. Validação do modelo do motor W22X 355 6np

Tabela D.9 - Valores das tensões e correntes obtidos na simulação para o motor W22X 355 6np.

Tensões e Correntes		Simulação Regime Permanente	Ensaio Regime Estipulado
Tensão de Fase	$V_1$ rms (V)	1905	1905
Corrente de Fase	$I_1$ rms (A)	Fase A	74,59
		Fase B	74,60
		Fase C	74,53
			74,71

Tabela D.10 - Valores de binário e velocidade obtidos na simulação do motor W22X 355 6np.

Binário e Velocidade		Simulação Regime Permanente	Ensaio Regime Estipulado
Binário	$T$ avg (Nm)	3209,6	3207,0
Velocidade de Rotação	$n$ avg (rpm)	992,84	992,00

Tabela D.11 - Valores de potências obtidos na simulação do motor W22X 355 6np.

Potências		Simulação Regime Permanente	Ensaio Regime Estipulado
Potência Absorvida	$P_{abs}$ avg (kW)	343,908	346,000
Potência Útil	$P_u$ avg (kW)	333,780	333,000

Tabela D.12 - Valor do fator de potência obtido na simulação do motor W22X 355 6np.

Fator de Potência		Simulação Regime Permanente	Ensaio Regime Estipulado
Potência Aparente	$S$ (kVA) (4.9)	426,396	426,967
Fator de Potência	$\cos \varphi$ (4.10)	0,807	0,812

## D.4. Validação do modelo do motor W22X 450 8np

Tabela D.13 - Valores das tensões e correntes obtidos na simulação para o motor W22X 450 8np.

Tensões e Correntes		Simulação Regime Permanente	Ensaio Regime Estipulado
Tensão de Fase	$V_1$ rms (V)	3464	3464
Corrente de Fase	$I_1$ rms (A)	Fase A	47,39
		Fase B	47,40
		Fase C	47,36
			49,9

Tabela D.14 - Valores de binário e velocidade obtidos na simulação do motor W22X 450 8np.

Binário e Velocidade		Simulação Regime Permanente	Ensaio Regime Estipulado
Binário	$T_{el}$ avg (Nm)	5135,3	5123,0
Velocidade de Rotação	$n$ avg (rpm)	746,51	746,00

Tabela D.15 - Valores de potências obtidos na simulação do motor W22X 450 8np.

Potências		Simulação Regime Permanente	Ensaio Regime Estipulado
Potência Absorvida	$P_{abs}$ avg (kW)	410,391	414,300
Potência Útil	$P_u$ avg (kW)	401,448	400,000

Tabela D.16 - Valor do fator de potência obtido na simulação do motor W22X 450 8np.

Fator de Potência		Simulação Regime Permanente	Ensaio Regime Estipulado
Potência Aparente	$S$ (kVA) (4.9)	492,422	518,561
Fator de Potência	$\cos \varphi$ (4.10)	0,833	0,800



# Anexo E

## Formas de onda do regime permanente

Neste ponto seguem as formas de onda obtidas para todos os motores em estudo.

### E.1. Formas de onda do motor W22X 500 2np

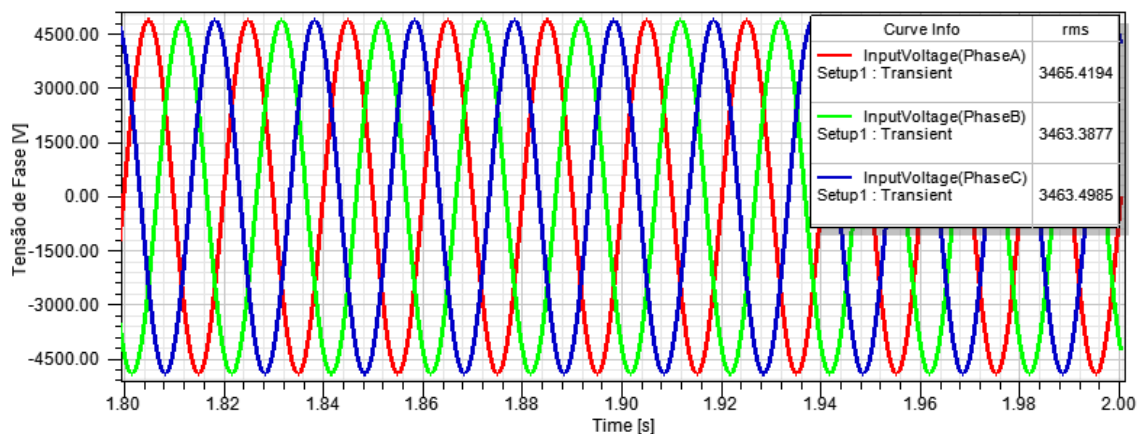


Figura E.1 - Tensões de fase (*InputVoltage(Phase)*) motor W22X 500 2np.

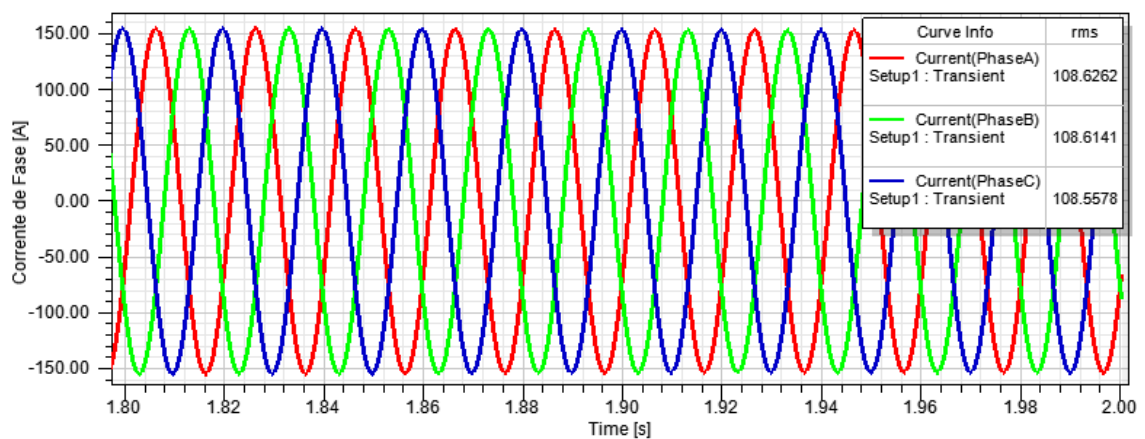


Figura E.2 - Correntes de fase (*Current(Phase)*) motor W22X 500 2np.

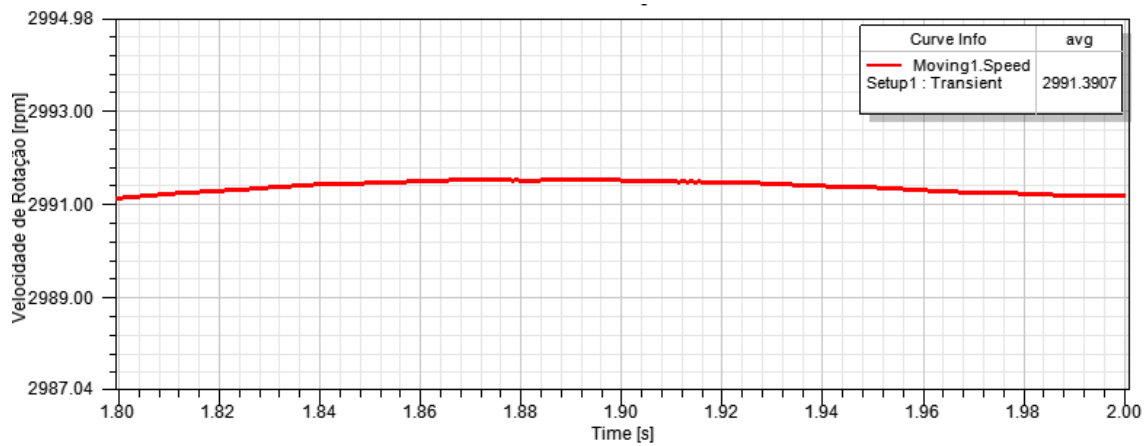


Figura E.3 - Velocidade de rotação (*Moving1.Speed*) motor W22X 500 2np.

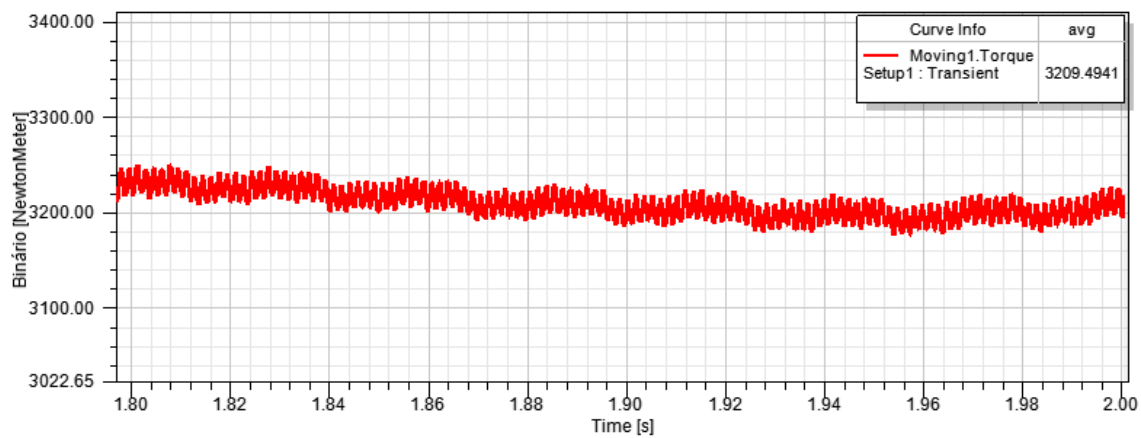


Figura E.4 - Binário (*Moving1.Torque*) motor W22X 500 2np.

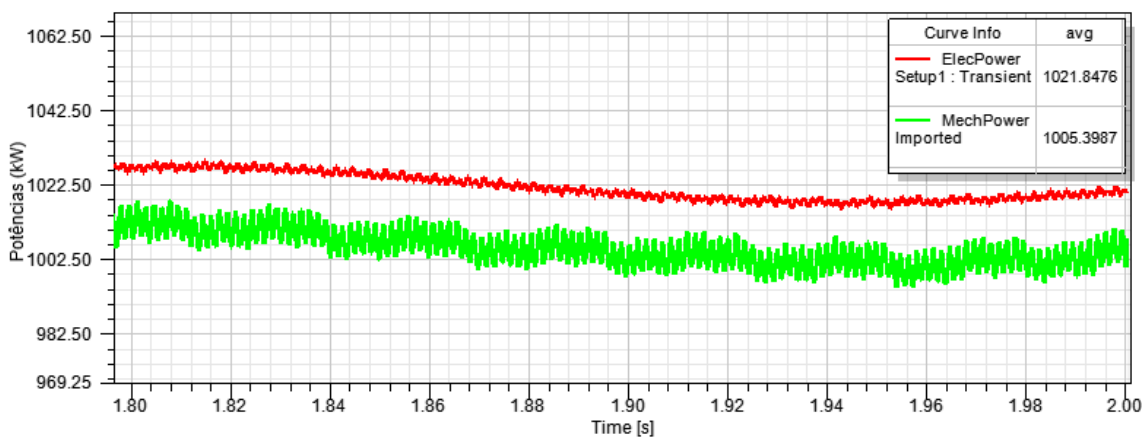


Figura E.5 - Potência absorvida (*ElecPower*) e potência útil (*MechPower*) motor W22X 500 2np.

## E.2. Formas de onda do motor W22X 355 4np

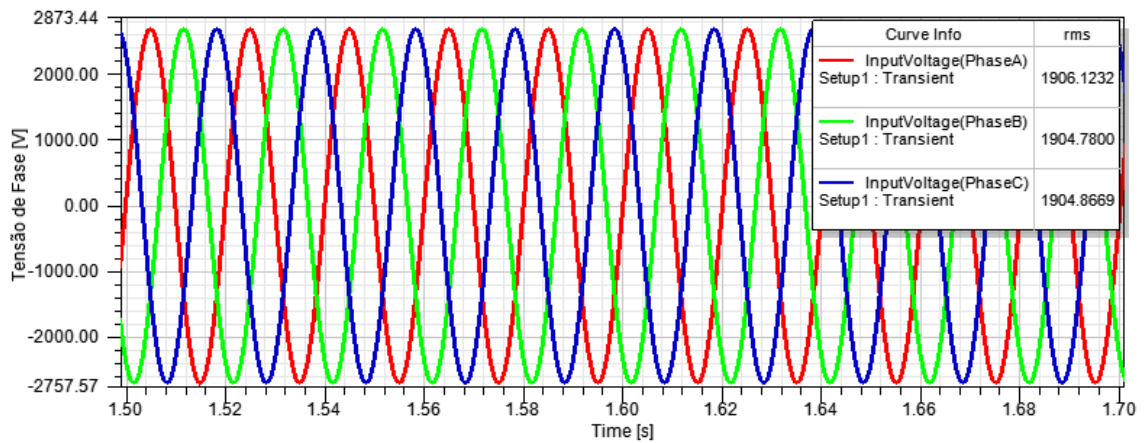


Figura E.6 - Tensões de fase (*InputVoltage(Phase)*) motor W22X 355 4np.

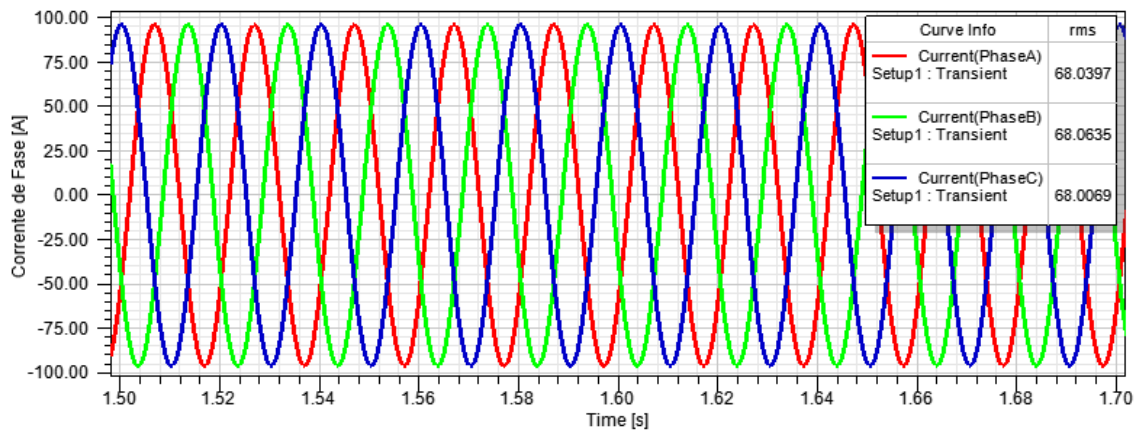


Figura E.7 - Correntes de fase (*Current(Phase)*) motor W22X 355 4np.

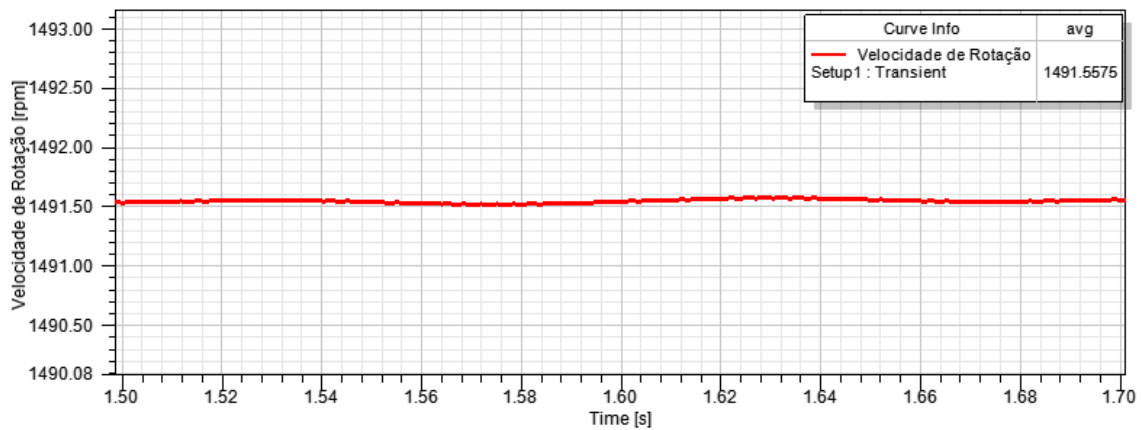


Figura E.8 - Velocidade de rotação (*Moving1.Speed*) motor W22X 355 4np.

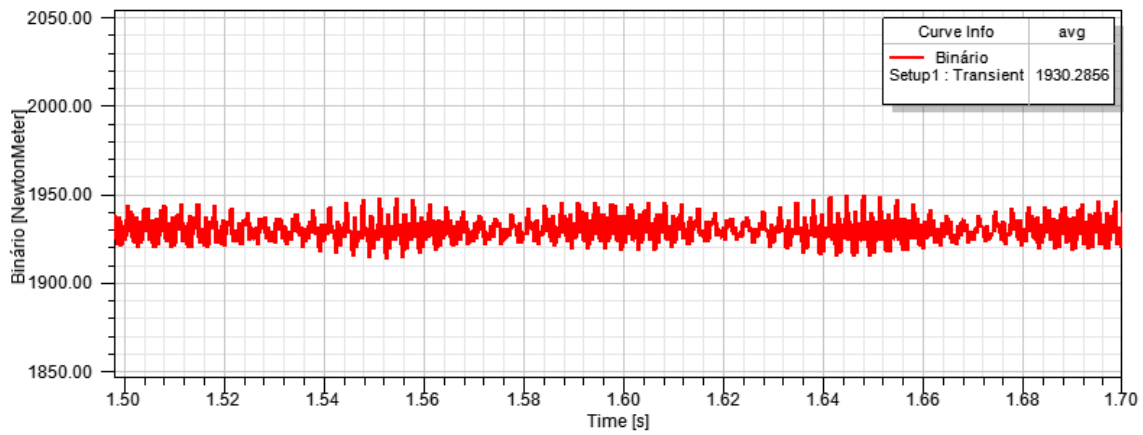


Figura E.9 - Binário (*Moving1.Torque*) motor W22X 355 4np.

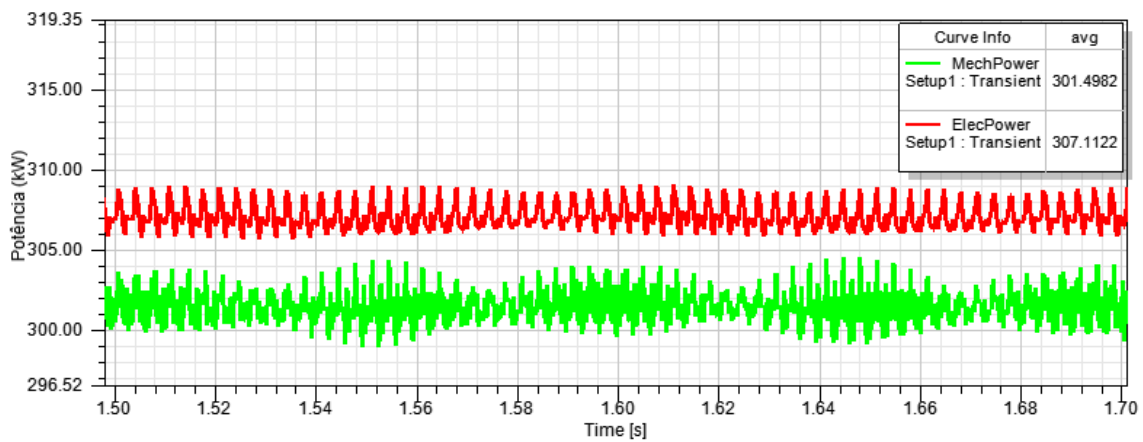


Figura E.10 - Potência absorvida (*ElecPower*) e potência útil (*MechPower*) motor W22X 355 4np.

### E.3. Formas de onda do motor W22X 450 8np

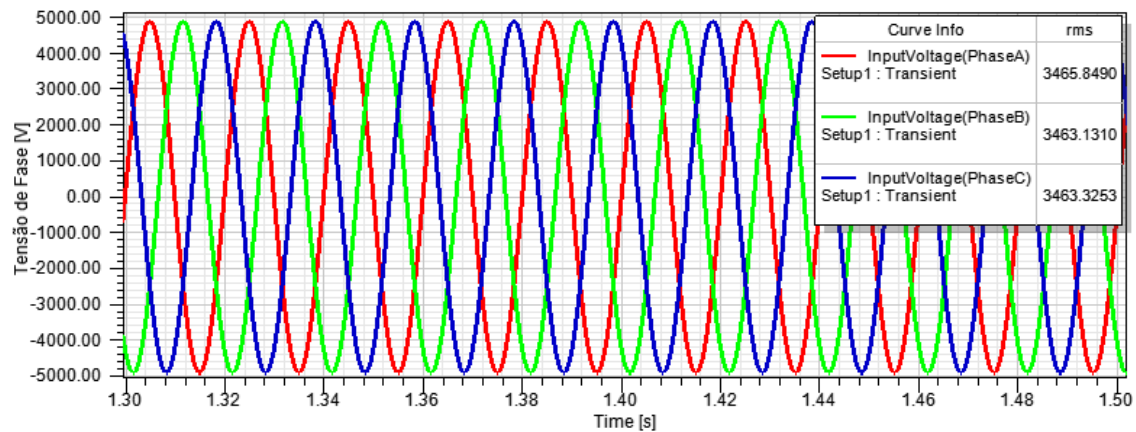


Figura E.11 - Tensões de fase (*InputVoltage(Phase)*) motor W22X 355 8np.

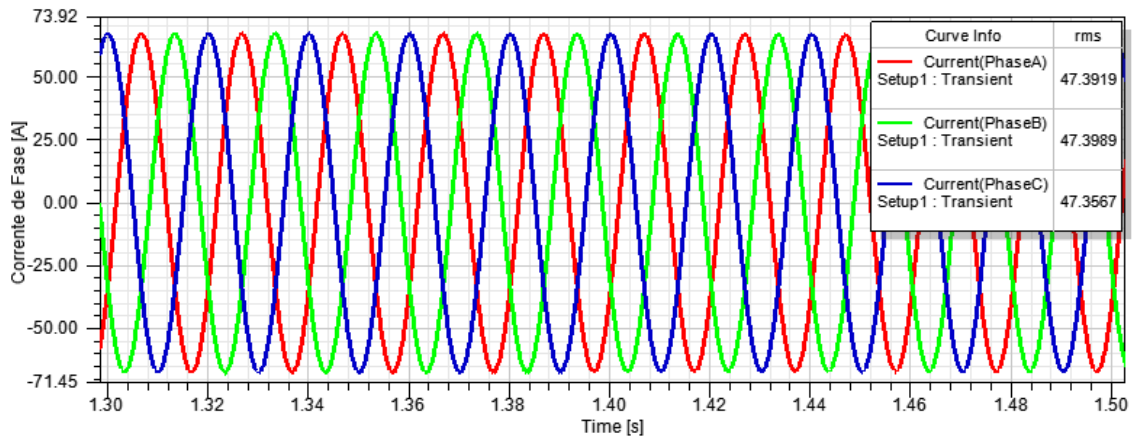


Figura E.12 - Correntes de fase (*Current(Phase)*) motor W22X 355 8np.

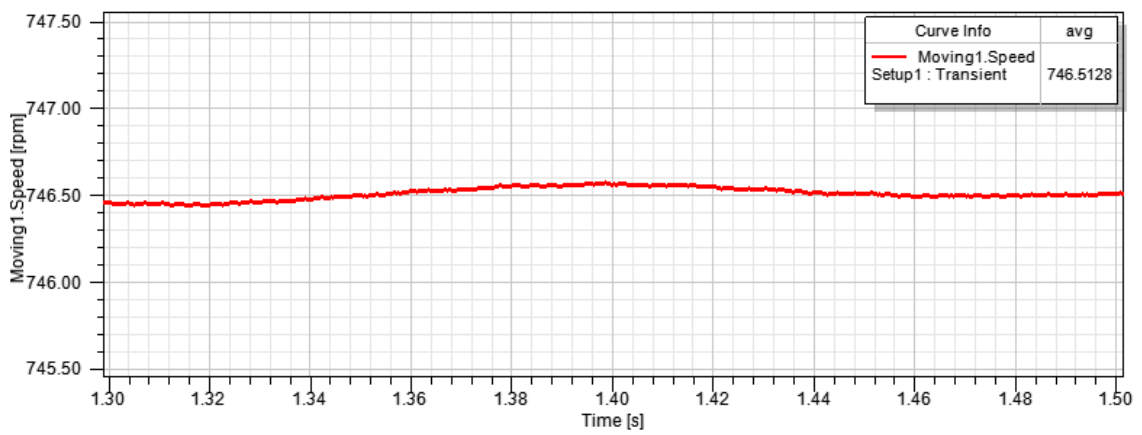


Figura E.13 - Velocidade de rotação (*Moving1.Speed*) motor W22X 355 8np.

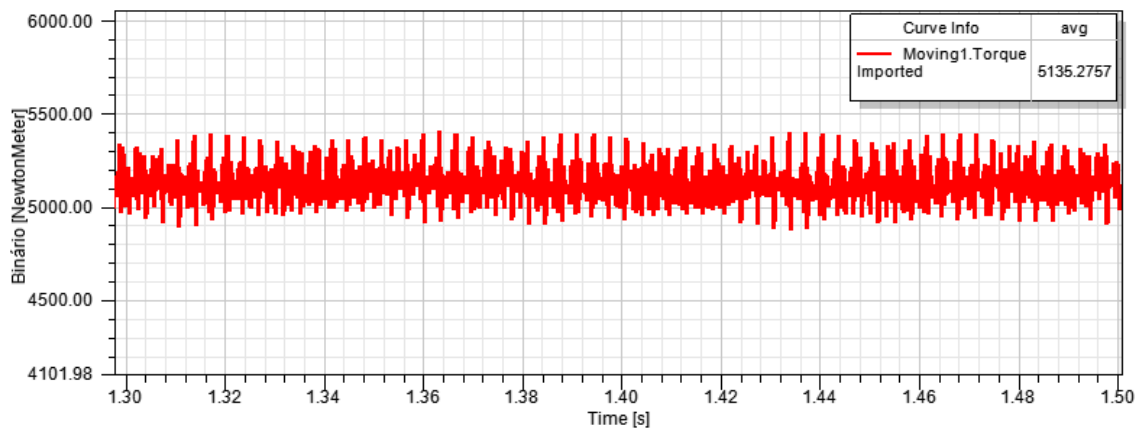


Figura E.14 - Binário (*Moving1.Torque*) motor W22X 355 8np.

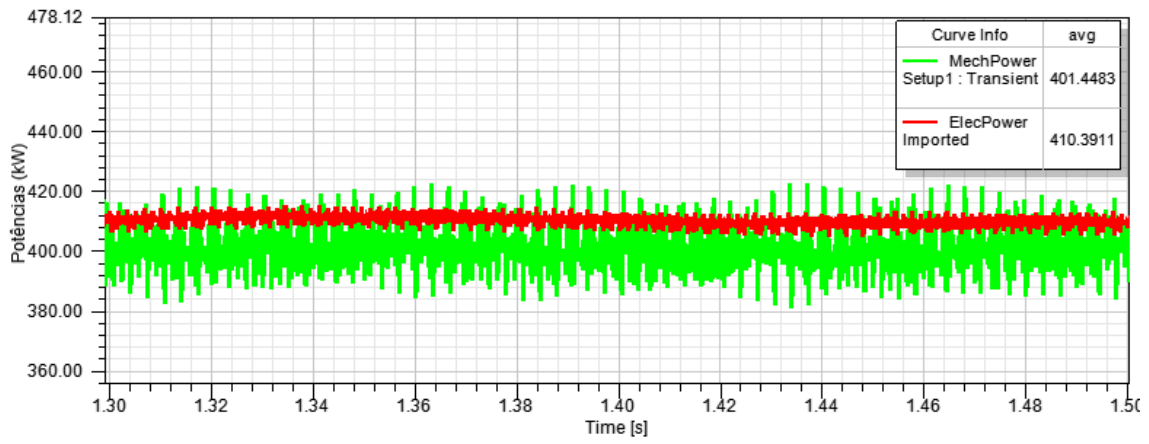


Figura E.15 - Potência absorvida (*ElecPower*) e potência útil (*MechPower*) motor W22X 355 8np.

## Anexo F

### Indução magnética nas cunhas

#### F.1. Condições de obtenção das ilustrações

Tabela F.1 - Fatores importantes na análise da indução magnética (valores instantâneos).

Motor <i>W22X 355 4np</i>	Cunhas Magnéticas	
	Sim	Não
Velocidade de rotação (rpm)	1491,58	1491,66
Corrente de Fase Estatórica (A)	68,04	68,95
Instante de tempo (s)	1,90	1,89
Posição do rotor (°)	321,22	321,02
Motor <i>W22X 355 6np</i>	Cunhas Magnéticas	
	Sim	Não
Velocidade de rotação (rpm)	992,75	992,79
Corrente de Fase Estatórica (A)	74,57	75,75
Instante de tempo (s)	1,29	1,29
Posição do rotor (°)	120,18	120,38
Motor <i>W22X 450 8np</i>	Cunhas Magnéticas	
	Sim	Não
Velocidade de rotação (rpm)	746,56	746,55
Corrente de Fase Estatórica (A)	47,38	48,37
Instante de tempo (s)	1,7	1,69
Posição do rotor (°)	19,24	19,85

## F.2. Ilustrações da indução magnética no entreferro

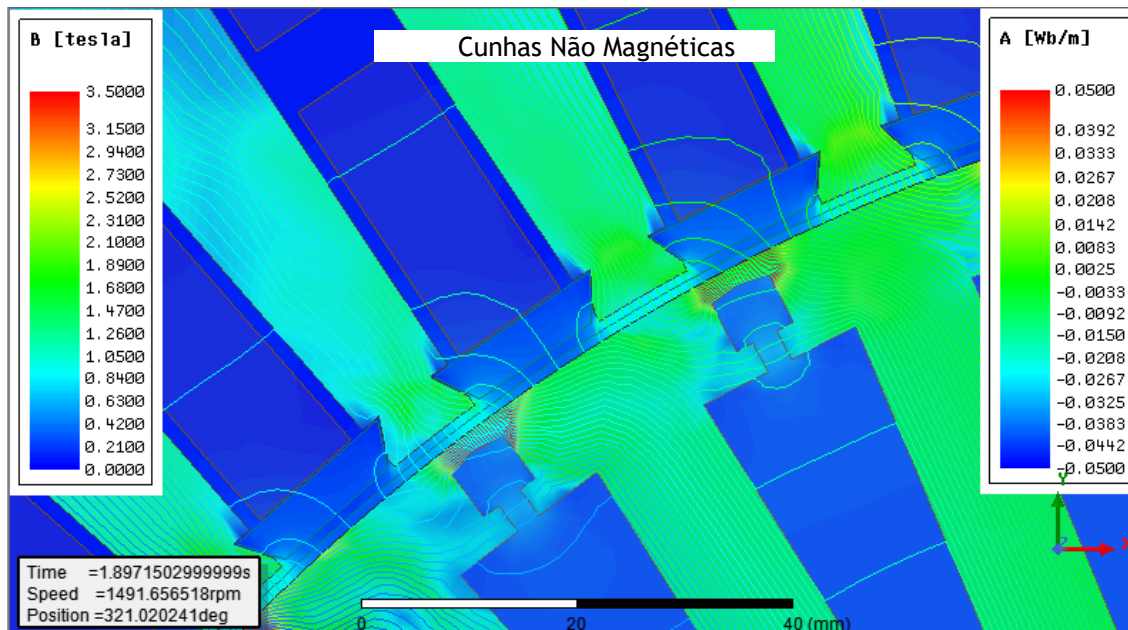


Figura F.1 - Densidade de fluxo magnético com cunhas não magnéticas (W22X 355 4np).

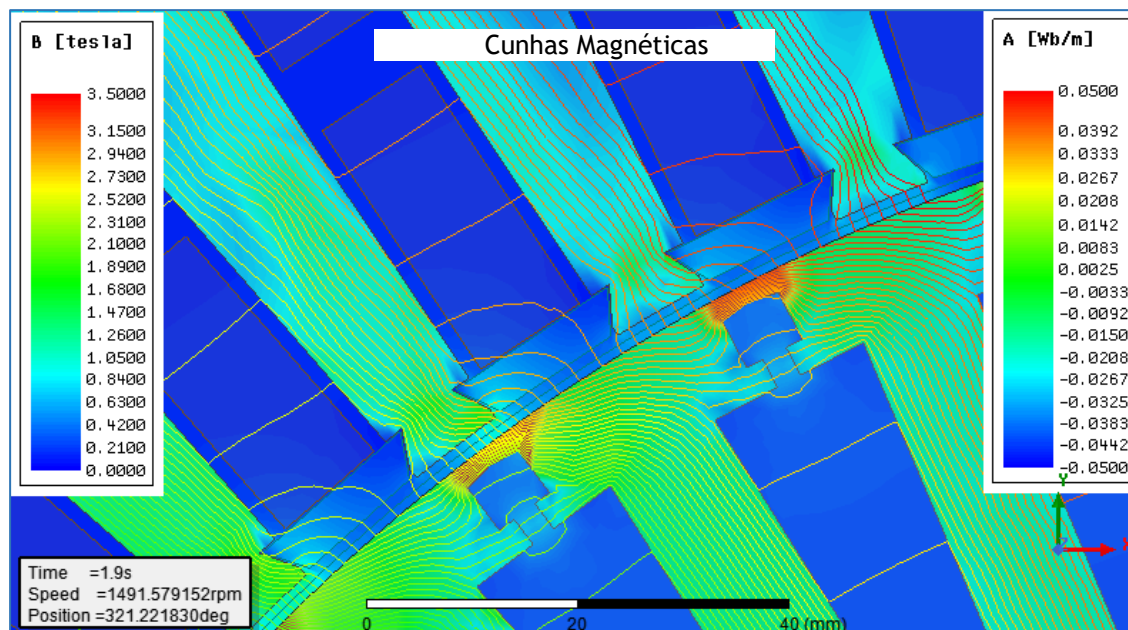


Figura F.2 - Densidade de fluxo magnético com cunhas magnéticas (W22X 355 4np).



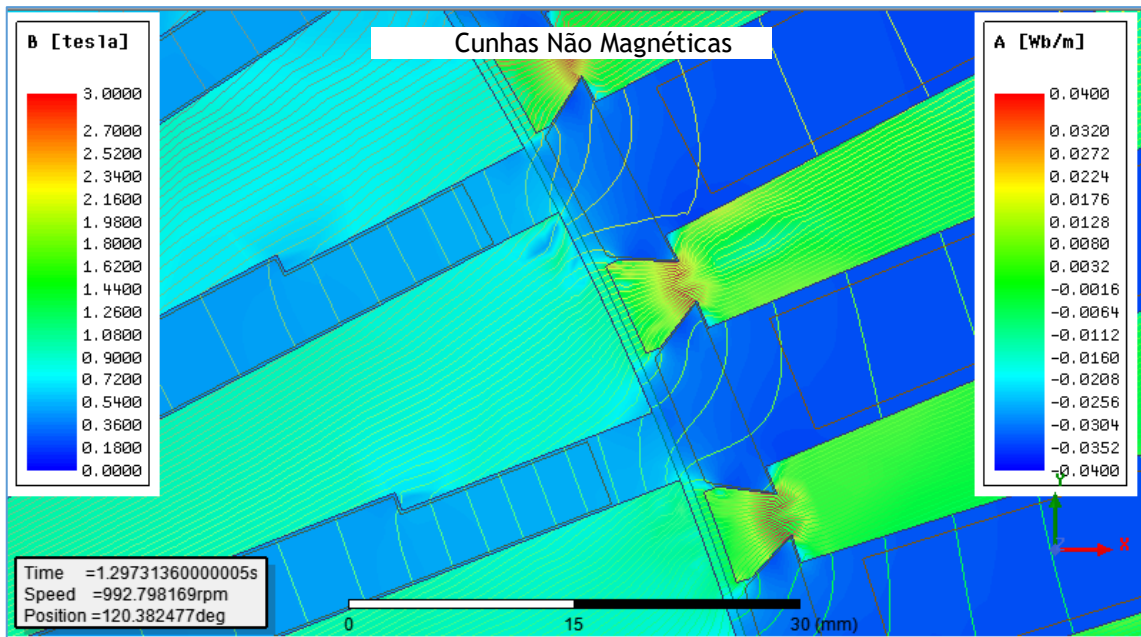


Figura F.3 - Densidade de fluxo magnético com cunhas não magnéticas (W22X 355 6np).

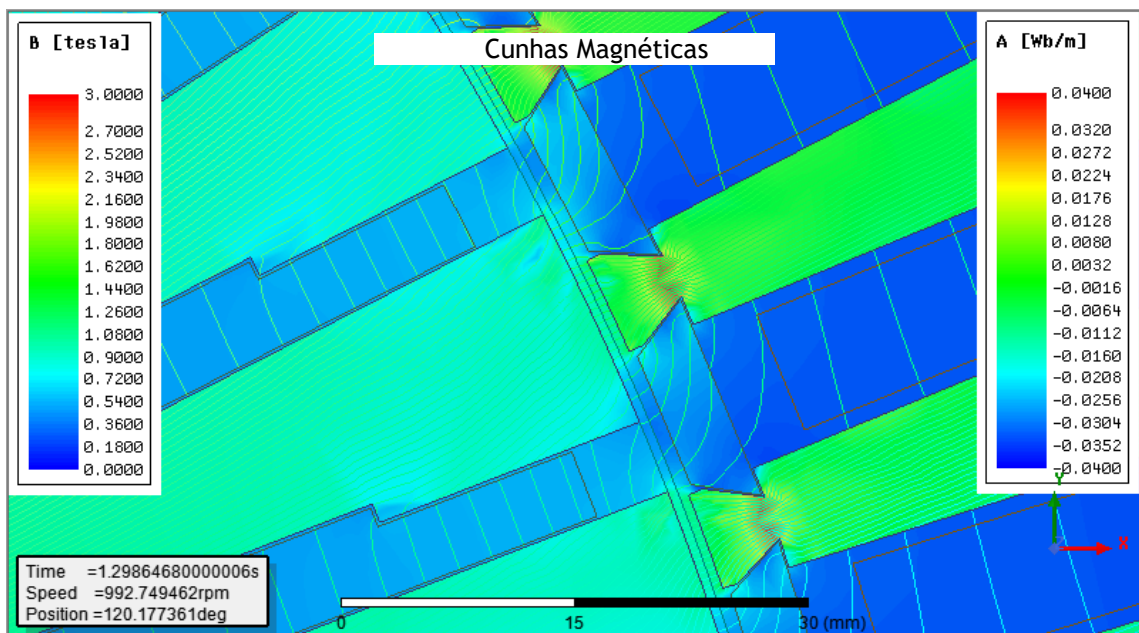


Figura F.4 - Densidade de fluxo magnético com cunhas magnéticas (W22X 355 6np).

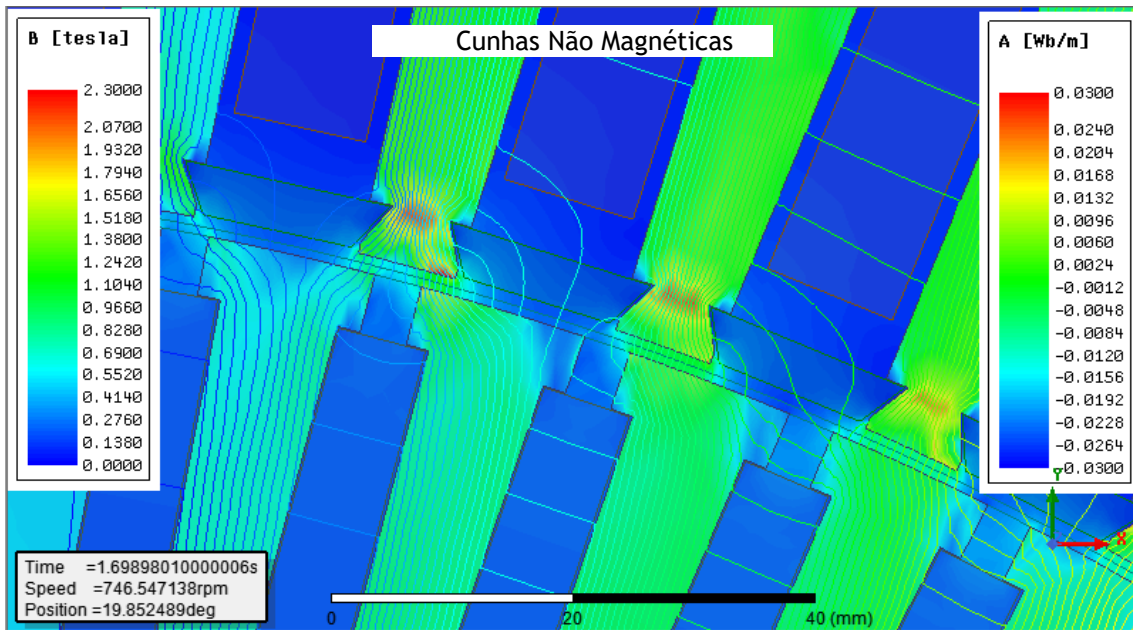


Figura F.5 - Densidade de fluxo magnético com cunhas não magnéticas (W22X 450 8np).

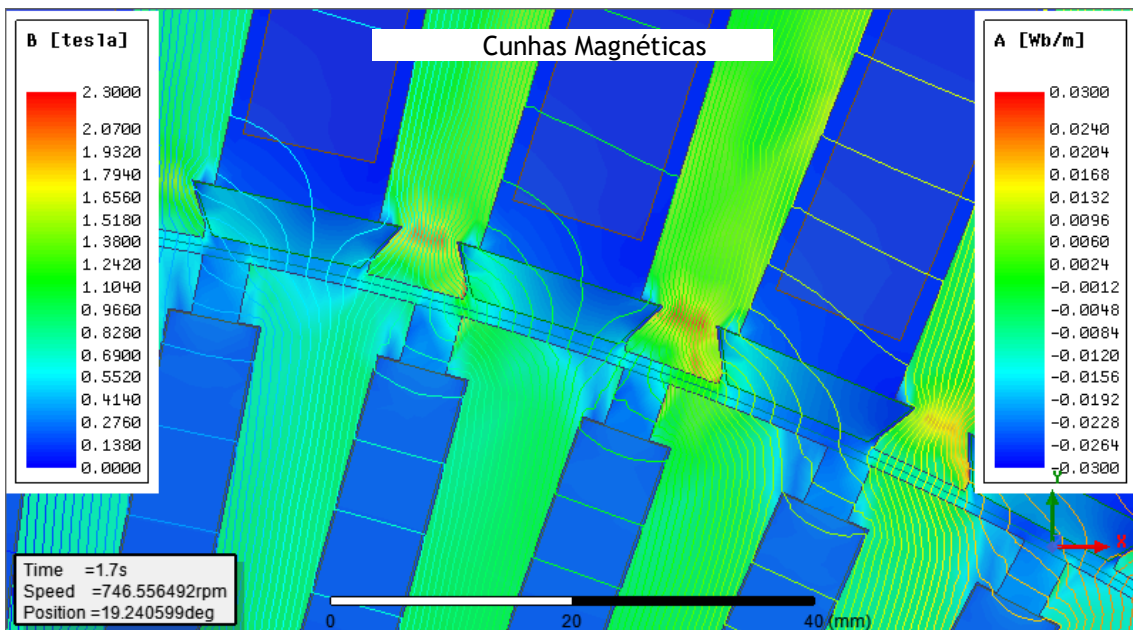


Figura F.6 - Densidade de fluxo magnético com cunhas magnéticas (W22X 450 8np).

## Anexo G

### Cálculo perdas anéis curto-circuito

Este capítulo contém uma tabela com os dados utilizados no cálculo das perdas por efeito Joule nos anéis de curto-circuito (tabela G.1).

Tabela G.1 - Cálculo perdas por efeito Joule nos anéis de curto-circuito.

W22X 500 2np			W22X 355 4np		
Perdas Anéis Curto-Circuito	Cunhas Magnéticas		Perdas Anéis Curto-Circuito	Cunhas Magnéticas	
	Sim	Não		Sim	Não
$p_{Js}$ (W)	3584	3620	$p_{Js}$ (W)	2372	2436
$P_{abs}$ (W)	1021848	1019858	$P_{abs}$ (W)	307117	307270
$p_{Fes}$ (W)	4575	4643	$p_{Fes}$ (W)	2486	2513,8
$P_{tr}$ (W) (4.4)	1013689	1011595	$P_{tr}$ (W) (4.4)	302259	302319
$s$	0,0033	0,0033	$s$	0,0060	0,0060
$p_{Jr Totais}$ (W) (4.5)	3345	3338	$p_{Jr Totais}$ (W) (4.5)	1814	1814
$p_{Jr Totais ENSAIO}$ (W)	3193	-	$p_{Jr Totais ENSAIO}$ (W)	1640	-
$p_{Jr SIMULAÇÃO}$ (W)	2977	2918	$p_{Jr SIMULAÇÃO}$ (W)	1550	1640
$p_{Jr Anéis}$ (W) (4.6)	368	520	$p_{Jr Anéis}$ (W) (4.6)	263	174
W22X 355 6np			W22X 450 8np		
$p_{Js}$ (W)	4815	4968	$p_{Js}$ (W)	3475	3621
$P_{abs}$ (W)	343908	344240	$P_{abs}$ (W)	410391	413110
$p_{Fes}$ (W)	2966	3304	$p_{Fes}$ (W)	3084	3256
$P_{tr}$ (W) (4.4)	336128	335968	$P_{tr}$ (W) (4.4)	403832	406233
$s$	0,0084	0,0084	$s$	0,0053	0,0053
$p_{Jr Totais}$ (W) (4.5)	2824	2822	$p_{Jr Totais}$ (W) (4.5)	2140	2153
$p_{Jr Totais ENSAIO}$ (W)	2852	-	$p_{Jr Totais ENSAIO}$ (W)	1960	-
$p_{Jr SIMULAÇÃO}$ (W)	2191	2259	$p_{Jr SIMULAÇÃO}$ (W)	2892	3865
$p_{Jr Anéis}$ (W) (4.6)	633	563	$p_{Jr Anéis}$ (W) (4.6)	-	-

## G.1. Avaliação do método de cálculo de perdas nos anéis

Em relação ao cálculo das perdas por efeito Joule totais rotóricas e por comparação dos valores de  $p_{Jr\ Totais}$  (calculadas através do método) e  $p_{Jr\ Totais\ ENSAIO}$ , considera-se que o método é válido a um nível teórico.

No entanto, quando se procede à subtração desse valor pelo obtido em simulação ( $p_{Jr\ SIMULAÇÃO}$ ), o motor W22 X 450 8np apresenta falta de coerência, na medida em que  $p_{Jr\ SIMULAÇÃO}$  é maior do que  $p_{Jr\ Totais\ ENSAIO}$ . O facto destes motores não fazerem parte de nenhuma linha standard da WEG pode dificultar a obtenção de características iguais às obtidas em ensaio experimental. Além disso, são motores que podem sofrer revisões/alterações às suas características construtivas e/ou elétricas, acentuando o erro entre simulação e ensaio.

Por essa razão, a parcela de perdas por efeito Joule nos anéis de curto-circuito não foi incluída no cálculo do rendimento, por forma a garantir igualdade de condições nos quatro motores. Ainda assim, considera-se um ponto importante a incluir em desenvolvimentos futuros desta temática, como referenciado na secção **8.2.3**.

